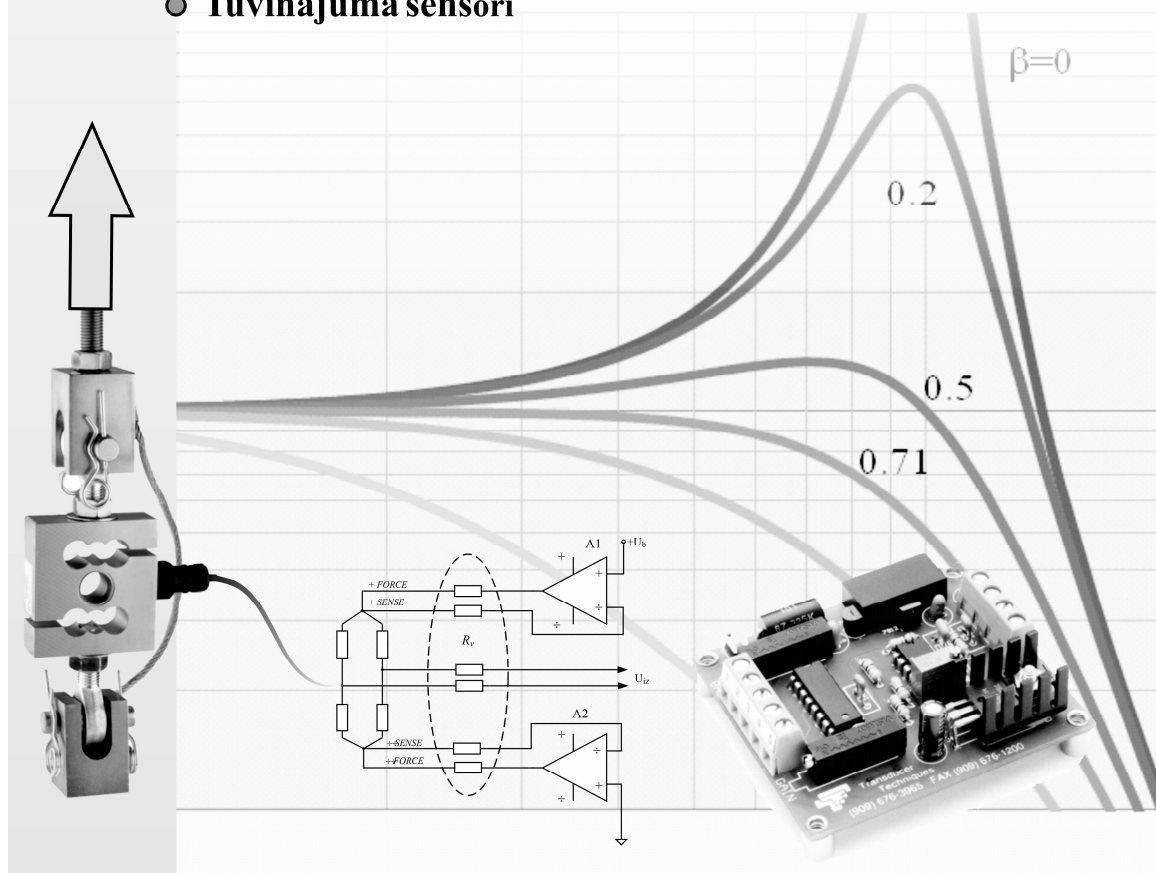


Aivars Kaķītis
Ainārs Galiņš
Pēteris Leščevics

SENSORI UN MĒRĪŠANAS SISTĒMAS

- Mērīšanas sistēmu pamatprincipi
- Neelektrisko lielumu mērīšanas metodes
- Tuvinājuma sensori



LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
TEHNISKĀ FAKULTĀTE

Mehānikas institūts

Aivars Kaķītis

Ainārs Galiņš

Pēteris Leščevics

Sensori un mērīšanas sistēmas



Jelgava 2008



Mācību grāmata sagatavota un izdota ESF projekta „Inženierzinātņu studiju satura modernizācija Latvijas Lauksaimniecības universitātē” ietvaros, projektu līdzfinansē Eiropas Savienība.

Kaķītis A., Galiņš A., Leščevics P. **Sensori un mērīšanas sistēmas.** Jelgava: LLU, 2008. – 395 lpp.

Grāmata sastāv no trim galvenajām daļām. **A daļā** ir apskatīti vispārīgie mērīšanas sistēmu un sensoru uzbūves un darbības principi. Šajā daļā izklāstīti arī signālu apstrādes teorētiskie pamati. **B daļā** apskatīti mehānisko lielumu mērīšanas principi, sensori un to izmantošanas ieteikumi. Šeit doti arī rūpnieciski ražoto sensoru tehniskie parametri. **C daļa** veltīta tehnoloģisko procesu automatizācijā izmantojamo tuvinājuma sensoru darbības un izmantošanas principiem. Grāmata ir paredzēta mācību vielas apguvei priekšmetos Mehatroniskās sistēmas, Mērsistēmu interfeisi un Datorizētās mērsistēmas LLU Tehniskās fakultātes un Informāciju tehnoloģiju fakultātes studentiem.

ISBN 978-9984-784-73-1

© Aivars Kaķītis, Ainārs Galiņš, Pēteris Leščevics

© LLU Tehniskā fakultāte

Saturs

Priekšvārds.....	6
A daļa. Mērīšanas sistēmu pamatprincipi.....	7
A-1 Mērīšanas sistēmu vispārēja uzbūve.....	8
A-1.1. Fizikālie lielumi un to mērīšana.....	8
A-1.2. Termini.....	12
A-1.3. Sensoru izejas signāli.....	16
A-1.4. Aizsardzības klases.....	17
A-2 Sistēmu statiskās raksturlīknes. Mērīšanas kļūdas.....	20
A-2.1. Statiskās raksturlīknes.....	20
A-2.2. Mērīšanas kļūdas.....	24
A-3 Sistēmu dinamiskās raksturlīknes.....	28
A-3.1. Dinamisko sistēmu elementi.....	29
A-3.2. Iedarbes funkcijas.....	34
A-3.3. Dinamisko sistēmu kārtas.....	38
A-3.4. Nultās kārtas sistēmas.....	39
A-3.5. Pirmās kārtas sistēmas.....	41
A-3.6. Otrās kārtas sistēmas.....	43
A-3.7. Mērījumu dinamiskās kļūdas.....	49
A-4 Sensoru darbības fizikālie principi.....	56
A-4.1. Aktīvie mērpārveidotāji.....	58
A-4.2. Parametriskie mērpārveidotāji.....	66
A-4.3. Lineārais diferenciālais transformators.....	72
A-4.4. Kapacitatīvais pārveidotājs.....	78
A-4.5. Optiskie pārveidotāji.....	81
A-4.6. Pjezorezistīvie pārveidotāji.....	91
A-4.7. Magnetorezistīvie pārveidotāji.....	101
A-4.8. Holla pārveidotāji.....	104
A-4.9. Varistori.....	108
A-4.10. Ultraskaņas sensori.....	112
A-4.11. Diskrētas darbības sensori.....	118
A-5. Signāli un to apstrāde.....	122
A-5.1. Signālu veidi.....	122
A-5.2. Furjē transformācijas.....	128
A-5.3. Analogo signālu digitālā apstrāde.....	135
A-5.4. Diskrēta laika Furjē transformācijas.....	145
A-5.5. Signālu filtri.....	153
A-5.6. Signālu pārvade.....	160

A-6.	Mērķēdes.....	166
A-6.1.	Aktīvo sensoru mērķēdes.....	166
A-6.2.	Parametrisko sensoru mērķēdes.....	167
A-6.3.	Mērtilti.....	172
A-7.	Instrumentālie pastiprinātāji.....	193
A-7.1.	Pastiprinātāja darbības princips.....	193
A-7.2.	Atgriezeniskā saite.....	196
A-7.3.	Pastiprinājuma mērvienība decibels.....	199
A-7.4.	Operacionālā pastiprinātāja uzbūve.....	200
A-7.5.	OP pamatslēgumu shēmas.....	204
A-7.6.	Instrumentālais operacionālais pastiprinātājs.....	216
A-8.	Ciparu-analogie un analogu-ciparu pārveidotāji.....	220
A-8.1	Ievads.....	220
A-8.2.	CAP un ACP signāli.....	221
A-8.3.	CAP un ACP shēmu elementi.....	224
A-8.4.	Rindu ciparanalogie pārveidotāji.....	228
A-8.5.	R2-R kāpņveida matrica.....	231
A-8.6.	Strāvas avotu pārslēdzēja CAP.....	236
A-8.7.	CAP parametri.....	237
A-8.8.	Skaitītāja tipa ACP.....	239
A-8.9.	Sekotājtīpa ACP.....	241
A-8.10.	Secīgās aproksimācijas ACP.....	241
A-8.11.	ACP parametri.....	243
A-8.12.	Delta-Sigma ACP un CAP.....	244
A-8.13.	Interpolējošie CAP.....	247
A-9.	Traucējumu novēršana mērsistēmās.....	250
B daļa.	Neelektrisko lielumu mērīšanas metodes.....	258
B-1.	Mehāniskā sprieguma, spēka un momenta mērīšana.....	259
B-1.1.	Spēki, momenti un spriegumi.....	259
B-1.2.	Deformāciju un spriegumu mērīšana.....	264
B-1.3.	Spēka mērīšana.....	271
B-1.4.	griezes momenta mērīšana.....	276
B-2.	Spiediena mērīšana.....	279
B-2.1.	Spiediena veidi.....	279
B-2.2.	Spiediena mērpārveidotāji.....	281
B-3.	Plūsmas mērīšana.....	288
B-3.1.	Plūsmas mērītāji ar vietējām pretestībām.....	288
B-3.2.	Rūpnieciski ražotie plūsmas mērītāji.....	290
B-4.	Temperatūras mērīšana.....	294
B-4.1.	Rezistīvie metāla sensori.....	294
B-4.2.	Termistori.....	298

B-4.3.	Silīcija temperatūras sensori.....	299
B-4.4.	Integrālie temperatūras sensori.....	301
B-4.5.	Termopāri.....	303
C daļa.	Tuvinājuma sensori.....	306
C-1.	Tuvinājuma sensori un to slēgumi.....	307
C-1.1.	Sensoru pieslēguma shēmas.....	309
C-1.2.	Sensoru paralēlie un virknes slēgumi.....	314
C-2.	Elektromehāniskie pozīcijas slēdži.....	319
C-2.1.	Mehāniskie pozīcijas slēdži.....	319
C-2.2.	Pneimomehāniskie slēdži.....	323
C-3.	Magnētiskie tuvinājuma sensori.....	325
C-3.1.	Magnētisms.....	325
C-3.2.	Herkonu tuvinājuma sensori.....	328
C-3.3.	Induktīvi-magnētiskie sensori.....	332
C-3.4.	Magnētiski-pneimatiskie sensori.....	334
C-4.	Induktīvie sensori.....	336
C-4.1.	Induktīvo sensoru darbības princips.....	336
C-4.2.	Induktīvo sensoru izmantošana.....	338
C-5.	Kapacitatīvie sensori.....	344
C-5.1.	Darbības princips.....	344
C-5.2.	Kapacitatīvo sensoru izmantošana.....	346
C-6.	Optiskie tuvinājuma sensori.....	350
C-6.1.	Gaismas laušana un optiskie kabeļi.....	350
C-6.2.	Optisko sensoru darbības princips.....	355
C-6.3.	Caurstarojošie sensori.....	361
C-6.4.	Atstarotā stara sensori.....	364
C-6.5.	Difūzās gaismas sensori.....	367
C-6.6.	Optiskie sensori ar gaismas vadiem.....	372
C-6.7.	Traucējumi optisko sensoru darbībā.....	374
C-6.8.	Speciālas nozīmes sensori.....	376
C-7.	Ultraskaņas sensori.....	381
C-7.1.	Sensoru darbības princips un parametri.....	381
C-7.2.	Ultraskaņas sensoru izmantošana.....	383
C-8.	Pneimatiskie tuvinājuma sensori.....	387
	Izmantotā literatūra.....	394

Priekšvārds

Straujā datortehnikas attīstība dod iespēju vadīt tehnoloģiskos procesus un iekārtas, izmantojot datorprogrammas. Fizikālo lielumu mērīšana tiek veikta, izmantojot virtuālos instrumentus un datorizētas mērsistēmas. Lielākā daļa rūpniecisko iekārtu un arī sadzīves tehnikas tiek veidotas kā mehatroniskās iekārtas, kuru darbību vada programmējamie mikrokontrolleri vai datorizētas sistēmas. Visās šajās sistēmās ļoti svarīga nozīme ir fizikālo lielumu mērīšanai. Inženieriem, kuri nodarbojas ar mehatronisko sistēmu projektēšanu, apkalpošanu vai remontu, ir būtiski izprast sensoru un mērsistēmu darbības principus un to lietošanas īpatnības.

Attiecīgie mācību priekšmeti ir iekļauti arī LLU inženiertehnisko specialitāšu studentu mācību programmās. Grāmata ir paredzēta mācību vielas apguvei priekšmetos Mehatroniskās sistēmas, Mērsistēmu interfeisi un Datorizētās mērsistēmas LLU Tehniskās fakultātes un Informāciju tehnoloģiju fakultātes studentiem.

Grāmata sastāv no trim galvenajām daļām.

A daļā ir apskatīti vispārīgie mērīšanas sistēmu un sensoru uzbūves un darbības principi. Šajā daļā izklāstīti arī signālu apstrādes teorētiskie pamati.

B daļā apskatīti mehānisko lielumu mērīšanas principi, sensori un to izmantošanas ieteikumi. Šeit doti arī rūpnieciski ražoto sensoru tehniskie parametri.

C daļa veltīta tehnoloģisko procesu automatizācijā izmantojamo tuvinājuma sensoru darbības un izmantošanas principiem.

Grāmatu veidojuši LLU Mehānikas un Enerģētikas institūtu mācību spēki. Tās tapšanā izmantots plašs literatūras avotu klāsts, kas dots grāmatas noslēgumā. Grāmatas tapšanā izmantoti arī kompāniju *Festo*, *Siemens*, *Valvo*, *Turck*, *Picotechnology*, *TQ* un *Analog Devices* informatīvie materiāli un iekārtu tehniskie dati.

A daļa

MĒRĪŠANAS SISTĒMU PAMATPRINCIPI

A-1. Mērīšanas sistēmu vispārējā uzbūve

Apkārtējā vidē notiek ļoti daudzi mehāniski, ķīmiski, termodinamiski, bioloģiski, elektriski u.c. procesi, kuri norises gaitā ir jākontrolē un jāvada, lai nodrošinātu modernās industrijas un arī cilvēku sadzīves tehnisko ierīču un tehnoloģiju pareizu darbību. Lai varētu veikt procesu automatisko regulēšanu, svarīgs nosacījums ir nepieciešamo fizikālo lielumu mērīšana.

1.1. Fizikālie lielumi un to mērīšana

Mērīšana - darbību kopums, lai noteiktu kāda lieluma vērtību. Mērāmo lielumu šajā procesā mēs salīdzinām ar noteiktu etalonu, kurš atbilst pieņemtajām mērvienībām. Mērīšanu mēs veicam ikdienā daudzas reizes, piemēram, paskatoties pulkstenī, pēc būtības mēs mērām laiku. Ir izveidoti ļoti daudzi mērinstrumenti dažādu cilvēku vajadzību apmierināšanai. Tie ir dažādas sarežģītības pakāpes, sākot no visvienkāršākajiem, piemēram, mērlineāla un beidzot ar ļoti sarežģītiem datorizētiem mērīšanas kompleksiem. Mērīšanu var veikt arī automatiski. Tas nepieciešams tehnoloģisko procesu vadībā, zinātniskiem pētījumiem un citur.

Katrā gadījumā tiek izmantots atbilstošs **mērīšanas princips**, kura pamatā ir kāds fizikāls efekts.

Piemēri:

- ✓ termoelektriskais efekts, lietojams temperatūras mērīšanā,
- ✓ Džozefsona efekts, lietojams elektrisko potenciālu starpības mērīšanā,
- ✓ Doplera efekts, lietojams ātruma mērīšanā,

Visus fizikālos lielumus varam iedalīt pēc fizikālās izcelsmes un pēc parametra izmaiņas ātruma laikā.

No mērīšanas sistēmu viedokļa pēc fizikālās izcelsmes visus lielumus iedalām **elektriskos** lielumos un **neelektriskos** lielumos.

Pie elektriskajiem lielumiem pieder tie fizikālie lielumi, kas ir tieši saistīti ar elektriskām un magnētiskām parādībām dabā vai tehnikā. Piemēram: elektriskais spriegums, strāva, kapacitāte, magnētiskā plūsma u.t.t.

Pie neelektriskajiem lielumiem pieskaitām tos fizikālos lielumus, kuru izcelsme nav tiešā veidā saistīta ar elektriskām parādībām. Piemēram: ķermeņu kustības ātrums, pārvietojums, spiediens, temperatūra u.c.

Pēc parametra izmaiņas ātruma laikā fizikālos lielumus iedala statiskos (lēni mainīgos) un dinamiskos lielumos.

Lēni mainīgo lielumu noteikšanas sensori un mērsistēmas ir vienkāršākas, jo nav

nepieciešams saskaņot mērsistēmas dinamiskos parametrus ar mērāmā lieluma izmaiņas ātrumu.

Izvēloties mērsistēmas dinamisku lielumu mērīšanai, sevišķa uzmanība jāpievērš sensoru un mērsistēmu ātrdarbībai, jo, izmantojot neatbilstošus sensorus, ievērojami pieaugs mērījumu dinamiskā kļūda.

Procesa **dinamiskumu** var vērtēt no diviem aspektiem:

✓ **fizikālā procesa dabas;**

Spiediena izmaiņas ātrums hidrauliskajā sistēmā var tuvojies lielumam, kas samērojams ar pašas sistēmas daļu brīvo svārstību periodu. Tādā gadījumā procesi, kas norisinās sistēmā, būs dinamiski attiecībā uz pašu sistēmu.

✓ **mērsistēmas ātrdarbības pakāpes.**

Temperatūras izmaiņas ātrums tehnoloģiskajā procesā neizsauc parādības, kas būtu klasificējamas kā dinamiskas. Veicot temperatūras izmaiņas mērījumus ar iekārtu, kuras laika konstante ir līdzīga temperatūras izmaiņas ātrumam procesā, iegūsim kļūdainus rezultātus.

Šajā gadījumā process ir dinamisks attiecībā pret mērsistēmu. Lai novērstu mērījuma kļūdas, jālieto mēriekārta ar augstāku brīvo svārstību frekvenci.

Vēsturiski izveidojās un līdz šim brīdīm eksistē neelektrisku lielumu mērīšanas iekārtas, kuras varam attēlot ar sekojošu blokshēmu (1. att.).



1.1 att. **Vienkārša mērinstrumenta blokshēma**

Pēc šādas shēmas darbojas gan mehānisko lielumu mehāniskie mērītāji, gan elektrisko lielumu mērītāji (mērinstrumenti), gan mehānisko lielumu elektriskie mērītāji.

Šāda veida ierīcēs mērījumu rezultāts tiek tieši nolasīts no indikācijas ierīces (displeja, skalas u.c.) un tālāk reģistrēts (parasti rakstiski).

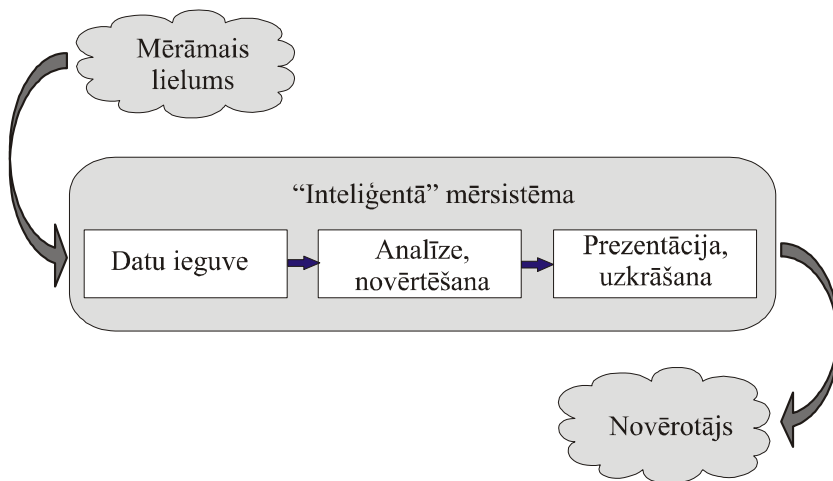
Priekšrocības:

- ✓ vienkārši un relatīvi lēti instrumenti,
- ✓ pietiekoša precizitāte.

Trūkumi:

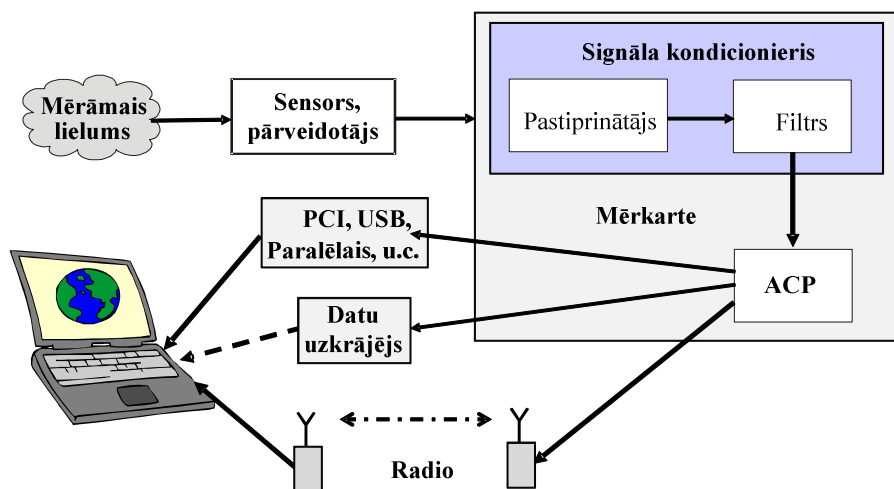
- ✓ sarežģīta iegūto datu reģistrācija un apstrāde,
- ✓ katra fizikālā parametra mērīšanai nepieciešams īpašs instruments.

Divdesmitā gadsimta deviņdesmito gadu beigās notika strauja personālo datoru attīstība. Tas deva iespēju radikāli pārveidot mērīšanas sistēmas, ieviešot procesa analīzi un novērtēšanu jau pašā mērīšanas procesā. Tas ļāva izveidot t.s. „inteliģentās” mērsistēmas, kuras blokshēma redzama 1.2 attēlā.



1.2 att. Datorizētās mērsistēmas blokshēma

„Inteliģentās” mērsistēmas galvenās sastāvdaļas ir sensors jeb pārveidotājs un mērkarte, kā arī dators ar nepieciešamajām saskarnēm (1.3 att.). Mērāmais neelektriskais lielums tiek pārveidots elektriskā signālā. To izdara ar īpaši veidotiem sensoriem - pārveidotājiem. Analogais signāls no sensora izejas tiek padots uz signāla kondicionieri un tālāk uz analogu - ciparu pārveidotāju, kur signāls tiek diskretizēts un pārveidots datoram saprotamā kodā. Ciparu signāls datorā nonāk caur kādu no saskarnēm, piemēram, PCI, paralēlo, USB vai virknes saskarni. Signāls var tikt ierakstīts atmiņas kartē un nepieciešamības gadījumā ievadīts datorā. Signālu var pārraidīt uz datoru, izmantojot radiosaiti vai interneta pieslēgumu. Rezultātā mērīšanas sistēma kļūst elastīga un labi piemērojama dotajiem apstākļiem.



1.3 att. Datorizētās mērsistēmas galvenie bloki

Datorizētai mērīšanas sistēmai ir būtiskas priekšrocības pret parastām mērīšanas sistēmām:

- ✓ tās ir universālas, mērīšanas sistēma nav saistīta ar kādu noteiktu fizikālu lielumu. Nomainot sensoru, mēs iegūstam cita fizikālā lieluma mēriekārtu.
- ✓ mēriekārtas pamatā ir dators, kas ļauj veikt iegūto rezultātu apstrādi un visus nepieciešamos aprēķinus,
- ✓ vienlaicīgi iespējams mērīt daudzus (pat līdz 128) parametrus vienlaicīgi, pie tam, tie var būt dažādi fizikālie lielumi,
- ✓ mēriekārtas vizuālais izskats veidojas uz datora ekrāna un iekārtas vadība notiek programmatiski. Tas dod iespēju katrā gadījumā izveidot piemērotāko un ērtāko sistēmas vadības elementu un indikatoru novietojumu. Tos sauc par **virtuālajiem instrumentiem**.

Datorizēto mērsistēmu trūkums ir to salīdzinoši augstā cena.

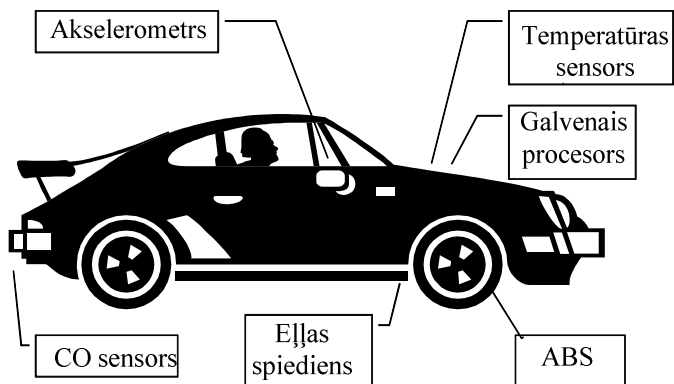
Pēdējā laikā, attīstoties mikroelektronikai, ir izstrādāti virtuālie instrumenti, kuri ir pietiekoši precīzi un lēti.

Ražotāji piedāvā arī datu uzkrāšanas ierīces, kuras var strādāt bez datora, ilgstošu laiku reģistrējot mērāmos lielumus.

Mērīšanas sistēmas izmanto šādās galvenajās jomās:

- ✓ sistēmu un iekārtu diagnostikā,
- ✓ tehnoloģisko procesu kontrolē,
- ✓ tehnoloģisko procesu vadībā un regulēšanā,
- ✓ datu iegūšana zinātniskos pētījumos.

Šobrīd gan rūpniecībā, gan sadzīves tehnikā par ierastu lietu kļuvušas **mehatroniskās ierīces** un sistēmas. Tās ir tehniskas iekārtas, kas ietver sevī gan mehāniskus elementus, gan elektroniskās shēmas, gan informāciju tehnoloģiju produktus – dažādus programmējamus procesorus.



1.4 att. Automobilis, kā mehatroniska sistēma

Attēlā 1.4 redzam nelielu daļu no modernā automobiļa mērīšanas aprīkojuma. Visa informācija no daudzajiem sensoriem nonāk galvenajā procesorā, kurš veic visu procesu kontroli un regulēšanu. Šādus piemērus mēs varētu nosaukt ļoti daudz.

Mērīšanas sistēmu un sensoru darbības principu pārzināšana ir ļoti būtiska visu specialitāšu inženieriem. Tāpēc arī šajā grāmatā iepazīsimies ar mērīšanas sistēmu un sensoru darbības pamatprincipiem.

1.2. Terminu

Mērīšanas sistēmu un sensoru darbības principi satur daudzus īpašus terminus, kurus ir nepieciešams zināt, lai varētu izprast mērsistēmu darbības principus. Tāpēc vispirms apskatīsim un definēsim galvenos terminus šajā jomā.

Mērlielums - mērīšanai pakļauts konkrēts lielums. Mērlieluma tehniskā raksturojumā var iekļaut tādus lielumus, kā laiks, temperatūra un spiediens.

Ietekmējošais lielums - lielums, kas nav mērlielums, bet ietekmē mērīšanas rezultātu.

Mērsignāls - lielums, kurš pārstāv mērlielumu un funkcionāli ar to ir saistīts. Mērsistēmā ieejas signālu var nosaukt par iedarbi, bet izejas signālu par reakciju. Piemēri:

- ✓ elektriskais izejas signāls spiediena pārveidotājā,
- ✓ frekvence pārveidotājā "spriegums - frekvence",
- ✓ elektrodzinējspēks elektroķīmiskās koncentrācijas mērītājā.

Mērlīdzeklis - ierīce, kas paredzēta mērījumu veikšanai patstāvīgi vai kopā ar papildus ierīcēm.

Sensors - mērlīdzekļa vai mērķēdes elements, uz kuru mērlielums tieši iedarbojas. Sensors ir ierīce, kura reaģē uz fizikāla parametra (temperatūras, spiediena) izmaiņām ar viegli izmērāmu īpašību (izmēri, pārvietojums) maiņu. Piemēri: dzīvsudrabs, bimetāls. Sensors ir vispārīgāks termins par mērpārveidotāju vai devēju. Dažās nozarēs šajā izpratnē lieto terminu "detektors".

Piemēri:

- ✓ termoelektriskā termometra mērsavienojums;
- ✓ turbīnas plūsmas mērītāja rotors;
- ✓ manometra Burdona caurule;
- ✓ līmeņa mērlīdzekļa pludiņš;
- ✓ spektrofotometra fotoelements.

Detektors - ierīce vai viela, kas uzrāda kādas parādības klātbūtni, neuzrādot ar to saistītā lieluma vērtību. Piemēram - halogēna noplūdes detektors, lakmusa papīrs.

Mērpārveidotājs – ierīce, kura reaģē uz neelektriska fizikāla parametra (temperatūras, spiediena) izmaiņām, izmainot savus elektriskos parametrus (pretestību, magnētiskās īpašības).

Aktīvais mērpārveidotājs - ģenerē elektrisko spriegumu vai strāvu (pjezoelektriķi).

Pasīvais mērpārveidotājs - izmaina jutīgā elementa elektriskos parametrus (pretestību, kapacitāti) u.c.

Transmitters – instruments ar strāvas izeju (**strāvas cilpa**), kurš apvieno mērpārveidotāju un strāvas pastiprinātāju. Šāds apvienojums ļauj pārvadīt signālu lielos attālumos ar augstu precizitāti un bez traucējumiem. Strāvas cilpas tiek lietotas tālvadības sistēmās, kur signāls tiek pārvadīts lielos attālumos un nepieciešama augsta trokšņu noturība. Signāls tiek pārveidots 4 – 20 mA stiprā strāvā un var tikt pārvadīts līdz vairāku kilometru attālumam bez kropļojumiem. Strāvas cilpas tiek lietotas tiešai pieslēgšanai datorizētām sistēmām, datu uzkrājējiem un rūpniecisko procesu kontrolleriem.

Mērķēde - mērlīdzekļa vai mērsistēmas elementu virkne, kas veido mērsignāla ceļu no ieejas līdz izejai. Piemērs: elektroakustisko mērķēdi veido mikrofons, vājinātājs, filtrs, pastiprinātājs un voltmētrs.

Mērsistēma - pilns mērlīdzekļu komplekts kopā ar citām mēriekārtām, sagatavots noteiktu mērījumu veikšanai. Sistēma var ietvert materiālos mērus un ķīmiskos reaģentus. Pastāvīgi uzstādītu mērsistēmu sauc par **mērkompleksu**.

Mērlīdzekļa **rādījuma novirze** - mērlīdzekļa rādījuma sistemātiskā kļūda. Mērlīdzekļa rādījuma novirzi parasti novērtē ar rādījuma vidējo kļūdu pie atbilstoša skaita atkārtotiem mērījumiem.

Mērīšanas rezultātu atkārtojamība - pie nemainīgiem mērīšanas nosacījumiem secīgi veiktu viena un tā paša mērlieluma mērījumu rezultātu sakritības pakāpe. Šos nosacījumus sauc par atkārtojamības nosacījumiem. Atkārtojamības nosacījumi ietver:

- ✓ to pašu mērīšanas procedūru,
- ✓ to pašu novērotāju,
- ✓ to pašu mērīšanas līdzekli, kas lietots tajos pašos apstākļos,
- ✓ to pašu atrašanās vietu,
- ✓ atkārtojumu īsā laika posmā.

Atkārtojamību var izteikt kvantitatīvi ar rezultātu izkliedes raksturojumiem.

Mērīšanas **rezultātu reproducējamība** - pie izmainītiem mērīšanas nosacījumiem viena un tā paša mērlieluma mērījumu rezultātu sakritības pakāpe. Reproducējamības pamatotam izklāstam nepieciešams izmainīto nosacījumu uzskaitījums.

Izmainītie nosacījumi var ietvert:

- ✓ mērīšanas principu,
- ✓ mērīšanas metodi,
- ✓ novērotāju,
- ✓ mērlīdzekli,

- ✓ references etalonu,
- ✓ atrašanās vietu un lietošanas apstākļus,
- ✓ laiku.

Reproducējamību var izteikt kvantitatīvi ar rezultātu izkliedes raksturojumiem. Šajā gadījumā pieņem, ka rezultāts ir koriģēts.

Precizitātes klase - mērlīdzekļu klase, kas atbilst noteiktām metroloģiskām prasībām, nodrošinot kļūdas noteiktās robežās. Saskaņā ar vienošanos precizitātes klasi parasti apzīmē ar skaitli vai simbolu un sauc par **klases rādītāju**.

Kalibrēšana - operāciju kopums, kas pie noteiktiem nosacījumiem konstatē sakarību starp mērlīdzekļa vai mērsistēmas uzrādītām vērtībām, materiālā mēra vai references materiāla vērtībām un atbilstošajām vērtībām, kuras reproducētas no etaloniem. Kalibrēšanas rezultāts pieļauj uzdot kā mērlielumu rādījumu vērtības vai arī kā rādījumu korekcijas. Kalibrēšana var arī noteikt citas metroloģiskās īpašības, piemēram, ietekmējošo lielumu iespaidu. Kalibrēšanas rezultātus var fiksēt dokumentā, ko sauc par **kalibrēšanas sertifikātu** vai **kalibrēšanas pārskatu**.

Nominālais diapazons - rādījumu diapazons, kas iegūstams speciāli ieregulējot mērlīdzekli. Nominālo diapazonu parasti nosaka ar tā apakšējo un augšējo robežu, piemēram, 100°C līdz 200°C. Ja apakšējā robeža ir nulle, nominālo diapazonu parasti nosaka tikai ar tā augšējās robežas vērtību, piemēram, nominālais diapazons no 0 V līdz 100 V tiek izteikts kā 100 V.

Diapazons - nominālā diapazona divu robežvērtību starpības absolūtā vērtība. Piemēram, nominālā diapazona - 10 V līdz +10 V diapazona robežas ir 20V.

Mērdisapazons jeb **darba diapazons** mērlielumu vērtību kopa, kurā mērlīdzekļa kļūda atrodas uzdotajās robežās.

Pārneses funkcija - sakarība pie noteiktiem nosacījumiem starp iedarbi un reakciju. Piemēram, termopāra EDS (elektrodzinējspēks) kā temperatūras funkcija. Sakarība var būt izteikta matemātiska vienādojuma, skaitļu tabulas vai grafika veidā. Ja iedarbe mainās kā laika funkcija, viens no pārneses funkcijas veidiem ir pārvades funkcija (reakcijas un iedarbes Laplasa pārveidojumu dalījums).

Jūtība - mērlīdzekļa reakcijas izmaiņas dalītas ar atbilstošajām iedarbes izmaiņām. Jūtība var būt atkarīga no iedarbes lieluma.

Jūtīguma sliekšnis - vislielākā iedarbes izmaiņa, kas nerada uztveramas mērlīdzekļa reakcijas izmaiņu, iedarbes izmaiņām notiekot lēni un vienmērīgi. Jūtības sliekšnis var būt atkarīgs, piemēram, no trokšņa (iekšējā vai ārējā) vai berzes. Tas var būt atkarīgs arī no iedarbes lieluma.

Indikācijas ierīces **izšķiršanas spēja** vismazākā starpība starp indikācijas ierīces rādījumiem, kurus var viennozīmīgi nolasīt. Ciparu indikācijas ierīcēm tā ir indikācijas maiņa, kad pēdējā zīmīgā dekādē cipars mainās par vienu vienību.

Neietekmējamība - mērlīdzekļa spēja neietekmēt mērlielumu. Piemēram, svariem

piemīt neietekmējamība, bet pretestības termometram, kas silda vidi, kuras temperatūru mēra, nepiemīt neietekmējamība.

Dreifs - mērlīdzekļa metroloģiskā raksturojuma lēnas izmaiņas neatkarīgi no mērlieluma maiņas. Visbiežāk ir sastopams „nulles” dreifs, kuru izsauc apkārtējās vides parametru maiņa un procesi, kas notiek mērlīdzekļa shēmās.

Reakcijas laiks - laika intervāls starp momentu, kad iedarbe pakļauta noteiktai momentānai izmaiņai, līdz tam, kad reakcija paliek aptuveni noteiktās robežās līdz tās beigu pastāvīgās vērtības sasniegšanai.

Histerēze – nolasījumu starpība, kura parādās atkarībā no kuras puses (augšas vai apakšas) tuvojas mēramajam lielumam. Histerēzi izsauc mehāniskā berze, magnētiskie efekti, elastīgās deformācijas vai termiskās parādības.

Sistemātiskā kļūda – vidējais rezultāts, kuru iegūst no viena un tā paša mērlieluma neierobežota mērījumu skaita, kas veikti pie atkārtojamības nosacījumiem, mīnus mērlieluma patiesā vērtība.

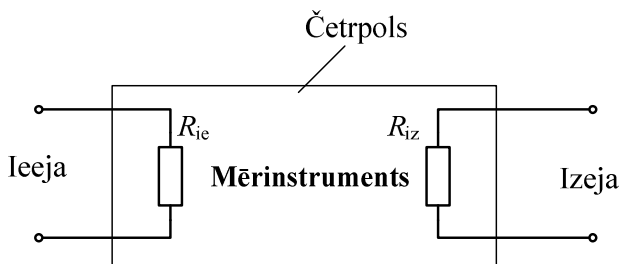
Gadījumkļūda – mērīšanas rezultāts mīnus vidējais rezultāts, kuru iegūst no viena un tā paša mērlieluma neierobežota mērījumu skaita, kas veikti pie atkārtojamības nosacījumiem.

Linearitāte

Ja mērinstrumenta raksturlīkne nav taisne, tas tomēr nenozīmē, ka tas ir neprecīzs. Mērinstrumenta lietošanu parasti atvieglo raksturlīkne, kuru apraksta taisnes vienādojums $y=kx$. Sevišķi svarīgi tas ir gadījumos, kas instruments tiek izmantots kā lielākas mērsistēmas sastāvdaļa.

Ieejas un izejas pretestība

Jebkuru elektroniskās sistēmas bloku vai elementu mēs varam uzskatīt par četrpolu, kuram ir divas ieejas spaiļes un divas izejas spaiļes (1.5 att.).



1.5 att. Četrpola ieejas un izejas pretestība

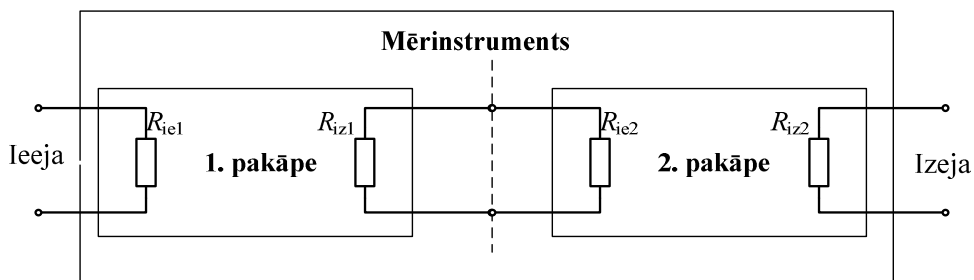
Starp ieejas spailēm pastāv noteikta kompleksa pretestības vērtība, kuru saucim par bloka (elementa) **ieejas pretestību** vai **ieejas impedanci**. Vispārējā gadījumā ieejas (arī izejas) pretestība ir komplekss lielums.

Par četrpola **izejas pretestību** vai **izejas impedanci** sauc kompleksās pretestības

lielumu, kurš pastāv starp četrpola izejas spailēm.

Taču, ja signāla frekvenču josla nepārsniedz dažus kilohercus, ieejas (izejas) pretestību pieņem vienādu ar aktīvo kompleksās pretestības daļu.

Ieejas pretestība parasti ir kā slodzes pretestība iepriekšējai pakāpei, tāpēc tai jābūt lielākai par iepriekšējās pakāpes izejas pretestību (1.6 att.).



1.6 att. Izejas un ieejas pretestību salāgošana

Maksimālo jaudu no 1. pakāpes izejas var noņemt pie nosacījuma, ja $R_{iz1}=R_{ie2}$. Signāla apstrādes traktos parasti nav nepieciešams sasniegt maksimālo pārvades jaudu. Svarīgāk ir pārvadīt signālu ar minimāliem frekvenču un nelineārajiem kropļojumiem. Sprieguma izejas gadījumos izvēlas, lai $R_{ie2}>R_{iz1}$.

Strāvas izejas gadījumos pakāpes izejas pretestība ir ļoti augsta. Nākamās pakāpes ieejas pretestību izvēlas tā, lai tā atbilstu tehniskajā specifikācijā norādītajam lielumam, vai tiktu iegūts nepieciešamais sprieguma līmenis. Detalizēts aprēķins tiks dots A-6 nodaļā.

1.3. Sensoru izejas signāli

Lietojot sensorus, jāzina to elektrisko izejas signālu veidi. Pēc izejas signāla veida sensori iedalās vairākās grupās vai tipos, ko apzīmē ar attiecīgu burtu.

A-tips

Sensori ar bināru (loģiskā 0 vai loģiskais 1) izejas signālu (slēdži). Šie sensori paredzēti lietošanai procesu automatizācijā. A-tipa sensori ir tiešā veidā pieslēdzami programmējamiem loģiskiem controlleriem (PLC).

Piemēri: Tuvinājuma sensori, spiediena, līmeņa un citi sensori.

B-tips

Sensori ar impulsveida izejas signālu. Salāgošanai ar PLC ieeju ir nepieciešami īpaši pārveidotāji - impulsu skaitītāji (elektroniskie vai programmas). Jālieto PLC, kas atbalsta garākus programmas vārdus. Piemērs: impulsveida garuma vai rotācijas leņķa sensori.

C-tips

Sensori ar analogā signāla izeju, bez pastiprinātāja un signāla pārveidotāja. Šo sensoru

izejas signāla līmenis parasti nepārsniedz dažus desmitus milivoltu un nav tieši izmantojams pieslēgšanai PLC ieejai. Šos sensorus izmanto mainīgu parametru mērīšanai. Ja šie sensori jāpieslēdz PLC ieejai, nepieciešami signāla pastiprinātāji un formētāji. Piemēri: pjezoelektriskie un pjezorezistīvie sensori, termopāri, Holla sensori un magnetorezistori, pH un vadītspējas zondes, lineārie potenciometri. Šīs ir biežāk sastopamās jomas, kurās nepieciešamības gadījumā lietotājs izvēlas individuālu elektronisko shēmu.

D-tips

Sensori ar analogu izejas signālu, integrētu pastiprinātāju un signāla pārveidotāju. Izejas signāla līmeņi sensoriem ar sprieguma izeju ir sekojoši:

- ✓ 0 ... 10V;
- ✓ -5V ... +5V;
- ✓ 0 ... 5V.

Sensori ar strāvas izeju nodrošina šādus izejas parametrus:

- ✓ 0 ... 20 mA;
- ✓ -10 ... +10 mA;
- ✓ 4 ... 20 mA.

Šos sensorus var tieši pieslēgt PLC ieejai.

E-tips

Sensori un sensoru sistēmas ar standartizētu izejas signālu pieslēgšanai datu kopnēm vai saskarnēm RS-232-C, RS-422-A vai RS-485.

1.4. Aizsardzības klases

Elektriskā aprīkojuma aizsardzības klases definē standarts EN 40 050 "IP aizsardzības klases". Tas nosaka aizsardzības pakāpi pret saskari, svešķermeņiem un ūdeni.

Aizsardzības klases norāda simbols, kas sastāv no diviem burtiem IP (starptautiskā aizsardzība) un diviem simboliem, kas norāda aizsardzības pakāpi.

Piemēram: IP 67.

Pirmais cipars kodā (0-6) norāda uz aizsardzības pakāpi pret saskaršanos ar svešķermeņiem un svešķermeņu iekļūšanu korpusā, otrais cipars (0-8) norāda uz aizsardzības pakāpi pret ūdens iekļūšanu korpusā.

Aizsardzības klases pret saskaršanos ar svešķermeņiem un svešķermeņu iekļūšanu korpusā dotas 1.1 tabulā.

Nosacījumi:

- 1) 1-4 klases aizsardzības aprīkojums, kas aizsargā pret regulāras vai neregulāras formas svešķermeņu iekļūšanu, kuru izmēri ir lielāki nekā atbilstošā diametra vērtība.
- 2) 3-4 klases aizsardzības realizēšana aprīkojumam, kam ir drenāžas vai gaisa

dzesēšanas atveres, jāveic par to atbildīgajai tehniskajai komisijai.

- 3) 5. klases aizsardzības realizēšana aprīkojumam, kam ir drenāžas atveres, jāveic par to atbildīgajai tehniskajai komisijai.

1.1 tabula. Aizsardzības klases pret saskaršanos ar svešķermeņiem un svešķermeņu iekļūšanu korpusā

Pirmais koda cipars	Aizsardzības pakāpe (pret saskaršanos un svešķermeņu iekļūšanu korpusā)
0	Nav noteiktas aizsardzības.
1	Aizsardzība pret cietu svešķermeņu iekļūšanu, kuru diametrs lielāks par 50 mm (lieli svešķermeņi) ¹⁾ . Nav aizsardzības pret tīšu pieskaršanos, piemēram, ar roku, bet ir aizsardzība pret liela laukuma saskari.
2	Aizsardzība pret cietu svešķermeņu iekļūšanu, kuru diametrs ir lielāks par 12 mm (vidēja lieluma svešķermeņi) ¹⁾ . Aizsardzība pret pirkstu pieskārieniem vai līdzīgu saskari.
3	Aizsardzība pret cietu svešķermeņu iekļūšanu, kuru diametrs ir lielāks par 2.5 mm (mazi svešķermeņi) ¹⁾²⁾ . Aizsardzība pret instrumentiem, vadiem u.c., kuru diametrs ir lielāks par 2.5 mm.
4	Aizsardzība pret cietu svešķermeņu iekļūšanu, kuru diametrs ir lielāks par 1 mm (graudains materiāls) ¹⁾²⁾ . Aizsardzība pret instrumentiem, vadiem u.c., kuru diametrs ir lielāks par 1 mm.
5	Aizsardzība pret kaitīgu putekļu nosēšanos. Putekļu iekļūšana nav pilnībā novērsta, taču putekļi nevar iekļūt tik lielā daudzumā, lai bojātu darbību (aizsargāts pret putekļiem) ³⁾ . Pilnīga aizsardzība pret saskari ar svešķermeņiem.
6	Aizsardzība pret putekļu iekļūšanu (putekļu-drošs). Pilnīga aizsardzība pret saskari ar svešķermeņiem.

1.2 tabula. Aizsardzības klases aizsardzībai pret ūdeni

Otrais koda cipars	Aizsardzības klase (aizsardzība pret ūdeni)
0	Nav īpašas aizsardzības.
1	Aizsardzība pret vertikāli pilošu ūdeni. Ūdens piles nedrīkst nodarīt nekādu kaitējumu.
2	Aizsardzība pret vertikāli pilošu ūdeni. Ūdens piles, kas krīt līdz 15° lielā leņķī no normālas slīpi novietota aprīkojuma (korpusa) pozīcijas, nedrīkst nodarīt nekādu kaitējumu (diagonāli krītošas ūdens piles).
3	Aizsardzība pret ūdeni, kas pil līdz 60° lielā leņķī attiecībā pret vertikāli. Izsmidzināts ūdens nedrīkst nodarīt kaitējumu.
4	Aizsardzība pret ūdens šļakatām. Ūdens nedrīkst nodarīt nekādu kaitējumu.
5	Aizsardzība pret ūdens strūklu no sprauslas, kas pavērsta pret aprīkojumu (korpusu) no dažādām pusēm. Ūdens strūklas nedrīkst nodarīt nekādu kaitējumu.
6	Aizsardzība pret lielu ūdens daudzumu vai spēcīgām ūdens strūklām. Nelabvēlīgos apstākļos ūdens nedrīkst iekļūt aprīkojumā (korpusā).
7	Aizsardzība pret ūdeni, kad aprīkojums (korpus) tiek iegremdēts ūdenī noteiktos spiediena un laika apstākļos. Ūdens nedrīkst iekļūt kaitīgos daudzumos.
8	Aprīkojums (korpus) ir piemērots ilgstošai iegremdēšanai ūdenī pie ražotāja norādītajiem apstākļiem (iegremdēšana) ¹⁾ .

- 1) Šī aizsardzības klase parasti attiecas uz aprīkojumu, kas ir hermētiski noslēgts. Dažiem aprīkojuma tipiem ir pieļaujama neliela ūdens ieplūde, ja vien tai nav kaitīga efekta.

A-2. Sistēmas statiskās raksturlīknes. Mērījuma kļūdas

Izvēloties mērinstrumentus vai mērīšanas sistēmas noteiktam mērķim, nākas salīdzināt daudzas rūpnieciski ražotas iekārtas. Lai to varētu izdarīt, nepieciešams novērtēt katras iekārtas īpašības un izvēlēties konkrētajam uzdevumam piemērotāko mērinstrumentu vai mērsistēmu. Lai šo uzdevumu veiktu, jānovērtē sistēmas **statiskās** un **dinamiskās raksturlīknes**, un jāveic iespējamo kļūdu analīze.

Šajā nodaļā iepazīsimies ar statiskajām raksturlīknēm un mērīšanas kļūdām. Sistēmu dinamiskās raksturlīknes ir analizētas A-3 nodaļā.

2.1. Statiskās raksturlīknes

Sistēmas statiskās raksturlīknes tiek definētas pieņemot, ka ieejas parametrs izmainās lēni (lēni mainīgi lielumi). Jēdziena „lēni mainīgi parametri” kvantitatīvos rādītājus definēsim nākamajā šīs grāmatas nodaļā. Runājot par statiskajām raksturlīknēm pieņemsim, ka ieejas parametrs (signāls) ir laikā nemainīgs, un šādu procesu saucim par **statisku procesu**.

Turpmākā izklāstā definēsim lielumus, kas raksturo sistēmas īpašības statiskā procesā.

Galvenais uzdevums, veicot jebkura veida mērījumu, ir garantēt to precizitāti atbilstoši mērījuma mērķim. Piemēram, ja mērīšanas sistēma ir paredzēta automātiskās regulēšanas sistēmas atgriezeniskās saites signāla nodrošināšanai, tai jānodrošina precizitāte vismaz $\pm 0.25\%$.

Statiskā kalibrēšana

Jebkura mērinstrumenta statiskās raksturlīknes nosaka, veicot statisko kalibrēšanu. Vispārējā gadījumā statisko kalibrēšanu veic, izmainot sistēmas ieejas lielumu noteiktās robežās, un reģistrējot sistēmas izejas lielumu atbilstoši ieejas lieluma izmaiņām ar noteikumu, ka pārējie sistēmu ietekmējošie faktori visā kalibrēšanas laikā paliek nemainīgi.

Rezultātā iegūstam sakarību starp sistēmas ieejas un izejas lielumiem pie nemainīgiem ārējiem faktoriem.

Šo procedūru var veikt, pieņemot par ieejas lielumu kādu no iepriekš fiksētajiem faktoriem, un noteikt tā ietekmi uz sistēmu. Tādā veidā var iegūt statiskās kalibrēšanas raksturlīkņu saimi, kura raksturo sistēmas reakciju noteiktā iedarbes funkciju apgabalā.

Mērīšanas sistēmas statiskā kalibrēšana tiek veikta, lai definētu sistēmas pārvades funkciju un mērinstrumenta precizitāti.

Veicot kalibrēšanu ir jānodrošina ieejas lieluma izmaiņa ar noteiktu precizitāti.

Šeit iespējami divi varianti:

- ✓ ieejas lieluma izmaiņa tiek nodrošināta ar noteiktas precizitātes etaloniem, piemēram, kalibrējot svarus, kā ieejas lieluma etalonu izmantojam noteiktas precizitātes atsvarus,
- ✓ ieejas lieluma izmaiņa tiek mērīta ar etalonam atbilstošu mērinstrumentu, kura precizitāte ir zināma. Piemēram, kalibrējot temperatūras mērinstrumentu, vides temperatūra tiek mērīta ar etalontermometru.

Lai iegūtu noteiktas precizitātes mēriekārtu, kalibrēšana jāizdara ar vismaz 10 reizes precīzāku etalonu. Piemēram, ja jākalibrē temperatūras mērinstruments ar precizitāti 1%, tad etalontermometram jābūt ar precizitāti vismaz 0.1%.

Iepriekš noskaidrojām, ka kalibrēšana jāizdara pie fiksētiem pārējiem procesu ietekmējošiem lielumiem. Parasti tie ir apkārtējās vides parametri, piemēram, gaisa temperatūra, mitrums, barošanas spriegums u.c. Noskaidrosim, ar kādu precizitāti jāveic apkārtējās vides parametru mērījumi, izdarot kalibrēšanu. Pieņemsim, ka spiediena mērinstrumenta kļūda mērāmās vides temperatūrai izmainoties par 100 °C, ir 0.100%. Ja mēs esam mērījuši šo vides temperatūru ar termometru, kura precizitāte ir 2%, tad spiediena mērījuma kļūda sasniegs 0.102%. Redzam, ka praksē šāda kļūdas palielināšanās nav būtiska. Tas nozīmē, ka, veicot mērinstrumenta statisko kalibrēšanu, apkārtējās vides parametru mērīšanas precizitāte var būt zemāka par kalibrējamā instrumenta precizitāti. Parasti, projektējot mērīšanas sistēmas, tiek veikti pasākumi, lai ierobežotu apkārtējās vides parametru ietekmi uz mērīšanas precizitāti.

Statisko kalibrēšanu ieteicams veikt, izmantojot ieejas lielumu etalonus, vai ieejas lielumu mērīt ar precīziem mehāniskajiem mērinstrumentiem.

Piemēram, kalibrējot caurplūdes mērītājus, par etalona mēriekārtu izmanto precīzu mērcilindru un laika mērīšanas ierīci.

Mērinstrumenta precizitāte (angļu, *accuracy*) - mērīšanas līdzekļa spēja uzrādīt patiesajai vērtībai tuvu reakcijas lielumu. Mērinstrumenta precizitāte parāda nolasījuma novirzi no reālās vērtības. To parasti izsaka procentos no pilnas skalas vērtības. Piemēram: 100-kPa manometrs ar precizitāti 1% nodrošinās nolasījumu ar novirzi visā skalas diapazonā ne lielāku kā ± 1 kPa. Pamatnoteikums, izvēloties mērpārveidotājus vadības sistēmām, to precizitātei (ieskaitot histerēzi, linearitāti un atkārtojamību) jābūt ne zemākai par 0.25% visā diapazonā. Dažkārt instrumenta precizitāti norāda kā absolūto novirzi katram mērdiapazonam.

Mērījuma precizitāte (*precision*) – mazākā mērāmā lieluma izmaiņa, kura rada ticamu mērinstrumenta rādījumu. Instrumenta mērījuma precizitāte parāda tā spēju nodrošināt nolasījuma atkārtojamību ar uzdoto precizitāti. Atšķirību starp mērinstrumenta precizitāti un mērījuma precizitāti izskaidrosim piemērā, kurā pieņemsim, ka ar augstu precizitāti ir noskaidrots sprieguma lielums 100V. Izdarot piecus mērījumus ar vienu mērinstrumentu, ieguvām sekojošus rezultātus: 104, 103,

103, 105 un 105V. No šiem lielumiem varam konstatēt, ka mērinstrumenta precizitāte nepārsniedz 5% (5V), mērījuma precizitāte ir apmēram $\pm 1\%$, jo maksimālā novirze no vidējās vērtības (104V) ir tikai 1V. Var atzīmēt, ka mērinstrumentu kalibrējot, tā precizitāte varētu sasniegt ± 1 V. Šis piemērs parāda, ka mērinstrumenta precizitāti var palielināt to kalibrējot, bet mērījuma precizitāti ar kalibrēšanu palielināt nevar.

Abu šo terminu salīdzinājums redzams 2.1 attēlā. Mērīšanu tēlaini var salīdzināt ar šaušanu mērķī. Trāpījumu blīvums raksturo mērījuma precizitāti, bet novirze no desmitnieka – mērinstrumenta precizitāti.



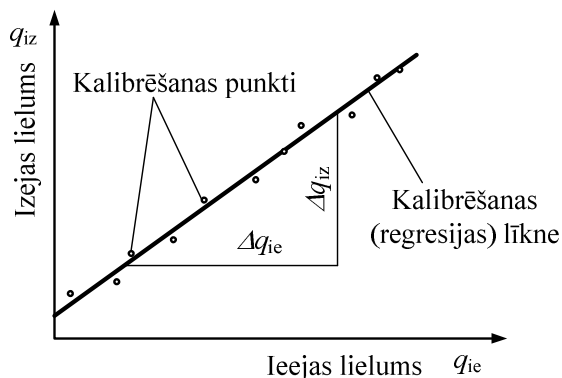
2.1 att. **Mērinstrumenta un mērījuma precizitātes salīdzinājums**

Mērinstrumenta precizitāte raksturo tā sistematisko kļūdu, kura ir atkarīga no mērinstrumenta uzbūves īpatnībām.

Mērījuma precizitāte raksturo gadījuma kļūdu, un tā ir atkarīga no mērāmā procesa īpatnībām un apkārtējās vides izmaiņām.

Mērinstrumenta jutība

Mērinstrumenta jutību nosaka no kalibrēšanas līknes. Vēlams, lai mērinstrumenta raksturlīkne būtu taisne (2.2 att.), taču tas nenozīmē, ka mērinstrumenti ar nelineāru raksturlīkni būtu neprecīzāki.



2.2 att. **Lineāra instrumenta jutības noteikšana**

Lineāra mērinstrumenta statisko jutību nosakām pēc formulas:

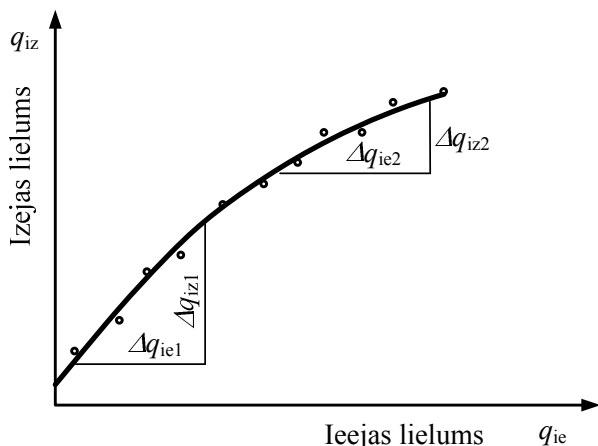
$$K_{st} = \frac{\Delta q_{iz}}{\Delta q_{ie}}. \quad (2.1)$$

Lineāram instrumentam statiskā jutība ir konstants lielums.

Mērinstrumentam ar nelineāru raksturlīkni, statiskā jutība ir mainīgs lielums, tāpēc to nosaka vairākās kalibrēšanas līknes vietās, parasti diapazona sākumā, vidū un beigās. Šajā gadījumā lielumiem Δq_{ie} un Δq_{iz} jābūt pēc iespējas mazākiem. Šos lielumus izvēlas tā, lai attiecīgā Δq zonā raksturlīkni varētu uzskatīt par lineāru.

Katrā raksturlīknes vietā jutību aprēķina pēc formulas (2.1). Nosakot jutību vairākās raksturlīknes vietās, var iegūt mērinstrumenta jutības izmaiņas līkni, atkarībā no ieejas lieluma.

Ja nelineārais mērinstruments tiek izmantots fizikālā lieluma mērīšanai tikai noteiktā šaurā diapazona daļā, tad šajā daļā var noteikt tā jutību un pieņemt, ka tā ir konstanta un instruments lineārs. Protams, tas ir spēkā tikai tajā mērīdiapazona daļā, kur ir noteikta jutība un novērtēta līknes **linearitāte**.



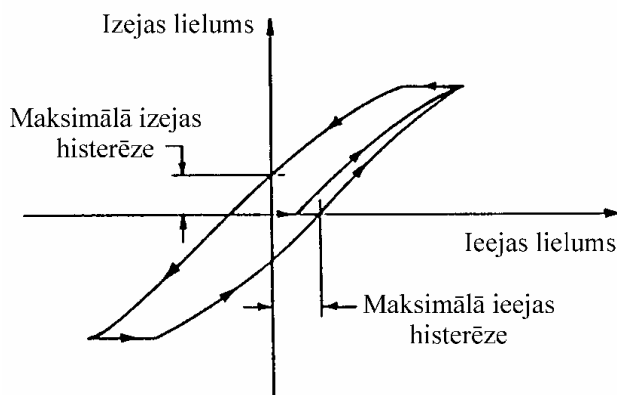
2.3 att. Nelineāra mērinstrumenta jutība

Linearitāti novērtē ar maksimālo raksturlīknes novirzi no taisnas līnijas. To var izteikt procentos vai absolūtā vērtībā. Linearitāti var noteikt visam mērīdiapazonam vai arī tikai kādai tā daļai.

Histerēze

Histerēze parādās kalibrēšanas procesā, kā starpība starp mērinstrumenta rādījumiem, ieejas lielumam pieaugot un samazinoties (2.4 att.).

Histerēzes lielums ir svarīgs mērījumos, kur ieejas lielums mainās laikā, gan pieaug, gan samazinās.

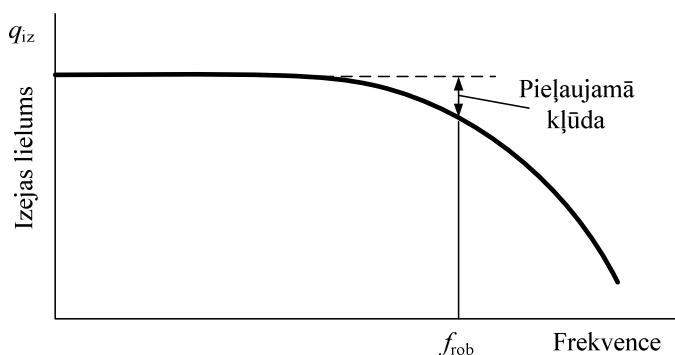


2.54 att. Histerēzes veidošanās

Nejutības zona veidojas nulles punkta tuvumā. Pieaugot ieejas lielumam, izejas lieluma izmaiņa sākumā nenotiek. Tikai sasniedzot noteiktu ieejas signāla lielumu, sākas izejas lieluma izmaiņa. Mehāniskās sistēmās šo parādību izsauc sausā berze.

Amplitūdas - frekvenču raksturlīkne

Mērāmā lieluma izmaiņas frekvencei palielinoties, mērinstrumenta izejas lielums sāk samazināties. Šo parādību rada sistēmas inerciālie un elastīgie elementi. Mehāniskajās sistēmās tās ir elementu masas un elastības, elektriskajās – induktivitātes un kapacitātes.



2.5 att. Mērinstrumenta amplitūdas – frekvenču raksturlīkne

No amplitūdas – frekvenču raksturlīknes var noteikt robežfrekvenci f_{rob} , līdz kurai mērinstrumenta kļūda nepārsnieds pieļaujamo (2.5 att.).

2.2. Mērīšanas kļūdas

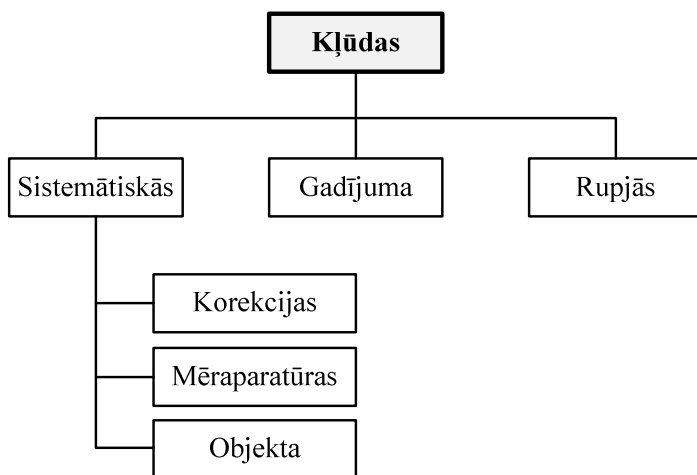
Fizikālā lieluma vērtību, kas ideāli atspoguļo aplūkojamā objekta, tā stāvokļa vai notiekošā procesa īpašību, sauc par šī fizikālā lieluma **patieso vērtību**.

Eksperimentāli iegūtie rezultāti dod tikai aptuvenu nosakāmā fizikālā lieluma vērtību. Tie ir atkarīgi ne tikai no fizikālā lieluma patiesās vērtības, bet arī no mērīšanas metodes, no lietotajiem tehniskajiem līdzekļiem, no mērījumu izpildītāja īpašībām un citiem apstākļiem. Eksperimentāli noteikto fizikālā lieluma vērtību, kura tādā mērā tuvojas patiesajai vērtībai, ka izmantojama tās vietā, sauc par šī fizikālā lieluma **reālo vērtību**.

Starpību starp iegūto rezultātu x' un nosakāmā lieluma reālo vērtību x , t.i., lielumu $\Delta x = x' - x$, sauc par **absolūto kļūdu**. Absolūtās kļūdas attiecību pret lieluma reālo vērtību sauc par **relatīvo kļūdu**, to parasti apzīmē ε . Relatīvo kļūdu izsaka procentos (2.2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% = \frac{x' - x}{x} \cdot 100\%. \quad (2.2)$$

Kļūdas klasificē pēc to izcelsmes, iedalot trīs galvenajās kļūdu grupās (2.6 att.).



2.6 att. **Mērījuma kļūdu klasifikācija**

Par **sistemātisku kļūdu** sauc kopējās kļūdas komponenti, kas ir konstanta vai arī likumsakarīgi mainās atkārtotos viena un tā paša lieluma mērījumos. Sistemātiskās kļūdas īsto mērskaitli nobīda uz augšu vai uz leju par fiksētu nemainīgu lielumu δ . Šāda kļūda parādīsies, ja stieni, kura garums ir l metri, mērīsim ar etalonu, kura nominālais garums ir 1 metrs, bet faktiskais - $(1 + \delta)$ metri.

Tādu sistemātisku kļūdu, kuras daba ir zināma un vērtība pietiekami precīzi nosakāma, sauc par **korekciju**. Piemēram, lai izlabotu mērījumu rezultātus, kas iegūti ar mikrometru, ja uz tā skalas sākuma nolasījums (bez priekšmeta) ir $0,02 \text{ mm}$, nevis $0,00$, katram rezultātam jāpieskaita korekcija $k = - 0,02 \text{ mm}$.

Tādu sistemātisko kļūdu, kas saistīta ar mērinstrumenta vai mēraparāta ierobežotu precizitāti, sauc par **mērinstrumenta (mēraparatūras) kļūdu**. Tās vērtība

un zīme katrā konkrētajā mērījumā nav precīzi zināma, taču ar ļoti augstu varbūtību var pieņemt, ka mērinstrumenta kļūda nepārsniedz noteiktu vērtību δ , ko sauc par **mērinstrumenta pamatkļūdu**.

Ja mērinstrumenta pasē nav uzrādīta precizitātes klase vai precizitāte atbilstošā lieluma mērvienībās, tad par mērinstrumenta pamatkļūdu pieņem **pusi no tā skalas sīkākās iedaļas vērtības**. Piemēram, ja skrūves mikrometra sīkākās iedaļas vērtība ir 0,01 mm, tad $\delta = 0,005 \text{ mm}$. Ciparu indikācijas mērinstrumentiem pamatkļūda parasti ir vienāda ar ± 1 skaitļa jaunākās kārtas vienību.

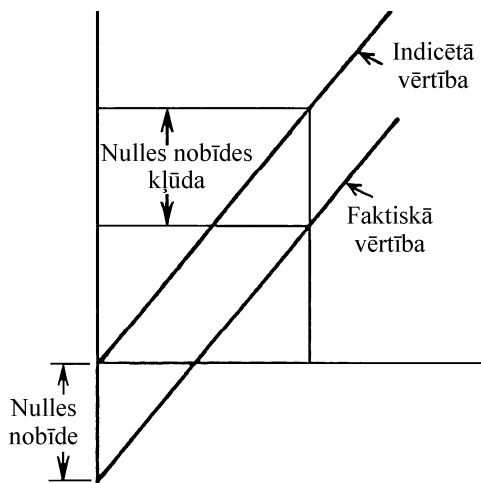
Ja mērinstrumentam uzdota **precizitātes klase** γ , tad kļūdu δ aprēķina pēc formulas:

$$\delta = \frac{\gamma}{100} \cdot X_m, \quad (2.3)$$

kur X_m – mērinstrumenta izmantojamais mērapjoms.

Mērinstrumenta vai mērsistēmas kļūdas var samazināt, veicot kalibrēšanu un mērsistēmas regulēšanu.

Strādājot ar mērīšanas sistēmām, jāņem vērā dažas īpatnības, kas rodas sarežģītās sistēmās. Elektroniskās mērīšanas sistēmās bieži vien rodas nulles nobīde jeb **nulles dreifs** (2.7 att.).



2.7 att. Nulles nobīdes kļūda

Tā cēlonis ir sarežģīti procesi, kas noris elektronisko shēmu iekšienē, kā arī apkārtējās vides temperatūras izmaiņa. Nulles dreifa rezultātā parādās nulles nobīde, kura palielina mērījuma kļūdu. Nulles dreifs parasti notiek lielākā laika periodā, un, lai no tā izvairītos, ik pa laikam jāveic nulles korekcija. Modernajās mēriekārtās ražotāji ir izstrādājuši shēmas, kas samazina nulles dreifu līdz nenozīmīgam lielumam. Jebkurā gadījumā pirms mērījumu sākšanas mēriekārta ir jādarbina tukšgaitā vismaz 20 līdz 30 minūtes, lai nostabilizētu mērsistēmas režīmus.

Sistemātisko kļūdu, kas saistīta ar kādu mērāmā objekta īpatnību, sauc par **objekta kļūdu**. Piemēram, nosakot materiāla blīvumu, tiek izmērīta masa un tilpums ķermenim, kura iekšienē ir dobums, par kura eksistenci nav zināms, tādēļ iegūtais rezultāts ir kļūdains. No šādām kļūdām var izvairīties, lietojot citu mērīšanas metodiku.

Par **gadījuma kļūdu** sauc kopējās kļūdas sastāvdaļu, kuras cēloņi nav zināmi, bet, vairākkārt atkārtojot mērījumus, mainās kļūdas skaitliskā vērtība un zīme. Gadījuma kļūdas nav iespējams novērst. Tās var tikai samazināt un novērtēt to lielumu, izmantojot gadījuma kļūdu teoriju, kas izveidota, balstoties uz varbūtību teoriju.

Rupja kļūda var rasties nepamanītas mērīšanas apstākļu izmaiņas dēļ (piemēram, izmainās elektriskajai ķēdei pieliktais spriegums), mērījuma nepareizas izpildes, mērinstrumenta rādījuma nepareizas nolasīšanas, nolasījuma kļūdaina pieraksta un citu līdzīgu iemeslu dēļ. Parasti, rezultāti, kuri satur rupju kļūdu, ievērojami atšķiras no pārējiem skaitliski, ja izdarīta vairākkārtēja dotā lieluma vērtības noteikšana.

Vispārīgā gadījumā visas atsevišķās kļūdas kopā veido rezultāta kopējo kļūdu.

Veicot mērījumus jāņem vērā sekojošais:

- ✓ jāizvēlas piemērota mērīšanas metodika, lai izslēgtu objekta kļūdas;
- ✓ jāņem vērā nepieciešamās korekcijas;
- ✓ jānovērš rupju kļūdu rašanās, bet, ja tās radušās, tās jāizslēdz, izmantojot atbilstošos kritērijus;
- ✓ jānovērtē mērinstrumentu un gadījuma kļūdas.

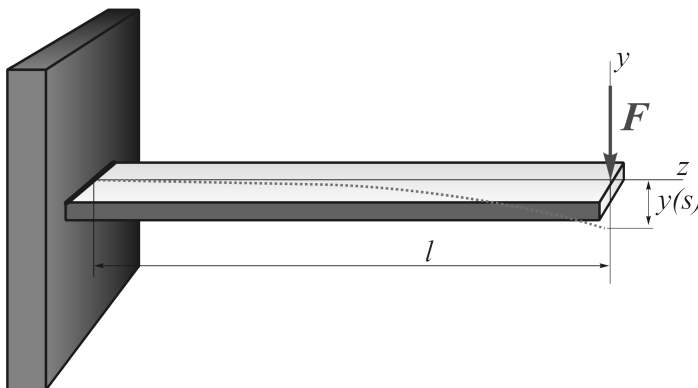
Šajā grāmatā galveno uzmanību veltīsim aparatūras radītajām mērījumu kļūdām un mērinstrumentu un mērāmās sistēmas mijiedarbības radītajām kļūdām. Pie iepriekšminētajām var pieskaitīt dinamiskās kļūdas, kas rodas ātri mainīgu parametru mērīšanas rezultātā.

A-3. Sistēmu dinamiskās raksturlīknes

Dabā un arī tehnikā visi procesi ir nepārtraukti mainīgi. Procesa parametru (temperatūra, spiediens u. c.) izmaiņas ātrums var būt dažāds. Piemēram: temperatūra ūdens sildītājā parasti izmainās samērā lēni – dažī grādi minūtē vai lēnāk, turpretim temperatūras izmaiņa iekšdedzes motora cilindrā sadegšanas procesā izmainās par vairākiem simtiem grādu sekundes simtdaļā.

Fizikālo lielumu mērīšana notiek noteiktā laika periodā. Neatkarīgi no parametra izmaiņas ātruma, mērīšanas sistēmai ir jāuzrāda (jāfiksē) parametra vērtība pieļaujamās kļūdas robežās.

Pieņemsim, ka mehāniskā sistēma sastāv no metāla sijas, kuras kreisais gals iespiļēts balstā, bet uz brīvo galu iedarbojas koncentrēts spēks F (3.1 att.).



3.1 att. Konsolsijas deformācija

Spēka darbības rezultātā sijas brīvais gals pārvietojas par lielumu $y(s)$. Ja spēks laikā nemainās (tas ir konstants), arī sijas deformācija nemainās. Ja ir nepieciešams izmērīt šo deformāciju, varam lietot dažādas metodes un mērīšanas ilgums nav svarīgs. Ja siju deformējošā spēka vērtības mainās lēnām, piemēram, ar periodu 5 minūtes, tad mērījumus veic tāpat kā iepriekš.

Līdzīga situācija veidojas, ja nepieciešams izmērīt ārgaisa temperatūru. Temperatūras izmaiņas parasti notiek ļoti lēnām un mērīšanu varam veikt, piemēram, ar dzīvsudraba termometru. Iegūtais rezultāts būs atkarīgs tikai no mērīinstrumenta precizitātes. Ja parametra vērtība nemainās laikā vai mainās lēnām, šādu procesu sauc par **statisku procesu**. Šāda parametra mērīšanu sauc par statisko mērīšanu. Secinām, ka statisks process būs tādā gadījumā, ja uz sistēmu iedarbosies nemainīgi vai **lēni**

mainīgi spēki vai parametri. Termins lēni mainīgi parametri neizsaka izmaiņas ātruma kvantitatīvos rādītājus, tāpēc ir nepieciešams definēt šo terminu, ko izdarīsim nedaudz vēlāk.

Pieņemsim, ka uz siju (3.1 att.) iedarbojas sinusoidāli mainīgs spēks, kura amplitūda mainās pēc likuma $F(t) = A \cdot \sin \omega t$. Spēka izmaiņas leņķiskā frekvence $\omega = 2\pi f$ var mainīties ļoti plašās robežās, pat līdz vairākiem simtiem kHz. Secinām, ka šādā gadījumā spēka mērīšana jāveic ļoti īsā brīdī. Arī sijas deformācija atšķirsies no statiskās deformācijas. Mērīšana šajā gadījumā ir komplicētāka, jo jāievērtē dinamiskie procesi, kas notiek pašā mērīšanas sistēmā.

Sistēmas, kuru parametri ir laikā strauji mainīgi, sauc par **dinamiskām sistēmām**. Taču ne visas sistēmas, kuru parametri ir mainīgi, jānovērtē kā dinamiskas. Lai pareizi izvēlētos mērīšanas sistēmas, jāzina un jāprot novērtēt mēriekārtas, kā dinamiskas sistēmas reakcija mainīga parametra iedarbībā.

Dinamiskās sistēmas apraksta ar diferenciālvienādojumiem. Lai to varētu izdarīt, nepieciešams noteikt katra elementa dinamiskās īpašības un uzrakstīt to matemātisko modeli.

3.1. Dinamisko sistēmu elementi

Reāla mehatroniska sistēma ietver sevī mehāniskas, hidrauliskas, pneimatiskas un elektriskas apakšsistēmas. Katra no tām sastāv no atsevišķiem elementiem, kuru mijiedarbība nosaka visas sistēmas dinamiskumu. Lai izveidotu kopēju sistēmas matemātisko modeli, nepieciešams izprast katra tās elementa dinamiskās īpašības. Reālas sistēmas atsevišķās daļas parasti ir ar kompleksu uzbūvi un to dinamiskās īpašības var būt nelineāras. Lai atvieglotu modelēšanu, atsevišķos nelineāros elementus **linearizē**. To izdara idealizējot atsevišķas elementu īpašības.

Visas sistēmas var iedalīt divās grupās:

- ✓ mehāniskās (mehāniskās, hidrauliskās, pneimatiskās),
- ✓ elektriskās.

Analizējot sīkāk katras sistēmas elementu matemātiskos modeļus varam secināt, ka gan mehāniskās, gan elektriskās sistēmas elementus var aprakstīt ar līdzīgiem diferenciālvienādojumiem, jo katrā grupā var atrast elementus ar vienādām dinamiskajām īpašībām.

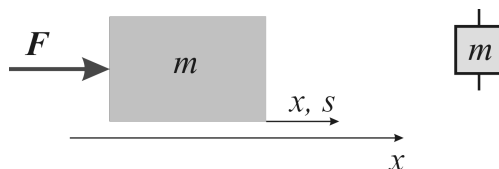
Jebkura sistēma sastāv no trīs dažādu veidu elementiem:

- ✓ inerciālie,
- ✓ elastīgie,
- ✓ dempferējošie (bremzējošie).

Inerciālie elementi

Mehānikā inerciālos elementus raksturo to masa m un kustību apraksta Otrais

Ņūtona likums. Pieliekot elementam ar masu m spēku F , elements kustas virzienā x (3.2 att.). Masas m pārvietojumu apzīmēsim ar x vai s . Labajā pusē parādīts inerciālā elementa apzīmējums matemātisko modeļu shēmās.



3.2 att. **Virzes kustības parametri**

Pēc Otrā Ņūtona likuma varam uzrakstīt sekojošu sakarību:

$$F = \frac{d^2 s}{dt^2} \cdot m = \frac{d^2 x}{dt^2} \cdot m, \quad (3.1)$$

kur - $\frac{d^2 s}{dt^2}$ un $\frac{d^2 x}{dt^2}$ - ķermeņa paātrinājums, m/s^2 , m – ķermeņa masa, kg.

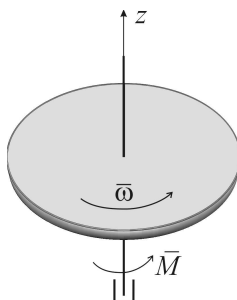
Ja ķermenim pielikts laikā mainīgs spēks $F(t)$, tā ķermeņa paātrinājumu varam noteikt pēc vienādojuma:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{m} \cdot F(t) \quad (3.2)$$

Tas ir virzes kustības diferenciālvienādojums. Turpmāk lietosim sekojošus apzīmējumus:

- ✓ ķermeņa pārvietojums x ,
- ✓ ķermeņa kustības ātrums - $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$;
- ✓ ķermeņa paātrinājums - $\frac{d^2 x}{dt^2} = \ddot{x}$.

Līdzīgā veidā varam sastādīt arī cieta ķermeņa rotācijas kustības diferenciālvienādojumu (3.3 att.).



3.3 att. **Rotācijas kustības parametri**

Rotācijas kustības aprakstīšanai lietosim sekojošus apzīmējumus:

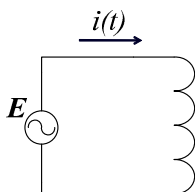
- ✓ φ – ķermeņa pagriezienu leņķis,
- ✓ $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}$ – leņķiskais ātrums,
- ✓ $\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \ddot{\varphi}$ – leņķiskais paātrinājums.

Rotācijas kustības diferenciālvienādojumu varam uzrakstīt sekojošā veidā:

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{I} \cdot M(t), \quad (3.3)$$

kur I – ķermeņa inerces moments, kg/m^2 , $M(t)$ – laikā mainīgs ārējo spēku moments, Nm .

Salīdzinot vienādojumus (3.2) un (3.3), redzam, ka to struktūra ir vienāda. Līdzīgā veidā varam uzrakstīt arī elektriska elementa diferenciālvienādojumu. Elektriskajās sistēmās inerciālas īpašības piemīt induktivitātēm (3.4 att.).



EDS izmaiņu uz induktivitātes izsaka vienādojums (3.4):

$$E = L \frac{di}{dt}, \quad (3.4)$$

kur L – spoles induktivitāte, i – strāvas izmaiņa laikā.

3.4 att. Induktivitātes slēgums

Strāvas izmaiņu laikā $i(t)$ izsaka vienādojums (3.5):

$$i(t) = \frac{dq}{dt}, \quad (3.5)$$

kur q – elektriskais lādiņš.

Apvienojot vienādojumus (3.4) un (3.5), iegūstam strāvas izmaiņas diferenciālvienādojumu induktivitātes slēguma maiņstrāvas ķēdē:

$$\frac{d^2q}{dt^2} = \frac{1}{L} E(t) \quad \text{vai} \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot E(t). \quad (3.6)$$

Kā redzam visu inerciālo elementu diferenciālvienādojumi ir ar vienādu struktūru.

Elastīgie elementi

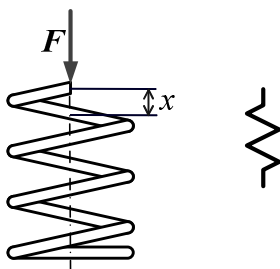
Ideāls elastīgais elements ir bez masas, bet tam piemīt elastīgās īpašības. Tas noteiktos apstākļos var uzkrāt potenciālo enerģiju, un vēlāk to atdot sistēmai.

Mehānikā elastīgais elements ir atsperē (3.5 att.). Hidrauliskajās un pneimatiskajās sistēmās elastīgā elementa īpašības piemīt gaisa un šķidruma saspiežamībai. Elektriskajās sistēmās elastīgais elements ir kapacitāte.

Elastības spēku, kādu rada atsperē, nosaka pēc formulas:

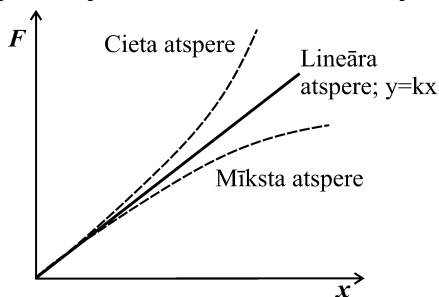
$$F(t) = -k \cdot x = -k \cdot \int_0^t \dot{x} \cdot dt, \quad (3.7)$$

kur k - atspēres elastības koeficients, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$, $\dot{x}$ - kustības ātrums, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

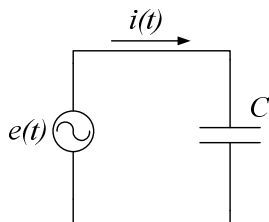


3.5 att. Elastīgais elements (atsperē) un tās apzīmējums shēmās

Kā redzam, atspēres spēks ir proporcionāls un pretēji vērsts deformācijai x , uz to norāda mīnus zīme vienādojumā (3.7). Parasti elastības koeficients k ir konstants lielums. Praksē iespējams izveidot atspēres ar nelineāru raksturlīkni (3.6 att.). Šajā gadījumā elastības koeficients nav konstants, bet ir atkarīgs no atspēres deformācijas $k=f(x)$. Veidojot matemātisko modeli, jāzina atspēres elastības koeficienta izmaiņas funkcija un tā jāievieto diferenciālvienādojumā.



3.6 att. Nelineāro atspēru raksturlīknes



3.7 att. Kondensatora slēgums

Elektriskajās sistēmās elastīgās īpašības piemīt kapacitātei (3.7 att.).

Sprieguma izmaiņu uz kondensatora platēm apraksta vienādojums:

$$e(t) = \frac{1}{C} \cdot q(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt, \quad (3.8)$$

kur C – kapacitāte, $q(t)$ – elektriskais lādiņš, $i(t)$ – strāvas momentānā vērtība.

Dempferējošais (rezistīvais) elements

Dempferējošie elementi rada pretestību kustībai (gan mehāniskajai, gan elektriskajai strāvai) un patērēto enerģiju pārvērš siltumā.

Mehāniskajās sistēmās ir divu veidu berze:

- ✓ viskozā berze (šķidrumā),
- ✓ sausā (Kulona) berze.

Viskozā berze rodas divām virsmām pārvietojoties viena attiecībā pret otru šķidrumā. Pretestības spēks ir proporcionāls šķidruma viskozitātei, ķermeņu izmēriem, aptekamības koeficientam un kustības ātrumam. Sakarība starp spēku $F(t)$ un ātrumu ir ļoti sarežģīta, bet to var linearizēt un aprakstīt ar sekojošu vienādojumu:

$$F(t) = R_h \cdot v = R_h \cdot \frac{dx}{dt} = c \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (3.9)$$

kur R_h – hidrauliskās berzes pretestība, c – dempferēšanas koeficients.

Izteiksim vienādojumu sekojošā veidā:

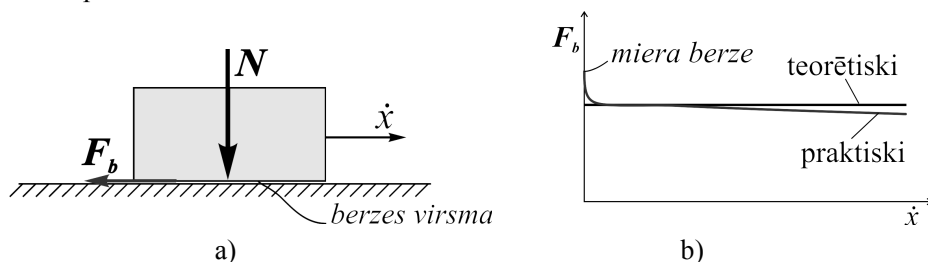
$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{c} \cdot F(t). \quad (3.10)$$

Redzam, ka bremzējošais spēks ir proporcionāls kustības ātrumam.

Shēmās dempferējošos elementus apzīmē šādi -



Sausā berze rodas divām sausām saskarē esošām virsmām pārvietojoties viena attiecībā pret otru 3.8 att.



3.8 att. **Sausā berze**

a – sausās berzes spēku shēma, b – berzes spēka atkarība no kustības ātruma

Attiecību starp maksimālo berzes spēku F_b un normālo reakciju N (3.8 att.) sauc par **berzes koeficientu** f , ko izsaka šādi:

$$f = \frac{F_b}{N}. \quad (3.11)$$

Ja berzes koeficients ir zināms, maksimālo berzes spēku izsaka šādi:

$$F_b = \pm f \cdot N. \quad (3.12)$$

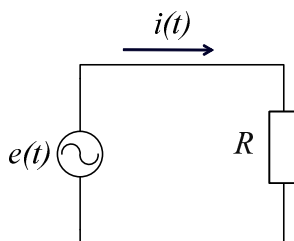
Berzes koeficienta lielums atkarīgs no saskares virsmu fizikālajām īpašībām. To savstarpējā iedarbība ir diezgan komplicēta un tiek iztīrāta speciālosursos. Praktiskiem aprēķiniem pieņemamā tuvinājumā slīdes berzes parādību raksturo ar

S. Kulona apkopotiem eksperimentu rezultātiem, kuri formulējami šādi:

- ✓ berzes spēks vērsts pretēji relatīvi iespējamam slīdēšanas virzienam,
- ✓ berzes spēka modulis proporcionāls normālai reakcijai starp saskares virsmām,
- ✓ berzes koeficients nav atkarīgs no saskarvirsmu lieluma, bet atkarīgs no virsmu materiāla un fizikālajām īpašībām,
- ✓ berzes koeficients ķermeņu kustībā ir mazāks par berzes koeficientu to miera stāvoklī (3.8b att.).

Ievērtējot sauso berzi vienādojumos, jāņem vērā berzes spēka zīme (vienādojums 3. 12).

Elektriskajās sistēmās dempferējošais elements ir aktīvā (omiskā) pretestība (3.9 att.). Slēgumos aktīvā pretestība nerada fāzu nobīdes starp strāvu un spriegumu. Sakarību starp strāvu un spriegumu ķēdēs ar aktīvo pretestību apraksta Oma likums.



3.9 att. Aktīvās pretestības slēgums

Sprieguma izmaiņu uz aktīvās pretestības apraksta sekojoši:

$$e(t) = R \cdot i(t) = R \cdot \frac{dq}{dt}. \quad (3.13)$$

Visa elektriskā jauda, kas izdalās uz aktīvās pretestības, pārvēršas siltumā.

3.2. Iedarbes funkcijas

Iepriekš analizējām sistēmas elementus un to reakciju dažādu faktoru iedarbības rezultātā. Sistēmas darbību izsauc ārējā iedarbe. Mehāniskajās sistēmās tie ir ārējie spēki un momenti, bet elektriskajās – ārējie spriegumi un strāvas. Termodinamiskajās sistēmās darbību rada siltuma pievadīšana vai aizvadīšana.

Jebkura ārējā iedarbe var būt laikā mainīga un tās izmaiņas likumu sauc par iedarbes funkciju. Mehāniskajās sistēmās ārējo spēku un momentu izmaiņas likumsakarības rada mehāniskie ģeneratori, piemēram, motori ar reduktoriem un citiem piedziņas elementiem.

Hidrauliskajās sistēmās ārējo iedarbību uz sistēmu rada spiediena un plūsmas avoti. Praktiski tie ir dažāda tipa sūkņi. Piemēram, tilpumsūknis (zobratu, plunžeru) atbilst plūsmas avotam, jo tā raksturlīkne atbilst funkcijai $Q(t) = \text{const}$. Savukārt dinamiskie sūkņi (centrbēdzes, aksiālie) pēc savām raksturlīknēm atbilst spiediena

ģeneratoram ar mainīgu iekšējo hidraulisko pretestību.

Elektriskajās sistēmās ir divi ārējie avoti – sprieguma (EDS) un strāvas avoti. **Sprieguma avotu** EDS nav atkarīgs no sistēmas īpašībām un stāvokļa, tā iekšējā pretestība $r_0=0$. Praksē tas atbilst sprieguma stabilizatora raksturlīknēm. Nestabilizēto sprieguma avotu EDS nedaudz mainās atkarībā no strāvas lieluma, jo avota iekšējā pretestība nav vienāda ar nulli.

Strāvas avotu radītais EDS ir mainīgs un atkarīgs no sistēmas īpašībām un stāvokļa. Šajā gadījumā parasti tiek uzturēta konstanta strāva. Var uzskatīt, ka strāvas avota iekšējā pretestība ir bezgalīgi liela.

3.1 tabula **Mehānisko, hidraulisko un elektrisko sistēmu ekvivalence**

Mehāniskais lielums	Hidrauliskais lielums	Elektriskais lielums
Pārvietojums (s, x)	Pārvietojums (s, x)	Lādiņš (q)
Ātrums ($v, \dot{x}$)	Plūsma (Q, q)	Strāva (i, I)
Spēks (F)	Spiediens (p)	Spriegums, EDS (u, U, E)
Masa (m)	Masa (m)	Induktivitāte (L)
Atsperes konstante (k)	Šķidruma saspiežamība	1/kapacitāte ($1/C$)
Dempferēšanas koeficients (c)	Dempferēšanas koeficients (c)	Aktīvā pretestība (R)
Potenciālā enerģija	Spiediena un elastības uzkrātā enerģija	Kapacitātē uzkrātā enerģija
Kinētiskā enerģija	Plūsmas ātruma uzkrātā enerģija	Induktivitātē uzkrātā enerģija

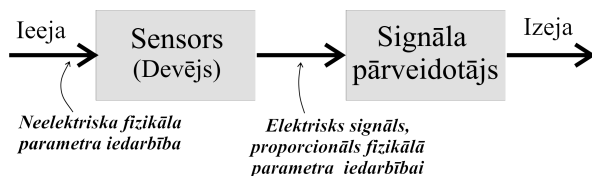
Tabulā 3.1 dota galveno mehānisko, hidraulisko un elektrisko lielumu atbilstība un vienādojumos izmantotie apzīmējumi. Līdzīgā veidā var atrast analogiju arī pneimatiskajām un termodinamiskajām sistēmām.

Praksē reālās mehatroniskās sistēmas sastāv no vairākām atsevišķām sistēmām. Arī sensori ir pieskaitāmi pie mehatroniskām sistēmām, jo pēc savas būtības satur pārveidotājus no neelektriska lieluma uz elektrisku lielumu. Izmantojot iepriekš aprakstīto pieeju, sistēmas matemātiskā modeļa izveidošana notiek, izmantojot vienādu matemātisko aparātu visām apakšsistēmām.

$$\begin{array}{ccc}
 \xrightarrow{q_i} & \boxed{\text{Sistēma} \frac{d}{dt}} & \xrightarrow{q_o}
 \end{array}
 \qquad
 F_s = \frac{q_o}{q_i}
 \qquad
 (3.14)$$

3.10 att. **Sistēma un tās pārvades funkcija**

Uzskatīsim reālo sistēmu par „melno kasti”, uz kuru iedarbojas ārējā iedarbe q_i , ko sauksim par iedarbes funkciju (3.10 att.). Atkarībā no sistēmas īpašībām, tās izejā iegūsim izejas signālu q_o . Attiecību F_s starp izejas un ieejas lielumiem sauc par pārvades funkciju. Parasti to raksta izmantojot Laplasa transformācijas.



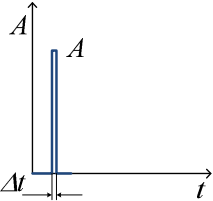
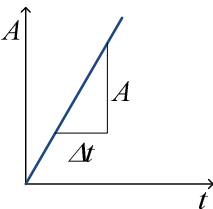
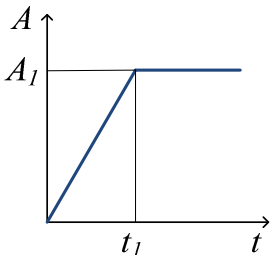
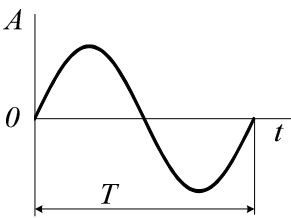
3.11 att. Mērpārveidotājs kā elektromehāniska sistēma

Attēlā 3.11 redzama mērpārveidotāja, kā elektromehāniskas sistēmas uzbūve. Pēc šādas shēmas darbojas daudzi neelektrisko lielumu mērīšanas pārveidotāji, piemēram, spiediena mērpārveidotājs. Tas satur mehānisko daļu (membrānu ar tenzorezistoriem), kura tiek deformēta šķidruma vai gāzes spiediena iedarbībā. Deformācijas rezultātā tenzorezistoru slēguma izejā rodas elektriskais spriegums, kas tiek pastiprināts, filtrēts un kalibrēts atbilstoši nepieciešamajiem pārveidotāja parametriem. To veic signāla pārveidotājs. Lai noteiktu šīs kompleksās sistēmas reakciju ārējās iedarbes rezultātā, jāzina tās matemātiskais modelis un jāveic tā novērtēšana vai eksperimentāli jānosaka ierīces reakcija. Lai to izdarītu uz sistēmu iedarbojas ar matemātiski aprakstāmu iedarbes signālu. Tālāk apskatīsim plašāk lietojamo iedarbes funkciju veidus.

3.2 tabula Iedarbes funkcijas un to raksturojums

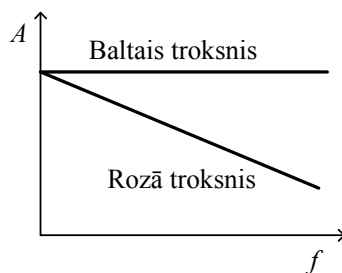
Funkcijas veids	Raksturojums
Kāpņu (angl. <i>step</i>) funkcija	
	Plaši lietota funkcija sistēmu dinamisko parametru noteikšanai. Laika momentā t_0 funkcija vērtība no 0 momentāni pieaug līdz amplitūdai $A=I$. $\left. \begin{array}{ll} t < 0 & A = 0 \\ t > 0 & A = I \end{array} \right\}$
Impulsa funkcija	
	Tas ir teorētisks impulss, kura amplitūda ir bezgalīgi liela, bet ilgums ir bezgalīgi mazs. Praksē iespējama situācija, kad pārslēgšanas momentos var rasties ļoti īsi sprieguma lēcieni, kas ļoti daudzas reizes pārsniedz shēmas spriegumus un impulsa amplitūda uzskatāma par bezgalīgu lielu.

3.2 tabulas turpinājums

Ierobežotā impulsa (Dīraka, delta) funkcija	
	Delta funkcija ir ierobežotā impulsa funkcija ar amplitūdu A. Impulsa garums ir daudzkārt mazāks par sistēmas brīvo svārstību frekvences periodu.
Lineāri mainīgā (angl. <i>ramp</i> , slīpnes) funkcija	
	Funkcija, kuras amplitūda laikā $t=0$ ir $A=0$. Funkcija ir lineāri mainīga un laikā $t=\infty$ tās amplitūda ir $A=\infty$. Funkcijas slīpums ir $A/\Delta t$.
Lineāri mainīgā funkcija ar ierobežojumu (angl. <i>terminated ramp</i>)	
	Funkcija sāk lineāri mainīties laikā $t=0$ un laika momentā $t=t_1$ tās pieaugums apstājas un amplitūda ir A. $\left. \begin{array}{l} t < 0 \quad A = 0 \\ 0 < t < t_1 \quad A = k \cdot t \\ t > t_1 \quad A = A_1 \end{array} \right\}$ Funkcijas sākuma punkts var būt nobīdīts laikā (angl. <i>time delay</i>). Funkcija tiek izmantota dažādu sistēmu testēšanai līdzās pakāpiena funkcijai.
Sinusoidāla (kosinusoidāla) funkcija	
	Sinusoidāla formas iedarbe ir visbiežāk lietotā funkcija elektronisku sistēmu gadījumos. Šīs funkcijas spektrā nav harmonisko sastāvdaļu. Tā satur tikai pamatfrekvenci. Signāla amplitūda $a = A \cdot \sin \omega \cdot t$, kur leņķiskā frekvence $\omega = 2\pi f$ vai $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Akustisko un elektronisko sistēmu testēšanai bieži izmanto balto un rozā troksni. Baltais troksnis satur bezgalīgi plašu harmonisko spektru ar vienādu amplitūdu.

Rozā trokšņa amplitūdu-frekvenču raksturlīknei ir krītošs raksturs (3.12 att.).



3.12 att. „Baltā” un „rozā” trokšņa amplitūdas – frekvences raksturlīknes

3.3. Dinamisko sistēmu kārtā

Nodaļas sākumā noskaidrojām ar ko atšķiras statiskās sistēmas un dinamiskās sistēmas. Precīzāk formulējot jāsaka, ka sistēma eksistē pati par sevi un tai piemīt noteiktas īpašības. Sistēmas dinamisms parādās tikai reakcijā uz ārējo iedarbi. Ja ārējā iedarbe ir laikā nemainīga, piemēram, ja tenzorezistoru spēka sensors ir slogots ar konstantu spēku, tā izejas signāls arī būs laikā nemainīgs. Iespējams arī cits gadījums. Ja spēka sensora jutīgais elements ir pjezoelements, tad konstanta spēka iedarbībā, tā izejas signāls laika gaitā samazināsies līdz nullei.

Uz sistēmu var iedarboties mainīga ārējā iedarbe, piemēram, uz spiediena sensoru iedarbojas sinusoidāli mainīgs spiediens, kura maksimālā amplitūda ilgākā laika periodā nemainās, taču viena svārstību perioda laikā tā mainās pēc sinusa likuma. Šādu procesu sauksim par **stacionāru**. Mērījuma rezultāti būs atkarīgi no sistēmas dinamiskajām īpašībām.

Lai vienkāršotu mērpārveidotāju izvēli dinamisku procesu analizēšanai, visas sistēmas grupē pēc to reakcijas veida uz iedarbes signāliem.

Vispārīgā gadījumā jebkuru mehāniskas vai elektriskas sistēmas reakciju uz iedarbes signāliem varam aprakstīt ar diferenciāliem vienādojumiem izmantojot iepriekš apskatītos sistēmas pamatelementus. Vispārīgā gadījumā izmanto n -tās kārtas diferenciālvienādojumu:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = F(t), \quad (3.15)$$

kur $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ – konstanti koeficienti, kas raksturo sistēmu, x – nosakāmais parametrs, piemēram, sistēmas pārvietojums, $F(t)$ – iedarbes funkcija.

Kompleksās sistēmas apraksta šādu diferenciālvienādojumu sistēmas. Teorētiski n var būt jebkurš skaitlis no 0 līdz ∞ . Praksē vairumā gadījumu reālu sistēmu var

aprakstīt ar otrās kārtas diferenciālvienādojumiem. Lai vienkāršotu aprēķinus, nepieciešams pēc iespējas samazināt vienādojuma kārtu.

Sistēmas reakcija ir atkarīga no tā, kādus pamatelementus (inerciālie, elastīgie, dempferējošie) sistēma satur. Iepriekš noskaidrojām, ka katra atsevišķa elementa matemātiskais modelis ir noteiktas kārtas diferenciālvienādojums. Dinamiskās sistēmas klasificē pēc to kārtas – nultās, pirmās un otrās kārtas.

Nultās kārtas sistēmas apraksta diferenciālvienādojums, kurš satur tikai nultās kārtas diferenciāli:

$$a_0 \frac{d^0 x}{dt^0} = a_0 x = F(t) . \quad (3.16)$$

Pirmās kārtas sistēmas apraksta pirmās kārtas diferenciālvienādojums:

$$a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = F(t) . \quad (3.17)$$

Otrās kārtas sistēmas apraksta otrās kārtas diferenciālvienādojums:

$$a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = F(t) . \quad (3.18)$$

Secinājums: sistēmas kārtu nosaka pēc diferenciālvienādojuma kārtas, kurš apraksta doto sistēmu.

Tālākā izklāstā novērtēsim katras kārtas sistēmas parametrus un tās reakciju uz dažādām ārējām iedarbēm.

3.4. Nultās kārtas sistēma

Nultās kārtas sistēmu apraksta vienādojums (3.17). Kā redzam, tas ir algebrisks vienādojums, no kura izsakām aprēķināmo lielumu x :

$$x = \frac{1}{a_0} F(t) . \quad (3.19)$$

Apzīmēsim $\frac{1}{a_0} = K$ un saucsim to par sistēmas statisko jutību. Lielumam K ir sava

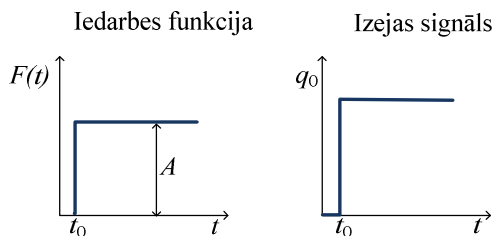
fizikālā jēga, piemēram, mehāniskām sistēmām tas izsaka sistēmas deformāciju statiska spēka iedarbībā.

Ievietojot vienādojumā (3.19), iegūstam:

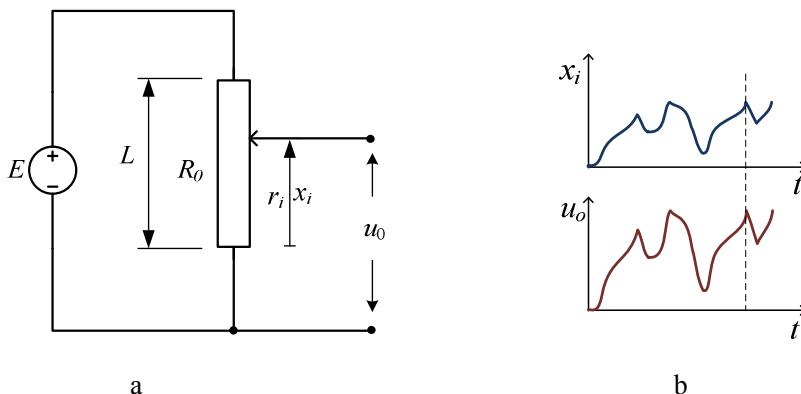
$$x = K \cdot F(t) . \quad (3.20)$$

Redzam, ka starp iedarbes lielumu un sistēmas izejas signālu pastāv lineāra sakarība. No tā varam secināt, ka „0”- kārtas sistēmas ir vislabāk piemērotas sensoru mērīšanas sistēmu veidošanai. Attēlā 3.13 redzama nultās kārtas sistēmas reakcija uz pakāpiena

funkciju. Redzam, ka sistēma pilnībā seko iedarbes funkcijas amplitūdas izmaiņām. Praksē nultās sistēmas parametriem atbilst rezistīvais pārvietojuma devējs.



3.13 att. Nultās kārtas sistēmas reakcija uz pakāpiena funkciju



3.14 att. Potenciometriskā pārvietojuma mērītāja shēma un raksturlieknes

Pieņemsim, ka pārvietojuma devējs ir izveidots kā lineārais potenciometrs ar pretestību R_0 , kas atbilst gājiena garumam L (3.14a att.). Mērāmais attālums ir x_i , kam atbilst pretestība r_i . Pēc Oma likuma var noteikt izejas spriegumu u_0 potenciometra izejā:

$$u_0 = \frac{r_i}{R} \cdot E = \frac{E}{L} \cdot x_i = K \cdot x_i, \quad (3.21)$$

kur $K = E/L$ - devēja statiskā jutība, $V \cdot m^{-1}$.

Ja mērāmais attālums ir laikā mainīgs (3.14b), tad izejas signāls precīzi seko ieejas parametra izmaiņām.

Jāņem vērā, ka potenciometriskais devējs saglabā savas īpašības tikai līdz noteiktai iedarbes funkcijas frekvencei. Katrai ierīcei piemīt noteikta induktivitāte un kapacitāte. Augstāku frekvenču gadījumā šo reaktīvo pretestību lielums kļūst samērojams ar sensora aktīvo pretestību un parādās to ietekme uz sistēmas reakciju. Sistēma pārvēršas par otrās kārtas sistēmu. Parasti potenciometriskos devējus izmanto lēni mainīgu procesu parametru noteikšanai un tādā gadījumā tos var uzskatīt par „0”-kārtas sistēmām.

3.5. Pirmās kārtas sistēma

Pirmās kārtas sistēmas apraksta iepriekš minētais diferenciālvienādojums (3.17):

$$a_1 \cdot \frac{d^1 x}{dt^1} + a_0 \cdot \frac{d^0 x}{dt^0} = F(t).$$

Pārveidosim šo vienādojumu, izdalot abas vienādojuma puses ar a_0 :

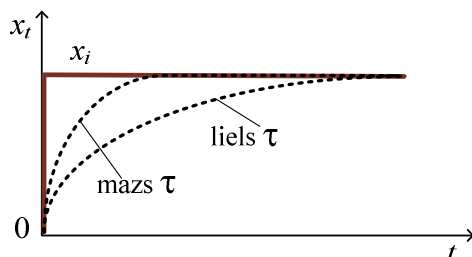
$$\frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{dx}{dt} + x = \frac{1}{a_0} F(t). \quad (3.21)$$

Redzam, ka $\frac{1}{a_0} = K$ un tā ir sistēmas statiskā jutība.

Konstanto lielumu $\frac{a_1}{a_0}$ apzīmēsim ar τ . Iegūstam: $\tau = \frac{a_1}{a_0}$.

Iegūtajai konstantei ir laika mērvienība un to sauc par sistēmas **laika konstanti**.

Lai atrastu diferenciālvienādojuma atrisinājumu, nepieciešams zināt iedarbes funkciju $F(t)$. Pieņemsim, ka uz sistēmu iedarbojas pakāpiena impulss (skatīt tabulu 3.2) ar amplitūdu A . Tādā gadījumā iedarbes funkcija $F(t) = A = x_i$, ja $t > 0$ (3.16 att.).



3.15 att. Pirmās kārtas sistēmas reakcija uz kāpņu impulsu

Diferenciālvienādojuma atrisinājuma sākuma nosacījumi: $x = x_0 = 0$, ja $t = 0$.

Izejas signāla izmaiņu apzīmēsim ar x_t .

Diferenciālvienādojuma atrisinājums atbilst vienādojumam (3.22):

$$x_t = \frac{A}{a_0} + \left(x_0 - \frac{A}{a_0} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.22)$$

Ņemot vērā, ka $x_0 = 0$ un $1/a_0 = K$ un $A = x_i$, varam rakstīt:

$$x_t = K \cdot x_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (3.23)$$

Ievietojot vienādojumā (3.14), nosakām sistēmas pārvades funkciju:

$$\frac{x_t}{K \cdot x_i} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.24)$$

Ievietosim vienādojumā (3.23) laiku $t=\infty$ un noteiksim izejas signālu x_∞ :

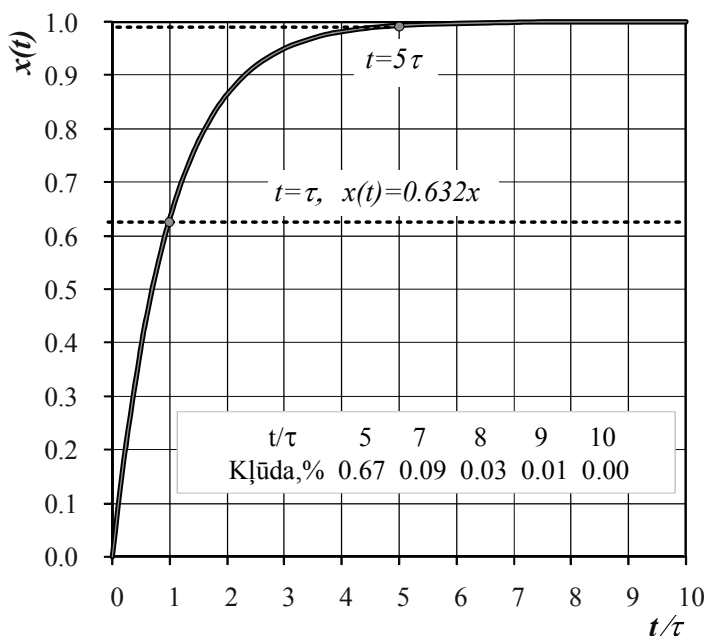
$$x_\infty = K \cdot x_i. \quad (3.25)$$

Vienādojums (3.25) apraksta procesa stacionāro daļu, t.i. situāciju, kad izejas signāls sasniedz savu maksimālo vērtību. Vienādojuma (3.23) iekavās esošā daļa izsaka

procesa nestacionāro daļu. Tas nozīmē, ka izteiksme $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ ir pārejas procesa funkcija. Analizējot šo izteiksmi, secinām, ka pārejas laiks ir atkarīgs tikai no laika konstantes τ vērtības. jo mazāka ir laika konstante, jo īsāks ir procesa pārejas laiks. Attēlā 3.15 ar pārtrauktu līniju parādīta izejas signāla izmaiņa kāpņu impulsa iedarbības rezultātā dažādām sistēmas laika konstantēm.

Lai noteiktu laika konstanti, ievietosim vienādojumā (3.24) izteiksmi (3.25):

$$\frac{x_t}{x_\infty} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.26)$$

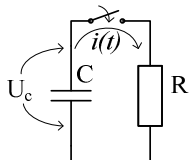


3.16 att. **Pirmās kārtas sistēmas pārejas process**

Pieņemsim, ka $x_\infty=1$ un noteiksim izejas signāla relatīvo izmaiņu, ja laiks $t=\tau$. Aprēķinot iegūstam, ka $x_\tau=0.632$. Tas nozīmē, ka laikā, kas vienāds ar sistēmas laika konstanti, izejas signāls sasniegs 63.2% no savas maksimālās vērtības stacionārā

procesā. Šo īpašību izmanto eksperimentālai sistēmas laika konstantes noteikšanai. Attēlā 3.16 redzama pirmās kārtas sistēmas pārejas procesa raksturlīkne. Par procesa stacionārās daļas sākumu uzskata laiku, kad $t=5\tau$. Ja mērāmā fizikālā lieluma izmaiņas laiks vienāds ar šo lielumu, tad dinamiskā mērījuma kļūda būs 0.67%. Jāņem vērā, ka tā ir tikai viena no kopējās mērījuma kļūdas daļām. Attēlā 3.16 parādīta dinamiskās kļūdas izmaiņa atkarībā no attiecības t/τ .

Praksē pirmās kārtas sistēmām atbilst temperatūras devēji, RC ķēdes un cita ierīces. Kondensatora izlādi caur aktīvo pretestību (3.17 att.) apraksta pirmās kārtas diferenciālvienādojums, kuru atrisinot iegūstam sprieguma izmaiņas likumu uz kondensatora spailēm.



Pieņemsim, ka sākuma stāvoklī, kondensators ir uzlādēts līdz spriegumam U_0 . Ieslēdzot slēdzi, ķēdē plūst strāva un spriegums uz kondensatora spailēm samazinās atbilstoši vienādojumam:

$$U_c(t) = U_0 \cdot e^{-(1/RC)t}. \quad (3.27)$$

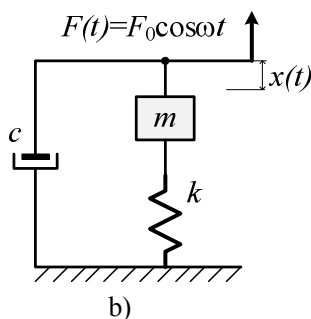
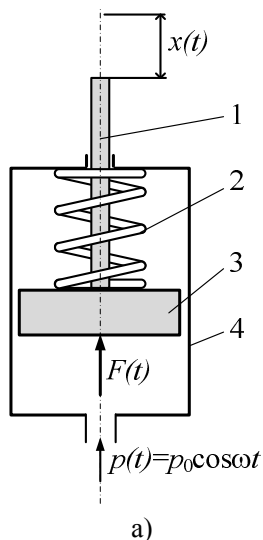
3.17 att. **Kondensatora izlāde**

Slēguma laika konstante ir vienāda ar $\tau = R \cdot C$. Pretestības un kapacitātes slēgumus jeb RC ķēdes plaši izmanto elektroniskajās shēmās.

3.6. Otrās kārtas sistēma

Otrās kārtas dinamiskās sistēmas apraksta vienādojums (3.18):

$$a_1 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = F(t).$$



3.18 att. **Virzuļtipa spiediena sensors (a) un tā modelēšanas shēma (b)**

Mehānikā viena no tipiskām otrās kārtas sistēmām, ir virzulīša tipa spiediena pārveidotājs (3.18a att.).

Spiediena sensors sastāv no korpusa 4, kurā ievietots virzulis 3 ar kātu 1. Virzuli apakšējā stāvoklī notur atsperē 2. Virzulis korpusā ir ievietots blīvi, lai nenotiktu šķidruma noplūde starp korpusu un virzuli. Uz virzuli iedarbojas šķidruma spiediens $p(t)$ un rada spēku $F(t)$. Pieņemsim, ka spiediens un arī spēks laikā mainās pēc likuma $F(t) = p_0 \cdot A_v \cos \omega t = F_0 \cos \omega t$, kur A_v – virzuļa laukums, F_0 – spēka maksimālā vērtība kosinusoīdā.

Pieņemsim, ka atsperes elastības koeficients ir k un atsperē ir bez masas. Virzuļa masa ir m . Virzuļa pārvietojums spiediena spēka ietekmē ir $x(t)$.

Sistēmas modelēšanas shēma, atbilstoši otrās kārtas sistēmai, ir redzama attēlā 3.18b. Modelis satur visus sistēmas dinamiskos elementus: inerciālo – virzuļa un tam pievienoto elementu reducēto masu m , elastīgo – atsperes elastību k un dempferējošo elementu, ko raksturo viskozā berze ar koeficientu c .

Ievietojam vienādojumā (3.18) atbilstošos lielumus no modelēšanas shēmas un iegūstam vienādojumu (3.28):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k \cdot x = F_0 \cos \omega t. \quad (3.28)$$

Iegūtais vienādojums ir otrās kārtas lineārs, nehomogēns diferenciālvienādojums ar konstantiem koeficientiem, kura atrisinājumu izsaka formula (3.29):

$$x(t) = \frac{\left(\frac{F_0}{k}\right) \cos(\omega t - \phi)}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \right]^2 + \left[2 \left(\frac{c}{c_c}\right) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.29)$$

kur ϕ - fāzu nobīdes leņķis, rad, ω_n – sistēmas brīvo svārstību leņķiskā frekvence, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, c_c – kritiskais dempferēšanas koeficients.

Sistēmas brīvo svārstību frekvenci aprēķina pēc formulas (3.30):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3.30)$$

Kritisko dempferēšanas koeficientu aprēķina pēc formulas (3.31):

$$c_c = 2\sqrt{m \cdot k}. \quad (3.31)$$

Abi iepriekšminētie parametri raksturo konkrēto sistēmu un ir atkarīgi no sistēmas reducētās masas un elastības koeficienta attiecības. Abi minētie parametri ļoti būtiski ietekmē sistēmas izejas lielumu $x(t)$.

Vienādojumā 3.29 frekvenču attiecību apzīmēsim ar $\alpha = \frac{\omega}{\omega_n}$ un dempferēšanas

koefficientu attiecību ar $\beta = \frac{c}{c_c}$.

Lielumu β sauc par **dempferēšanas pakāpi**.

Lielums F_0/k izsaka statisko novirzi, ja sistēma slogota ar konstantu spēku F_0 . Ņemot vērā, ka izteiksme $\cos(\omega t - \phi)$ vienādojumā 3.29 izsaka sinusoidāla signāla izmaiņu, tā amplitūdas vērtību aprēķina pēc formulas:

$$x_0 = \frac{\left(\frac{F_0}{k}\right)}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \right]^2 + \left[2 \left(\frac{c}{c_c}\right) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (3.32)$$

Ievietojot vienādojumā 3.32 iepriekš pieņemtos apzīmējumus, iegūstam:

$$x_0 = \frac{\left(F_0/k\right)}{\sqrt{\left(1 - \alpha^2\right)^2 + \left(2\alpha \cdot \beta\right)^2}}. \quad (3.33)$$

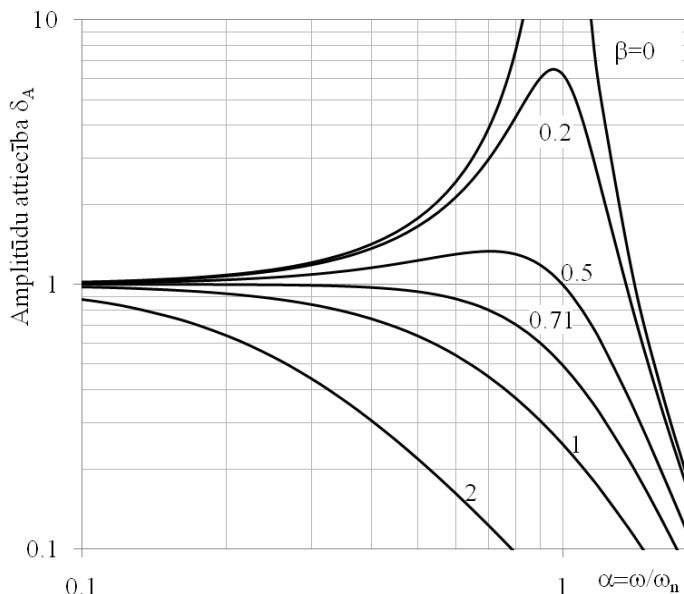
Sistēmas dinamisko kļūdu raksturo signāla amplitūdas relatīvā izmaiņa salīdzinājumā ar statisko novirzi. Apzīmēsim relatīvo amplitūdas izmaiņu sistēmas dinamisko īpašību rezultātā ar δ_A , un izteiksim no vienādojuma 3.33, pārveidojot to bezdimensionālā formā:

$$\delta_A = \frac{x_0}{\left(F_0/k\right)} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \alpha^2\right)^2 + \left(2\alpha \cdot \beta\right)^2}}. \quad (3.34)$$

Kā redzam no vienādojuma 3.34, relatīvā amplitūdas izmaiņa ir atkarīga no sistēmas brīvo svārstību frekvences, ko ievērtē lielums α , un dempferēšanas pakāpes β .

Sistēmas relatīvā izejas signāla amplitūdas izmaiņa atkarībā no uzspiesto un brīvo svārstību frekvenču attiecības dažādiem dempferēšanas koeficientiem redzama attēlā 3.19. Ja $\alpha < 0.3$, tad sistēmas svārstību amplitūda tuvojas statiskās slodzes amplitūdai, $\delta_A \approx 1$. Frekvenču attiecībai α tuvojoties $\alpha \approx 1$, svārstību amplitūda izmainās atkarībā no dempferēšanas pakāpes. Ja dempferēšanas nav, t.i. $\beta = 0$, iestājas rezonanse un svārstību amplitūda pieaug līdz bezgalībai. Praksē vienmēr pastāv berze un līdz ar to arī noteikta dempferēšanas pakāpe. Piemēram, ja $\beta = 0.2$, tad svārstību amplitūda pieaug gandrīz 6.5 reizes. Svārstību frekvence, pie kuras novērojama maksimālā

svārstību amplitūda ir atkarīga no dempferēšanas pakāpes, un, pieaugot tai, maksimuma frekvence samazinās. Palielinoties dempferēšanas pakāpei virs 0.7, svārstību amplitūdas palielināšanās virs $\delta_A=1$ nav novērojama.



3.19 att. Sistēmas amplitūdas – frekvenču raksturlīknes

3.19 attēlā redzamajā amplitūdu – frekvenču raksturlīknē izšķir raksturīgus apgabalus:

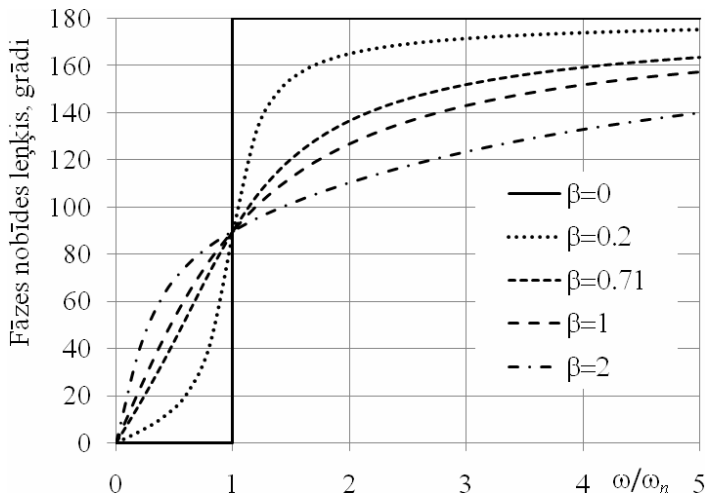
- ✓ pirmsrezonanses apgabals, $\alpha < 0.3$,
- ✓ rezonanses apgabals, $0.3 < \alpha < 1.5$,
- ✓ aizrezonanses apgabals, $\alpha > 1.5$.

Pirmsrezonanses apgabalā sistēmas reakcija uz ierosinošo svārstību frekvenci atbilst statiskam režīmam un svārstību relatīvā amplitūda $\delta_A \approx 1$. Tas nozīmē, ka sistēma spēj izsekot mainīgā parametra iedarbībai, un rezultējošā amplitūda un arī fāze atbilst faktiskajai fizikālā lieluma vērtībai dotajā laika momentā. Lielākā daļa sensoru ir paredzēti darbināšanai tieši šajā zonā.

Rezonanses apgabalā sistēmas izejas signāla amplitūda ir atkarīga praktiski tikai no dempferēšanas pakāpes. Ja dempferēšanas pakāpe ir mazāka par 0.2, svārstību amplitūda strauji palielinās un var novest sistēmu pie avārijas. Rezonanses apgabalu mērīšanas sistēmās izmanto īpašos gadījumos, piemēram, svārstību kontūros, rezonanses frekvences mērītājos u.c.

Aizrezonanses apgabalā izejas signāla amplitūda strauji samazinās, un, jau pie $\alpha=3$, relatīvā amplitūda ir tikai 1% no sākotnējās. Šo apgabalu mērīšanas sistēmās izmanto tikai īpašos gadījumos, piemēram, seismogrāfos.

Vienlaicīgi ar amplitūdas izmaiņu atkarībā no frekvenču attiecības α , mainās arī fāzu nobīde starp ieejas (mērāmo) lielumu un izejas signālu (3.20 att.). Tas rada papildus mērījuma kļūdas.



3.20 att. Otrās kārtas sistēmas fāzu – frekvenču raksturliknes

Sistēmas reakciju vislabāk novērtēt iedarbojoties uz to ar kāpņu funkcijas (*step*) iedarbi. Diferenciālvienādojuma (3.18) atrisinājuma sākuma nosacījumi: $x=x_0=0$, ja $t=0$ un $dx/dt=0$, ja $t=0$. Izejas signāla izmaiņu apzīmēsim ar x_t . Ņemot vērā, ka $x_0=0$ un $l/a_0=K$ un $A=x_i$, izteiksim sistēmas pārvades funkciju. Vienādojuma atrisinājums ir atkarīgs no sistēmas dempferēšanas pakāpes β .

Iegūstam trīs atrisinājuma veidus:

- ✓ dempferēšana pārsniedz kritisko, $\beta > 1$:

$$\frac{x_t}{K \cdot x_i} = -\frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}}{2\sqrt{\beta^2 - 1}} e^{(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})\omega_n t} + \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 1}}{2\sqrt{\beta^2 - 1}} e^{(-\beta - \sqrt{\beta^2 - 1})\omega_n t} + 1, \quad (3.35)$$

- ✓ kritiskā dempferēšana, $\beta = 1$:

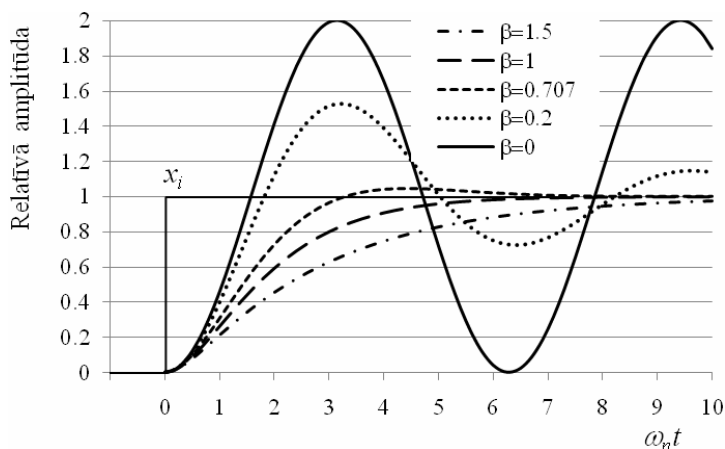
$$\frac{x_t}{K \cdot x_i} = -(1 + \omega_n \cdot t) \cdot e^{(-\omega_n t)} + 1, \quad (3.36)$$

- ✓ dempferēšana mazāka par kritisko, $\beta < 1$:

$$\frac{x_t}{K \cdot x_i} = -\frac{e^{-\beta \omega_n t}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sin(\sqrt{1 - \beta^2} \cdot \omega_n \cdot t + \phi) + 1. \quad (3.37)$$

$$\text{Fāzu nobīde: } \phi = \arcsin \sqrt{1 - \beta^2}, \text{ radiāni.} \quad (3.38)$$

Relatīvo mērāmā signāla amplitūdu apzīmēsim ar x_i . Izejas signāla amplitūdas izmaiņu uzskatāmi attēlot kā funkciju no $\omega_n t$, kas izsaka vektora pagriezienu leņķi radiānos. Tādā gadījumā attēlā 3.21 redzamās līknes ir piemērojamas jebkurai sistēmas brīvo svārstību frekvencei.



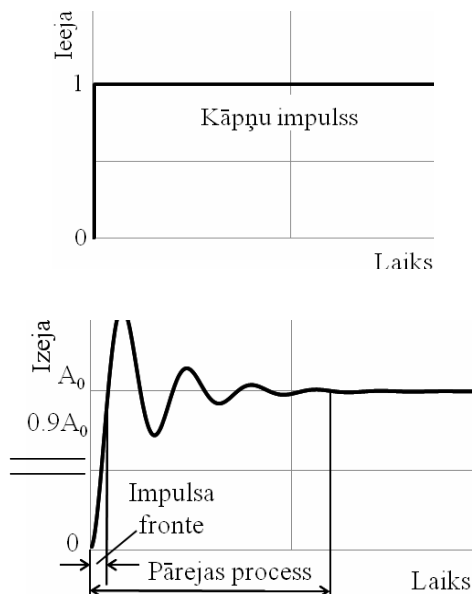
3.21 att. Otrās kārtas sistēmas reakcija uz kāpņu impulsu

Redzam, ka sistēmas reakcija uz pakāpiena impulsu mainās atkarībā no sistēmas dempferēšanas pakāpes. Pēc ieejas impulsa iedarbības uz sistēmu, izejas signāla pieaugums sākas pakāpeniski. Ja sistēmas dempferēšanas pakāpe $\beta=0$, tad sistēmas izejā parādās nerimstošas sinusoidālas svārstības.

Ja dempferēšanas pakāpe ir $\beta=1$, tad iestājas kritiskā dempferēšana, un sistēma pārvēršas par aperiodisku. Šajā gadījumā izejas signāla amplitūda asimptotiski tuvojas uzdotajai amplitūdai bez svārstībām. Mērīšanas sistēmās ir svarīgs laika periods, kurā izejas signāls sasniedz statisko izejas signāla līmeni. Šis laiks nosaka maksimālo mērāmā lieluma frekvenci, kuru iespējams noteikt bez dinamiskās kļūdas. Attēlā 3.21 redzams, ka visīsākais laiks, kad izejas signāls sasniedz relatīvo vērtību 1, ir sistēmai bez dempferēšanas. Taču tālāk sākas nerimstošas svārstības un mērāmā lieluma vērtība nav nosakāma.

Pieaugot dempferēšanas koeficientam, izejas signāla pieauguma laiks palielinās, bet svārstības kļūst rimstošas. Praktiski tas nozīmē, ka derīgajam izejas signālam pārejas procesā uzklājas rimstošas parazitiskas svārstības. Praksē to sauc par „zvanīšanu” (3.22 att.).

Impulsa frontes laiks ir vienāds ar laika periodu no iedarbes sākuma līdz brīdim, kad signāla amplitūda sasniedz 90% no stacionārā signāla amplitūdas A_0 . Pārejas procesa beigas nosaka pēc svārstību amplitūdas samazināšanās līdz pieļaujamās kļūdas robežai.



3.22 att. Izejas signāla laika aizture un „zvanišana”

„Zvanišanas” impulsa frekvence ω_z ir atkarīga no dempferēšanas frekvences un ir aprēķināma pēc sekojošas formulas:

$$\omega_z = \omega_n \sqrt{1 - \beta^2} . \quad (3.39)$$

Praksē šī parādība bieži sastopama signāla apstrādes traktos, pastiprinātājos, aktīvajos filtros un citur. Tam par iemeslu parasti dažādas parazitiskās pozitīvās atgriezeniskās saites.

3.7. Mērījumu dinamiskās kļūdas

Teorētiski labākā dempferēšanas pakāpe ir 0.707, pie kuras instrumentam ir visplašākā mērāmā signāla spektra josla pie noteiktas dinamiskās kļūdas vērtības. Rūpnieciski ražoto mērpārveidotāju dempferēšanas pakāpe parasti ir robežās no $\beta=0.6$ līdz 0.7.

Lai samazinātu mērījumu kļūdu, mērpārveidotājiem un visai mērīšanas sistēmai kopumā jādarbojas statiskā režīmā. Nodaļas sākumā definējam, ka statisks process būs tādā gadījumā, ja uz sistēmu iedarbosies nemainīgi vai **lēni mainīgi** spēki vai parametri. Šī definīcija nedod iespēju novērtēt, kad mainīgais parametrs ir uzskatāms par lēni mainīgu, un kad par ātri mainīgu. Procesa dinamiskumu raksturo relatīvā amplitūdas izmaiņa, ko aprēķina pēc vienādojuma 3.34. Pieņemot, ka dempferēšanas pakāpe $\beta=0$, iegūstam dinamiskuma koeficienta izteiksmi:

$$\mu_d = \left| \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \right|. \quad (3.40)$$

Process ir statisks, ja dinamiskuma koeficients ir $\mu_d=1$. Kā redzam no vienādojuma (3.40), tas ir iespējams tikai gadījumā, ja $\omega=0$. Lai definētu lēni mainīga parametra robežu, pieņemam pieļaujamo kļūdu, par kuras lielumu izejas parametri var atšķirties no ideālā gadījuma. Pieņemsim, ka pieļaujamā dinamiskuma kļūda ir 5%. Tādā gadījumā pieļaujamais dinamiskuma koeficients būs $\mu_d=1.05$. No formulas (3.40) izsakām frekvenču attiecību, un, aprēķinot iegūstam, ka šajā situācijā process uzskatāms par statistisku, ja uzspiesto svārstību frekvence ω ir 4.59 reizes mazāka par sistēmas brīvo svārstību frekvenci ω_n .

Ja sistēmas dempferēšanas pakāpe $\beta>0$, tad sistēmas dinamiskuma koeficients mainās atkarībā no dempferēšanas pakāpes.

Izvēloties mērpārveidotājus dinamiski mainīgu lielumu mērīšanai, svarīgi novērtēt dinamisko kļūdu. Mērpārveidotāja brīvo svārstību frekvence un dempferēšanas pakāpe parasti ir dota tehniskajā specifikācijā. Dinamisko kļūdu nosaka no vienādojuma 3.34. Amplitūdas relatīvo izmaiņu, kas radusies dinamisko procesu rezultātā, var izteikt sekojoši: $\delta_A=\mu+1$, kur μ – dinamiskā kļūda.

Ievietojam δ_A izteiksmi vienādojumā 3.34 un izsakām dinamisko kļūdu μ :

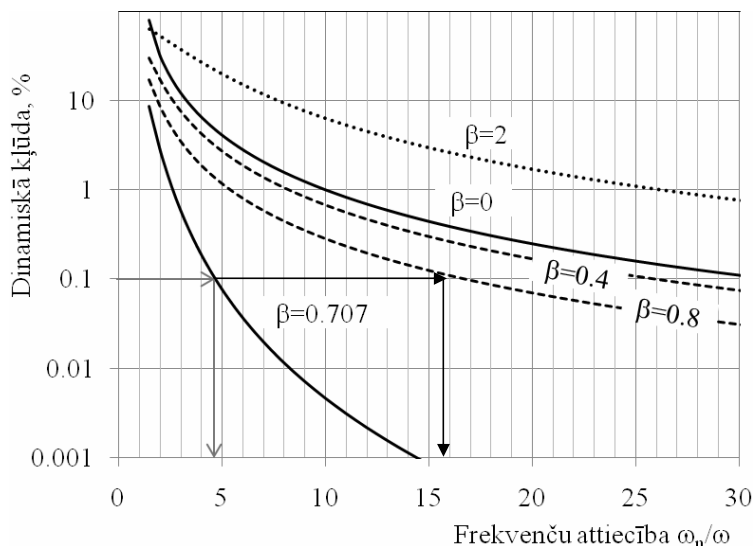
$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1 - \alpha^2)^2 + (2\alpha \cdot \beta)^2}} - 1. \quad (3.41)$$

Pareizinot iegūto kļūdu ar 100, iegūstam dinamisko kļūdu procentos.

Attēlā 3.23 redzama dinamiskās kļūdas atkarība no brīvo svārstību frekvences attiecības pret uzspiesto svārstību frekvenci. Pēc šī grafika varam noteikt, cik reižu pārveidotāja brīvo svārstību frekvencei jābūt lielākai par mērāmā signāla spektra augstāko frekvenci, lai dinamiskā kļūda nepārsniegtu uzdoto vērtību. Dinamisko kļūdu ietekmē sistēmas dempferēšanas koeficients. Vismazākā kļūda ir, ja dempferēšanas pakāpe ir $\beta=0.707$. No grafika redzam, ka, pieņemot pieļaujamo dinamisko kļūdu 0.1% un $\beta=0.707$, pārveidotāja brīvo svārstību frekvencei jābūt vismaz 4.7 reizes lielākai par mērāmā lieluma augstāko frekvenci. Savukārt, ja $\beta=0.8$, tad frekvenču attiecībai jābūt vismaz 15.9.

Dempferēšanas pakāpes palielināšana virs kritiskās ($\beta>1$), ievērojami pasliktina sistēmas ātrdarbību un palielina dinamisko kļūdu (3.23 att., $\beta=2$).

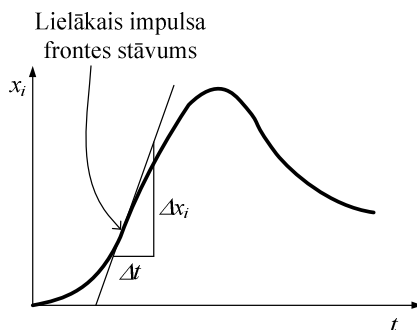
Reālās sistēmās iedarbes funkcija parasti ir impulsveida ar plašu spektrālo sastāvu un mainīgām impulsa frontēm. Lai novērtētu dinamiskās kļūdas lielumu, izmanto vairākas metodes.



3.23 att. **Dinamiskās kļūda atkarībā no frekvences**

Ja iedarbes funkcija ir periodiska ar plašu frekvenču spektru, jānoskaidro spektra augstākā frekvence, kuras mērījuma dinamiskā kļūda ir definēta. Tā kā signāla spektra augstākās frekvences svārstībām ir sinusoidāla forma (pēc Furjē transformācijām), tad mērpārveidotāja parametrus izvēlamies pēc iepriekš aprakstītās metodes sinusoidālai iedarbei.

Ja uz sistēmu iedarbojas neperiodiski impulsi vai vienreizējs impulss, sistēmas reakciju nosaka impulsa frontes lielākais stāvums. Šajā vietā būs vislielākā dinamiskā kļūda (3.24 att.). Parasti šādi mērījumi tiek veikti nosakot mehāniskas sistēmas pārejas procesa parametrus, piemēram, hidrocilindra kustības ātruma pieaugums ieslēdzot plūsmas sadalītāju.



3.24 att. **Iedarbes impulsa frontes stāvums**

Apzīmēsim lielāko frontes stāvumu ar $\dot{x}_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta t}$. (3.42)

Iegūtā funkcija ir slīpnes (*ramp*) funkcija, kuras amplitūda mainās pēc likuma:

$$F(t) = K \cdot \dot{x}_i \cdot t, \quad (3.43)$$

kur K – sistēmas statiskā jutība, t – laiks.

Ievietojam iegūto funkciju diferenciālvienādojumā (3.18) un atrisinām vienādojumu atbilstoši sekojošiem sākuma nosacījumiem: $x_0=0$, ja $t=0$.

Līdzīgi kā iepriekš aprakstītajā pakāpiena funkcijas iedarbībā, arī šeit, atkarībā no dempferēšanas pakāpes, ir iespējami trīs diferenciālvienādojuma atrisinājumi. Iepriekš noskaidrojām, ka dinamiskā kļūda savu minimumu sasniedz, ja dempferēšanas pakāpe $\beta \approx 0.7$. Tāpēc vienādojuma atrisinājumu analizēsīm tikai dempferēšanas pakāpei, kas mazāka par kritisko, t.i. $0 \leq \beta < 1$.

Vienādojuma atrisinājumu izsaka formula:

$$\frac{x_t}{K} = \dot{x}_i \cdot t - \frac{2\beta \dot{x}_i}{\omega_n} \left[1 - \frac{e^{-\beta \cdot \omega_n \cdot t}}{2\beta \sqrt{1-\beta^2}} \sin(\sqrt{1-\beta^2} \cdot \omega_n \cdot t + \phi) \right]. \quad (3.44)$$

$$\text{Fāzu nobīde: } \phi = \arctg \frac{2\beta \sqrt{1-\beta^2}}{2\beta^2 - 1}. \quad (3.45)$$

Pārveidosim vienādojumu bezdimensionālā formā izdalot abas puses ar $\dot{x}_i \cdot t$, iegūstam sekojošu izteiksmi:

$$\frac{x_t}{K \cdot \dot{x}_i \cdot t} = 1 - \frac{2\beta}{\omega_n \cdot t} \left[1 - \frac{e^{-\beta \cdot \omega_n \cdot t}}{2\beta \sqrt{1-\beta^2}} \sin(\sqrt{1-\beta^2} \cdot \omega_n \cdot t + \phi) \right]. \quad (3.46)$$

No vienādojuma (3.46) izsakām dinamisko kļūdu μ_i :

$$\mu_i = \frac{x_t}{K \cdot \dot{x}_i \cdot t} - 1 = -\frac{2\beta}{\omega_n \cdot t} \left[1 - \frac{e^{-\beta \cdot \omega_n \cdot t}}{2\beta \sqrt{1-\beta^2}} \sin(\sqrt{1-\beta^2} \cdot \omega_n \cdot t + \phi) \right]. \quad (3.47)$$

Pārveidojot iegūstam:

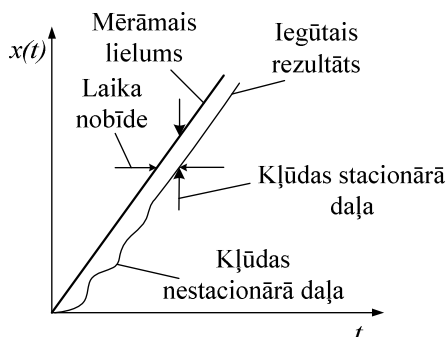
$$\mu_i = -\frac{2\beta}{\omega_n \cdot t} + \frac{e^{-\beta \cdot \omega_n \cdot t}}{\omega_n \cdot t \sqrt{1-\beta^2}} \sin(\sqrt{1-\beta^2} \cdot \omega_n \cdot t + \phi). \quad (3.48)$$

Dinamiskā kļūda sastāv no divām daļām – stacionārās un nestacionārās daļas.

Stacionārā daļa $\frac{2\beta}{\omega_n \cdot t}$ izsaka signāla pieauguma kļūdu, kas rodas no signāla pārbīdes laikā. Redzam, ka šī kļūdas daļa ir atkarīga no dempferēšanas pakāpes. Ja $\beta=0$, tad arī kļūda vienāda ar nulli.

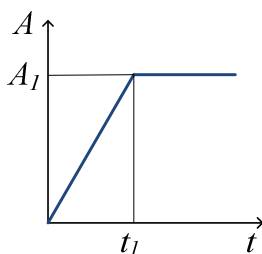
Kļūdas nestacionārā daļa izpaužas kā svārstību process, kas uzklājas signāla

izmaiņas līknei (3.25 att.). Šo kļūdas daļu apraksta otrs saskaitāmais vienādojumā (3.48). Tas apraksta rimstošu sinusoidālu svārstību procesu.



3.25 att. Lineāri mainīga procesa mērīšanas kļūdas

No mērīšanas viedokļa mūs interesē maksimālā kļūda. Praksē funkcijas pieauguma process nevar turpināties bezgalīgi. Tāpēc maksimālo kļūdu noteiksim, pieņemot, ka procesu attēlo slīpnes funkcija ar ierobežojumu (3.26 att.). Pieņemsim, ka funkcijas pieaugums beidzas laikā t_1 .



3.26 att. Slīpnes funkcija ar ierobežojumu

Sistēmas brīvo svārstību leņķisko frekvenci izteiksim caur svārstību periodu:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T}, \quad (3.49)$$

kur T – brīvo svārstību periods.

Vienādojumā ieejošo lielumu $\omega_n t$ pārveidosim

$$\text{sekojoši: } \omega_n t = 2\pi \cdot \frac{t_1}{T}.$$

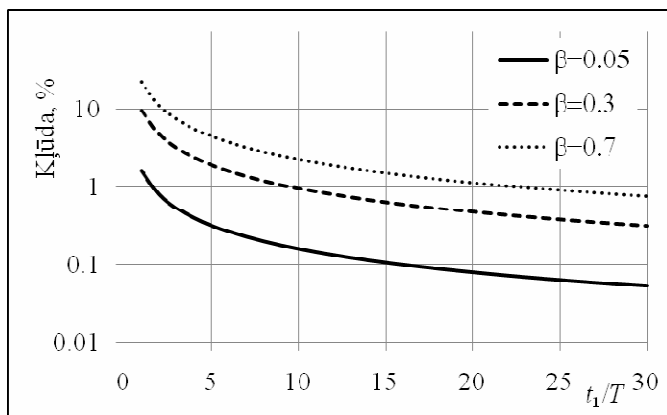
Noteiksim iespējamās dinamiskās kļūdas daļas ierobežota pieauguma slīpnes funkcijai.

Procesa stacionāro dinamiskās kļūdas daļu aprēķinām pēc formulas:

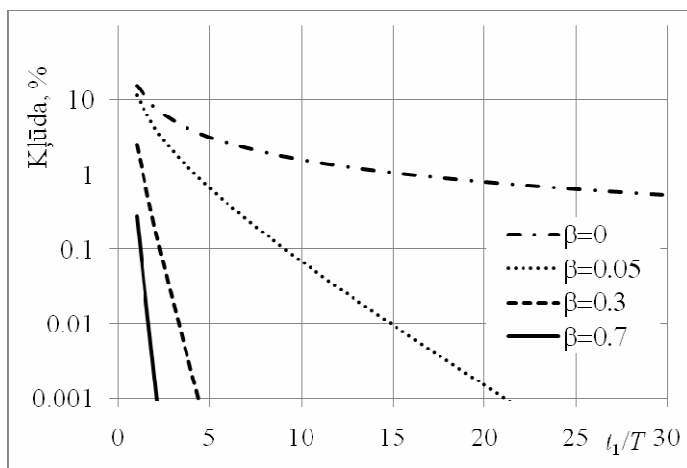
$$\mu_{istac} = \frac{2\beta}{2\pi \cdot \frac{t_1}{T}}. \quad (3.50)$$

Kļūdas stacionārās daļas izmaiņas līkne atkarībā no attiecības t_1/T dažādām dempferēšanas pakāpēm, redzama attēlā 3.27. Kļūda ir vienāda ar nulli, ja sistēmas dempferēšanas pakāpe ir nulle. Praksē šāda situācija nav iespējama, tāpēc jāizvēlas kompromisa variants, vadoties no pieļaujamās kļūdas lieluma.

Dinamiskās kļūdas nestacionārā daļa sasniedz savu maksimālo vērtību, ja izteiksmē esošā sinusa funkcija ir vienāda ar vienu.



3.27 att. **Dinamiskās kļūdas stacionārā daļa**



3.28 att. **Dinamiskās kļūdas nestacionārā daļa**

Līdz ar to dinamiskās kļūdas nestacionārā daļa nepārsniedz lielumu pēc formulas 3.51:

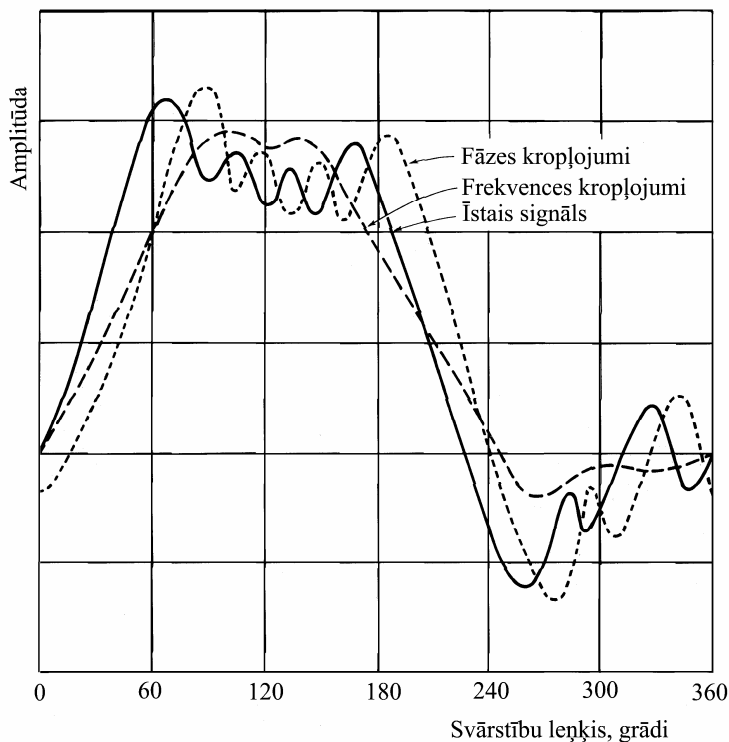
$$\mu_{ipār} = \frac{e^{-2\pi\beta\frac{t_1}{T}}}{2\pi\frac{t_1}{T}\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (3.51)$$

Kļūdas nestacionārās daļas izmaiņas līkne atkarībā no attiecības t_1/T dažādām dempferēšanas pakāpēm, redzama attēlā 3.28. Kļūda strauji samazinās, palielinoties sistēmas dempferēšanas pakāpei un attiecībai t_1/T .

Nestacionārā kļūdas daļa, salīdzinājumā ar stacionāro kļūdas daļu, ir ievērojami mazāka. Neperiodisku procesu mērīšanā vēlams izvēlēties pārveidotājus ar mazāku dempferēšanas pakāpi. Sensora brīvo svārstību periodam jābūt vismaz 20 reizes mazākam par impulsa frontes pieauguma laiku. Tas nodrošinās dinamisko kļūdu mazāku par 1%.

Signālu kropļojumi

Pieņemsim, ka mērāmais lielums ir periodisks impulsveida signāls, kura formu apraksta Furjē transformāciju rezultātā iegūta sinusoidālu signālu summa. Reālās situācijās signāla spektrs var būt ļoti plašs, vairāk par desmit harmonikām.



3.29 att. Signāla frekvenču un fāzu kropļojumi

Iepriekš noskaidrojām, ka otrās kārtas dinamiskā sistēma rada izmaiņas signāla formā un amplitūdā, kas izpaužas kā mērījuma kļūdas. Attēlā 3.29 redzam divu veidu kropļojumus, kas rodas signālu apstrādes rezultātā.

Frekvenču kropļojumi rodas, ja sistēmas frekvenču caurlaides josla ir pārāk šaura. Tādā gadījumā samazinās spektra augstāko harmoniku amplitūda, vai arī tās pazūd pavisam. Impulsa forma nogludinās un amplitūda izmainās atbilstoši zemāko spektra sastāvdaļu amplitūdai.

Fāzu kropļojumi izpaužas, kā signāla nobīde laikā. To rada sistēmas dempferēšanas pakāpe un pirmās kārtas dinamiskie elementi. Atsevišķos gadījumos fāzu kropļojumi var neizmainīt signāla amplitūdu, bet tikai nobīdīt to laikā.

4. Sensoru darbības fizikālie principi

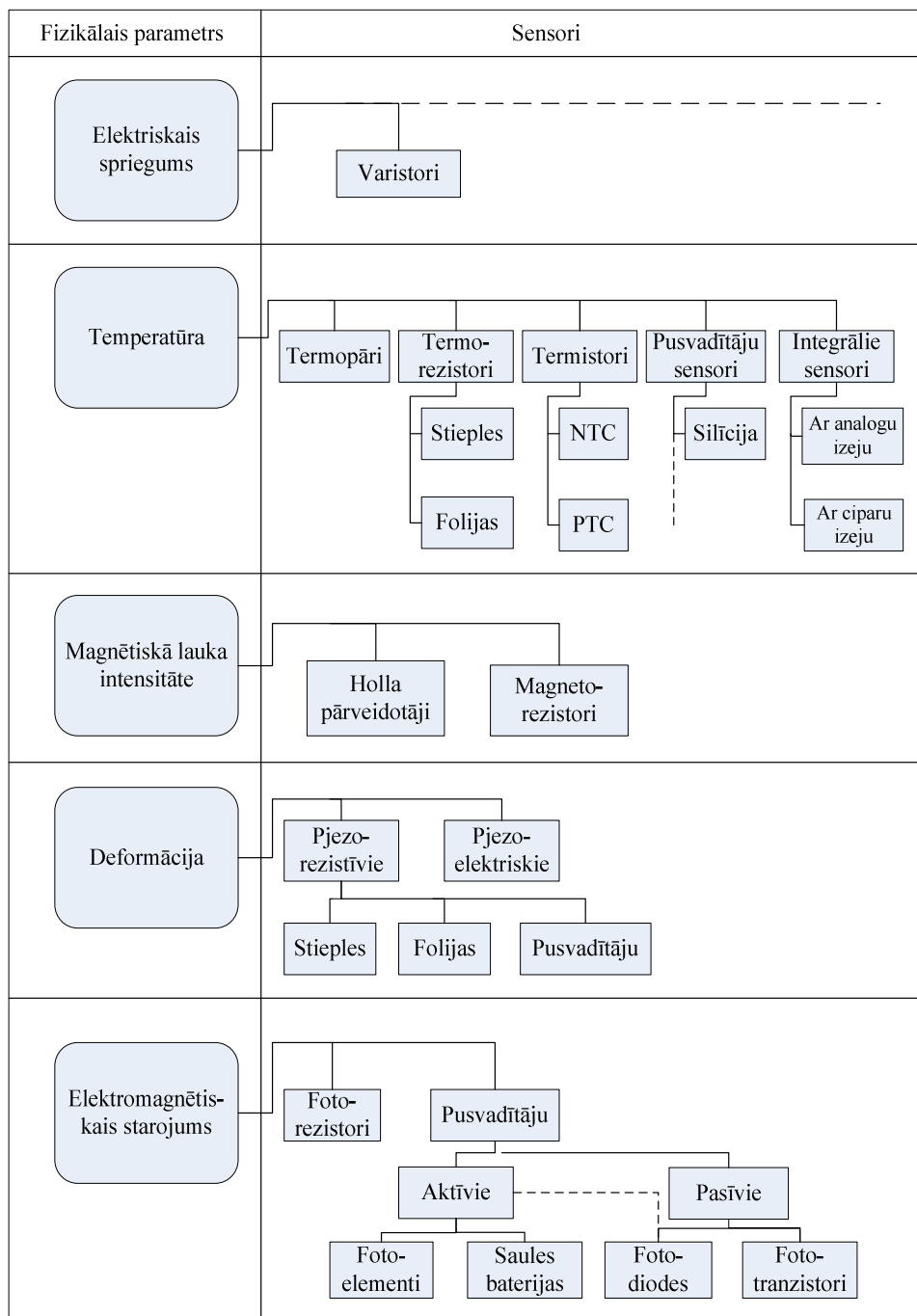
Iepriekšējās nodaļās noskaidrojām, ka jebkuras mērīšanas sistēmas pamatelements ir sensors. Par **sensoru** sauksim ierīci, kas pārveido vienu (mērāmo) fizikālo lielumu citā (nolasāmā) fizikālā lielumā. Piemēram, dzīvsudraba termometrs pārveido temperatūras izmaiņu dzīvsudraba stabiņa garuma izmaiņā, kuru mēs ērti varam salīdzināt ar skalu un noteikt mērāmo temperatūru. Temperatūru varam mērīt arī ar termopāri. Izmainot temperatūru vienam no termopāra galiem, tā vaļējā galā ģenerēsies elektriskais spriegums proporcionāls temperatūru starpībai starp termopāra galiem. Izmērot šo spriegumu ar jebkuru milivoltmetru, mēs varam noteikt temperatūru. Atšķirība starp šiem sensoriem ir tāda, ka otrajā gadījumā sensora izejas signāls ir elektriskas dabas.

Ir zināmi ļoti daudzi sensori, kuri pārveido neelektriskus fizikālus parametrus elektriskos lielumos. Šādus sensorus sauc par **mērpārveidotājiem, devējiem vai adapteriem**. Angļu valodā lieto apzīmējumus *sensor, transducer, transmitter, pick-up device* un citus. Krievu valodā lieto terminus *датчик, преобразователь* un citus. Turpmākā izklāstā mēs lietosim terminus mērpārveidotājs un devējs, kā arī sensors, ar to apzīmējot sensoru ar elektrisku izeju. Termins mērpārveidotājs vairāk attiecas uz sensoriem, kurus izmanto tieši fizikālā lieluma analogai mērīšanai. Parasti tiem ir lineāra izejas raksturlīkne.

Sensorus var iedalīt **pasīvos** un **aktīvos** sensoros. Pasīviem sensoriem mērāmo lielumu noteikšanai ir nepieciešama papildus enerģija, bet aktīvie sensori paši ģenerē elektrisko strāvu vai spriegumu. Piemēram, termopāris siltuma iedarbībā ģenerē elektrisko signālu, kurš ir proporcionāls temperatūru starpībai starp termopāra galiem.

Pasīvie mērpārveidotāji izmaina savas elektriskās īpašības ārējas enerģijas ietekmē. Piemēram, foto rezistors izmaina savu pretestību saņemot gaismas starojumu. Rezultātā strāva caur foto rezistoru izmainās. Šajā gadījumā varam teikt, ka elektriskais izejas signāls ir atkarīgs no gaismas enerģijas daudzuma, ar kuru foto rezistors tika apstarots.

Sensorus var iedalīt arī pēc fizikālā lieluma, kuru tas uztver. Biežāk lietoto sensoru klasifikācija pēc fizikālā parametra dota 4.1 attēlā.



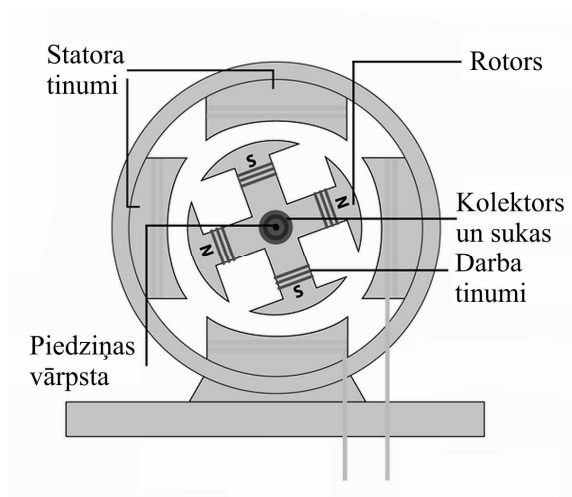
4.1 att. Sensoru klasifikācija

4.1. Aktīvie mērpārveidotāji

Aktīvie mērpārveidotāji tiek definēti kā elementi, kuri ģenerē elektrisku spriegumu spēka vai enerģijas iedarbībā. Mērpārveidotājos signāla ģenerēšanai izmanto sekojošus fizikālus efektus:

- ✓ elektromehānisko,
- ✓ foto elektrisko,
- ✓ pjezoelektrisko,
- ✓ termoelektrisko,
- ✓ Vīganda.

Elektromehānisko pārveidotāju darbības princips balstās uz Faradeja indukcijas likumu, kurš nosaka, ka vadītājam pārvietojoties magnētiskajā laukā uz tā galiem inducējas EDS. Minētais princips parasti tiek izmantots elektriskajos ģeneratoros. Nelielas jaudas līdzstrāvas ģeneratorus sauc par tahoģeneratoriem un izmanto leņķiskā ātruma mērīšanai.



4.2 att. **Tahoģenerators** uzbūve

Tahoģenerators (4.2 att.) sastāv no rotora un statora. Parasti rotora tinumi ir paredzēti sprieguma noņemšanai, bet statora tinumi kalpo ierosmes magnētiskā lauka ģenerēšanai. Pēdējā laikā tiek ražoti ļoti spēcīgi pastāvīgie magnēti, kurus izmanto ierosmes magnētiskā lauka nodrošināšanai.

Tahoģenerators priekšrocības – tas ir lēts, vienkāršs un pietiekoši drošs sensors. Izejas spriegums ir robežās no 3 – 12V un tam nav vajadzīgs pastiprinātājs.

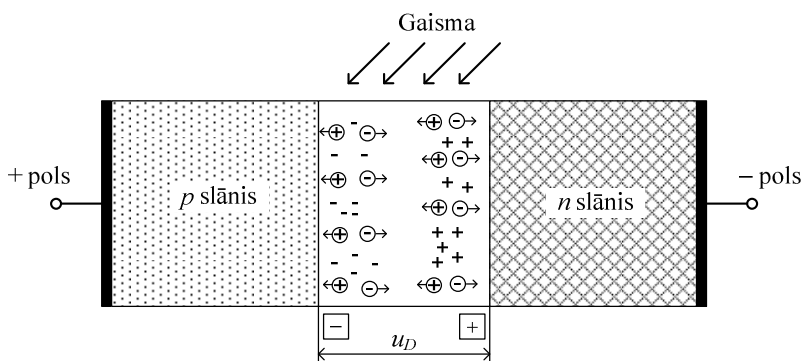
Tahoģenerators trūkumi:

- ✓ nevar mērīt mazus rotācijas ātrumus, jo izejas spriegums ievērojami samazinās un kļūst nestabils,
- ✓ tas slobo mērāmo ierīci, un tāpēc to nav ieteicams lietot mazjaudīgās iekārtās,
- ✓ lietošanas laikā ģenerators dilst.

Rūpnieciski tiek ražoti dažādas jaudas tahogeneratori gan rotācijas ātruma mērīšanai, gan atgriezeniskās saites nodrošināšanai automātiskās regulēšanas sistēmās.

Foto elektriskie pārveidotāji

Fotoelementa un saules baterijas darbības princips ir parādīts 4.3 attēlā. Apgaismojot fotoelementus un saules baterijas, tajās sāk plūst strāva, kuras stiprums atkarīgs no apgaismojuma intensitātes. Tādēļ tos sauc arī par "aktīviem foto pusvadītājiem". Abiem elementiem ir vienāds darbības princips un arī līdzīga uzbūve. Fotoelementos un saules baterijās pusvadītāja materiālam ir n -vadības un p -vadības apgabali. Pārejas apgabalā, tāpat kā pusvadītāju diodēs, difūzijas rezultātā rodas difūzijas spriegums u_D , kas kavē elektronu pāreju uz p apgabalu un caurumu pāreju uz n apgabalu. Ļoti plānajā sprostslānī tikpat kā nav kustīgu lādiņnesēju.



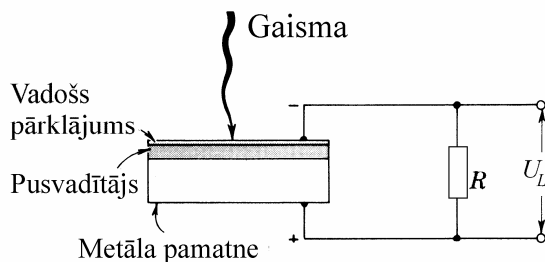
4.3 att. Fotoelementu un saules bateriju darbības pamatprincips

Ja gaismas stari krīt uz sprostslāni, tad pievadītās enerģijas rezultātā tiek sarautas saites kristāliskajā režģī, un izveidojas kustīgi lādiņnesēju pāri. Elektriskā lauka ietekmē, kas rodas uz sprostslāņa, difūzijas sprieguma rezultātā kustīgie elektroni virzās uz n apgabalu un kustīgie caurumi uz p apgabalu. Tādēļ n apgabalā rodas elektronu pārpalikums, bet p apgabalā - caurumu pārpalikums. Tādējādi n slānis kļūst par sprieguma avota negatīvo polu un p slānis par pozitīvo polu. Šie procesi vienkāršoti un shematiski attēloti 4.3 attēlā.

Fotoelementa konstrukcija sastāv no metāla pamatnes, gaismjutīga pusvadītāja materiāla un strāvu vadoša caurspīdīga pārklājuma. Tas var būt speciālas strāvu vadošas lakas slānis.

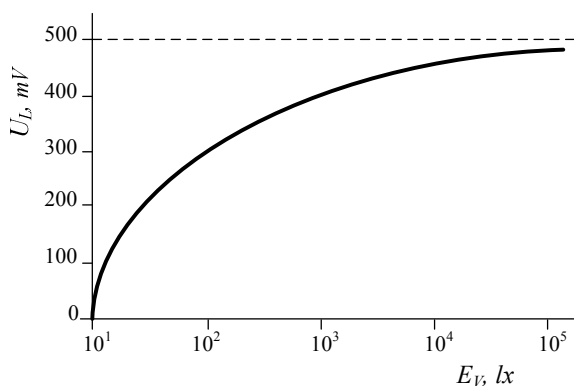
Fotoelementa p - n sprostslānis atrodas tieši zem pārklājuma virskārtas, lai krītošās gaismas iedarbība būtu pēc iespējas lielāka. Saules bateriju uzbūve ir līdzīga, bet salīdzinājumā ar fotoelementiem, to virsma ir daudz lielāka.

Gaismai krītot uz pusvadītāja materiālu tiek ģenerēts spriegums. Fotoelementa izejas spriegums U_L ļoti lielā mērā ir atkarīgs no slodzes pretestības R . Ja slodzes pretestība ir bezgalīgi liela izejas spriegumu aproksimē logaritmiska funkcija.



4.4 att. Fotoelementa uzbūve

4.5 attēlā ir parādīta Si fotoelementam raksturīgā brīvgalvas sprieguma U_L atkarība no apgaismojuma intensitātes E_V . Šo sakarību sauc par fotoelementu brīvgalvas raksturlīkni.



4.5 att. Brīvgalvas spriegums E_0 kā apgaismojuma intensitātes E_V funkcija

Ja fotoelementam paaugstina apgaismojuma intensitāti, sākot no $E_V=0\text{lx}$, tad, sākumā aptuveni līdz $E_V \approx 100\text{lx}$, brīvgalvas spriegums pieaug samērā strauji. Paaugstinoties apgaismojuma intensitātei, U_L palielinās ievērojami lēnāk, un Si fotoelementos tas tuvojas U_L robežvērtībai, kas ir $U_L \approx 500\text{ mV}$, kad apgaismojuma intensitāte ir vislielākā. Tādējādi $U_{L\text{max}}$ vienmēr ir mazāks nekā p - n pārejas difūzijas spriegums. Visiem fotoelementiem ir novērojama brīvgalvas sprieguma raksturlīknes logaritmiskā forma. Bez tam brīvgalvas spriegums ir atkarīgs no temperatūras un materiāla īpašībām. Fotoelementa gaismjutīgās virsmas lielums neietekmē ģenerētā brīvgalvas sprieguma lielumu. Samazinot slodzes pretestību izejas sprieguma sakarība kļūst lineārāka.

Praksē būtiska nozīme ir arī īsslēguma strāvas raksturlīknei, jo tā parāda īsslēguma strāvas I_S atkarību no apgaismojuma intensitātes E_V . Starp fotoelementu īsslēguma strāvu I_S un apgaismojuma intensitāti E_V pastāv praktiski lineāra sakarība. Lineāra sakarība pastāv arī starp absolūto I_S lielumu un fotoelementa gaismjutīgās

virsmas A laukumu. No īsslēguma strāvas raksturlīknes kāpuma var aprēķināt fotojutīgumu S :

$$S = \frac{\Delta I_S}{\Delta E_V}, \quad (4.1)$$

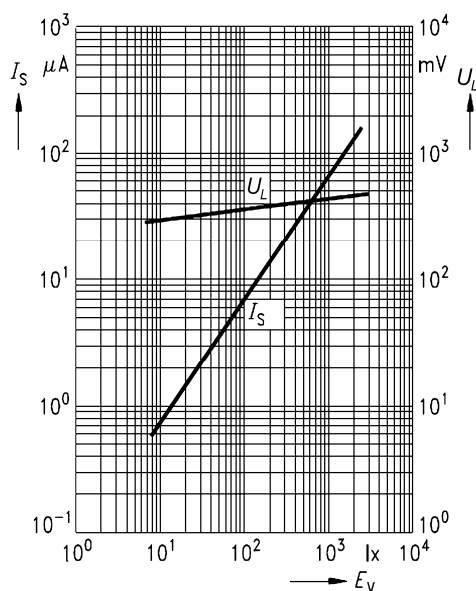
kur: ΔI_S – īsslēguma strāvas pieaugums, nA, ΔE_V – apgaismojuma intensitātes pieaugums, lx.

Jo lielāka gaismjutīgā virsma, jo lielāka kļūst īsslēguma strāva I_S un līdz ar to arī fotojutīgums S .

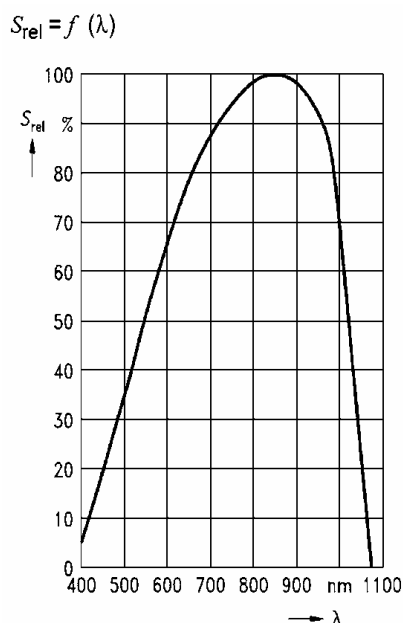
Attēlā 4.6 redzamas kompānijas Siemens ražotā fotoelementa BPY11 brīvgaltais sprieguma un īsslēguma strāvas raksturlīknes, bet attēlā 4.7 – spektrālā jutīguma raksturlīkne. No šīm raksturlīknēm var noteikt fotoelementa iekšējo pretestību R_i :

$$R_i = \frac{U_L}{I_S}. \quad (4.2)$$

Kā redzams no fotoelementa BPY11 raksturlīknēm, iekšējā pretestība nav konstants lielums, bet mainās atkarībā no apgaismojuma intensitātes E_V . Tā, piemēram, minētajam fotoelementa tipam $R_i \approx 50 \text{ k}\Omega$, ja $E_V = 100 \text{ lx}$, $R_i \approx 12 \text{ k}\Omega$, ja $E_V = 500 \text{ lx}$ un $R_i \approx 6.5 \text{ k}\Omega$, ja $E_V = 1000 \text{ lx}$. Tātad, pieaugot apgaismojuma intensitātei, fotoelementa iekšējā pretestība samazinās.



4.6 att. BPY 11 tipa fotoelementa brīvgaltais sprieguma un īsslēguma strāvas raksturlīkne

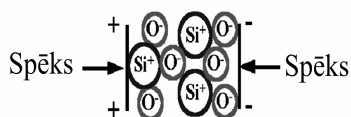


4.7 att. Spektrālā jutīguma raksturlīkne

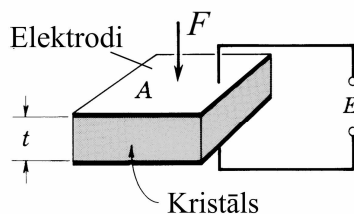
Fotoelementus galvenokārt izmanto apgaismojuma intensitātes mērīšanai. Lai nodrošinātu nepieciešamo mērījumu precizitāti, starp optiskajiem un ģenerētajiem elektriskajiem lielumiem jābūt lineārai sakarībai. To panākt, darbinot fotoelementus ar slodzes pretestībai atbilstošu strāvu. Ja slodzes pretestība $R_L \ll R_i$, tad fotoelements darbojas īsslēguma strāvas režīmā un nodrošina lineāru sakarību starp fotostrāvu un apgaismojuma intensitāti plašā apgaismojuma intensitātes apgabalā.

Pjezoelektriskais efekts

Kristāliskos dielektriķus, kurus deformējot noteiktos virzienos notiek to polarizācija, sauc par pjezoelektriķiem, bet pašu parādību - par pjezoelektrisko efektu. To pirmie 1880. gadā atklāja un sāki izpētīja kvarca un turmalīna kristālos franču fiziķi Pjērs Kirī un Žaks Kirī. Pazīstamākie pjezoelektriķi ir kvarcs, turmalīns, segnetsāls un bārija titanāts. Pjezoelektriskais efekts novērojams kristālos, kuriem nav simetrijas centra.



4.8 att. Kvarca plāksnītes deformācija



4.9 att. Pjezoelementa uzbūve

Pakļaujot kvarca plāksnīti spiedes deformācijai, notiek jonu pārgrupēšanās kristālā elementāršūnā (4.8 att.). Silīcija pozitīvais jons iespiežas starp skābekļa negatīvajiem joniem un notiek jonu noslāņošanās. Tas pats notiek arī pārējās šūnās un rada materiāla kristālu polarizāciju. Ja maina deformācijas zīmi (spiedi aizstāj ar stiepi), paraugs polarizējas pretējā virzienā.

Veidojot pjezoelementu, pjezoelektriskais kristāls tiek novietots starp diviem elektrodiem (4.9 att.). Pieliekot elektrodiem spēku F , kristālā rodas mehāniskie spriegumi un notiek tā deformācija un uz elektrodiem rodas potenciālu starpība E . Sprieguma lielums ir atkarīgs no tā kādā virzienā pret kristālu asīm ir nošķelta kvarca plāksne. Potenciālu starpību pjezoelementa izejā nosaka pēc formulas (4.3):

$$E = \delta_U \cdot t \cdot \frac{F}{A}, \quad (4.3)$$

kur δ_U - pjezoelektriskā spriegums konstante, $\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1}$, F - pieliktais spēks, N , A - plāksnītes laukums, m^2 , t - plāksnītes biezums, m .

Pjezoelektriskās konstantes vērtība dažādiem materiāliem mainās plašās robežās. Materiālus raksturo divas pjezoelektriskās konstantes - lādiņa konstante δ un sprieguma konstante δ_U . Piemēram, dabīgajam kvarcam $\delta = 2.3 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$, ($\delta_U = 0.055$

$\text{V}\cdot\text{m}\cdot\text{N}^{-1}$), bet bārija titanātam $\delta=140\times10^{-12} \text{ C}\cdot\text{N}^{-1}$, ($\delta_U=0.0106 \text{ V}\cdot\text{m}\cdot\text{N}^{-1}$). Jāņem vērā, ka dažādās šķēluma plaknēs konstantes vērtība mainās plašās robežās. Rūpnieciski ražotajiem pārveidotājiem pjezoelektriskās konstantes vērtība ir norādīta to specifikācijās.

Pieslēdzot pārveidotāju mērīšanas shēmai, jāņem vērā, ka izejas signāla jauda ko ģenerē pjezoelements ir ļoti niecīga. Būtībā tas ir tikai neliels elektriskais lādiņš. No šī viedokļa pjezoelements ir signāla avots ar ļoti augstu izejas pretestību, kura ir atkarīga no iedarbes signāla frekvences. Pjezoelementi labi izmantojami dinamiski mainīgu fizikālo lielumu mērīšanai. Izejas spriegums ir atkarīgs no paša kristāla un tam pievienotās elektriskās ķēdes kapacitātes un aktīvās pretestības. Izejas spriegumu aprēķina pēc formulas 4.4:

$$U_m = \delta \frac{F_m}{C} \cdot \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}, \quad (4.4)$$

kur F_m – sinusoidāla iedarbes spēka amplitūdas vērtība, N, ω - sinusoidāla signāla leņķiskā frekvence, s^{-1} , R – pjezoelementa un mērķēdes ieejas kopējā pretestība, Ω , C – pjezoelementa un mērķēdes ieejas kopējā kapacitāte, F. No formulas izriet, ka pie zemām iedarbes frekvencēm, izejas signāla amplitūda samazinās. Jāņem vērā, ka katram pjezoelementam piemīt sava brīvo svārstību frekvence. Ja iedarbes signāla frekvence tuvojas brīvo svārstību frekvencei, izejas signāla spriegums ievērojami pieaug.

Pjezoelektriskie kristālus lieto ne tikai spiedes spriegumu (4.9 att.), bet arī lieces normālo spriegumu un tangenciālo bīdes spriegumu mērīšanai. Šajā gadījumā izejas spriegums būs sarežģīta funkcija atkarībā no kristālu orientācijas.

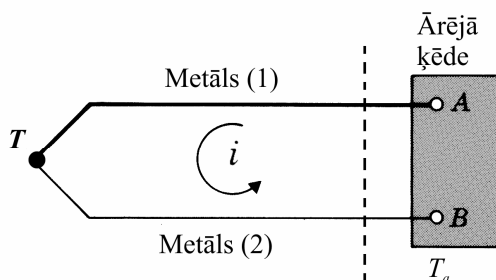
Šobrīd ir zināmi vairāk nekā 1500 dažādi materiāli, kam piemīt pjezoelektriskais efekts. Lielākā daļa no tiem tiek veidoti mākslīgi, veicot polarizāciju noteiktā plaknē un noteiktā temperatūrā. Tādā veidā tiek izveidoti materiāli ar īpašībām, kas vislabāk atbilst veicamajiem mērījumiem. Pjezoelektriskie kristāli plaši tiek izmantoti, kā lēti dinamiski mainīga spiediena un vibrāciju mērpārveidotāji.

Pjezokristālos ir novērojams arī apgrieztais efekts. Pievadot spriegumu kristāla pretējām plaknēm, novēro kristāla formas izmaiņu. Šo parādību izmanto dažādās ierīcēs, pārsvarā vibrāciju, skaņas un ultraskaņas radīšanai, kā arī tehnikā, akustikā, radio ierīcēs u.t.t.

Termoelektriskais efekts

Ir zināmi trīs **termoelektriskā efekta** veidi – Sībeka efekts, Peltjē efekts un Tomsona efekts. Sībeka efekts tika atklāts 1821. gadā, kad vācu fiziķis T. Sībeks atklāja, ka savienojot divus dažādus metālus, ķēde plūst strāva, ja to savienojumi atrodas dažādās temperatūrās. To sauc par termoelektrisko efektu. 1834. gadā franču

fiziķis Ž. Peltjē atklāja, ka no ārēja avota laižot strāvu ķēdē, kuru veido divi dažādi metāli, to sakausējuma vietu temperatūras kļūst dažādas. Šo parādību sauc par Peltjē efektu, un tas ir apgrieztais Sībeka efekts. Temperatūras mērīšanai visplašāk tiek izmantots Sībeka efekts. Ja kopā savieno divus dažāda metāla vadītājus (4.10 att.), starp punktiem *A* un *B* rodas EDS, kurš ir proporcionāls temperatūras starpībai starp savienojumu *T* un punktiem ārējā vides temperatūru T_a .



4.10 att. Termopāra uzbūve

Šāda veida mērpārveidotāju sauc par termopāri. Termopāra ģenerēto EDS aprēķina pēc formulas:

$$E = \alpha(T - T_a), \quad (4.5)$$

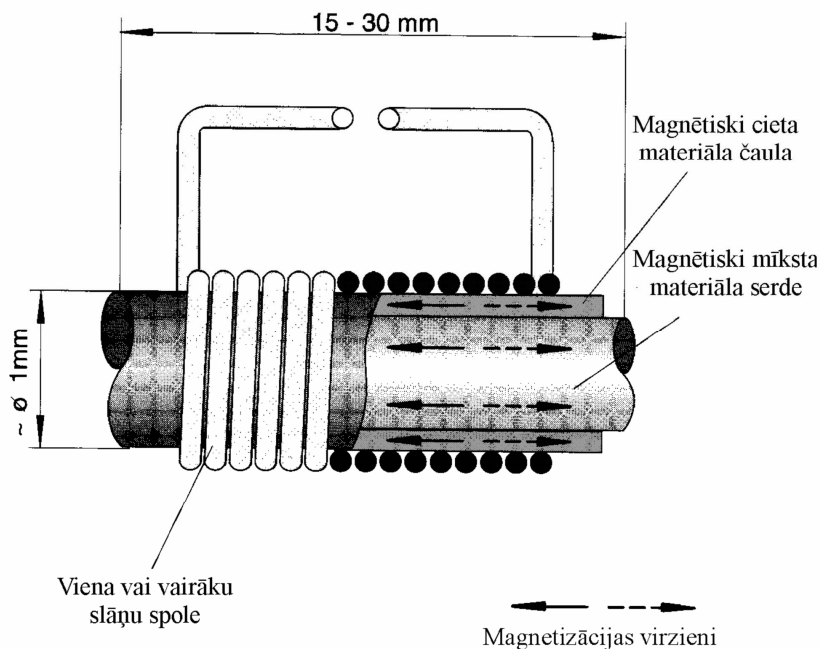
kur α - Sībeka koeficients, $V \cdot K^{-1}$, T un T_a - temperatūra sakausējumā un termopāra brīvajā galā, K. Sībeka koeficients ir atkarīgs no termopāri veidojošo metālu īpašībām. To sauc arī par termopāra jutības koeficientu vai termo-EDS koeficientu. Tas rāda, cik liels EDS tiek ģenerēts uz termopāra galiem, ja temperatūru starpība starp termopāra galiem ir $1^\circ K$ vai $1^\circ C$. Termo-EDS koeficients dažādiem metālu pāriem nepārsniedz $100 \mu V \cdot K^{-1}$. Termopāri plaši tiek izmantoti augstu temperatūru (līdz pat $3000^\circ C$) mērīšanai. Termopāriem ir pietiekoši lineāra raksturlīkne. Termopāru izmantošanas trūkums ir tas, ka jāveic termopāra brīvā gala temperatūras izmaiņas kompensācija. Šobrīd to veic, izmantojot speciālus termistorus, kuri tiek integrēti signāla apstrādes shēmās.

Vīganda (*Wiegand*) efekts

Vīganda efekts tiek novērots īpašā magnētiska materiāla vadā, kuram tuvinātā spolē inducējas elektriskā sprieguma impulss. Vīganda vads tiek izgatavots ar aukstās kalšanas paņēmieni no speciāla dzelzs, kobalta un vanādija sakausējuma.

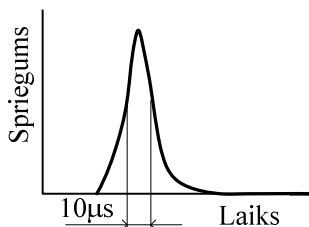
Tā diametrs parasti ir aptuveni 1 mm. Mehāniskās apstrādes rezultātā tiek iegūts serdenis ar magnētiski mīkstu centru un magnētiski cietu ārējo čaulu (4.11 att.). Ja uz šo serdeni iedarbojas pietiekoši spēcīgs mainīgs magnētiskais lauks, magnētiski mīkstā serdena domēni uz īsu mirkli izmaina savu polarizāciju un ģenerē spolē īsu, spēcīgu

sprieguma impulsu (4.12 att.). Ja sensora garums ir 15-30 mm, iegūst sprieguma impulsu ar amplitūdu 2-8 V.



4.11 att. Vīganda sensora uzbūve

Sprieguma amplitūda nav atkarīga no ierosinošā magnētiskā lauka intensitātes un virziena. Tas izskaidrojams ar to, ka serdes uzbūve un magnētiskais materiāls nodrošina Barkhauzena lēcienu veidošanos. Lai notiktu sprieguma impulsa ģenerēšana nepieciešama magnētiskā lauka izmaiņa serdeņa garenvirzienā.



4.12 att. Vīganda sensora ģenerētais sprieguma impulss

Vīganda sensori var strādāt temperatūras diapazonā no -196 līdz $+175^{\circ}\text{C}$.

Vīganda sensorus izmanto rotācijas ātruma mērīšanai, stāvokļa noteikšanai un citās līdzīgās situācijās. Raksturīga Vīganda sensora īpašība ir tā, ka nav nepieciešams ārējs barošanas avots, lai sensors darbotos. Sensora izejas signāla amplitūda ir pietiekoši liela, lai pārslēgtu reģistrējošo ierīču triggerus.

4.2. Parametriskie mērpārveidotāji

Par parametrisko mērpārveidotāju sauc ierīci, kura fizikāla lieluma iedarbībā maina savus elektriskos parametrus. Pie parametriskajiem mērpārveidotājiem pieder ierīces, kuras enerģijas (gaisma, siltums) ietekmē izmaina savas elektriskās īpašības (kapacitāti, pretestību). Parametriskos mērpārveidotājus sauc arī par pasīvajiem devējiem. Pasīvos mērpārveidotājus plaši izmanto dažādu fizikālu lielumu (spēka, spiediena, temperatūras u. c.) elektriskai mērīšanai. Parasti spēka vai spiediena izmaiņa tiek pārveidota mehāniskā pārvietojumā un tad tiek mērīts šis pārvietojums.

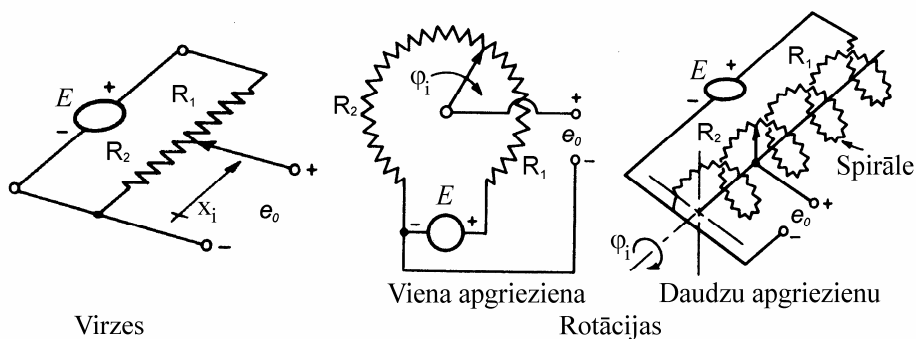
Potenciometriskie mērpārveidotāji

Potenciometriskais mērpārveidotājs ir ierīce, kurā slīdkontakts pārvietojas pa taisnas vai liektas forma augstas pretestības vadītāju. Rezistīvā daļa var būt gatavota no metāla vai speciāla sastāva pārklājuma (4.13 att.). Šādas ierīces sauc par potenciometriem vai reostatiem. Rūpnieciski tiek ražoti dažāda konstruktīvā izpildījuma, izmēra, pretestības un precizitātes potenciometri. Rotācijas potenciometra konstruktīvais izveidojums redzams 4.14 attēlā.

Potenciometriskais mērpārveidotājs galvenokārt paredzēts virzes vai rotācijas (leņķiskā) pārvietojuma pārveidošanai elektriskā signālā. Daudzos gadījumos ar mehāniskām metodēm spēku un spiedienu iespējams pārveidot pārvietojumā un tad ar potenciometru iespējams mērīt arī šos lielumus. Sakarība starp pārvietojumu un pretestības izmaiņu, atkarībā no potenciometra konstrukcijas, var būt lineāra, logaritmiska vai eksponenciāla.

Jāatzīmē, ka potenciometriem ir samērā liela berze, un tie ir ļoti jutīgi pret vibrācijām.

Tā rezultātā izejas signāls ir ar augstu trokšņu līmeni un ierīces nav piemērotas dinamiskiem mērījumiem.

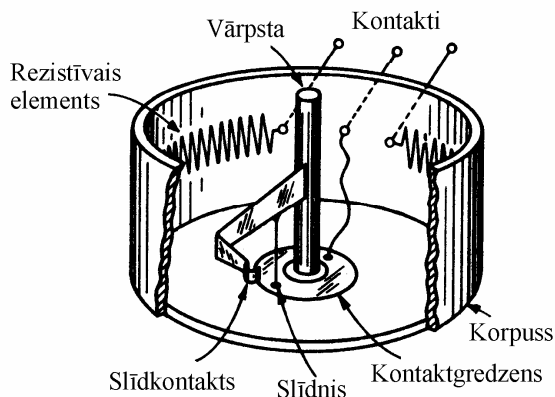


4.13 att. Potenciometrisko pārveidotāju shēmas

Salīdzinājumā ar citiem mērpārveidotājiem potenciometri ir ļoti lēti un tiek plaši izmantoti. Potenciometri ir vienkārši instalējami un to barošanai var izmantot gan līdzstrāvu, gan maiņstrāvu. Visbeidzot, potenciometriskie mērpārveidotāji nodrošina lielu izejas signālu un tiem nav nepieciešami pastiprinātāji, tie viegli salāgojami ar nākošajām pakāpēm.

Pamatformula, pēc kuras aprēķina potenciometra izejas spriegumu e_0 ir sekojoša:

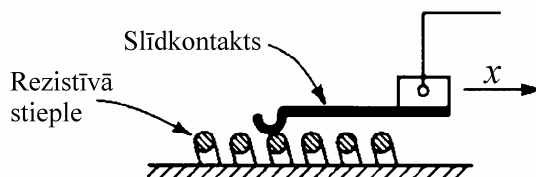
$$e_0 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.6)$$



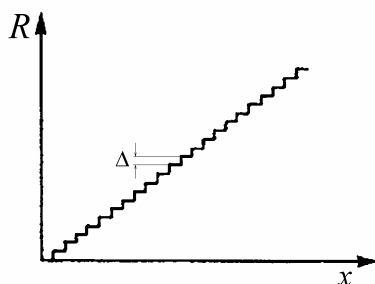
4.14 att. Rotācijas potenciometra konstruktīvā uzbūve

Tā ir sprieguma dalītāja formula, pieņemot, ka izejas signāls tiek ņemts no R_2 (4.13 att.). Formulu 4.6 var izmantot mērķēdes aprēķiniem, ja ir spēkā sakarība $R_1 + R_2 \ll R_m$, kur R_m mērinstrumenta ieejas pretestība vai mērķēdes ieejas pretestība, kurai pieslēdz potenciometru.

Potenciometriskais mērpārveidotājs atbilst „0”-kārtas dinamiskajām sistēmām, jo nesatur elastīgos elementus. Jāņem vērā, ka šī atbilstība ir spēkā tikai pie nelieliem potenciometra kustības ātrumiem. Pie lieliem ātrumiem potenciometra konstrukcijas elastīgās īpašības izsauc svārstības konstrukcijā un tā noved pie mērījuma kļūdu palielināšanās. Galvenais svārstību avots ir elastīgais slīdkontakts (4.15 att.).

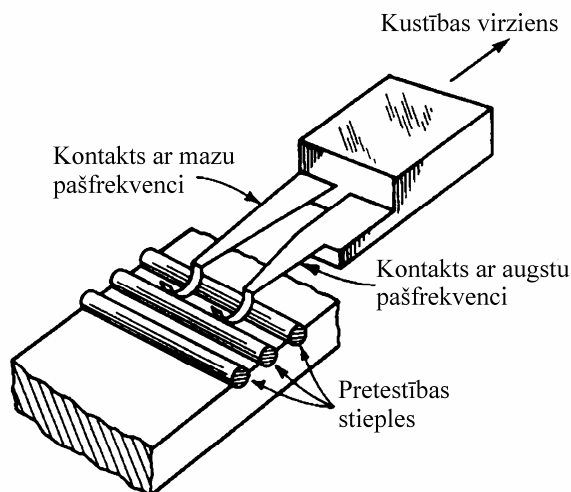


4.15 att. Potenciometra slīdkontakts



4.16 att. **Potenciometra pretestības izmaiņa atkarībā no slīdņa pārvietojouma**

Parasti mērpotenciometru rezistīvā daļa tiek izgatavota no augstas pretestības stieples. Slīdkontaktam pārvietojoties pa stieples vijumiem rodas kontakta vibrācijas, kas rada traucējošus izejas sprieguma impulsus un var novest pie kļūdām mērījumos. To sauc par kontaktu drebēšanu. To novērš signāla apstrādes traktā ieslēdzot filtrus. Ja potenciometrs tiek pieslēgts programmējamajam mikrokontrollerim (PLC), tad jālieto īpaša drebēšanas novēršanas shēma. Parasti šīs shēmas jau ir iebūvētas PLC ieejā.



4.17 att. **Potenciometra kontaktu konstrukcija**

Darba laikā slīdkontakts pārvietojas no viena stieples vijuma uz otru. Tā rezultātā devēja izejā pretestība mainās lēcienveidīgi ar soli Δ , skat. 4.16 att. Parasti mērpotenciometri tiek izgatavoti no ļoti tievas stieples un lēciena radītā kļūda ir nebūtiska.

Lai novērstu slīdkontakta drebēšanas radītos traucējumus, konstruktīvi tas izveidots ar divām atsevišķām dažāda garuma kontakta daļām (4.17 att.). Katrai slīdņa

daļai ir cita brīvo svārstību frekvence un tas nodrošina ievērojami stabilāku kontaktu darba laikā.

Potenciometriskie pārveidotāji ļoti plaši tiek izmantoti gan pārvietojumu mērīšanai, gan automātiskās regulēšanas sistēmās.

Potenciometrisko pārveidotāju priekšrocības:

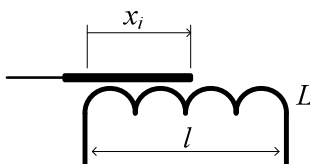
- ✓ vienkārša konstrukcija,
- ✓ liels izejas spriegums, nav nepieciešami pastiprinātāji,
- ✓ lineāra izejas raksturlīkne, ja izmanto potenciometrisko slēgumu ar lielu slodzes pretestību,
- ✓ maza cena.

Trūkumi:

- ✓ augsts trokšņu līmenis izejas signālā,
- ✓ ierobežots maksimālais kustības ātrums,
- ✓ darba gaitā sensora kustīgās daļas dilst.

Induktīvie mērpārveidotāji

Induktīvo mērpārveidotāju darbības pamatā ir spoles induktivitātes izmaiņa kāda materiāla klātbūtnes rezultātā.



4.18 att. Spole ar serdeni

Ieslēdzot spoli ar noteiktu induktivitāti maiņstrāvas ķēdē, jāņem vērā tās kompleksā pretestība Z :

$$Z = R + X_L + X_C, \quad (4.7)$$

kur R – spoles vada aktīvā pretestība, Ω , X_L – spoles induktīvā pretestība, ko rada spoles induktivitāte, Ω , X_C – spoles kapacitatīvā pretestība, ko rada spoles starpvijumu un montāžas kapacitātes, Ω .

Spoles aktīvā un kapacitatīvā pretestības rada enerģijas zudumus un pasliktina ierīces parametrus.

Spoles induktīvo pretestību X_L aprēķina pēc formulas:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (4.8)$$

kur L – spoles induktivitāte, H, f – maiņsprieguma frekvence, Hz.

Spoles induktivitāti ietekmē tās vijumu skaits, ģeometriskie izmēri un forma. Tās induktivitāte lielā mērā atkarīga no tās serdena. Jo dziļāk serdenis ir iebīdīts spolē, jo

lielāka būs induktivitātes izmaiņa. Cilindriskas formas spolēm induktivitātes izmaiņa ir proporcionāla serdeņa pārvietojumam x_i .

Vadam, no kura izgatavota spole, piemīt arī aktīvā pretestība. Līdzstrāvai plūstot lineārā vadītājā, strāvas blīvums visos vadītāja šķērs griezuma punktos ir vienāds un tā aktīvā pretestība ir neliela. Bieži vien induktīvo sensoru barošanai izmanto augstas frekvences maiņspriegumu. Šajos gadījumos jāņem vērā virsmas efekts. Maiņstrāva, virpuļstrāvu radīto magnētisko lauku ietekmē, tiecas plūst pa vadītāja virsmu. Ļoti augstu frekvenču gadījumā strāva praktiski norobežojas plānā slānī pa vadītāja virsmu – no šejienes ir nosaukums “virsmas efekts” (angliski – *skin effect*). Virsmas efekta ietekmē augstfrekvences strāvai vads rada ievērojami augstāku elektrisko pretestību nekā līdzstrāvai. Ja vadītāju izgatavo no vairākiem, savstarpēji izolētiem, mazāka šķērs griezuma vadiem, tā pretestība augstfrekvences strāvai ir mazāka nekā tāda pat šķērs griezuma viengabala vadam. Šādus vadītājus sauc par augstfrekvences licēm.

Spoles pašas kapacitāte parasti ir maza un nebūtiski ietekmē pārveidotāja darbību.

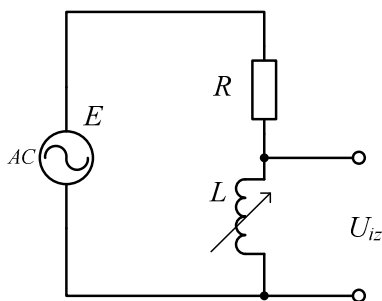
Spoles induktivitāti ietekmē serdeņa materiāls un tā magnētiskās īpašības. Serdes materiālu raksturo tā magnētiskā caurlaidība μ :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \quad (4.9)$$

kur μ_0 - magnētiskā lauka konstante, $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, μ_r – relatīvā magnētiskā caurlaidība. Relatīvā magnētiskā caurlaidība rāda cik reizes dotā materiāla serdenis palielina vai samazina spoles induktivitāti salīdzinājumā ar bezserdes spoli. Serdeņu materiālus iedala trīs grupās:

- ✓ diamagnētiķi - $\mu_r < 1$, samazina induktivitāti (cinks, svins, varš, sudrabs),
- ✓ paramagnētiķi - $\mu_r > 1$, nedaudz palielina induktivitāti (magnijs, hroms, alumīnijs, platīns),
- ✓ ferromagnētiķi - $\mu_r \gg 1$, ļoti stipri palielina induktivitāti, 100 – 10000 reizes (dzelzs, kobalts, niķelis, elektrotehniskais tērauds, ferīti).

Spoles induktivitātes izmaiņu sekmīgi var izmantot pārvietojuma mērīšanai. Šajā gadījumā spoli ieslēdz sprieguma dalītājā, skat. 4.19 att.



4.19 att. Induktīvā sensora slēguma shēma

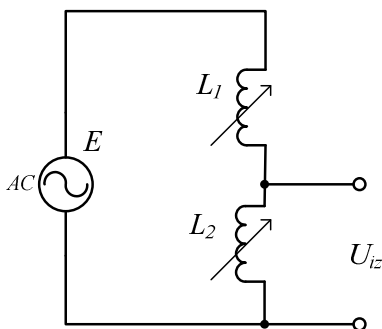
Izejas spriegumu aprēķina pēc maiņsprieguma dalītāja aprēķina formulas:

$$U_{iz} = \frac{E \cdot X_L}{R + X_L}, \quad (4.10)$$

kur X_L – spoles induktīvā pretestība. Optimālais darba režīms ir gadījumā, ja $X_L = R$.

Praksē šādu slēgumu lieto reti, jo pārveidotāja raksturlīkne nav lineāra. Labākus rezultātus iegūst lietojot divas spoles diferenciālā slēgumā (4.20 att.).

Diferenciālais induktīvais sensors sastāv no divām spolēm, kuras ir saslēgtas virknē. Praksē labākus rezultātus iegūst, ja abas spoles ir konstruktīvi vienādas un ar vienādu induktivitāti. Līdz ar to $X_{L1} = X_{L2} = X_L$.



4.20 att. Diferenciālā induktīvā sensora shēma

Lai sensors darbotos, jānodrošina spoļu induktīvās pretestības izmaiņa pretējos virzienos, ja induktivitāte L_1 pieaug par lielumu ΔL , tad induktivitāte L_2 samazinās par ΔL . Izejas spriegumu aprēķina pēc formulas 4.11:

$$U_{iz} = \frac{E \cdot \Delta X}{2X_L} = \frac{E}{2} \left(1 + \frac{\Delta X}{X_L} \right), \quad (4.11)$$

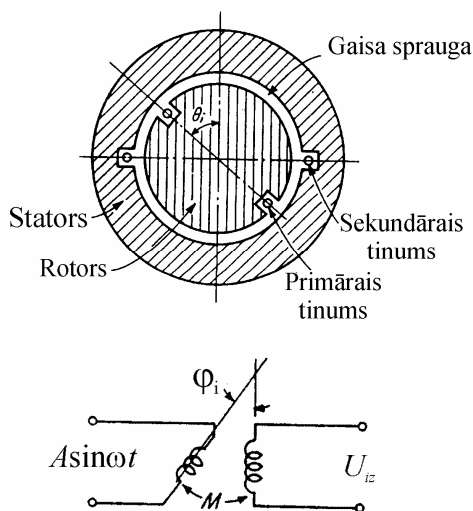
kur ΔX – pārveidotāja induktīvās pretestības izmaiņa.

Redzam, ka pārveidotāja izejas raksturlīkne ir lineāra jebkurai ΔX izmaiņai.

Induktīvais potenciometrs

Pagrieziena leņķa mērīšanai rūpnieciski tiek ražotas induktīva tipa mērīšanas ierīces, ko sauc par induktīvajiem potenciometriem. 4.21 attēlā redzamais mērpārveidotājs sastāv no koncentriski novietota rotora un statora, kuru rievās ievietoti divi tinumi.

Devēja primārajam tinumam pieslēgts maiņsprieguma barošanas avots, kura sprieguma amplitūda ir A . Ņemot vērā, ka gan stators, gan rotors ir izgatavoti no feromagnētiska materiāla, izveidojas transformators, kura transformācijas koeficients ir atkarīgs no spoļu savstarpējās indukcijas koeficienta M .



4.21 att. Induktīvais potenciometrs

Potenciometra izejas spriegums ir atkarīgs no koeficienta M , kuru nosaka spoļu savstarpējais novietojuma leņķis ϕ_i .

Izejas spriegumu aprēķina pēc formulas 4.12:

$$U_{iz} = K(A \cdot \sin \omega t) \cdot \phi_i, \quad (4.12)$$

kur K – induktīvā potenciometra konstante, kas ievērtē tā transformācijas koeficientu. Kā redzam potenciometra izejas raksturlīkne ir lineāra attiecībā uz pagriezienu leņķi ϕ_i .

Rūpnieciski ražoto induktīvo potenciometru mērīšanas diapazons, kurā saglabājas lineāra sakarība, ir $\pm 90^\circ$. Barošanas sprieguma frekvence 60 – 400 Hz.

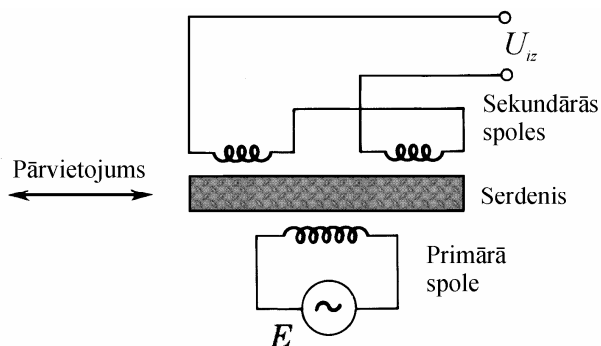
4.3. Lineārais diferenciālais transformators

Diferenciālā induktīvā mērpārveidotāja parametrus var ievērojami uzlabot pieslēdzot tā barošanu caur transformatoru.

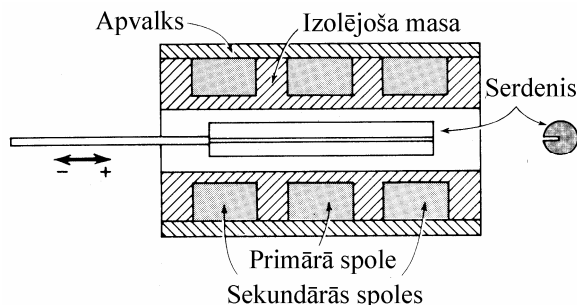
Diferenciālā transformatora shēma parādīta 4.22 attēlā. Trīs transformatora spoles ir novietotas rindā tā, ka to iekšpusē brīvi var pārvietoties serdenis. Sekundāro spoļu vijumi ir saslēgti pretfāzē. Ierīces konstruktīvā uzbūve parādīta 4.23 attēlā.

Mainstrāvas barošanas spriegums tiek pievadīts centrā esošajam primārajam tinumam. Izejas spriegums ir vienāds ar spriegumu starpību sekundārajās spolēs. Inducētā sprieguma vērtība katrā sekundārajā tinumā ir atkarīga no serdeņa stāvokļa attiecībā pret spolēm. Ja serdeņa novirzes no centrālā stāvokļa ir nelielas, tad ierīces izejas signāls ir lineāri mainīgs atkarībā no serdes pārvietojuma. Lineārā posma

garums rūpnieciski ražotajiem diferenciālajiem transformatoriem ir norādīts to pasē, un tie reti kad tiek ekspluatēti ārpus šīs zonas.

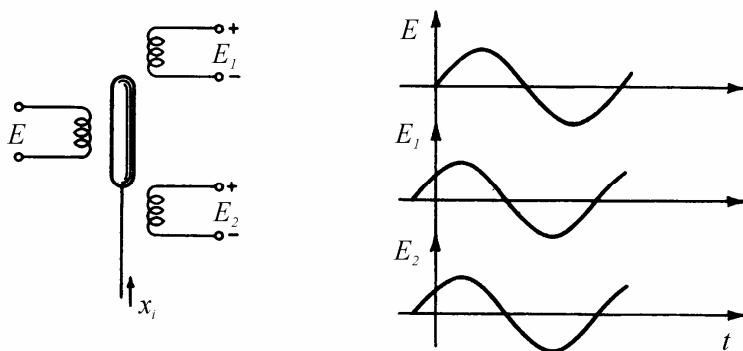


4.22 att. Lineārā diferenciālā transformatora shēma



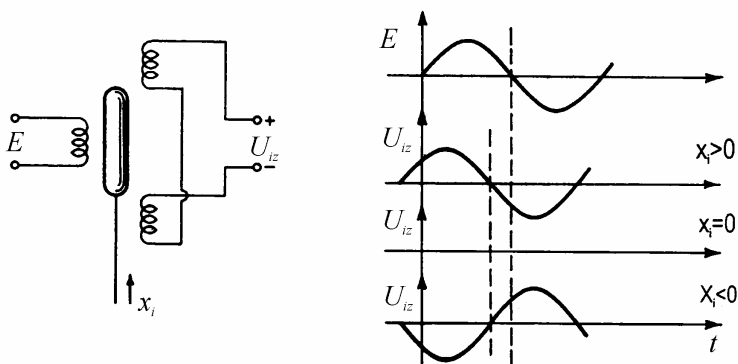
4.23 att. Rūpnieciski ražota lineārā diferenciālā transformatora konstrukcija

Šādas ierīces sauc par **lineārajiem diferenciālajiem transformatoriem (LDT)** (angļu valodā - *LVDT*). Lai izanalizētu diferenciālā transformatora darbību, pieņemsim, ka tā primārajam tinumam ir pieslēgts barošanas spriegums E un serdenis atrodas viduspunktā, $x_i=0$ (skat. att. 4.24).



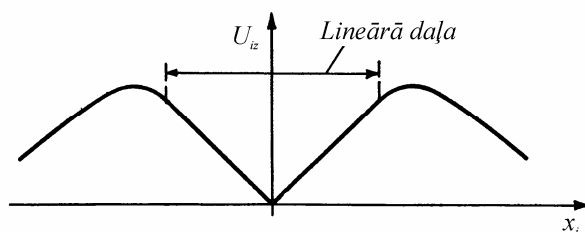
4.24 att. LDT darbība izejas stāvoklī

No spriegumu izmaiņas diagrammām redzam, ka abu sekundāro tinumu izejas spriegumi ir vienādi un sakrīt fāzē. Saslēgsim sekundāros tinumus pretfāzē, kā redzams 4.25 attēlā. Ja serdenis atrodas transformatora vidū, $x_i=0$, tad abi sekundārie spriegumi ir vienādi, bet tā kā tinumi ir saslēgti pretfāzē, tad rezultējošais spriegums LDT izejā ir vienāds ar nulli. Pārvietojot serdeni uz vienu vai otru pusi par vienādu attālumu, izejas spriegums būs vienāds ar abu sekundāro spriegumu starpību. Kā redzam no diagrammas attēlā 4.25, izejas signāli ir vienādi pēc amplitūdas, bet pretēji pēc fāzes.



4.25 att. LDT spriegumu diagrammas

Pārvietojot serdeni noteiktā attālumā no centra uz vienu vai otru pusi, izejas spriegums izmainās lineāri attiecībā pret pārvietojumu x (att. 4.26).



4.26 att. LDT izejas sprieguma izmaiņas līkne

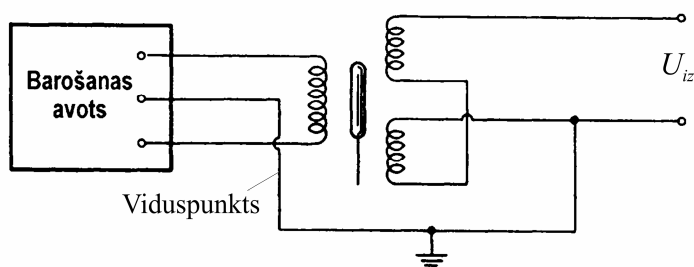
Šo lineāro posmu izmanto, lai veidotu augstas precizitātes un linearitātes mērpārveidotājus. Nulles stāvokļa tuvumā ir novērojama neliela izejas signāla nelinearitāte, jo pārejot nulles stāvoklim par 180° mainās signāla fāze.

Jāatzīmē, ka serdenim atrodoties vidusstāvoklī, nav iespējams iestatīt spriegumu vienādu ar „0”. Vienmēr paliek neliels nobīdes spriegums, ko nosaka:

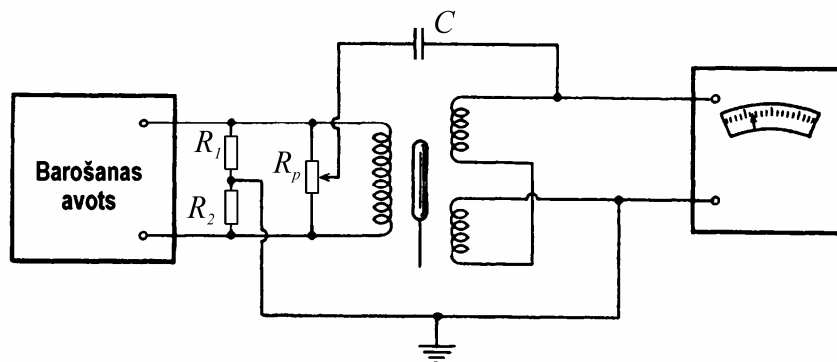
- ✓ izejas sprieguma fāzes izmaiņa par 180° nulles punktā,
- ✓ ierīces konstruktīvais nesimetriskums,
- ✓ barošanas sprieguma spektrā esošās augstākās harmonikas,
- ✓ elektriskā asimetrija, ko rada parazītiskās kapacitātes un induktivitātes.

Nulles korekciju veic izmantojot dažādas slēguma shēmas (skat. attēlus 4.27 un 4.28). Šajā gadījumā viens no transformatora izejas izvadiem tiek savienots ar barošanas avota viduspunktu, kura potenciāls ir vienāds ar „0”. Līdz ar to samazinās kaitīgo faktoru ietekme uz transformatora izejas spriegumu.

Ja nav pieejams barošanas avots ar simetrisku izeju un viduspunktu, var izmantot slēguma shēmu, kas parādīta attēlā 4.28. Tiek izveidots mākslīgs viduspunkts ar sprieguma dalītāju, rezistori R_1 un R_2 . Ar potenciometru R_p veic reaktīvās komponentes kompensāciju.



4.27 att. LDT „nulles” korekcija izmantojot barošanas avotu ar simetrisku izeju



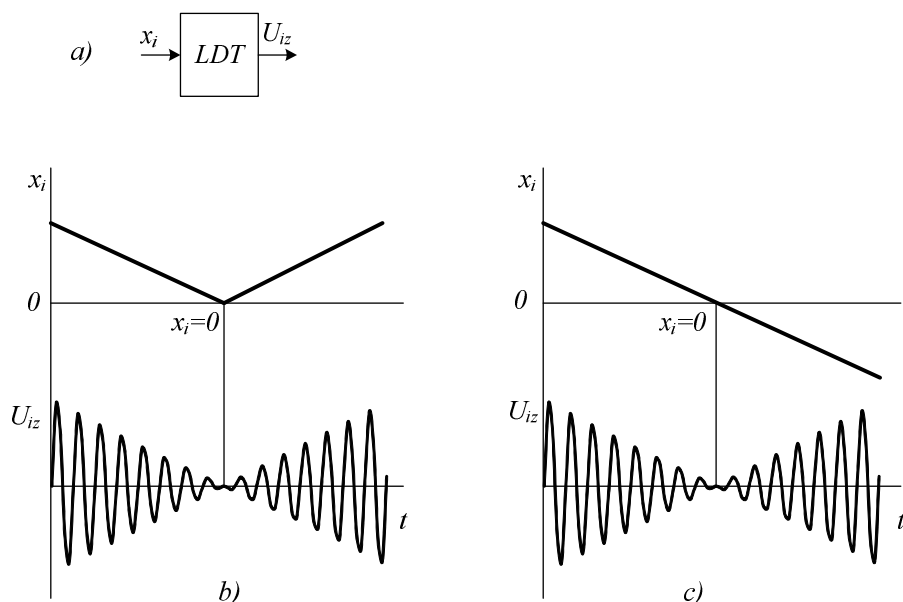
4.28 att. LDT „nulles” korekcijas shēma

Pieņemsim, ka LDT tiek izmantots pārvietojuma x_i mērīšanai. Uzskatīsim, ka LDT ir „melnā kaste”, kuras ieejas signāls ir mērāmais lielums x_i un izejas signāls U_{iz} (attēls 4.29a). Kā redzam attēlā 4.29b, ieejas signāls x_i var izmainīties no kādas vērtības $+x_i$ līdz $x_i=0$ un atpakaļ līdz $+x_i$. Tādā gadījumā izejas signāls no vērtības U_{iz} samazinās līdz 0 un tālāk pieaug līdz U_{iz} .

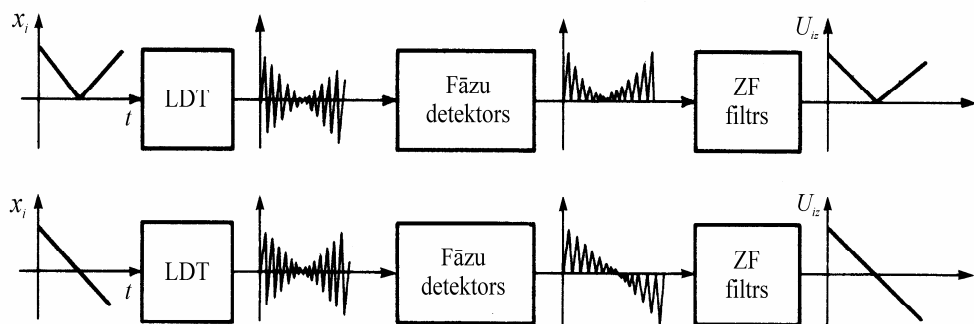
Izejas sprieguma amplitūdas izmaiņa pilnībā atbilst ieejas signāla izmaiņas likumam.

Savukārt attēlā 4.29c ieejas signāls x_i izmainās no $+x_i$ līdz 0 un tālāk līdz $-x_i$. Savukārt izejas signāls izmainās tādā pat veidā kā redzams attēlā 4.29b. Tas nozīmē,

ka LDT nedod iespēju noteikt ieejas signāla izmaiņas zīmi. Lai šo trūkumu novērstu izmanto iepriekš aprakstīto LDT īpašību pie „0”stāvokļa mainīt izejas signāla fāzi uz pretējo, t.i. fāze tiek pagriezta par 180° . Lai iegūtu divpolāru izejas signālu, diferenciālā transformatora izejā jāpieslēdz **fāzu detektors** un **zemfrekvences filtrs** (attēls 4.30).



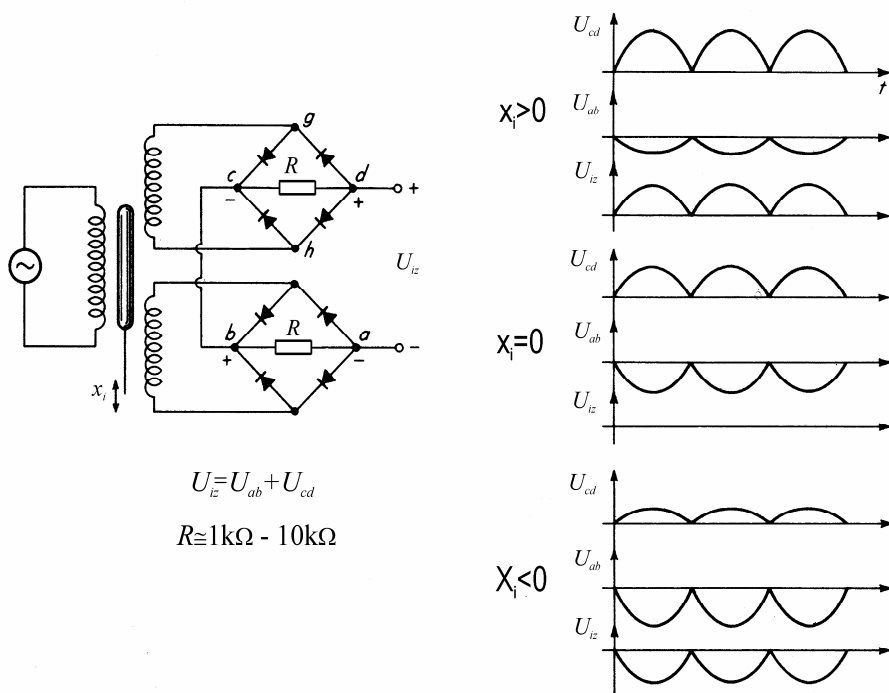
4.29 att. Lineārā diferenciālā transformatora izejas sprieguma izmaiņa atkarībā no serdeņa pārvietojuma



4.30 att. LDT darbība ar fāzu detektoru

Redzam, ka ieslēdzot fāzu detektoru LDT izejā, aiz fāzu detektora tiek iegūts pulsējošs līdzspriegums ar amplitūdu un zīmi proporcionālu ieejas signālam. Lai ierīce izejā iegūtu tīru līdzspriegumu, aiz fāzu detektora nepieciešams ieslēgt zemo frekvenču filtru. Filtra caurlaides joslu izvēlas nedaudz lielāku par mērāmā fizikālā lieluma augstāko izmaiņas frekvenci.

Viena no vienkāršākajām fāzu detektora shēmām un tās darbība parādīta attēlā 4.31. Signāls no LDT sekundārajiem tinumiem tiek padots uz tilta taisngriežiem ar slodzes pretestībām R . Taisngriežu izejas spriegumi tie saslēgti virknē pretējās fāzēs. Tādā veidā iegūstam abu spriegumu starpību. Attēla labajā pusē redzamas spriegumu diagrammas pie dažādiem serdeņa stāvokļiem.



4.31 att. **Fāzu detektora shēma un spriegumu diagrammas**

Attēlā 4.31 redzamais fāzu detektors nodrošina atbilstošas zīmes un amplitūdas izejas spriegumu ierīces izejā, taču tam piemīt nopietns trūkums – taisngriežu diodžu palielošais spriegums silīcija diodēm ir $\sim 0.7\text{V}$. Katrā pusperiodā vienlaicīgi darbojas 4 diodes (abos tiltos kopā). Tas nozīmē, ka detektora nejutības zona būs $\sim 2.8\text{V}$. Tas rada raksturīknes nelinearitāti serdeņa „0” stāvokļa tuvumā. Nejutības zonu var samazināt palielinot barošanas spriegumu. Šobrīd rūpnieciski ražotajos integrālajos fāzu detektoros izmanto sinhronās fāzu detektēšanas principu, kur nejutības zona ir samazināta līdz nenozīmīgam lielumam.

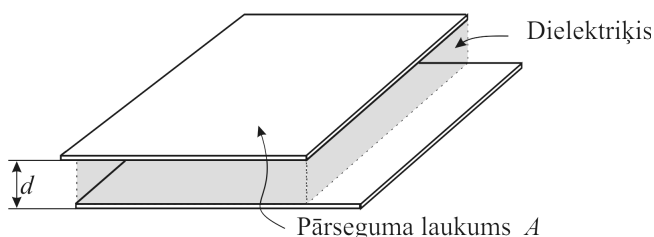
Ierīces ātrdarbību limitē tās mehāniskā inerce un izvēlēta barošanas sprieguma frekvence. Lai nodrošinātu vajadzīgo ātrdarbību, barošanas sprieguma frekvencei jābūt vismaz 10 reizes augstākai par paredzamo darba frekvenci.

Daudzas kompānijas piedāvā plašu sortimentu dažāda izmēra un ātrdarbības rūpnieciski ražotus lineāros diferenciālos transformatorus. Tos izmanto gan

pārvietojuma mērīšanai, gan, pēc mehāniskās transformācijas, arī spēka un spiediena mērīšanai. Ierīces parasti nodrošina augstu mērījumu precizitāti un traucējumu noturību, bet tās ir samērā dārgas.

4.4. Kapacitatīvais pārveidotājs

Šo pārveidotāju darbības principa pamatā ir kapacitātes izmaiņa mērāmā lieluma iedarbībā. Vienkāršākais kondensators sastāv no divām metāla plāksnēm starp kurām atrodas dielektrisks materiāls (4.32 att.).



4.32 att. Kapacitatīvā mērpārveidotāja shēma

Šāda kondensatora kapacitāti (pikofarados) var aprēķināt pēc formulas:

$$C = 0.0885 \cdot \varepsilon \cdot \frac{A}{d}, \quad (4.13)$$

kur d – attālums starp plāksnēm, cm, A – pārseguma laukums, cm^2 , ε - relatīvā dielektriskā caurlaidība.

Kondensatora kapacitāte atkarīga no tā ģeometriskajiem izmēriem un izolatora relatīvās dielektriskās caurlaidības. Dažādu materiālu relatīvā dielektriskā caurlaidība dota 4.1 tabulā. Redzam, ka vislielākā dielektriskā caurlaidība piemīt ūdenim. Plastikātiem tā svārstās robežās no 2 līdz 3.

Atkarībā no tā, uz kuru parametru iedarbojas mērāmais lielums, kapacitatīvajos pārveidotājos mērīšanai var izmantot efektīvās virsmas laukuma A , klājumu savstarpējā attāluma d vai efektīvās dielektriskās caurlaidības ε izmaiņas. No vienādojuma 4.13 secinām, ka kapacitātes izmaiņa lineāra attiecībā pret laukuma un dielektriskās caurlaidības izmaiņu, bet attiecībā pret plākšņu attālumu d – nelineāra.

Cilindrisko mērpārveidotāju kapacitāti pikofarados izsaka izteiksme:

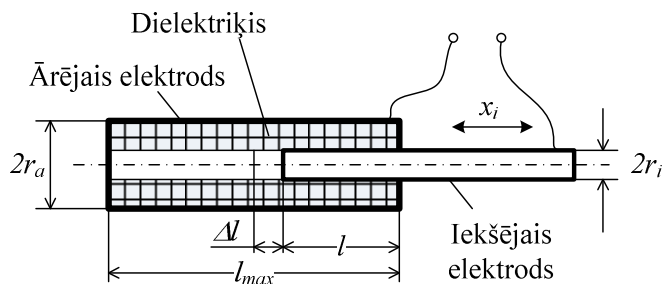
$$C = 0.0885 \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln \frac{r_a}{r_i}}, \quad (4.14)$$

kur l – iekšējā elektroda darbojošās daļas garums, cm, ε – dielektriķa dielektriskā caurlaidība, r_a un r_i – ārējā un iekšējā elektroda rādiuss, cm.

4.1 tabula. **Dažādu materiālu relatīvā dielektriskā konstante.**

<i>Materiāls</i>	Relatīvā dielektriskā caurlaidība
Etilspirts	25.1
Polivinilhlorīds	2.9
Metilspirts	33.5
Polietilēns	2.3
Stikls	3 ... 15
Polistirols	3.0
Ūdens	81
Transformatoru eļļa	2.2 ... 2.5
Ledus	4
Šiferis	6 ... 10
Gaiss	1
Ķieģelis	2.3
Cieta gumija	3 ... 4
Vazelīns	2.1 ... 2.3
Papīrs	1.2 ... 3.0
Kabeļu izolācijas kompaunds	2.5
Parafīns	2.2
Eļļains papīrs	5

Līdztekus plakaniem kondensatoriem pārvietojumu mērīšanā plaši izmanto cilindriskos kondensatorus (4.33 att.).



4.33 att. **Cilindriska kapacitīvā devēja shēma**

Kapacitātes izmaiņa ΔC aprēķināma pēc formulas 4.15:

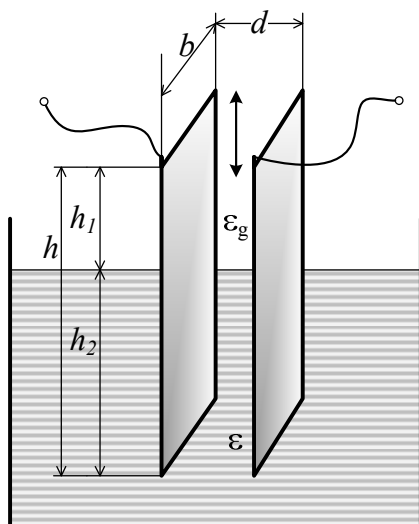
$$\Delta C = 0.0885 \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \Delta l}{\ln \frac{r_a}{r_i}}, \quad (4.15)$$

kur Δl – iekšējā elektroda pārvietojums, cm.

Kapacitāte mainās arī pārvietojot vienu plāksni attiecībā pret otru (laukuma A

maiņa), kā arī iebīdot citas dielektriskās caurlaidības dielektriķi starp plāksnēm. Pārvietojot dielektriķi perpendikulāri klājumu plaknei, iespējams izveidot pārveidotājus, kuriem mainās dielektriskā caurlaidība (4.34 att.).

Sevišķi ērti šo paņēmieni izmantot šķidruma līmeņa noteikšanai. Dielektriskā caurlaidība daudziem šķidrumiem, salīdzinājumā ar gaisu, ir ļoti liela (skat. 4.1 tabulu). Šķidruma elektrovadītspējai nav būtiskas ietekmes, jo var izmantot labi izolētus elektrodus. Tā kā gaisa dielektriskā caurlaidība ε_g atšķiras no kustīgā dielektriķa caurlaidības ε , tad var pieņemt, ka pārveidotājs satur divus paralēli slēgtus kondensatorus, kuru vienu daļu C_g veido gaisā esošā plāksņu daļa, bet otru – šķidrumā esošā daļa ΔC .



4.34 att. Šķidruma līmeņa mērīšanas shēma

Summārā kapacitāte C nosakāma pēc formulas:

$$C = C_g + \Delta C = 0.0885 \left(\frac{\varepsilon_g b h_1}{d} + \frac{\varepsilon b h_2}{d} \right), \quad (4.16)$$

kur C_g – gaisā esošās elektrodu daļas kapacitāte, ΔC – šķidrumā esošās daļas kapacitāte.

Ņemot vērā, ka $\varepsilon_g=1$ un $h_1=h-h_2$, izsakām ΔC :

$$\Delta C = 0.0885 \frac{b h_2}{d} (\varepsilon - 1). \quad (4.17)$$

Kā redzam, starp kapacitātes izmaiņu un šķidruma līmeni ir lineāra sakarība, kas nodrošina augstu mērījuma precizitāti.

Mērot neelektriskus lielumus, kapacitātes relatīvā izmaiņa var mainīties ļoti

plašās robežās, atkarībā no izmantotā jutīgā elementa un kapacitātes maksimālā lieluma. Kondensatora kapacitātes lielas izmaiņas var samērā vienkārši izmērīt ar dažādiem paņēmieniem. Mazu kapacitātes izmaiņu noteikšanai lieto jutīgākas metodes, piemēram, tilta, rezonanses vai sitienu. Vienkāršākā no tām ir tilta metode, ar kuru iespējams mērīt kapacitātes izmaiņas $\Delta C/C$ robežās no 10^{-4} līdz 10^{-3} . Lai noteiktu mērtilta parametrus jāzina sensora kapacitātes kompleksā pretestība. To aptuveni pieņem vienādu ar kondensatora reaktīvo pretestību X_c un nosaka pēc formulas:

$$Z \cong X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}, \quad (4.18)$$

kur Z – kompleksā izejas pretestība, Ω , f – barošanas sprieguma frekvence, Hz, C – kapacitāte, F. Parasti izejas pretestība kapacitatīvajiem mērpārveidotājiem ir augsta, un tas jāņem vērā izvēloties signāla apstrādes trakta nākošās pakāpes. Mērījumiem, kur nepieciešama vēl augstāka jutība ($\Delta C/C$ robežās no 10^{-5} līdz 10^{-6}), izmanto rezonanses vai sitienu metodes.

Kapacitatīvajiem pārveidotājiem ir vairākas priekšrocības: augsta jutība, mazi izmēri un svars, vienkārša uzbūve, niecīga inerce un neliela atgriezeniskā iedarbība uz kontrolējamo parametru.

Tomēr kapacitatīvajiem pārveidotājiem ir arī trūkumi:

- ✓ liela iekšējā pretestība,
- ✓ jutība pret gaisa mitruma palielināšanos un norasošanu,
- ✓ jutība pret ārējiem elektriskajiem laukiem un noplūdes kapacitātēm.

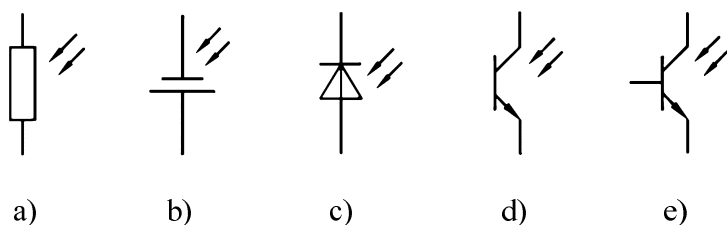
Lai sasniegtu augstu jutību, pārveidotāja barošanas avotam jābūt ar augstu darba frekvenci, bet ārējo elektrisko lauku iedarbības un parazitisko kapacitāšu samazināšanai nepieciešama pārveidotāja rūpīga ekranēšana. Pārveidotāja kļūdu sevišķi stipri ietekmē temperatūras un apkārtējās vides mitruma izmaiņas, kuru rezultātā mainās pārveidotāja ģeometriskie izmēri un gaisa dielektriskā caurlaidība. Daudzi ražotāji lieto papildus elektrodu, kas ļauj samazināt mitruma, rasas un ledus ietekmi uz sensora parametriem. Lai sasniegtu maksimālu pārveidotāja jutību, jānodrošina mazas montāžas kapacitātes un jālieto pēc iespējas īsāki montāžas vadi.

4.5. Optiskie pārveidotāji

Pie gaismjutīgiem sensoriem uz pusvadītāju bāzes pieder fotorezistori, fotoelementi, fotodiodes un fototranzistori. Krītošas gaismas ietekmē tajos paaugstinās pusvadītājmateriāla elektrovadītspēja, ko var izmantot dažādā veidā. Fotorezistorus, fotodiodes un fototranzistorus sauc par **pasīviem fotopusvadītājiem**, turpretī fotoelementus un solārās jeb saules baterijas uzskatāmas par **aktīviem**

fotopusvadītājiem, jo tajos elektrisko strāvu ģenerē krītošā gaisma. Fotoelementi un saules baterijas pārveido gaismas enerģiju elektriskajā enerģijā. Fotodiodes arī ģenerē elektrisko spriegumu gaismas ietekmē, taču šis efekts netiek plaši izmantots, jo signāla jauda ir niecīga.

Fotopusvadītāju shematiskie apzīmējumi redzami attēlā 4.35.



4.35 att. **Fotopusvadītāju shematiskie apzīmējumi**

- a) fotorezistors, b) fotoelements/saules baterija, c) fotodiode,
d) fototranzistors, e) fototranzistors ar bāzes izvadu,

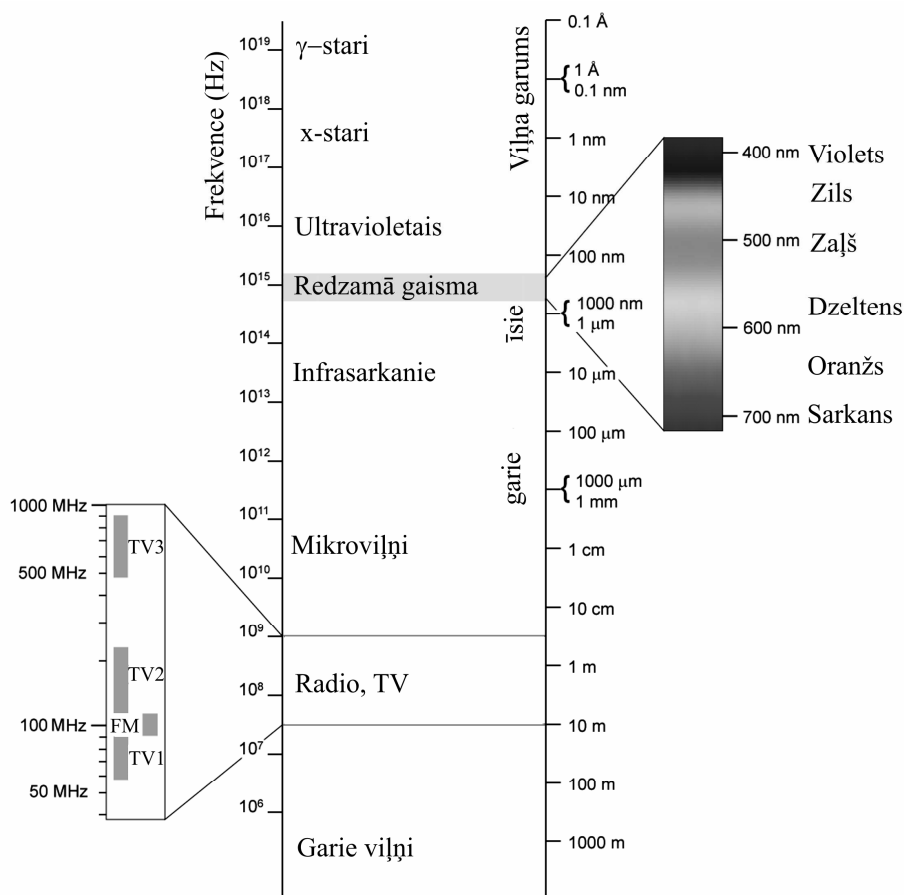
Aktīvos fotopusvadītājus un to īpašības mēs jau analizējām 4.1 nodaļā, tāpēc tagad apskatīsim tikai pasīvo pusvadītāju darbības principus, īpašības un izmantošanas iespējas.

Lai saprastu un spētu salīdzināt ražotāju doto fotopusvadītāju parametrus un raksturlīknes, ir nepieciešams zināt dažus svarīgākos gaismas tehnikas parametrus, kā arī to fizikālās sakarības. Daudzos izmantošanas gadījumos vienlaicīgi parādās kā redzamā, tā neredzamā gaisma, tāpēc ir lietderīgi vai pat nepieciešams izmēģināt fotopusvadītājus vai atbilstošos slēgumus reālos ekspluatācijas apstākļos.

Gaisma ir elektromagnētiskas viļņi, ko sauc arī par elektromagnētisko starojumu. Mūsu lielākais dabiskais gaismas avots ir saule. Turpretim kvēlspuldzes, luminiscentās lampas vai gaismu emitējoši fotopusvadītāji ir mākslīgi gaismas avoti, kuros dažādā veidā elektriskā enerģija tiek pārveidota gaismas enerģijā, t.i., starojuma enerģijā. Redzamā, cilvēka acij uztveramā gaisma, ir tikai pavisam neliela daļa no plašā elektromagnētisko viļņu spektra. Tas sniedzas no tehniskās maiņstrāvas ar zemu frekvenci līdz pat kosmiskajam starojumam ar ļoti augstu frekvenci. Tā kā elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums, tāpat kā gaismas ātrums, ir $c = 300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ jeb $3 \cdot 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tad pastāv noteikta sakarība starp starojuma frekvenci $f(\text{Hz})$ un elektromagnētisko svārstību viļņu garumu $\lambda(\text{m})$. To izsaka vienādojums:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{f}. \quad (4.19)$$

Elektromagnētisko svārstību spektrs pēc viļņu garuma ir 4.36 attēlā. Par viļņu garuma mērvienību ir pieņemts mikrometrs ($1\mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6}\text{ m}$). Pāreja starp atsevišķiem spektriem ir plūstoša. Redzamās gaismas diapazons ir sadalīts sīkāk.



4.36 att. Elektromagnētisko viļņu starojuma spektrs

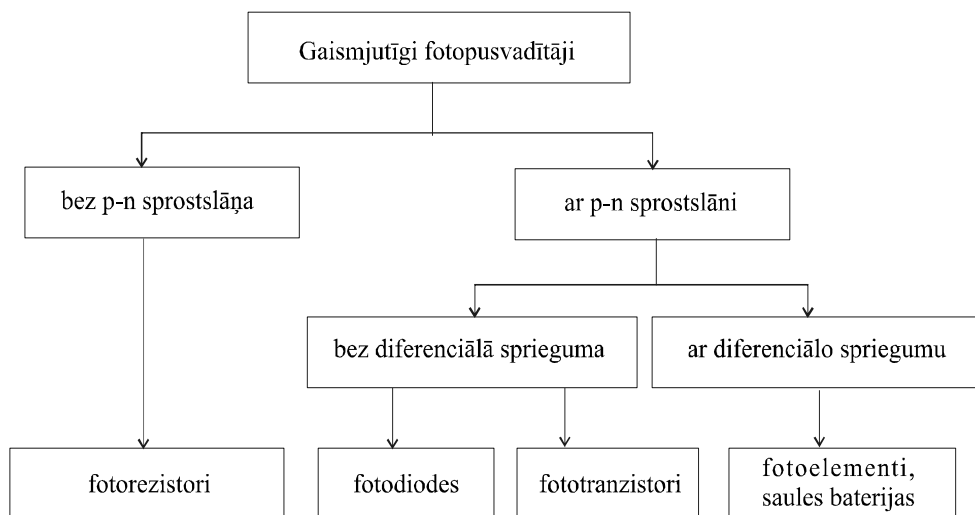
Redzamās gaismas diapazons kopējā spektrā ir ļoti mazs. Gaismai pieskaita vēl arī infrasarkanā starojumu un ultravioletos starus. Tos cilvēka acs vairs neuztver, un tāpēc tos sauc arī par neredzamo gaismu. Fotopusvadītāju gaismas jutīgums var atrasties arī neredzamās gaismas spektrā.

Kā redzams 4.36 attēlā, gaismas krāsa ir atkarīga no viļņu garuma. Infrasarkanai gaismai (IR) viļņu garums ir no apmēram 780 nm līdz 10^6 nm. Tai seko garo viļņu, bet jau redzamā tumši sarkanā gaisma. Redzamā gaisma ar visīsāko viļņu garumu tiek uztverta kā violeta krāsa, bet, viļņu garumam samazinoties, seko pāreja uz neredzamo ultravioleto gaismu (UV). Šī krāsu secība, piemēram, ir redzama arī katrā varavīksnē. Šīs krāsas sauc arī par gaismas spektrālrāsām. Dabīgā, baltā saules gaisma, kvēlspuldžu un luminiscento lampu radītā gaisma vienmēr ir dažādu viļņu garuma elektromagnētisko svārstību sajaukums. Saules gaismu ar prizmu var sadalīt 4.36 attēlā parādītajās spektrālrāsās. Mākslīgajos gaismas avotos, izmantojot atšķirīgus

materiālus un to dažādas fizikālās īpašības, ir iespējams starojuma galveno daļu ierindot infrasarkanajā, sarkani-oranžajā vai dzeltenī-zaļajā spektrā.

Gaismjutīgie fotopusvadītāji

Fotorezistori, fotodiodes, fototranzistori, fotoelementi un saules baterijas ir gaismjutīgi fotopusvadītāji. To iedalījums dots 4.37 attēlā.



4.37 att. **Gaismjutīgo fotopusvadītāju iedalījums**

Lai gan dažādie gaismjutīgo pusvadītāju veidi pēc savas uzbūves un funkcijām ir visai atšķirīgi, to darbības principa pamatā ir līdzīgs fizikas efekts, ko sauc par "iekšējo fotoelektrisko efektu".

Katram pusvadītājmateriālam istabas temperatūrā piemīt elektriskā vadītspēja. Pieaugot temperatūrai, tā palielinās, jo, pateicoties spēcīgākai atomu sasilšanai, aizvien vairāk tiek izjauktas saites kristālu režģī un rodas arvien vairāk brīvo elektronu. Tomēr šis efekts parādās ne tikai, pievadot siltumenerģiju, bet arī pievadot pusvadītājam enerģiju gaismas veidā. Elektronu skaits, kas atbrīvojas krītošās gaismas ietekmē, kļūst jo lielāks, jo lielāka ir starojuma vai apgaismojuma intensitāte.

Iekšējais fotoelektriskais efekts novērojams visiem pusvadītājmateriāliem. Tā kā diodēs un tranzistoros tas varētu izraisīt traucējumus, tad šiem elementiem ir gaismas necaurlaidīgs korpuss. Turpretī visu gaismjutīgo fotopusvadītāju korpusā ir atstāts "lodziņš", pa kuru gaismai nonākt uz pusvadītājmateriālu.

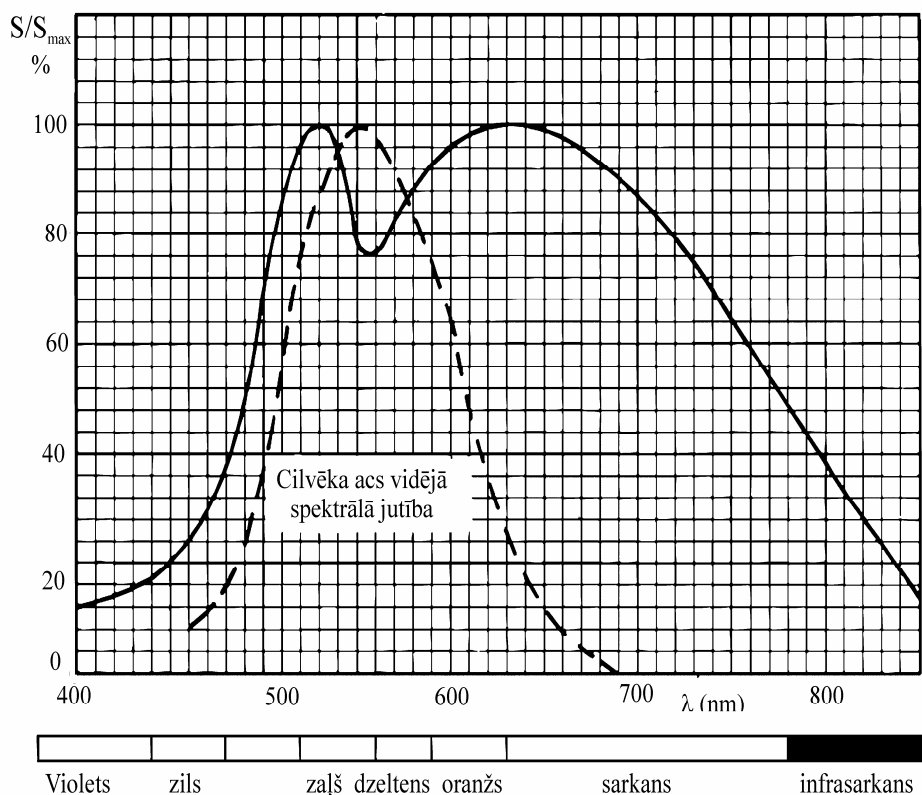
Fotorezistori

Fotorezistori sastāv no jauktiem pusvadītāju kristāliem. Tā kā *p-n* sprostslāņa nav, tad rezistora darbība nav atkarīga no strāvas virziena un to var darbināt kā līdzstrāvas, tā arī maiņstrāvas režīmā. Uz fotorezistoru krītošā gaisma izrauj valences elektronus no

pusvadītājmateriāla kristāliskā režģa, elektroni sāk brīvi kustēties, un materiāla elektriskā vadītspēja paaugstinās. Tātad, pieaugot apgaismojuma intensitātei, fotorezistora pretestība samazinās.

Fotorezistoru izgatavošanai, kuru spektrālais jutīgums ir redzamās gaismas diapazonā, izmanto kadmija sulfīdu (CdS) un kadmija selenīdu (CdSe). No svina sulfīda (PbS) un indiņa antimonīda (InSb) izgatavotajiem fotorezistoriem spektrālais jutīgums atrodas infrasarkanajā diapazonā.

Kadmija sulfīda fotorezistoru relatīvais jutīgums ir parādīts 4.38 attēlā. Redzams, ka fotorezistora spektrālais jutīgums ir ievērojami plašākā spektra diapazonā, salīdzinājumā ar cilvēka acs vidējo spektrālo jutīgumu.



4.38 att. Kadmija sulfīda fotorezistoru relatīvais jutīgums

Fotorezistoru svarīgākie parametri ir **tumsas strāvas pretestība** R_0 un **gaismas strāvas pretestība** R_H . Tehniskajās pasēs tos galvenokārt norāda apgaismojuma intensitātei $E_V=100\text{lx}$. Tehniskajās pasēs bieži norāda arī gaismas strāvas pretestību R_{1000} apgaismojuma intensitātei $E_V = 1000 \text{ lx}$. Tumsas strāvas pretestība tiek definēta kā pretestības lielums vienu minūti pēc pilnīgas aptumšošanas; $R_0 \geq 10\text{M}\Omega$. Gaismas

strāvas pretestība tiek norādīta pie apgaismojuma 100lx vai 1000lx. Tipiskās vērtības $R_{H100} \approx 500 \, \Omega$ līdz 50 k Ω , atkarībā no rezistora tipa.

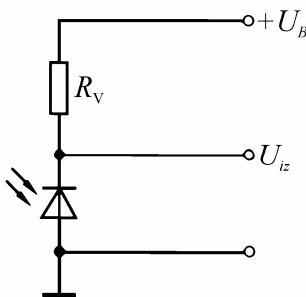
Fotorezistoru tehniskajos datos norāda arī maksimālo spriegumu un maksimālo izkliedes jaudu. Ieslēdzot fotorezistorus shēmās, šos parametrus nedrīkst pārsniegt.

Svarīgi!

Izmantojot fotorezistorus, jāievēro, ka rezistora pretestības lielums, mainoties apgaismojuma intensitātei, izmainās ar zināmu inerci. Inerce ir atkarīga no darba punkta un spektrālā jutīguma izmaiņām. Atkarībā no rezistora tipa var pāriet apmēram no 30 sekundēm līdz 20 minūtēm, līdz pilnīgas aptumšošanas gadījumā tiek sasniegta tumsas strāvas pretestība $R_0 > 1 \text{ M}\Omega$. Šī inerce parādās tāpēc, ka apgaismošanas rezultātā iegūtiem brīviem lādiņnesējiem jāmaina sava vieta, t.i., jāveido ciešas saites kristāliskā režģa iekšienē (rekombinācijas process). Tādēļ fotorezistorus nav vēlams izmantot tur, kur jāfiksē ātras apgaismojuma intensitātes izmaiņas.

Fotodiodes

Mūsdienās fotodiodes izgatavo tikai no silīcija. Izšķir *p-n* fotodiodes un PIN fotodiodes. *P-n* fotodiožu uzbūve ir līdzīga fotoelementu uzbūvei, taču to *p-n* zona ir nedaudz biezāka. Fotodiožu darbināšanai ir nepieciešams darbspriegums, kā arī slodzes pretestība R_V . Slēguma principiālā shēma ir parādīta 4.39 attēlā.



4.39 att. Fotodiožu slēguma principiālā shēma

Neapgaismojot pusvadītāja diodi, cauri *p-n* sprostslānim, līdzīgi kā pusvadītāju diodē, plūst sproststrāva, kuru fotodiodēs sauc par tumsas strāvu I_R .

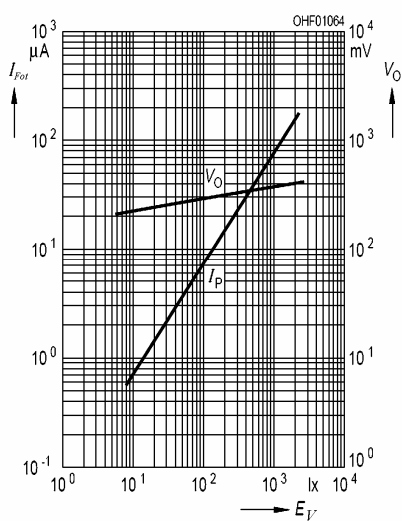
Ja *p-n* pāreju apgaismo, tad enerģijas pievades rezultātā tiek izjauktas atomu saites kristālrežģī un izveidojas kustīgi lādiņnesēju pāri, kuri elektriskā lauka ietekmē aizplūst, pie tam caurumi plūst uz *p* tipa slāni un elektroni uz *n* tipa slāni. Apgaismojuma ietekmē ģenerējas papildus fotostrāva I'_{Fot} , kas pieaug lineāri līdz ar apgaismojuma intensitāti. Šī fotostrāva summējas ar tumsas strāvu, kopējo fotostrāvu, kas izveidojas apgaismošanas rezultātā, apraksta vienādojums:

$$I_{\text{Fot}} = I_R + I'_{\text{Fot}}. \quad (4.20)$$

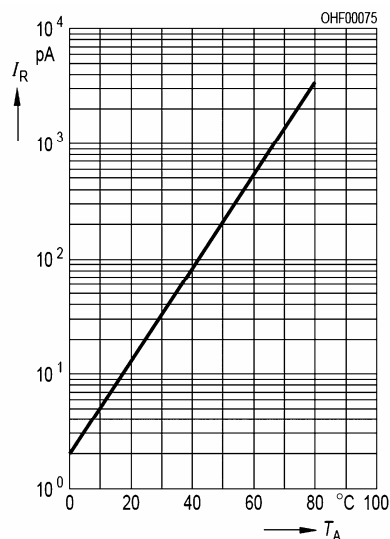
Tā kā I_R ir daudz mazāka kā I'_{Fot} , tad:

$$I_{\text{Fot}} \approx I'_{\text{Fot}} \quad (4.21)$$

Attēlā 4.40 ir parādīta sakarība starp fotostrāvu I_{Fot} un apgaismojuma intensitāti E_V kompānijā *Siemens* ražotajām *p-n* fotodiodēm BWP33. Parasti specifikācijās tiek norādīta arī fotodiodes ģenerētā tukšgaitas sprieguma V_o atkarība no apgaismojuma intensitātes.



4.40 att. Fotodiodes BPW 33 raksturlīknes (*Siemens*)



4.41 att. BPW33 tipa fotodiodes tumsas strāvas atkarība no temperatūras

Dotā raksturlīkne ir attēlota dubultlogaritmiskā mērogā. Pēc šīs raksturlīknes konstantā kāpuma ir redzams, ka pastāv lineāra atkarība starp I_{Fot} un E_V . Tādēļ fotodiodes ir īpaši piemērotas precīzai apgaismojuma intensitātes mērīšanai.

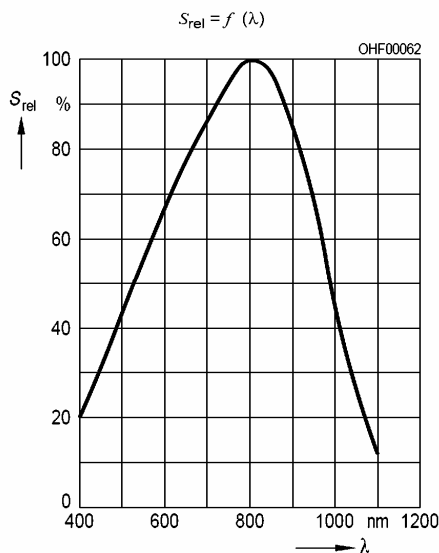
Tomēr, izmantojot fotodiodes kā mērpārveidotājus, to mērījumu precizitāti ietekmē tumsas strāvas I_R atkarība no temperatūras. Attēlā 4.41 redzama fotodiodes BPW33 tumsas strāvas izmaiņa atkarībā no apkārtējās vides temperatūras. Pie augstākām temperatūrām tumsas strāva ievērojami pieaug, un var radīt ievērojamas mērījuma kļūdas.

Tāpat kā visām citām gaismjutīgām elektroierīcēm, arī fotodiodēm piemīt spektrālais jutīgums. BPW33 tipa diodei relatīvais spektrālais jutīgums S_{rel} parādīts 4.42 attēlā.

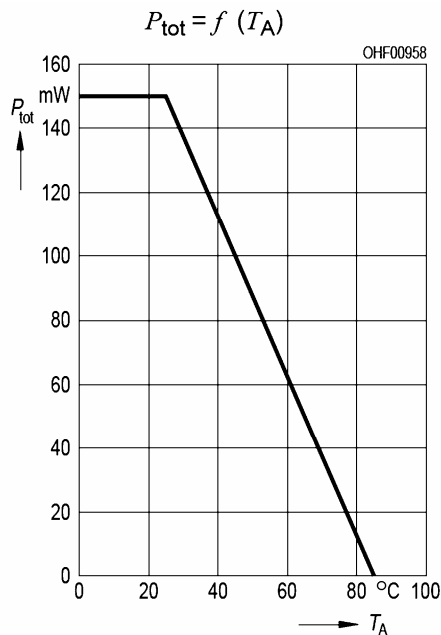
Šīs fotodiodes relatīvās spektrālās jutības maksimums atbilst viļņa garumam $\lambda \approx 800$ nm, tātad pārejas apgabalā no tumši sarkana uz infrasarkanā spektra diapazonu. Līdzīgi tas ir arī citiem silīcija fotodiožu tiem.

Fotodiožu *p-n* pārejas virsmai ir relatīvi liela barjerkapacitāte. Piemēram, *Siemens* fotodiodes BPW33 barjerkapacitāte C_0 , pie sprosprieguma $V_R = 0V$ un $f=1$

MHz, ir 630pF. Tas ierobežo fotostrāvas pieauguma ātrumu un izejas signāla pārslēgšanās laiku. Fotodiode BPW33 šis laiks ir 1.5μs. Fotodiodes BPW33 maksimālais spriegums ir $U_R=7V$



4.42 att. **BPW33 tipa fotodiodes spektrālā jutība**



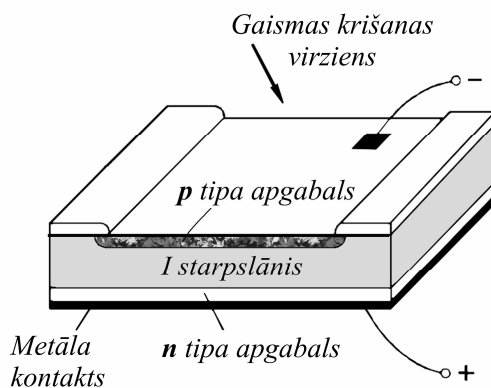
4.43 att. **Fotodiodes BPW33 maksimāli pieļaujamās izkliedes jaudas atkarība no temperatūras**

Ieslēdzot fotodiodes shēmās, nedrīkst pārsniegt diodes izkliedēto jaudu darba temperatūrā. Ierīces specifikācijā ir norādīta maksimālā izkliedes jauda $P_{tot}=150mW$ (diodei BPW33, temperatūrā 25°C). Fotodiodes BPW33 maksimālās izkliedes jaudas atkarība no temperatūras redzama attēlā 4.43.

Kā redzam, ja diodes temperatūra darba laikā var sasniegt 60°C, tad tās darba režīms jāizvēlas tā, lai izkliedes jauda nepārsniegtu 60mW, t.i. 2.5 reizes mazāk nekā maksimāli pieļaujamā jauda 25°C temperatūrā.

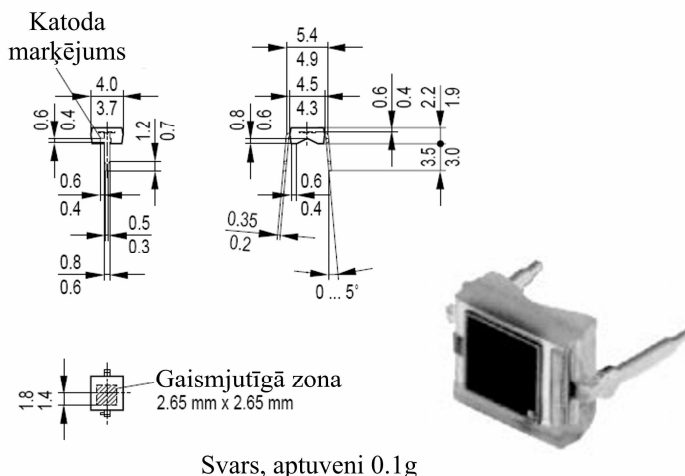
Lai novērstu $p-n$ fotodiodžu trūkumus, strauji mainīgu signālu gadījumos, tika izveidotas PIN fotodiodes. Vārds PIN norāda uz zonu secību šajās fotodiodēs: p tipa slānis, I - iekšējais slānis un n tipa slānis. PIN fotodiodžu uzbūve parādīta 4.44 attēlā. PIN diodēs starp ļoti plāno p un n tipa slāni atrodas biezs iekšējais starpslānis, t.i., vadošs pusvadītāju materiāls bez piejaukuma. Šajā I -slānī nav kustīgo lādiņnesēju, tāpēc uz tā krīt gandrīz viss pieliktais spriegums.

Lielās I -slāņa elektriskā lauka intensitātes dēļ apgaismojuma ģenerētie lādiņnesēju pāri uz p vai n slāni tiek novirzīti ātrāk nekā $p-n$ fotodiodēs. Lielāks lādiņnesēju pāru kustīgums labvēlīgi ietekmē elektroierīces pārslēgšanu.



4.44 att. PIN fotodiodes uzbūve

PIN fotodiodes ieslēdzas nanosekunžu laikā un to ieslēgšanās laiks ir 1000 reižu īsāks nekā p - n fotodiodēm. PIN fotodiodes var izmantot ievērojami lielākām frekvencēm nekā p - n fotodiodes. Piemēram, Siemens PIN fotodiodēm BPW34 barjerkapacitāte ir 72pF un pārslēgšanās laiks 20ns.



4.45 att. PIN un p - n fotodiožu konstrukcija (Siemens)

Vienādas gaismjutīgās virsmas gadījumā, fotostrāva PIN fotodiodēs ir uz pusi mazāka nekā p - n diodēs. Spektrālā jutīguma, kā arī temperatūras režīma ziņā būtisku atšķirību starp abiem fotodiožu veidiem nav. Samērā biežā I -slāņa dēļ PIN diodēm ir ievērojami lielāks sprostspriegums U_R . Tas sasniedz vērtības no 50V līdz 100V. Pēdējos gados PIN fotodiodes ieguvušas aizvien lielāku popularitāti. Pateicoties augstam spektrālam jutīgumam infrasarkanajā spektra diapazonā un īsajam ieslēgšanas laikam, tās plaši izmanto tālvadības ierīcēs ar modulētu infrasarkanu gaismu.

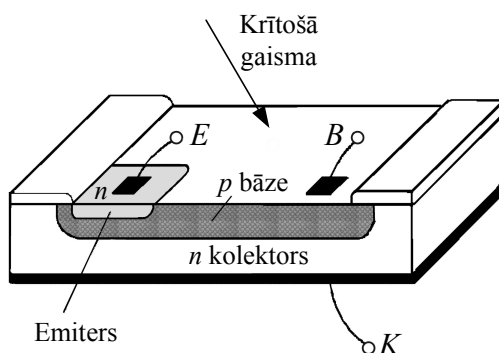
PIN diodes un p - n fotodiodes ģenerē spriegumu apgaismojuma ietekmē. Tās var

darbināt arī kā fotoelementus bez ārēja darbsprieguma. Tomēr šajā režīmā fotodiodes izmanto vienīgi izņēmuma gadījumos.

Dažādu kompāniju ražoto gaismjutīgo fotopusvadītāju konstruktīvā uzbūve ir ļoti atšķirīga. *Siemens* fotodiožu konstruktīvais izveidojums un izmēri redzami 4.45 attēlā. Šīs diodes ir paredzētas montēšanai spiestajās platēs. To izmēri un svars ļauj veidot miniatūru gaismjutīgos sensorus ar mazu enerģijas patēriņu. Mērīšanas shēmās būtiska nozīme ir arī pārējo shēmas elementu precizitātei un parametru stabilitātei.

Fototranzistori

No fotodiožu sprieguma dalītāja iegūtā strāva bieži vien ir par mazu, lai efektīvi vadītu nākamās mērķēdes pakāpes. Lai novērstu šo trūkumu, tika izveidoti fototranzistori, kuri, vienlaicīgi ar starojuma enerģijas uztveršanu, veic arī fotostrāvas pastiprināšanu. Planārā tehnoloģijā izgatavota fototranzistora uzbūve ir redzama 4.46 attēlā.



4.46 att. Planārā tehnoloģijā izgatavota fototranzistora uzbūve

Izveidojot vēl vienu p - n pāreju, p - n diodes p piejaukuma apgabals kļūst par fototranzistora bāzi. Krītot gaismai uz samērā lielo bāzes virsmu, izveidojas kustīgi lādiņnesēju pāri, kas rada bāzes strāvu un stūrē 100 līdz 700 reizes lielāku kolektora strāvu.

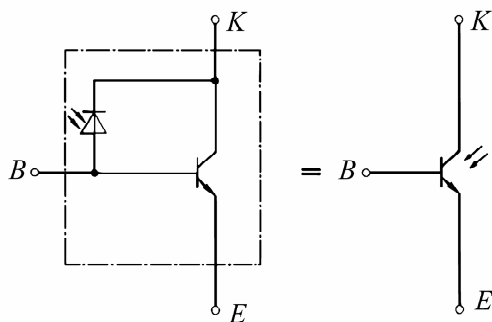
Fototranzistorus pēc to uzbūves, kā arī darbības veida var uzskatīt par fotodiodes kopslēgumu ar bipolāru tranzistoru. Vienkāršota fototranzistora ekvivalentā shēma ir dota 4.47 attēlā.

Caur neapgaismotu fotodiodi plūst tikai ļoti maza tumsas strāva I_{Ro} , kas vienlaikus ir arī tranzistora bāzes strāva. Tranzistora tumsas strāvu I_{Co} var aprēķināt pēc vienādojuma:

$$I_{Co} = B \cdot (I_{CBo} + I_{Ro}), \quad (4.22)$$

kur I_{CBo} - kolektora-bāzes diodes sproststrāva, B - tranzistora strāvas pastiprinājums.

Apgaismojot fotodiodi, plūst fotostrāva I_{Fot} , kas, pastiprināta par strāvas pastiprinājuma B vērtību, ir kolektora strāva un uzklājas tumsas strāvai.



4.47 att. Vienkāršota fototranzistora ekvivalentā shēma

Tāpēc fototranzistora kolektora strāvas aprēķināšanai spēkā ir vienādojums:

$$I_C = I_{Co} + B \cdot I_{Fot}, \quad (4.23)$$

Tā kā tumsas strāva I_{Co} ir daudz mazāka nekā $B \cdot I_{Fot}$, tad I_{Co} var neņemt vērā. Praksē pieņem:

$$I_C \approx B \cdot I_{Fot}. \quad (4.24)$$

Salīdzinājumā ar fotodiodēm, fototranzistoriem ir daudz lielāks spektrālais jutīgums. Transistora raksturlīknes ir izliektas, tāpēc starp kolektora strāvu I_C un apgaismojuma intensitāti E_V nepastāv lineāra sakarība. Tās ir ļoti līdzīgas bipolāra tranzistora raksturlīknēm. Atšķirībā no bipolārā tranzistora, bāzes strāvas vai bāzes-emitera sprieguma vietā kā parametrs tiek uzdots apgaismojuma intensitāte E_V . Fototranzistorus ieslēdz shēmās tāpat kā bipolāros tranzistorus, un to parametrus aprēķina tieši tāpat kā bipolāram tranzistoram.

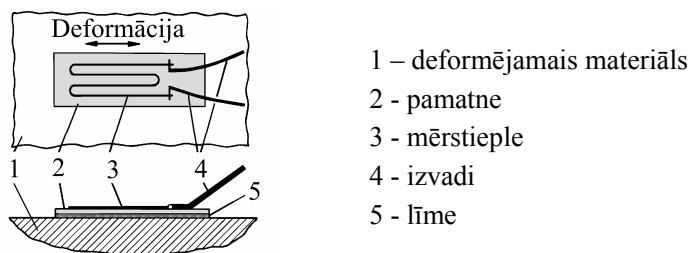
4.6. Pjezorezistīvie mērpārveidotāji

Lai deformāciju pārveidotu izmērāmā elektriskā signālā, var izmantot visdažādākos fizikālos principus. Aplūkosim metodes, kuru pamatā ir pjezorezistīvie efekti (grieķu val. *piezein* - saspīest). **Pjezorezistīvā** vai arī pjezopretestības efekta gadījumā ārējs spēks, kas izraisa stiepes vai spiedes spriegumu, iedarbojas uz materiālu un izsauc lādiņnesēju kustīguma vai arī lādiņnesēju blīvuma izmaiņas. Līdz ar to izmainās sensora materiāla **omiskā pretestība**.

Pjezoelektriskā efekta gadījumā (tos aplūkrojām nodaļas sākumā) ārējs spēks, kas iedarbojas uz jutīgo elementu, izraisa devēja materiālā lādiņnesēju novirzīšanos, ko var izmērīt uz elektrodiem kā elektrisko spriegumu. Tie ir aktīvie sensori.

Pjezorezistīvos mērpārveidotājus sauc par tenzorezistoriem (TR). Tenzorezistori ir visplašāk izplatītās ierīces deformācijas mērīšanai. To darbības princips balstās uz elektriska vadītāja pretestības atkarību no tā garuma un šķērsgriezuma laukuma

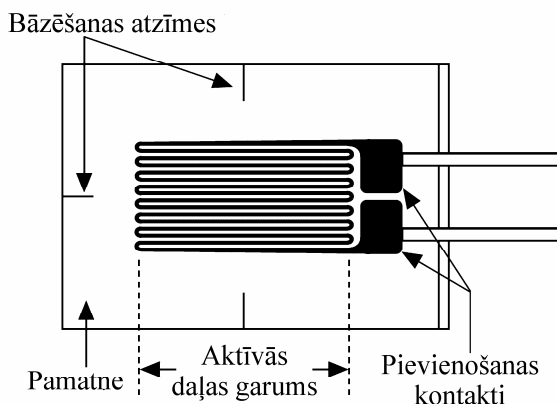
izmaiņas mehāniskās deformācijas rezultātā. Parasti elektriskais vadītājs (metāla stieple) tiek pielīmēts ar izolējošu līmi pie deformējamā materiāla. Slogojot materiāls deformējas kopā ar līmes kārtiņu un elektrovadītāju (4.48 att.).



4.48. att. **Tenzorezistora darbības princips**

Deformācijas rezultātā izmainās tenzorezistora vadītāja garums un šķērsriezuma laukums. Piemēram, stiepes slogojumā vadītāja garums pieaug, bet šķēsgriezums samazinās proporcionāli Puasona koeficientam. Sakarību starp stiepes vai spiedes spēku izsaka no materiālu pretestības zināmais Huka likums. Savukārt šķēsgriezuma laukuma samazināšanās notiek šķērsdeformācijas rezultātā, ko ievērtē šķērsdeformācijas jeb Puasona koeficients.

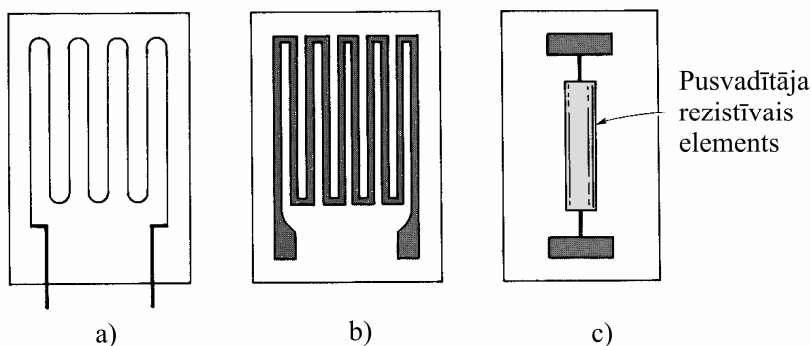
Šķērsdeformācijas koeficienta vērtības metāliem ir robežās no 0.25 līdz 0.3. Augstāk minētās sakarības spēkā tikai elastīgo deformāciju robežās.



4.49 att. **Tenzorezistora uzbūve**

Tenzorezistora konstruktīvā uzbūve redzama 4.49 attēlā. Ir divi galvenie tenzorezistoru veidi: metāla tenzorezistorus un pusvadītāju (4.50 att.).

Metāla tenzorezistoru jutīgais elements tiek izgatavots no metāla stieples vai no metāla folijas. Tā rezultātā izšķir divus metāla TR tipus – stieples un folijas. Pusvadītāju TR tiek izgatavoti uznesot uz pamatnes pusvadītāja slāni, kurš tiek pakļauts deformācijai.



4.50 att. Tenzorezistoru veidi.

a – stieples, b – folijas, c – pusvadītāja

Stieples tenzorezistorus izgatavo no tenzojutīga materiāla stieples ar diametru 0.01mm līdz 0.025 mm, iestrādājot to polimēra vai papīra pamatnē. Folijas tenzorezistorus uznesot valcētu slāni vadošo slāni 0.02 mm biezumā uz polimēra pamatnes un tad izkodinot nepieciešamo vadītāja konfigurāciju. Tas dod iespēju izgatavot optimālas konfigurācijas un formas tenzorezistorus dažādām vajadzībām. Pateicoties tehnoloģijas elastīgumam, tas ir visplašāk lietotais tenzorezistoru veids.

Lai iegūtu pēc iespējas lielāku izejas signāla spriegumu, tenzorezistoriem jābūt ar lielu pretestību, bet sakarā ar to tiek ierobežots piemērotu augstas pretestības izejmateriālu skaits. Mazā temperatūras koeficienta un relatīvi augstās īpatnējās pretestības dēļ galvenokārt tiek izmantoti konstantāna un platīna-volframa leģējumi. Par pamatnes materiālu izmanto papīru, bakelītu vai poliamīda sveķus. Tenzorezistoru nominālā pretestība parasti ir 100, 350 vai 1000 Ω , pieļaujamā strāva no 5 līdz 40 mA; jutības koeficienti robežās no 2 līdz 5. Tas nodrošina izejas signāla lielumu no 5mV līdz 30mV.

Pusvadītāju tenzorezistorus izgatavo no aptuveni 0.25 mm biezas tenzojutīga silīcija plāksnītes. Tā priekšrocība ir ļoti augsts jutības koeficients ($k \approx 100$). Ierīces trūkumi ir materiāla trauslums un augsta pretestības atkarība no temperatūras.

Līdzās vienkāršiem tenzorezistoriem plaši tiek izmantotas dažādu konfigurāciju tenzorezistoru rozetes, kuras sekmīgi izmantojamas sarežģītu spriegumu mērīšanai. TR rozetes parasti izgatavo folijas tehnoloģijā.

Deformācijas lielumu nosaka izmērot elektrovadītāja pretestības izmaiņu un veicot aprēķinus pēc tālāk apskatītās metodikas. Elektrovadoša materiāla pretestību R aprēķina pēc formulas:

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (4.25)$$

kur L – vadītāja garums, m, A – šķērsgriezuma laukums, m^2 , ρ - materiāla īpatnējā pretestība, $\Omega \cdot m$.

Ja vadītājs tiek deformēts stiepjot vai spiežot, izmainās tā garums L un šķērsriezuma laukums A . Pretestību ietekmē arī īpatnējās pretestības izmaiņa atkarībā no deformācijas pakāpes.

Pretestības izmaiņu dR nosaka pēc formulas:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_a (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho}, \quad (4.26)$$

kur R – neslogota elementa pretestība, ε_a – elementa relatīvais pagarinājums, μ – Puasona koeficients, $d\rho$ – materiāla īpatnējās pretestības izmaiņa.

Izmantojot tenzorezistorus deformāciju mērīšanā, ir būtiski zināt to jutības koeficientu. Tenzorezistora jutības koeficientu k definējam kā pretestības relatīvās izmaiņas dR/R attiecību pret relatīvo deformāciju:

$$k = \frac{dR/R}{\varepsilon_a}. \quad (4.27)$$

Apvienojot ar formulu 4.26, iegūstam:

$$k = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\varepsilon_a \rho}. \quad (4.28)$$

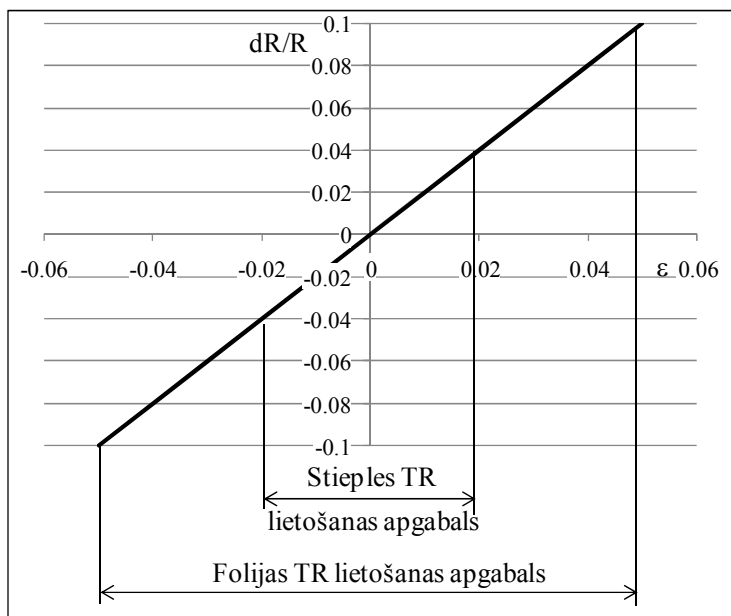
Ražotāji katra tenzorezistora pasē norāda jutības koeficienta vērtību un sākotnējo pretestību, tāpēc deformācijas noteikšanai nepieciešams izmērīt tikai pretestības izmaiņu ΔR . Lielākajai daļai tenzorezistoru jutības koeficients k ir nemainīgs plašā deformāciju diapazonā. Jutības koeficients k ir vienāds gan stiepes, gan spiedes deformācijām.

Lai tenzorezistori netiktu bojāti un darbotos bez kļūdām, tie drīkst deformēties tikai elastīgajā apgabalā. Atkarībā no konstrukcijas veida iegūstamās garuma izmaiņas ir robežās no 2 % (stieples TR) un 5 % (foliju TR). Sakarība starp relatīvo pretestības izmaiņu un deformāciju stiepes tenzorezistoriem un foliju tenzorezistoriem ir redzama attēlā 4.51. No grafika varam secināt, ka tenzorezistora pretestības izmaiņa atkarībā no deformācijas, ir lineāra. Savukārt, analizējot vienādojumu 4.26, redzam, ka pretestības izmaiņa nav lineāra, jo formula satur saskaitāmo $d\rho/\rho$, kurš nav konstants lielums. Pretruna izskaidrojama ar to, ka $\Delta R \ll R$ un šajā apgabalā īpatnējās pretestības izmaiņa procesu ietekmē nebūtiski.

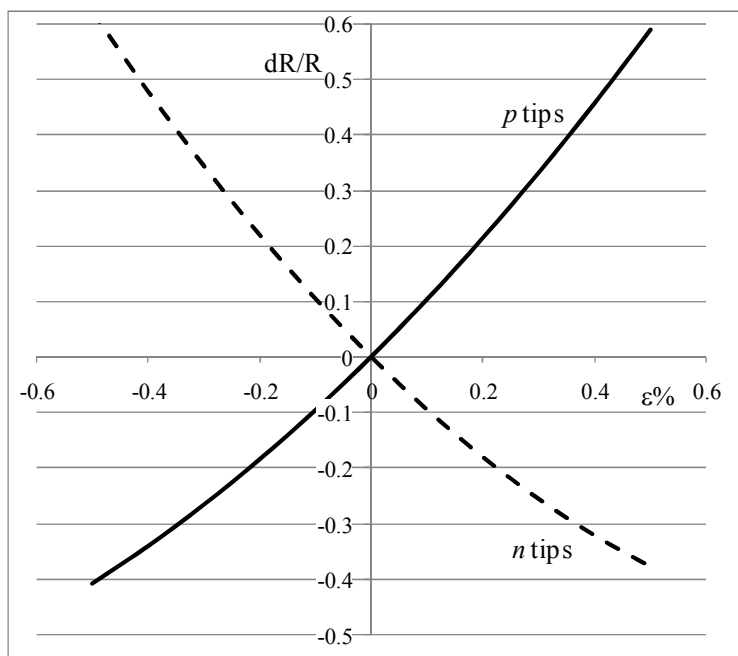
Par **pusvadītāju tenzorezistoru** pamatmateriālu visbiežāk tiek izmantots silīcijs. Tam piemīt līdzīgs piezorezistīvais efekts kā metāla tenzorezistoriem. Paralēli tam, darbojas vēl daudz spēcīgāks, tikai pusvadītājiem raksturīgs efekts.

Radot caurumus difūzijas procesā, plāksnītē tiek izveidotas pretestību josliņas. Iedarbojoties ārējam spēkam, n - piejaukuma materiālā izmainās lādiņnesēju kustīgums. Turpretim p - piejaukuma materiālā ārēja spēka ietekmē mainās lādiņnesēju skaits, kas nepieciešams lādiņa virzīšanai. Abos gadījumos jutīgajā

materiālā mainās pretestība. Tas izraisa jutības pieaugumu, sasniedzot k no 100 līdz 180, kas ir ievērojami lielāks nekā metāla tenzorezistoram.



4.51 att. Metāla tenzorezistoru raksturliķnes

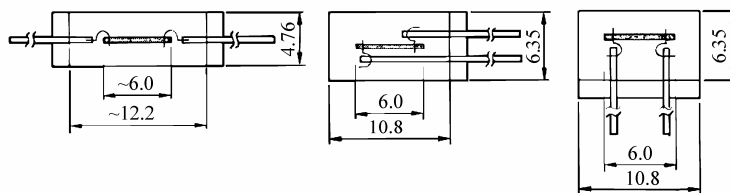


4.52 att. Pusvadītāju tenzorezistoru raksturliķnes

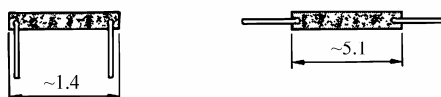
Jutības koeficienta k vērtība pusvadītāju tenzorezistoriem ir pozitīva, ja devēja materiālam ir p - piejaukums, bet negatīva n - piejaukuma gadījumā. Pusvadītāju tenzorezistoru maksimāli pieļaujamā deformācija sasniedz apmēram 0,5% un ir 10 reizes mazāka nekā metāla tenzorezistoriem. Tomēr, salīdzinājumā ar metāla tenzorezistoriem, pusvadītāju tenzorezistoriem ir ievērojami lielāks jutīgums, jo to k faktors ir lielāks.

Raksturīgā sakarība starp pusvadītāju tenzorezistoru jutīgumu un deformāciju ir parādīta attēlā 4.52. Relatīvo pretestības izmaiņu lielums ir atkarīgs no jutīgā materiāla veida, no tā piejaukuma, kā arī no iedarbes spēka virziena un no magnētiskā lauka spēka līniju virziena pusvadītāja materiālā, kas parādās, pieliekot darbspriegumu.

Pusvadītāju tenzorezistorus izgatavo gan ar pamatni, gan bez tās. Attēlā 4.53 parādīti daži pusvadītāju tenzorezistoru konstrukciju veidi. Tā kā pusvadītāju TR ir nelieli, tad tie ir sevišķi piemēroti ļoti neliela izmēra sensoriem. Līdz ar modernās pusvadītāju tehnoloģijas un izgatavošanas metožu attīstību, radušās jaunas iespējas apvienot jutīgo elementu ar integrētu mērķēdi un signāla pastiprinātāju.



Pusvadītāju TR ar pamatni



Pusvadītāju TR bez pamatnes

4.53 att. **Pusvadītāju TR konstrukcijas** (izmēri mm)

Salīdzinājumā ar metāla tenzorezistoriem, pusvadītāju tenzorezistoru trūkums ir nelineārās raksturlieknes un samērā lielā pusvadītājmateriāla pretestības atkarība no temperatūras izmaiņām. Tāpēc daudzi ražotāji piedāvā mērpārveidotājus, kas jau kompensēti un linearizēti noteiktam temperatūras režīmam. Nelinearizētiem tenzorezistoriem var izmantot linearizācijas shēmas, kuras aplūkosim nākamajās nodaļās.

4.2 tabula. Svarīgākās tenzorezistoru īpašības

Parametrs	Simbols	Stieples TR	Folijas TR	Pusvadītāju TR
Nominālā pretestība	$R_0 (\Omega)$	60, 120, 300, 350, 500, 1000	100, 120, 300, 350, 700, 100	120, 350, 1000, 2000, 3000
Aktīvais mērīšanas garums	l (mm)	1,5 ... 150	0,6 ... 150	0,8 ... 9,0
Jutības koeficients k		2 ... 5	~ 2	-103 ... +180
Maksimālā deformācija	$\epsilon_{\max} (\%)$	$\pm 2 \dots 4$	± 5	$\pm 0,5$
Pieļaujamā strāva	I_M (mA)	100 ... 40	20 ... 40	10 ... 20
Maksimālais tilta barošanas spriegums	U_B (V)	2 ... 60	1,5 ... 50	1 ... 2
Temperatūras diapazons	$^{\circ}\text{C}$	-268 ... +316	-268 ... +316	-73 ... +232

Tenzorezistoru montāža

Ražotāji piedāvā daudzas līmes tenzorezistoru uzlīmēšanai. Katrā gadījumā atbilstoša līme jāizvēlas vadoties no:

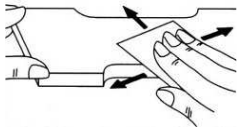
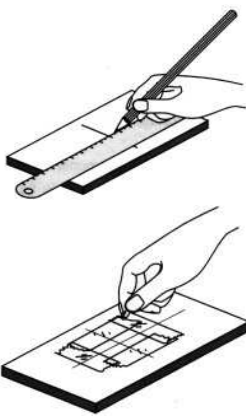
- ✓ tenzorezistora veida un tā pamatnes materiāla,
- ✓ testējamā materiāla īpašībām deformācijas lieluma,
- ✓ apkārtējās vides apstākļiem un temperatūras.

Metāla virsmām parasti izmanto ātri cietējošās līmes CN. To priekšrocība ir tā, ka sacietēšana notiek apmēram minūtes laikā. Tenzorezistoru uzlīmēšanai izmanto arī dažādus epoksīda sastāvus. Lai veiktu tenzorezistoru montāžu, nepieciešami sekojoši materiāli un instrumenti:

- ✓ tenzorezistori,
- ✓ līme,
- ✓ pievienošanas kontaktplāksnītes,
- ✓ divu veidu smilšpapīrs; #120 – 180 un #240 -320,
- ✓ šķīdinātājs, virsmas kodināšanas un attaukošanas līdzekļi,
- ✓ aizzīmēšanas flomāsters,
- ✓ mērlente vai lineāls,
- ✓ pincete, šķēres un spīles,
- ✓ līplenta un polietilēna plēve,

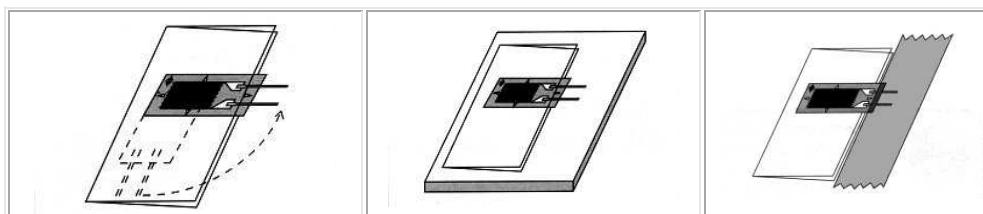
- ✓ vates kociņi,
- ✓ lodēšanas piederumi un lodāmurs,
- ✓ pieslēgšanas vadi,
- ✓ pārklāšanas materiāli.

Tenzorezistoru montāžu sāk ar **līmējamās virsmas sagatavošanu**.

	Virsmu notīra no netīrumiem un putekļiem. Virsmu noslīpē ar smalku smilšpapīru. Tēraudam lieto #120 – 180 smalkuma smilšpapīru, bet alumīnijam - #240 – 320 smalkuma.
	Tālāk veic virsmas attīrīšanu un kodināšanu. Vispirms ar šķīdinātāju, piemēram, acetonu, notīra virsmu izmantojot vates kociņus vai kokvilnas drāniņu. Pēc tam kodina virsmu ar fosforskābes šķīdumu un neitralizē ar ožamo spirtu. Šos materiālus kompānijas piedāvā ar kodētiem nosaukumiem. Ar tīru drānu noslauka virsmu sausu. Pirms līmēšanas virsmai uzklāj katalizatoru un ļauj tam nožūt vismaz vienu minūti.
	Izmantojot flomāsteri vai cietu zīmuli, atzīmējiet tenzorezistora atrašanās vietu. Apkārt atzīmētajai vietai uzlīmējiet līplentu, atstājot nelielu lielāku vietu, nekā tenzorezistora izmēri. Tā kalpos kā maska izspiestās līmes uzņemšanai. ! Darba laikā virsmai nedrīkst pieskarties ar pirkstiem, lai tā nekļūtu taukaina.

Līmēšana

TR izņem no iepakojuma ar visu plastikāta ieliktņi. Ar pinceti pagriež rezistoru tā, lai tā izvadi atrastos ārpus ieliktņa. TR ar ieliktņi novieto uz tīra stikla ar līmējamo pusi uz leju. Uz TR izvadiem un brīvā gala uzlīmē līplentas gabaliņu. Noņem tenzorezistora ieliktņi un līplentu ar TR no stikla.

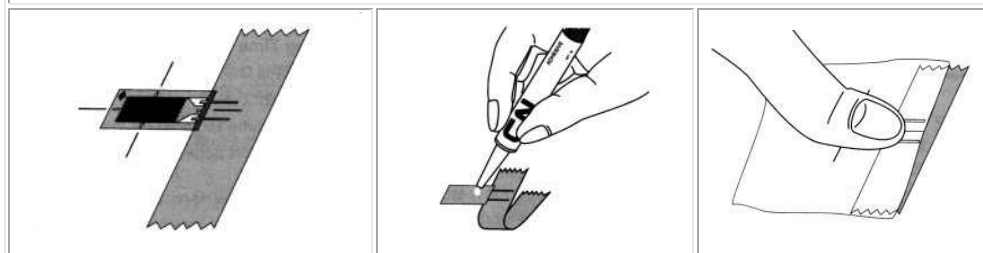


Tenzorezistoru novieto paredzētajā vietā un viegli nofiksē ar līplentu. Paceļot līplentu aiz viena gala, pagriež tenzorezistoru ar līmējamo pusi uz augšu.

Uz TR virsmas uznes dažus pilienus līmes. Līmes daudzums atkarīgs no tenzorezistora izmēriem. Līmi vienmērīgi izklaidē pa TR virsmu ar pudelītes uzgali.

Pavelkot līplentu, novieto TR atpakaļ vajadzīgajā vietā. Uz tenzorezistora novieto polietilēna plēves gabalu un ar pirkstu pakāpeniski no izvadu gala piespiež virsmai. Piespiestā stāvoklī līmējamās virsmas notur vismaz 60 sekundes. Nepieciešamais piespiešanas laiks ir atkarīgs no līmējamajām virsmām, vides temperatūras un mitruma.

! Līmēšana jāizdara ļoti ātri, lai līme nepagūtu sacietēt. Nepielīmējiet pirkstus, jo ādu līme „saķer” ļoti spēcīgi!



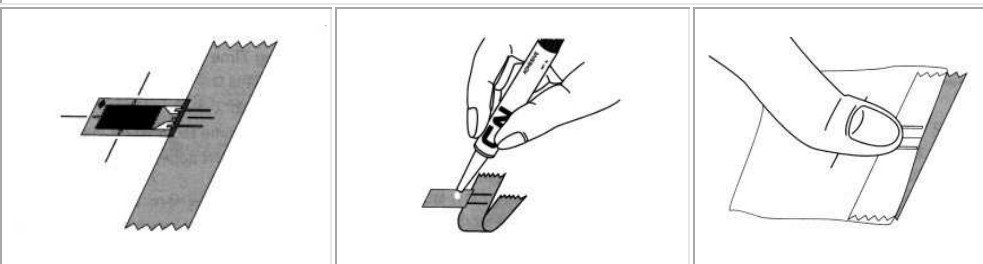
Izvadu pielodēšana

Pēc līmes sacietēšanas, noņem polietilēna plēvi un uzmanīgi, nesabojājot TR, līplentu. Ar pinceti paceļ uz augšu TR izvadus. Izvadus nedrīkst locīt to pievienošanas vietā, jo tā var sabojāt TR.

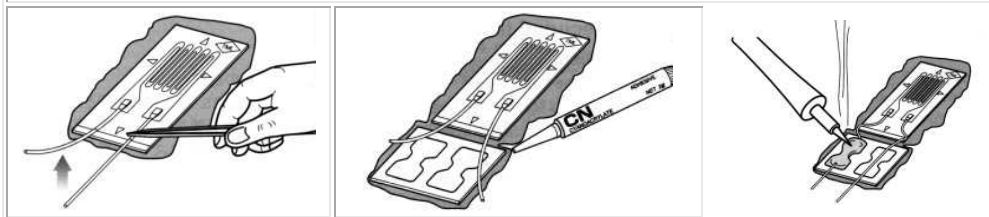
Netālu no TR pielīmē kontaktpaneli, izmantojot to pašu līmi ko tenzorezistoriem.

Ar pinceti izloka izvadus tā, lai veidotos elastīgs savienojums deformācijas uzņemšanai (skatīt attēlus). Ar asknaiblēm nokniebj izvadus vajadzīgā garumā.

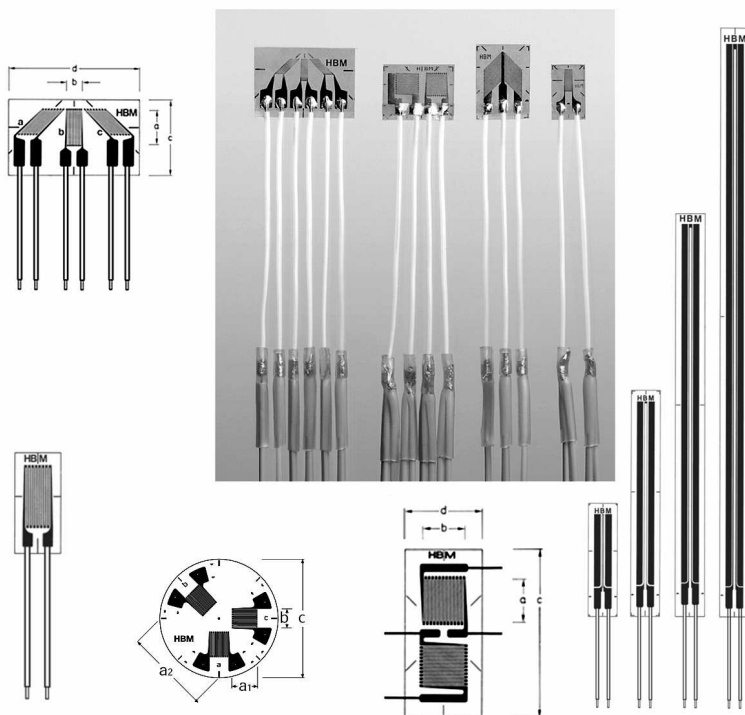
Izmantojot atbilstošas jaudas lodāmuru, pielodē izvadus kontaktpanelim.



Sagatavo pievienošanas vadu galus un pielodē kontaktpanelim. Ar šķīdinātājā samērcētu otiņu notīra kušņu paliekas no lodējuma vietām.



Pielodētos izvadus ar līmes pilieni nostiprina netālu no kontaktpaneļa. Galīgā izvadu nostiprināšana ir atkarīga no testējamās iekārtas konstrukcijas un izmēriem. Izvadus var nostiprināt izmantojot līplentu, silikona masas vai speciālas skavas.



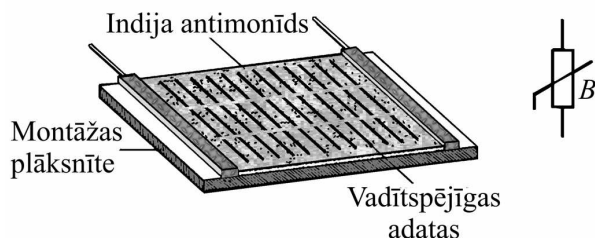
4.54 att. **Kompānijas HBM piedāvātie tenzorezistoru veidi**

Lai novērstu tenzorezistoru bojājumus darba laikā, tos pārklāj ar speciāliem pārklājumiem. Ražotāji piedāvā dažādas silikona un gumijas sastāvus, kā arī speciālas lakas. Piedāvājumu klāstā ir arī mastikas, kas uzklātas folijai, kura gan pasargā TR no bojājumiem, gan ekranē jutīgos elementus, samazinot trokšņu līmeni.

Ražotāji piedāvā atšķirīgas konstrukcijas tenzorezistorus ar dažādiem izvadu veidiem. Ērtu montāžu nodrošina tenzorezistori ar gariem izvadiem (4.54 att.) Šajā gadījumā nav nepieciešami kontaktpaneļi. Tas ievērojami vienkāršo TR montāžu un samazina tenzorezistora bojājuma risku.

4.7. Magnetorezistīvie pārveidotāji

Magnetorezistīvo sensoru darbības pamatā ir Gausa efekts, kas nosaka, ka feromagnētiskiem materiāliem, magnētiskā lauka iedarbes rezultātā, mainās elektriskā pretestība. Magnetorezistors sastāv no taisnstūrveida pamatnes, uz kuras uzklāts plāns indija antimonīda (InSb) pusvadītāja slānis. Tajā ļoti mazā attālumā viena no otras ievietotas niķeļa antimonīda (NiSb) metāla adatas šķērsām strāvas plūšanas virzienam. Magnetorezistora uzbūves pamatprincips attēlots 4.55 attēlā.

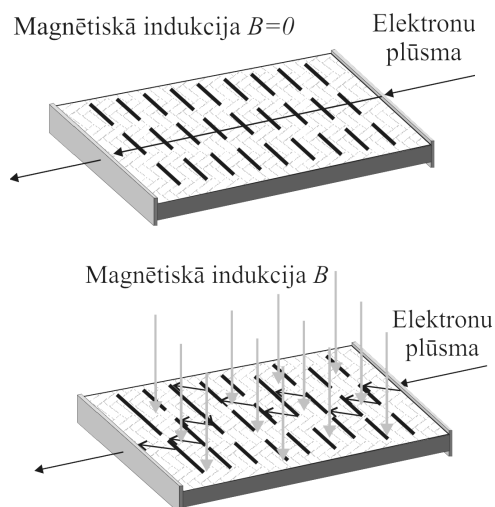


4.55 att. Magnetorezistora uzbūve un shematiskais apzīmējums

Ja plākšņveida magnetorezistora abos galos, kas izveidots tā, kā redzams 4.55 attēlā, pieliek elektrisko spriegumu, tad caur pusvadītāja materiālu plūst strāva. Metāla adatas nekavē un neietekmē elektronu kustību un tās virzienu, jo niķeļa antimonīds ir labs elektrovadītājs un visas adatas atrodas šķērsām lādiņnesēju kustībai. Magnetorezistora pretestība šajā stāvoklī ir niecīga un, atkarībā no pusvadītāja materiāla struktūras un izmēriem, var būt robežās no dažiem omiem (Ω) līdz vairākiem kiloomiem ($k\Omega$).

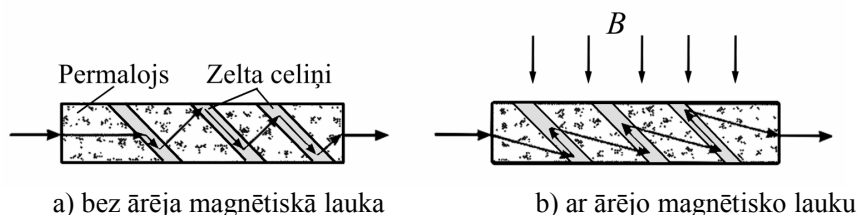
Turpretī, ievietojot plati magnētiskā laukā, visi kustīgie lādiņnesēji elektriskā lauka ietekmē, pateicoties Lorenca spēkam, tiek novirzīti uz vienu pusi. Tad elektronu trajektorija virzās nevis paralēli plates garenmalai, bet gan leņķī, kas atkarīgs no magnētiskās indukcijas B . Šo leņķi sauc par Holla leņķi. Izmantojot indija antimonīdu (InSb), Holla leņķis var sasniegt 80° . Elektronu plūsmas izmaiņa atkarībā no magnētiskās indukcijas B parādīta 4.56 attēlā. Lorenca spēka ietekmē novirzītie lādiņnesēji plūst pa slīpām trajektorijām no vienas metāliskās adatas uz otru. Adatas ir īsslēguma strāvu tilti, kas izlīdzina dažādo lādiņnesēju blīvumu. Jo lielāka ir magnētiskā indukcija B , jo spēcīgāk tiek novirzīti elektroni. To trajektorijas virzās aizvien slīpāk, un tādēļ atsevišķo elektronu ceļa garums kļūst arvien lielāks. Ceļa garuma palielināšanās nozīmē, ka paaugstinājusies arī plāksnītes pretestība.

Magnētiskā lauka virziena maiņa neietekmē plates pretestības lielumu, jo tā ir atkarīga vienīgi no trajektorijas pretestības lieluma, nevis no tā, vai elektroni novirzās uz plates kreiso vai labo malu.



4.56 att. Strāvas ceļš magnetorezistora plāksnītē dažādas magnētiskās indukcijas B ietekmē

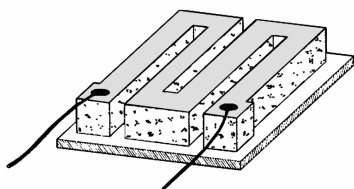
Kompānijas *Valvo* KMZ sērijas magnetorezistīvajos sensoros pretestības materiāls nav leģēts pusvadītājs, bet gan sastāv no 20% dzelzs un 80% niķeļa sakausējuma, ko sauc par **permaloju**. NiSb adatu funkcijas šajās konstrukcijās uzņemas zelta celiņi, kas 45° leņķī uzklāti uz līkumotā pretestības materiāla. Tā kā zeltam piemīt daudz lielāka elektrovadītspēja nekā permalojam, tad strāva pa zelta celiņiem plūst tik ilgi, cik iespējams, tātad zigzagveidā cauri sensoram. Ja elektroni ceļā no viena zelta celiņa uz otru tiek novirzīti magnētiskā lauka ietekmē, tad to ceļš caur permaloju kļūst garāks (attēls 4.57).



4.57 att. *Valvo* KMZ sērijas sensora darbības princips

Šis process ir salīdzināms ar sensora omiskās pretestības palielināšanos. Pēc šī principa var konstruēt arī sensorus, kuru pretestība samazinās līdz ar magnētiskā lauka palielināšanos.

Magnetorezistoru materiālu elektrovadītspēja ir samērā liela un to var paaugstināt, piejaucot materiālam piedevas. Lai iegūtu pēc iespējas garāku indija antimonīda josliņu, pusvadītājmateriāls tiek izkodināts līkumoti (4.58 att.). Izmainot līkumoto josliņu skaitu, garumu, platumu un biezumu, samērā plašās robežās var izmainīt pamatpretestību R_0 .



4.58 att. **Magnetorezistora konstruktīvā uzbūve**

Pusvadītājmateriāls ir vienmēr uzklāts uz pamatnes. E-tipam šī pamatne ir izveidota no plānas feromagnētisku materiālu plāksnītes ar lielu magnētisko caurlaidību. Turpretim K-tipa ierīcēm par pamatni kalpo plāna plastmasas vai keramikas plāksnīte. Lai aizsargātos no mehāniskiem bojājumiem, pusvadītāja virsmu pārklāj ar lakas kārtiņu.

Magnetorezistoru izejas pretestība istabas temperatūrā bez ārējā magnētiskā lauka iedarbes ir atkarīga no izmantotā materiāla vadītspējas un rezistora izmēriem. Pusvadītāju vadītspēju nosaka tā donorpiejaukumi. Ar donorpiejaukumiem saprot speciāli pievadītus piejaukuma atomus pusvadītājā, lai palielinātu tā vadītspēju.

Maza magnētiskā lauka iedarbes rezultātā pretestības izmaiņa ir ļoti maza, jo sensora pretestība ir magnētiskā lauka kvadrātiskā funkcija. Palielinātu jutību var panākt, izmantojot pastāvīgo magnētu – radot magnētisku ietekmi uz magnetorezistoru. Magnetorezistora darba punkts atrodas stāvajā kvadrātiskās raksturlīknes posmā, radot lielāku pretestības izmaiņu ārējo magnētisko lauku izmaiņas ietekmē. Šī tipa sensori ir konstruēti no magnētiski jutīga pusvadītāja materiāla savienojumā ar pastāvīgo magnētu un magnētisko plūsmu vadoša mīksts dzelzs daļām.

Magnetorezistīvie sensori var uztvert ārēji tuvojošos pastāvīgo magnētu vai, ja sensors ir ar iebūvētu magnētu, feromagnētiskus materiālus. Tuvojoties feromagnētiskiem materiāliem, sensorā izvietotā pastāvīgā magnēta magnētiskais lauks mainās. Šī lauka izmaiņa tiek uztverta ar magnetorezistoru un pārvērsta sensora izejas signālā. Sensors uztver tikai feromagnētiskus materiālus.

Attēlā 4.59 redzama *Siemens* magnetorezistora FP30D250E raksturlīkne un tās izkliedes zona. Sensora pretestības vidējā vērtība, ja $B = 0$ T, ir $R_0 \approx 250\Omega$. Tā pieaug kvadrātiski un, ja $B=1$ T, vidēji ir $R \approx 3.6k\Omega$.

Ražotāji magnetorezistoriem uzdod vairākus svarīgus parametrus:

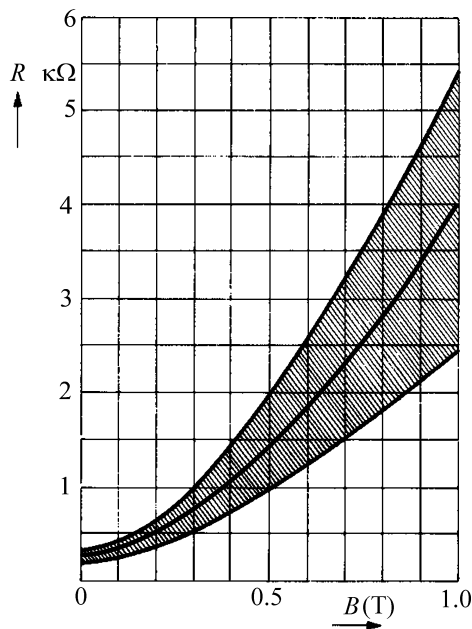
$T_{\max}$ - maksimālā darba temperatūra. Lielākajai magnetorezistoru daļai tā ir aptuveni 100°C un to nekādā gadījumā nedrīkst pārsniegt.

$P_{\max}$ - maksimālā elektriskā slodze. To galvenokārt uzdod noteiktai temperatūrai un arī to nekādā gadījumā nedrīkst pārsniegt. Pilnīga magnetorezistora zudumu jauda ir robežās no 0.5 W līdz 1 W.

U_1 - izolācijas materiāla pieļaujamais spriegums starp jutīgo elementu un montāžas pamatni. Parasti $U_1 = 100$ V.

R_0 - pamatpretestība, ja $B=0$ T. Atkarībā no magnetorezistora veida, tā ir robežās no dažiem omiem līdz vairākiem kiloomiem.

$R_{0\text{Tol}}$ - pamatpretestības pielāde. Lielākoties tā ir $\pm 20\%$.



4.59 att. **Siemens FP30D250E** tipa magnetorezistora raksturlīkne

Magnetorezistorus izmanto kā bezkontakta un bezpakāpju vadāmās pretestības. Vadība notiek ar pastāvīgo vai elektromagnētu, kura gaisa spraugā atrodas sensors. Vairāki ražotāji piedāvā arī diferenciālos magnetorezistorus. Tiem vidū ir papildus izvadi, kas sistēmu sadala divās vienlīdz aktīvās zonās. Diferenciālie magnetorezistori piemēroti dažādu kustību, apgriezienu skaita un griešanās virziena noteikšanai, lineāru kustību ātruma mērīšanai utt. Visos šajos gadījumos ir nepieciešamas speciālas mehāniskās ierīces, piemēram, roboti diski un elektroniskās slēguma shēmas magnetorezistora ģenerēto signālu formēšanai.

Magnetorezistori piemēroti arī magnētiskā lauka mērīšanai un kontrolei. Šiem sensoriem ir īpaša konstrukcija un raksturlīknes, kas nodrošina pietiekošu mērījumu precizitāti.

4.8. Holla pārveidotāji

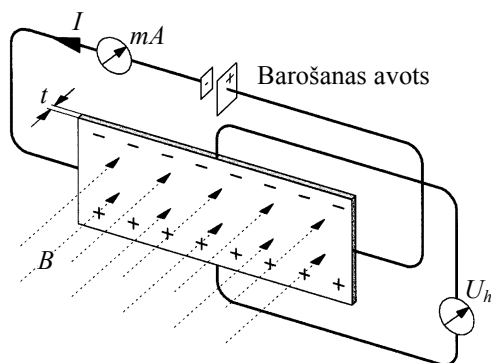
Amerikāņu fiziķis E. Holls (*E.C.Hall*) 1879. gadā atklāja, ka starp divām pretēji novietotām vadītāja plāksnītes garenmalām rodas elektriskais spriegums (potenciālu starpība), ja magnētiskā lauka spēka līnijas ir perpendikulāras caur šo plāksnīti plūstošās strāvas virzienam. Vadītāju un pusvadītājmateriālu ģenerētais Holla spriegums ir par mazu, lai to izmantotu tehnikā. Vēlāk konstatēja, ka šis efekts piemīt daudziem pusvadītājiem ar noteiktām fizikālām īpašībām. Mazās plāksnītes biezumam ir jābūt mazākam par plāksnītes garumu un platumu (4.60 att.).

Ja Holla pārveidotāju, pa kuru plūst strāva, šķērso magnētiskā lauka spēka līnijas, tad kustīgie lādiņnesēji Lorenca spēka ietekmē, kas darbojas perpendikulāri strāvas plūsmai un magnētiskajam laukam, tiek novirzīti - līdzīgi, kā tas ir magnetorezistora gadījumā. Vienā Holla pārveidotāja malā izveidojas elektronu iztrūkums, turpretī pretējā pusē rodas elektronu pārpalikums. Starp abiem Holla izvadiem rodas spriegums, ko sauc par Holla spriegumu un apzīmē ar U_H .

Holla spriegumu aprēķina pēc formulas:

$$U_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{t}, \quad (4.29)$$

kur U_H – Holla spriegums, R_H – Holla konstante, $\text{m}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, I – strāvas stiprums, A, B – magnētiskā lauka indukcija, $\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, t – plāksnītes biezums, m.



4.60 att. **Holla efekta ilustrācija**

Jaunu pusvadītājmateriālu - indija arsenīda (InAs) un indija antimonīda (InSb) izmantošana, ļāva ievērojami palielināt Holla sprieguma amplitūdu. Pateicoties tam, ka jaunajos materiālos ir liels lādiņnesēju kustīgums, modernajos pārveidotājos var iegūt spriegumu lielāku par $U_H = 1.5 \text{ V}$.

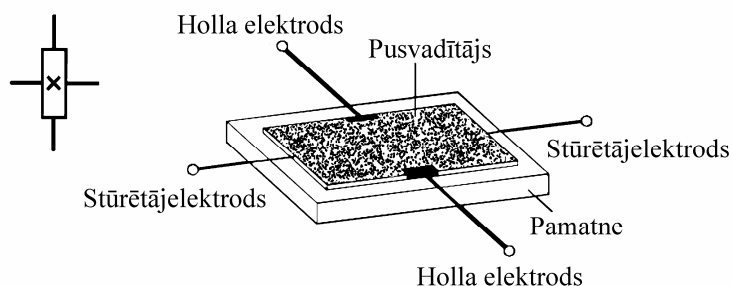
Holla sprieguma **polaritāte** ir atkarīga no strāvas virziena vadības ķēdē I , no magnētiskās indukcijas B un no devēja materiāla elektrovadītspējas veida. Turpretī Holla **sprieguma lielumu** nosaka strāvas stiprums vadības ķēdē un magnētiskā indukcija, kā arī Holla konstante R_H un jutīgā materiāla biezums. Holla konstante ietvert sevī tādas materiāla īpašības kā brīvo lādiņnesēju skaitu vienā tilpuma vienībā un lādiņnesēju kustīgumu.

Tā kā R_H un d Holla pārveidotājam vienmēr nosaka ražotājfirmas, tad Holla spriegumu var izmainīt tikai ar vadības strāvu un magnētisko indukciju, tāpēc arī U_H ir proporcionāls I un B reizinājumam:

$$U_H \propto I \cdot B. \quad (4.30)$$

Holla pārveidotājs konstruktīvi izveidots kā taisnstūrveida plāksnīte, uz kuras

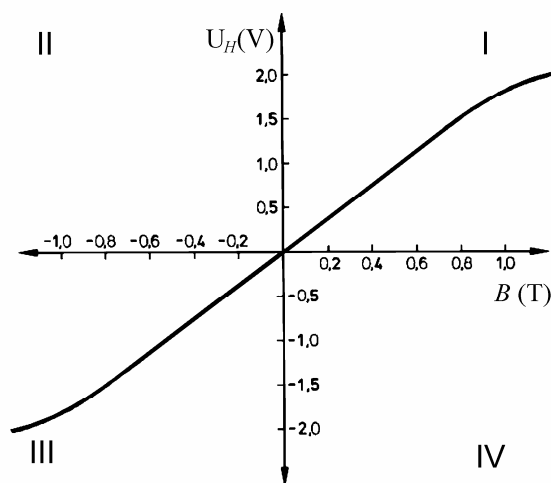
uzputināta plāna indija arsenīda (InAs) vai indija antimonīda (InSb) kārtiņa. Atšķirībā no magnetorezistora, tajā nav ievietotas mazās metāla adatiņas. Tā vietā Holla pārveidotājam abu garenmalu vidū ir divi citi izvadi, kurus sauc par Holla elektrodiem. Kopā ar stūrētājelektrodiem, kas atrodas pusvadītājsplāksnītes šaurajās malās, Holla pārveidotājam ir četri izvadi (4.61 att.).



4.61 att. Holla pārveidotāja uzbūve un shematiskais apzīmējums

Holla pārveidotāja raksturlīknes un parametri

Holla pārveidotāja raksturlīkne $U_H = f(B)$ ir redzama attēlā 4.62. Šāda raksturlīkne ir tad, ja vadības strāva ir konstanta un sensora izejā nav pieslēgta slodzes pretestība. Tā ir pārveidotāja brīvgaits režīma raksturlīkne.



4.62 att. Holla pārveidotāja brīvgaits režīma raksturlīkne, ja $I = \text{const}$.

Raksturlīkne virzās I. un III. kvadrantā, tādēļ, ka Holla sprieguma polaritāte ir atkarīga no magnētiskās indukcijas virziena. Tā kā raksturlīknes virziens abos kvadrantos ir vienāds, tad tehniskajās pasēs galvenokārt parādīta raksturlīknes gaita I. kvadrantā.

Ģenerētais Holla spriegums ir samērā mazs. Vairumam Holla pārveidotāju tipu tas ir robežās no 50 mV līdz 750 mV, un tikai dažiem tiptiem tas sasniedz vairāk par 1000 mV.

Holla konstantei R_H ir negatīvs temperatūras koeficients, tāpēc arī Holla spriegums U_H ir atkarīgs no temperatūras. Temperatūrai pieaugot, tas samazinās.

Katram Holla pārveidotāja tipam ražotāji uzrāda vairākus parametrus. Praksē svarīgākie raksturlielumi ir:

I_M ; $I_{\max}$ - maksimāli pieļaujamā vadības strāva; (atkarībā no tipa tā var būt līdz 600 mA);

I_N ; I_n - vadības strāvas nominālā vērtība kā režīma parametrs; (atkarībā no tipa līdz aptuveni 400 mA);

B_N ; B_n - magnētiskās indukcijas nominālā vērtība, T;

B_n - ierobežo raksturīgnes lineāro apgabalu. Ja $B > B_n$, tad U_H vairs nav proporcionāls B ; (atkarībā no pārveidotāja tipa B_n var būt līdz 1 T);

U_{H0} - brīvgaits Holla spriegums. To norāda nenoslogotam Holla pārveidotājam, ja I_n un B_n . Noslogojot pārveidotāju, šis spriegums nedaudz samazinās;

R_{iH} ; R_{10} - iekšējā pretestība starp Holla elektrodiem, ja $B = 0$ T;

R_{ist} ; R_{20} - iekšējā pretestība starp stūrējošiem elektrodiem, ja $B = 0$ T;

R_0 - omiskā pretestība, $B=0$.

Tehnoloģisku grūtību dēļ abus Holla elektrodus nevar uzlikt tieši uz vienas un tās pašas potenciāla līnijas. Tāpēc Holla spriegumu pārklāj maza omiskās pretestības sprieguma daļa. Tā parādās, ja $B=0$ T, un to sauc par omisko nulles spriegumu, kas izveidojas, ja $U_{HR0}=R_0 \cdot I_{st}$. Omiskais nulles spriegums, atkarībā no Holla pārveidotāja tipa, var sasniegt aptuveni 20mV un, ja nepieciešams precīzs mērījumu rezultāts, to jākompensē ar ārējo sprieguma dalītāju.

Holla pārveidotāju konstrukciju veidi un izmantošanas jomas

Lai Holla pārveidotāju darbību piemērotu magnētiskās vadības strāvas lielumam, tiem ir dažādas konstrukcijas. Valējā konstrukcijā Holla plāksnīti uzliek uz nemagnetizētas, ļoti plānas pamatnes. Pie tam pusvadītājmateriālu noklāj tikai ar vienu izolācijas lakas vai epoksīdsveķu kārtiņu. Slēgtas konstrukcijas Holla plāksnīte ir ievietota alumīnija korpusā, lai aizsargātu no mehāniskiem bojājumiem.

Holla pārveidotājus var izmantot ļoti dažādi. Lai izmantotu Holla spriegumu, parasti nepieciešams pieslēgt pastiprināšanas vai impulsu formēšanas shēmas. Šobrīd izmantotajiem Holla sensoriem ir integrētas pastiprinātāju un signālu formēšanas elektroniskās shēmas.

Holla pārveidotājus izmanto magnētiskās indukcijas B mērīšanai. Šajā gadījumā strāvu ķēdē I ieregulē noteiktā lielumā un uztur konstantu. Tad Holla spriegums ir atkarīgs vienīgi no magnētiskās indukcijas B . Kamēr Holla pārveidotājs tiek darbināts

raksturlīknes lineārajā apgabalā, U_H ir proporcionāls magnētiskajai indukcijai B . Jo mazāka mērzonde, jo precīzāk iespējams izmērīt magnētisko indukciju.

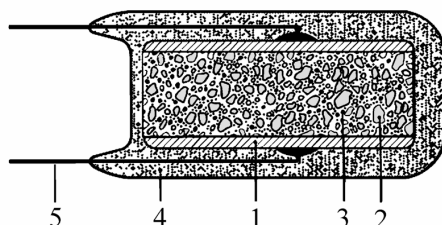
Bieži Holla pārveidotāju ievieto dzelzs serdeņa vai jūga gaisa spraugā. Tad magnētisko indukciju šajā vietā var izmērīt un kontrolēt ar ģenerēto Holla spriegumu. Šo metodi izmanto, piemēram, stipras līdzstrāvas mērīšanai. Šajā gadījumā mēra ap vadītāju esošo riņķveida magnētisko lauku.

Holla pārveidotājus kopā ar nelieliem pastāvīgiem magnētiem var izmantot par bezkontakta signālu sensoriem. Ja šādu magnētu virza garām Holla pārveidotājam, pa kuru plūst vadības strāva, tad ģenerējas Holla spriegums. Šis princips darbojas ļoti efektīvi arī tad, ja mazo pastāvīgā magnētisma magnētu nostiprina uz diska vai zobrata. Tiem griežoties, rodas īss Holla sprieguma impulss. Impulsus var saskaitīt ar elektroniskām ierīcēm un pārveidot tālāk, lai noteiktu rotācijas leņķisko ātrumu un apgriezību skaitu. Holla pārveidotājus izmanto arī automātiskās regulēšanas sistēmās.

4.9. Varistori

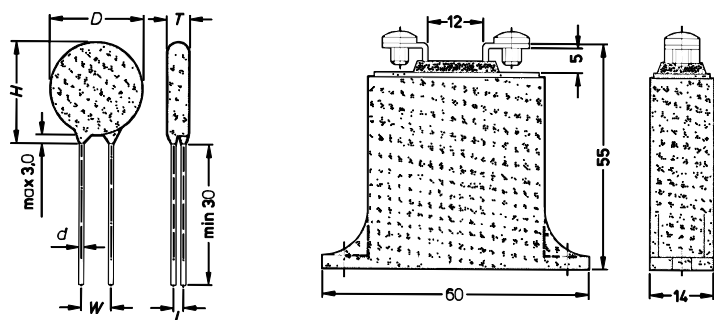
Varistors ir rezistors ar nelineāru raksturlīkni, kuras funkcija ir $R=f(U)$. Pie tam šī funkcija ir nelineāra un tās stāvums mainās atkarībā no varistoram pieliktā sprieguma.

Šobrīd sērijveidā ražotie varistori ir izgatavoti no metālu un keramikas sakausējuma. Pirmos varistorus izgatavoja no silīcija karbīda (SiC). Lai iegūtu labākas materiāla īpašības, mūsdienās pārsvarā izmanto metālu oksīdus: titāna oksīdu (TiO_2) un cinka oksīdu (ZnO). Šos kristāliskos materiālus kopā ar keramiskām saistvielām sapresē mazās plāksnītēs vai stienīšos un tad sakausē $1000^{\circ}C - 1500^{\circ}C$ temperatūrā, iegūstot materiāla vēlamās elektriskās īpašības. Starp abām metāla kontaktplāksnītēm (1) atrodas sakausēta cinka oksīda (2) slānis, kuram piejaukti citi metāla oksīdi (3) (4.63 att).



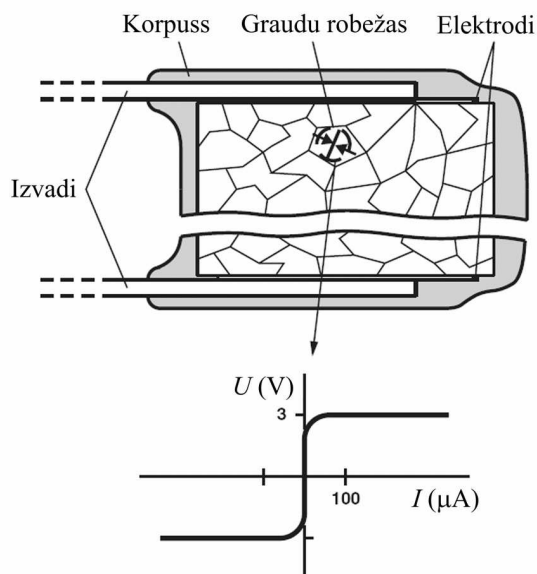
4.63 att. Metāla oksīda varistora uzbūve

Aktīvo daļu no mehāniskas vai ķīmiskas iedarbības aizsargā epoksīdsveķu kārtiņa (4). Vienlaikus tā kalpo arī kā izolators. Izvadi (5) ir izveidoti tā, lai tos varētu pieslēgt dažādi. Bez plāksnīšveida varistoriem sastopami arī bloka tipa varistori, kuros aktīvā daļa iekausēta blokveida korpusā. Plāksnīšveida un bloka tipa varistoru paraugi ir redzami attēlā 4.64.



4.64 att. Varistoru konstrukciju veidi

Metāla oksīda varistora uzbūve un raksturlīkne ir parādīta attēlā 4.65. Varistora elektrovadītspēja veidojas materiālu sakausēšanas procesā. Laba vadītspēja piemīt ZnO vai TiO_2 granulām, citām jaukto kristālu granulām ir augsta omiskā pretestība. Kausēšanas procesā ZnO vai TiO_2 graudu saskares vietās izveidojas pārejas pretestības, kuras var nosaukt arī par mikrovaristoriem.

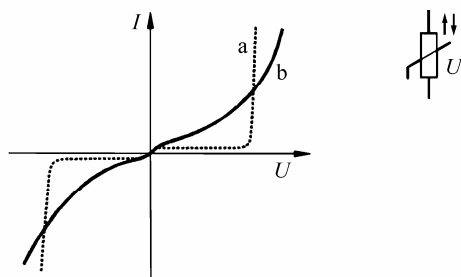


4.65 att. Metāla oksīda varistora darbības princips un raksturlīkne

Tie darbojas kā divas Zēnera diodes pretslēgumā, kuru summārās caursītes spriegums ir aptuveni 3,8 V. Visa varistora darbības efekts veidojas no šādu mikrovaristoru daudziem virknes un paralēlslēgumiem.

Kā redzam attēlā 4.65, varistora volt-ampēru raksturlīkne ir simetriska ar izteiktu sprieguma ierobežojumu. Pateicoties atšķirīgiem jaukto kristālu graudu izmēriem, kā

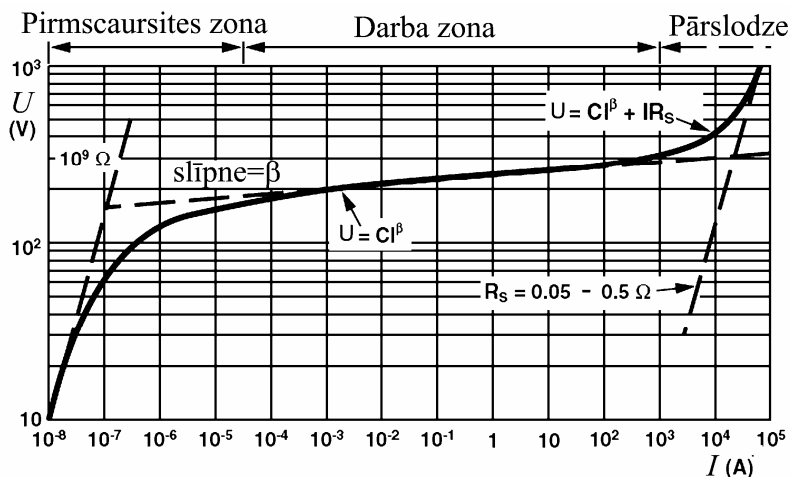
arī dažādam keramikas slāņa biezumam, varistoru caursites spriegumu iespējams variēt plašā diapazonā. Silīcija karbīda (SiC) un metāla oksīdu varistoru raksturlīkņu atšķirība un varistoru shematiskais apzīmējums redzami 4.66 attēlā.



4.66 att. Varistoru raksturlīknes un shematiskais apzīmējums
a) metāla oksīda varistors, b) SiC varistors

Kā redzam, metālu oksīdu varistoru raksturlīkne ir ievērojami stāvāka, un šie varistori nodrošina kvalitatīvāku darbu. Kā redzams 4.66 attēlā, raksturlīknes virzās simetriski, tātad nepastāv nekāda atkarība no pieliktā sprieguma polaritātes. Tāpēc parasti varistoru raksturlīknes zīmē tikai pozitīvajā strāvu apgabalā, jo otrā apgabalā būs tas pats tikai spoguļattēlā.

Attēlā 4.67 parādīta varistora raksturlīkne un atzīmēti raksturīgie ierīces parametri.



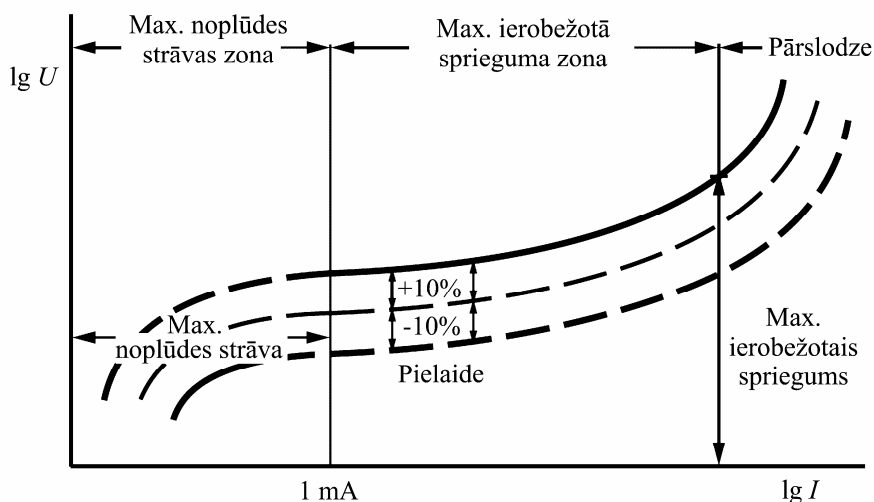
4.67 att. Varistora darba zonas un parametri

No attiecības $\Delta U/\Delta I$ kāpuma katram raksturlīknes punktam ir iespējams aprēķināt varistora dinamisko pretestību R_s . Sākot no nullpunkta, strāvas pieaugums ir visai niecīgs un pretestība šeit ir liela. Virs caursites sprieguma strāvas pieaugums ir ļoti straujš, un dinamiskā pretestība ir maza. Šeit sākas normālā darba zona. Šajā zonā dinamisko pretestību raksturo koeficients β . Sasniedzot noteiktu strāvu, iestājas

piesātinājums un dinamiskā pretestība vairāk nesamazinās. Šajā zonā pieaug gan spriegums, gan strāva un varistora izkliedētā jauda ievērojami palielinās. Tā ir pārslodzes zona un varistoru darbināt šajā zonā nav paredzēts.

Varistoru ražotāji raksturlīknes parasti zīmē dubultlogaritmiskā mērogā. Tehniskajās specifikācijās uzdotie varistoru svarīgākie parametri ir šādi:

- ✓ **maksimāli pieļaujamais sinusoidālais maiņspriegums** $U_{\text{eff max}}$ (angļu val.: *RMS Voltage*). Tā ir maksimāli pieļaujamā sinusoidāla maiņsprieguma efektīvā vērtība, kas ilgstoši drīkst iedarboties uz varistoru. Dažādiem varistoriem tā ir robežās no 4V līdz 2800V;
- ✓ **maksimāli pieļaujamais līdzspriegums** $U_{\text{-max}}$ (angļu val.: *DC Voltage*). Tā ir maksimāli pieļaujamā līdzsprieguma vērtība, kas ilgstoši drīkst iedarboties uz varistoru. Tā ir robežās no 5V līdz 3500V;
- ✓ **varistora spriegums** $U_{V1\text{mA}}$ (angļu val.: *Varistor Voltage*). Tas ir sprieguma kritums uz varistora, ja strāvas stiprums caur varistoru ir 1 mA. Šis spriegums var būt robežās no 8V līdz 5000V.



4.68 att. Varistora raksturlielumi

Kā redzam varistora spriegums $U_{V1\text{mA}}$ ir robežspriegums pie kura sākas strāvas strauja augšana un sprieguma ierobežošana (4.68 att.). Jāņem vērā, ka viena tipa varistoriem ir noteikta raksturlielumu izkliede. Tā parasti ir $\pm 10\%$.

Ražotāji norāda arī citus raksturojošos lielumus, piemēram, maksimāli pieļaujamo izkliedes jaudu, varistora pārslēgšanās laiku u.c.

Varistoru izmantošanas piemēri

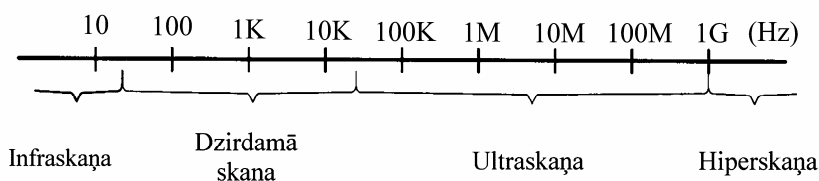
Varistorus galvenokārt izmanto pārspriegumu aizsardzībai visa veida elektriskajās ķēdēs. Rodoties enerģētiskā pārsprieguma maksimumam, varistors pāriet

no augstomīgā stāvokļa vadošā pozīcijā. Krītoties spriegumam, tas atkal iegūst lielu pretestību. Tādējādi tiek absorbēti nevēlamie sprieguma impulsi. Mērīšanas sistēmās varistorus plaši izmanto sensoru aizsardzībai induktīvu slodžu gadījumos. Šīs shēmas analizēsīm nodaļā par tuvinājuma sensoriem.

Varistoriem ir īpaša nozīme arī lieljaudas elektroniskajās ierīcēs. Lielu induktīvu slodžu gadījumos varistori aizsargā tiristorus no pārspriegumiem, kas rodas pārslēgšanās laikā.

4.10. Ultraskaņas sensori

Skaņas ar frekvenci virs cilvēka dzirdamības robežas sauc par ultraskaņu. Tās zemākā robeža ir ≈ 20 kHz. Ultraskaņas izmantošana sensoros ir ērta tādēļ, ka tai ir augsta frekvence un atbilstoši īss viļņu garums.



4.69 att. Skaņas frekvenču diapazoni

Skaņas izplatīšanās ir periodiska nesošās vides blīvuma izmaiņa. Tā noved pie mainīgas vides saspiešanas un retināšanas. Skaņas viļņu izplatīšanās ir atkarīga no skaņu pārvadošās vides; skaņas izplatīšanās nav iespējama vakuumā.

Apkārt esošajā vidē skaņa izplatās ar noteiktu ātrumu, ko nosaka vides blīvums un elastība. Skaņas viļņu izplatīšanās ātrumu **cietos ķermeņos** aprēķina pēc formulas:

$$v = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (4.31)$$

kur E – materiāla elastības modulis, Pa, ρ – blīvums, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Skaņas ātrumu šķidrumos aprēķina pēc līdzīga vienādojuma:

$$v = \left(\frac{K}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (4.32)$$

kur K – šķidruma saspiežamības modulis, Pa.

Skaņas ātruma aprēķinam **gāzēs** lieto sekojošu sakarību:

$$v = \left(\frac{\kappa p}{\rho} \right)^{1/2} = (\kappa R T)^{1/2}, \quad (4.33)$$

kur κ – adiabatiskā procesa kāpes rādītājs, p – spiediens, Pa, T – temperatūra, °K, R –

universālā gāzes konstante, $R=8314.41\text{J/kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{K}$.

Vienādojums parāda, ka skaņas viļņu izplatīšanās gāzē ir atkarīga tikai no temperatūras, bet ne no gāzes spiediena.

Tabulā 4.3 doti skaņas ātrumi biežāk sastopamajās vidēs un ķermeņos.

4.3 tabula. **Skaņas ātrums dažādos materiālos**

Cieti ķermeņi (pie 20°C)	v, m/s
Alumīnijs	5110
Dzelzs	5180
Zelts	2000
Korķis	500
Varš	3800
Misiņš	3500
Tērauds	5100
Šķidrumi (pie 20° C)	v, m/s
Benzols	1320
Hloroforms	1000
Glicerīns	1923
Petroleja	1320
Dzīvsudrabs	1415
Destilēts ūdens	1483
Gāzes (pie 20° C)	v, m/s
Argons	308
Hēlijs	971
Oglekļa dioksīds	258
Oglekļa monoksīds	337
Gaiss	332
Ūdeņradis	1286

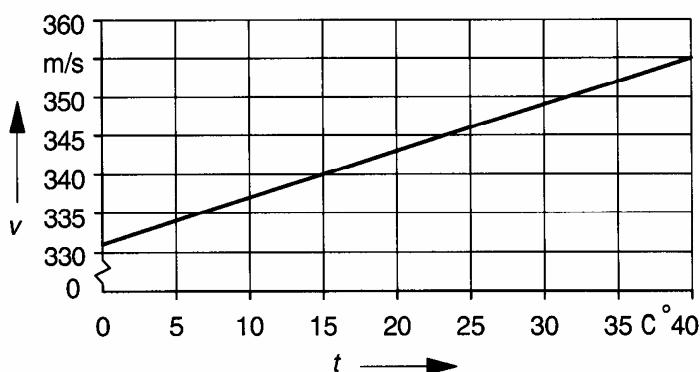
Visbiežāk ultraskaņas sensori tiek lietoti apkārtējā vidē, kur ultraskaņa izplatās gaisā. Skaņas ātrums gaisā 20 °C temperatūrā ir $332\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ultraskaņas ātrumu gaisā būtiski ietekmē gaisa temperatūra un mitrums.

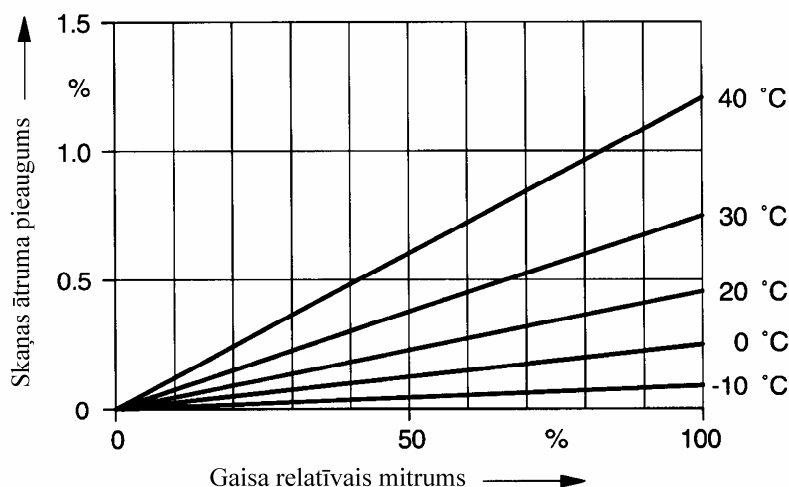
Šie lielumi jāņem vērā ievērtējot mērījuma kļūdu. No attēliem 4.70 un 4.71 redzam, ka gan gaisa temperatūra, gan relatīvais mitruma ietekmē ultraskaņas izplatīšanās ātrumu. Gaisa temperatūras pieaugums par 20°C izsauc skaņas ātruma palielināšanos pa ~3.5%. Gaisa relatīvā mitruma ietekme uz skaņas ātrumu ir mazāka un nepārsniedz vidēji 0.5%. Precīzos mērījumos jāveic rādījumu korekcija atbilstoši apkārtējās vides parametriem.

Tā kā ultraskaņas viļņiem ir īss viļņa garums, tie uzvedas līdzīgi gaismas viļņiem. Arī optiskās ģeometrijas likums (krišanas leņķis = atstarošanas leņķi) ir

lietojams ultraskaņas viļņu aprēķināšanai.



4.70 att. Skaņas ātruma izmaiņa sausā gaisā atkarībā no temperatūras



4.71 att. Skaņas ātruma izmaiņa atkarībā no gaisa relatīvā mitruma

Liela nozīme ultraskaņas viļņu atstarošanā ir virsmas struktūrai. Ja virsmas raupjums ir $1/4$ līdz $1/6$ no skaņas viļņa garuma, viļņi tiek atstaroti izkliedēti. Gludai virsmai maksimālais izkliedes leņķis ir aptuveni $\pm 5^\circ$.

Ultraskaņas viļņa garumu λ aprēķina pēc sekojošas formulas:

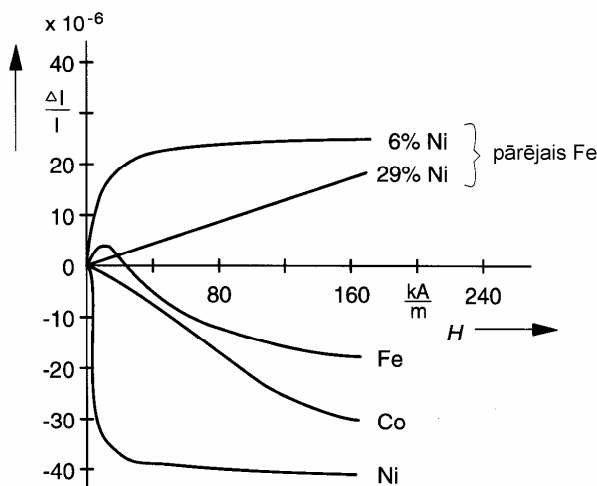
$$\lambda = \frac{f}{v}, \quad (4.34)$$

kur λ —viļņa garums, m, f — ultraskaņas frekvence, Hz, v — skaņas izplatīšanās ātrums, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Piemēram, ja frekvence ir 200 kHz un skaņas ātrums gaisā ir aptuveni 340 m/s,

viļņa garums ir $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{200 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1.7 \text{ mm}$.

Ultraskaņas ģenerēšana

Ultraskaņas ģenerēšanai tiek izmantotas trīs dažādas metodes: mehāniskā, magnētiskā un elektriskā. Mehānisko ultraskaņas ģenerēšanu sensoros neizmanto.



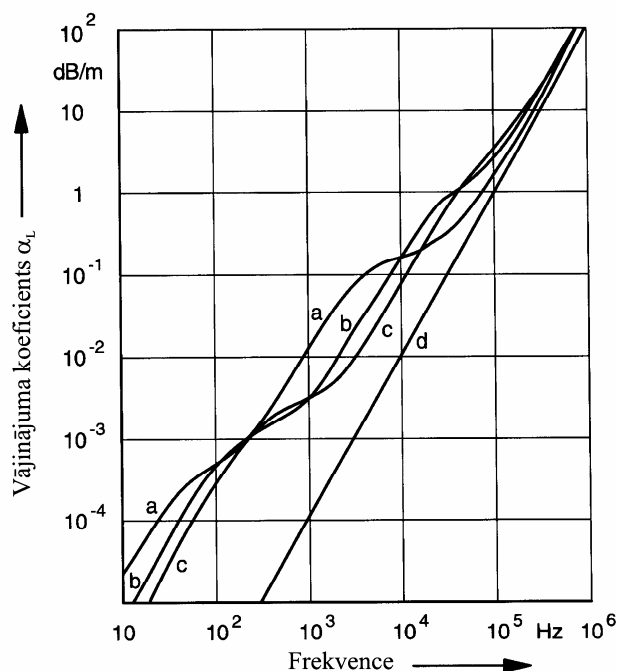
4.72 att. **Magnetostriktīvā relatīvā pagarinājuma līknes dažādiem materiāliem attiecībā pret magnētiskā lauka intensitāti H**

Ar magnetostriktijas ģeneratoriem ir iespējams ģenerēt ultraskaņu virs 50 kHz. Feromagnētisks materiāls mainīgā magnētiskajā laukā maina savu garumu. Relatīvā garuma izmaiņa $\Delta L/L$ pie maksimālām magnētiskā lauka svārstībām sasniedz $4 \cdot 10^{-5}$. Dažādu materiālu magnetostriktijas līknes redzamas 6.72 attēlā.

Augstas frekvences maiņspriegumu pieslēdzot pie kalnu kristāla plāksnes, rodas elektrostriktijas efekts (inverss pjezoelektriskajam efektam, ko aplūkojam 4.1 nodaļā). Šī plāksne rada mehāniskās svārstības ar uzdoto frekvenci. Svārstību amplitūda ievērojami pieaug pie kristāla rezonanses frekvences. Šādā veidā ģenerē ultraskaņu līdz 10 MHz frekvencei. Ultraskaņas ģenerēšanai izmanto pjezoelektriskos materiālus, kas tiek plaši izplatīti zem tirdzniecības nosaukuma “Piezoxide” (piemēram, no kompānijas “Valvo”). Šos materiālus izgatavo no svina-cirkonīta-titanīta.

Ultraskaņas viļņu vājinājums gaisā

Izvēloties ultraskaņas tuvinājuma sensorus, izstarotās skaņas frekvence jāizvēlas, ievērtējot jaudas zudumus gaisā. Ultraskaņas vājinājums gaisā ir atkarīgs no ultraskaņas frekvences un ultraskaņas sensora diapazona.



4.73. att. Vājinājuma koeficienta atkarība no ultraskaņas frekvences
pie gaisa temperatūras 20° C:

a – relatīvais gaisa mitrums 10%; b – relatīvais gaisa mitrums 40%;
c – relatīvais gaisa mitrums 80%; d – teorētiskais vājinājums, kas pamatojas uz
standarta absorbciju (proporcionāls skaņas frekvences kvadrātam).

Skaņai izplatoties gaisā, skaņas spiediena amplitūda p atkarībā no attāluma d samazinās eksponenciāli:

$$p = p_0 e^{-\alpha l}, \quad (4.35)$$

kur p_0 – sinusoidāla skaņas spiediena viļņa momentānā vērtība pie skaņas izstarotāja izejas ($l = 0$), Pa, p – sinusoidāla skaņas spiediena viļņa momentānā vērtība attālumā l no skaņas izstarotāja izejas (pieņemot, ka skaņas stars neizkliedējas), Pa, α – skaņas vājinājuma koeficients, m^{-1} .

Lineārā vājinājuma koeficienta α vietā izmanto arī logaritmisko vājinājuma koeficientu α_L , kas izsaka skaņas vājinājumu dB uz metru. Tas izsaka par cik decibelēm ir samazinājies skaņas spiediens viena metra attālumā.

Skaņas spiedienu noteiktā attālumā aprēķina pēc formulas:

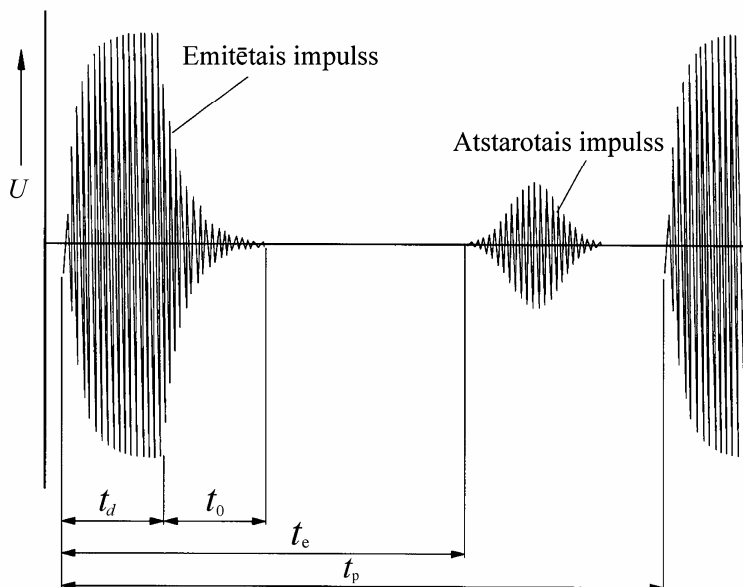
$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{\alpha_L l}{20}}, \quad (4.36)$$

kur α_L – logaritmiskais skaņas vājinājuma koeficients, $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$.

Skaņas vājinājuma koeficients ir ļoti lielā mērā atkarīgs no ultraskaņas frekvences (attēls 4.73). Skaņas vājinājums nosaka maksimālo attālumu, kādā iespējam sensora darbība.

Ultraskaņas sensoru darbības princips

Ultraskaņas sensoru darbības princips balstās uz akustisko viļņu atstarošanas principiem. Viļņus izstaro akustisko svārstību ģenerators, bet atstarotos viļņus “sajūt” uztvērējs.



4.74 att. Attāluma mērīšanas princips

Vide, kurā izplatās šie viļņi, parasti ir gaiss. Iekārtā tiek izmērīts un novērtēts skaņas viļņu izplatīšanās laiks. Par ultraskaņas mērpārveidotājiem (jutīgajiem elementiem) parasti izmanto pjezoelementus, kas veidoti no keramiska materiāla, kuram piemīt pjezoe efekts.

Daudzos gadījumos pjezoelektriskais jutīgais elements tiek izmantots gan viļņu izstarošanai, gan uztveršanai. Sensorā esošā elektroniskā shēma atšķir emitēto viļņus no atstarotā viļņa. Sensorā esošais ģenerators izstaro ultraskaņas impulsu paketi ar impulsa ilgumu t_d (4.74 att.). Skaņas viļnis, sastopot šķērslī, atstarojas un nonāk atpakaļ uztvērējā pēc laika t_e . Sensorā esošā elektroniskā shēma nosaka laiku no impulsa izstarošanas līdz atstarotā impulsa pienākšanai. Šajā laikā skaņas viļnis ir divreiz veicis attālumu līdz šķērslim. Zinot skaņas izplatīšanās ātrumu dotajā vidē, var aprēķināt attālumu līdz objektam.

Ultraskaņas sensoru priekšrocības un trūkumi

Priekšrocības

- ✓ Mērāmais parametrs ir impulsa izplatīšanās laiks. Tas ļoti būtiski uzlabo mērījuma precizitāti, jo laiku var noteikt ļoti precīzi un to neietekmē dažādi apkārtējās vides parametri.
- ✓ Metode ir bezkontakta un līdz ar to piemērota jebkura veida objektiem, kuri atstaro ultraskaņu. Tie var būt cieti, šķidri vai gāzveida.
- ✓ Attāluma mērīšanas diapazons ir pietiekoši plašs, līdz vairākiem desmitiem metru. To ierobežo sensora izstarotā jauda un ultraskaņas starojuma leņķis.
- ✓ Sensora darbību neietekmē apkārtējā vidē esošais piesārņojums (putekļi, dūmi, apgaismojuma izmaiņas, tvaiks).

Trūkumi

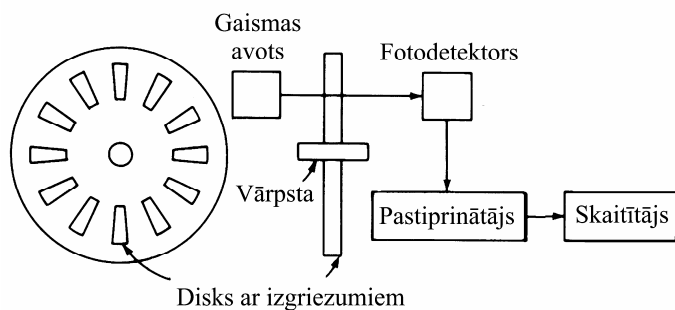
- ✓ Slīpas plakanas virsmas var novirzīt atstaroto vilni un netikt detektētas.
- ✓ Ir ierobežots minimālais attālums, ko detektē sensors. To nosaka impulsa garums t_d un svārstību rimšanas laiks t_0 (4.74 att.)
- ✓ Sensori nav piemēroti ātri mainīgu procesu mērīšanai. Ultraskaņas tuvinājuma sensoru nostrādāšanas ātrumu ierobežo maksimālā impulsu atkārtošanās frekvence (impulsu sekošanas intervāls t_p), kas ir atkarīga no sensora uzbūves. Parasti tā ir robežās no 1 līdz 125 Hz.
- ✓ Tuvumā esoši kustīgi objekti, ja tie nonāk viļņu izplatīšanās zonā, var radīt mērījumu kļūdas.
- ✓ Sensoru uzbūve ir relatīvi sarežģīta, un tie ir dārgi.

Ultraskaņas sensorus izmanto attāluma mērīšanai, dažādu vielu līmeņa noteikšanai, bezkontakta plūsmas ātruma mērīšanai cauruļvados. Rūpniecībā ultraskaņas sensorus izmanto procesu vadības sistēmās objektu stāvokļa noteikšanai.

4.11. Diskrētas darbības sensori

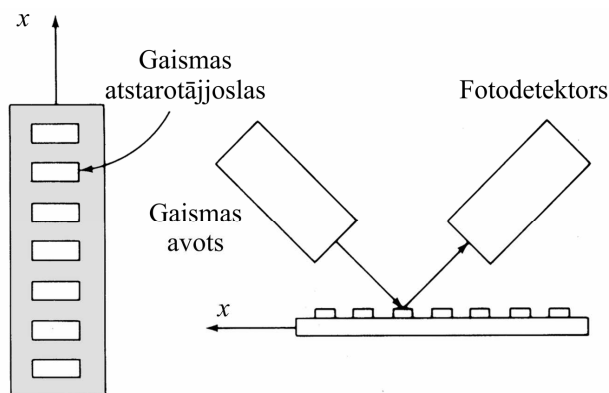
Izveidojot sensorus pēc iepriekš apskatītajiem principiem, sensora izejā iegūstam analogo signālu. Daudzos gadījumos ērti iegūt un izmantot sensora informāciju diskrētā veidā. Diskrētās darbības sensoru izejā signāls var būt impulsa rinda vai ciparu kods.

Impulsveida pārveidotāji labi izmantojami gan pagriezienu leņķa, gan virzes pārvietojuma noteikšanai. 4.75 attēlā parādīts pagriezienu leņķa pārveidotāja darbības princips. Diskam rotējot, caur atverēm no avota uz fotodetektora nokļūst impulsveida gaismas plūsma. Signāls tiek pastiprināts un novadīts uz impulsu skaitītāju. Impulsu skaits ir proporcionāls pagriezienu leņķim. Signāla frekvence ir proporcionāla leņķiskajam ātrumam. Ierīces jutību un izšķiršanas spēju nosaka un arī ierobežo atveru skaits diskā.



4.75 att. **Pagrieziena leņķa impulsveida mērpārveidotājs**

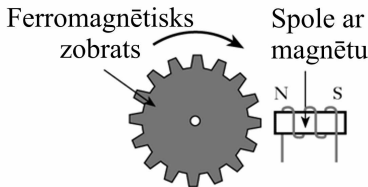
Impulsveida virzes pārvietojuma mērītājā (4.76 att.) tiek izmantota atstarotā gaisma. Ierīces kustīgajai daļai ir uznestas smalkas gaismu atstarojošas svītras. No avota virzītā gaisma impulsveidā tiek atstarota un absorbēta no kustīgā elementa virsmas.



4.76. att. **Lineārā pārvietojuma impulsveida mērītājs**

Gaismas impulsi nonāk fotodetektorā un tiek pārveidoti elektriskās strāvas impulsos. Mērījuma rezultātu indikācija notiek tāpat kā leņķiskā pārveidotāja gadījumā. Impulsu skaits ir proporcionāls lineārajam pārvietojumam.

Iepriekš aplūkoti vienkāršie pārveidotāji labi darbojas pietiekoši plašā ātruma izmaiņas apgabalā. Līdzīgā veidā optiskā detektora vietā var izmantot induktīvo detektoru. Šajā gadījumā rotējošo disku izgatavo no feromagnētiska materiāla, bet impulsus iegūst no induktīvā devēja, kura serde izgatavota no pastāvīgā magnēta (4.77 att.).

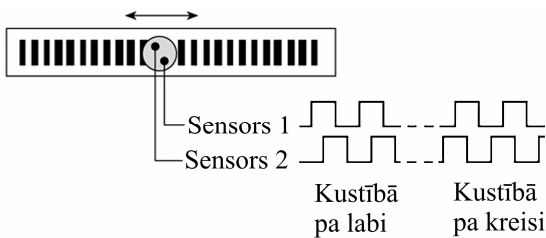


4.77 att. Impulsveida rotācijas sensors ar induktīvu devēju

Minētie sensori īpaši izdevīgi gadījumos, kad nepieciešams noteikt rotācijas ātrumu vai pagrieziena leņķi rotējošiem tērauda zobratiem, kuru rotācijas virziens nemainās (piemēram, automašīnu motoros vai reduktoros).

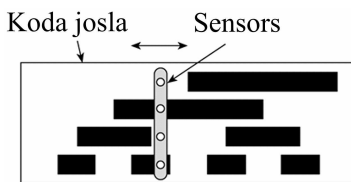
Pārveidotāju trūkums – nav iespējams noteikt rotācijas (vai virzes kustības) virzienu. Šo trūkumu novērš izmantojot divus, kustības virzienā nedaudz nobīdītus, impulsu detektorus (4.78 att.).

Sensora izejā veidojas divas impulsu rindas ar vienādu frekvenci, bet nobīdītas laikā. Citiem vārdiem sakot, starp impulsiem pastāv fāzu nobīde, kura izmaina zīmi mainoties rotācijas (vai virzes kustības) virzienam. Ierīces izejā pieslēdzot fāzu detektoru, iegūsim informāciju par kustības virzienu. Rūpnieciski ražota pārveidotāja attēls redzams attēla 4.78 labajā pusē.



4.78 att. Impulsveida sensors ar diviem detektoriem

Praksē ir gadījumi, kad sensors jāpieslēdz iekārtai, kuras ieejā nepieciešams signāls ciparu koda veidā. Tādos gadījumos izmanto absolūtā koda pārveidotājus (4.79 att.).

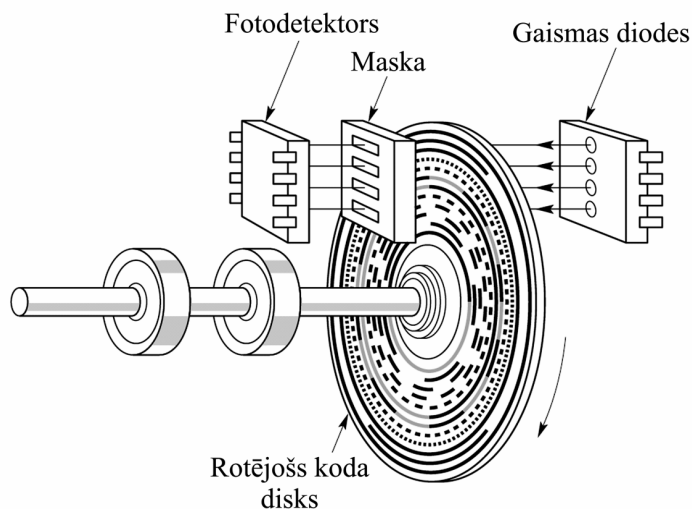


4.79 att. Absolūtā koda pārveidotājs

Absolūtā koda pārveidotāji parasti tiek izmantoti rotācijas kustības parametru

noteikšanai, jo pilns digitālais vārds atbilst vienam pilnam diska apgriezienam. Kodētājs sastāv no vairākiem impulsu lasītājiem, piemēram, optiskajiem pāriem. Ciparu kods tiek nolasīts dažādos veidos. Vienkāršākais no tiem ir binārais kods, kurš ir visas ciparu tehnikas pamatā. Taču sensoros šī koda izmantošana var radīt ievērojamas kļūdas, tāpēc plašāk tiek izmantots Greja kods.

Pagrieziena leņķa nolasīšanas precizitāte ir atkarīga no pārveidotāja bitu skaita. Katrs optiskais pāris uz nolasītāja dod vienu bitu. Varam secināt, ka attēlā 4.79 ir parādīts 4-bitu kodētāja princips. 4-bitu koda izšķiršanas spēja ir 1/16 daļa no apgrieziena, tāpēc mērīšanas precizitāte šeit nav augsta. Lai iegūtu lielāku precizitāti, nepieciešams palielināt nolasītāja optopāru skaitu (4.80 att.).



4.80 att. **Absolūtais rotācijas koda pārveidotājs ar optisko disku**

Absolūtā koda sensorus ražo daudzas kompānijas, jo tiem ir vairākas būtiskas priekšrocības:

- ✓ Stāvokļa koda saglabāšana pat pēc barošanas sprieguma pārtraukuma. Tas ir absolūtais kods un saglabājas mehāniskā veidā.
- ✓ Drošība, absolūtais kods saglabājas un pēc iekārtas bojājuma nav jāatjauno. Daudzos gadījumos tas palielina iekārtas darba drošību.
- ✓ Tas ir noturīgs pret dažādiem traucējumiem. Kļūdas gadījumā kods nav jāatjauno, pēc traucējošās iedarbes izbeigšanās, tas tiek nolasīts no jauna pareizi.

Šo iemeslu dēļ absolūtos enkoderus plaši izmanto rūpniecisko procesu automatizācijā.

Kā trūkums absolūtā koda pārveidotājiem jāmin samērā maza ātrdarbība, kura ir atkarīga no kodētāja izšķiršanas spējas.

5. Signāli un to apstrāde

Signāls ir viena vai vairāku mainīgo funkcija, kas raksturo kādas materiālas sistēmas stāvokli. Piemēram: ķermeņa temperatūras vai asins spiediena izmaiņas laikā, plakana attēla atsevišķu punktu spilgtuma atkarība no koordinātām. Tātad **signāls ir fizikāla informācijas reprezentācija** – ziņu kopums par materiālās sistēmas stāvokli. Ja šī informācija kādam ir vajadzīga, to nepieciešams nogādāt abonentam, izmantojot konkrētam signālam piemērotu sakaru sistēmu. Daba un cilvēki, demonstrējot apbrīnojamas izgudrotāju spējas, izveidojuši plašu informācijas pārvades metožu klāstu. Tajās izmanto gan skaņu (indiāņu bungu telegrāfs un Kanāriju salu svilpošanas sistēma), gan smaržu (plaši izplatīts sakaru veids dzīvnieku pasaulē), gan gaismu (semaforu telegrāfs un modernās šķiedru optikas sistēmas), gan elektrisko spriegumu un strāvu (radio, televīzija, telefons, telegrāfs, elektroniskais pasts).

Turpmāk runāsim tikai par viena mainīgā elektriskajiem signāliem – strāvas vai sprieguma izmaiņām laikā. Šī konkretizācija saistīta ar grāmatas tematiku, jo mērpārveidotāju izejas signāli ir elektriskas dabas, un to apstrādei izmanto elektroniskas ierīces.

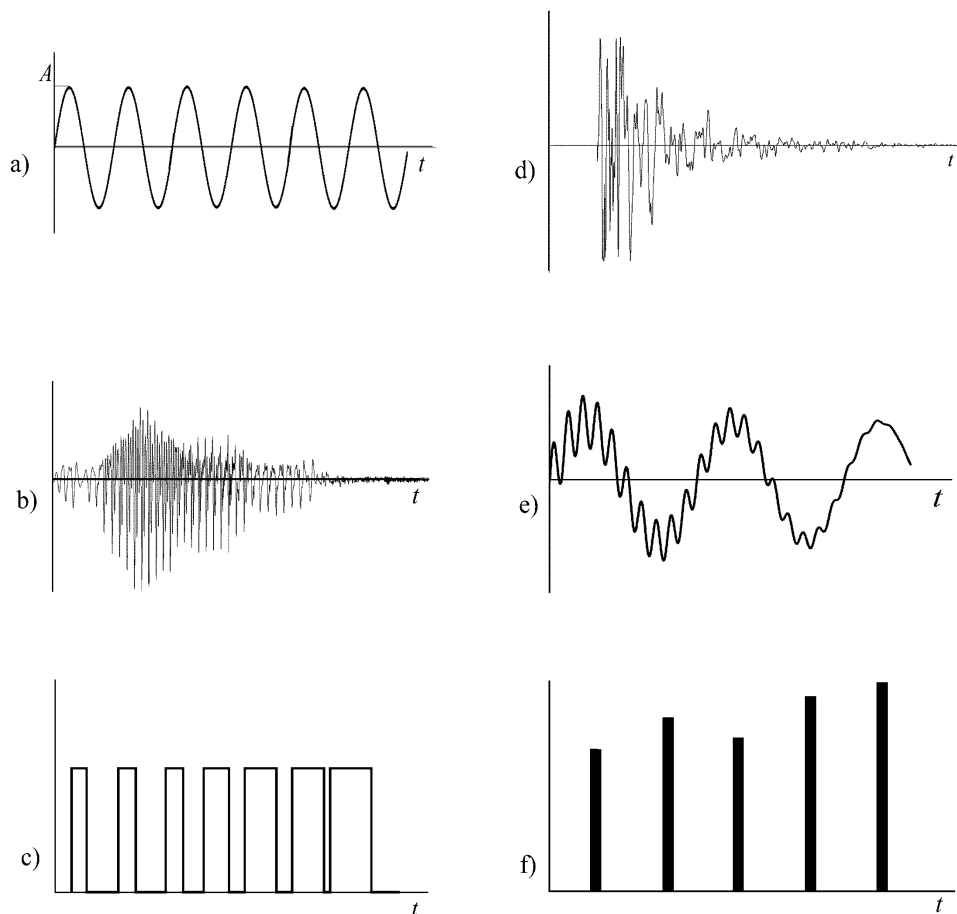
Elektriskos signālus iegūst, izmantojot dažādus sensorus un pārveidotājus, kas kādu neelektrisku lielumu pārveido spriegumā vai strāvā. Piemēram: mikrofons – skaņu, fotoelements – spilgtumu, pjezodevējs – spiedienu, termodevējs – temperatūru, gāzu sastāva sensoru matrica – smaržu.

Apzīmējumu un izklāsta vienkāršošanai turpmāk elektriskā signāla apzīmēšanai lietosim simbolu $s(t)$ un terminu “signāls”. Ar signāliem tiek veiktas daudzas darbības. Tie tiek fiksēti un glabāti, dažādi apstrādāti un pārveidoti, pārraidīti to vizualizācijai uz ekrāna un izdrukās. Šo darbību rezultātā signāli var tikt kropļoti, tiem var uzklāties dažādi traucējumi un citi signāli. Tāpēc, lai veidotu pēc iespējas kvalitatīvākas signālu apstrādes un pārvades sistēmas, tās pareizi izmantotu, nepieciešams labi pārzināt signālu īpašības.

5.1. Signālu veidi

Signāli kā laika funkcijas ir bezgalīgi daudzveidīgi. Dažu signālu laika diagrammas parādītas 5.1 attēlā. No šiem piemēriem redzam, ka signāli, kuru vērtības jebkuram laika momentam var precīzi noteikt (sinusoidālajiem signāliem attēlā 5.1a, c un e var uzrakstīt precīzu matemātisku izteiksmi), tomēr lielākajam vairumam signālu var tikai norādīt varbūtību, ar kādu tas nākošajos laika momentos atradīsies noteiktā vērtību intervālā (5.1b, d). Vairums signālu ir nepārtrauktas laika funkcijas, taču ir arī

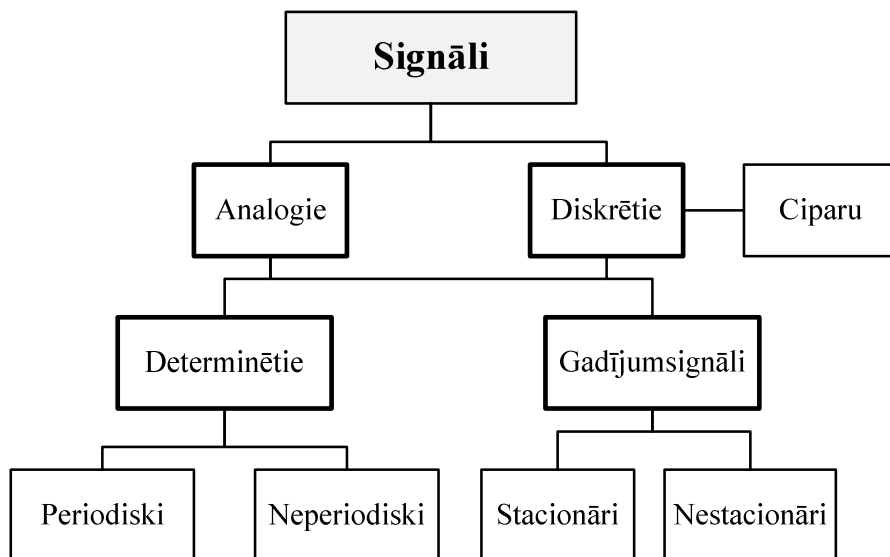
signāli (piemēram, 5.1f, kuru vērtības uzdotas tikai fiksētos laika momentos - diskrēta laika signāli (piemēram, temperatūru vidējās vērtības noteiktā laika intervālā, valūtas vai akciju kurss, kas noteikts reizi dienā).



5.1 att. **Dažādu signālu piemēri**

a) sinusoidāls signāls, b) vārdam „viens” atbilstošs skaņas signāls, c) impulsa platuma modulēts signāls, d) seismisks signāls, e) uzspiesto svārstību procesa pieraksts, f) gada vidējās temperatūras izmaiņa (diskrēts lielums, reģistrēts vienreiz gadā).

Lai varētu analizēt, kas notiek ar signālu, kad tas tiek pārvadīts dažādās sistēmās, nepieciešams signāla matemātiskais pieraksts (modelis). Ņemot vērā jau atzīmēto signālu daudzveidību, lietderīgi veikt klasifikāciju, – sagrupēt signālus pēc kādām tiem kopīgām īpašībām. No matemātisko modeļu veidošanas viedokļa lietderīgi vienā grupā iekļaut signālus, kuru aprakstīšanai piemērots kāds konkrēts matemātiskais aparāts. Signālu klasifikācija redzama 5.2 attēlā.



5.2 att. Signālu klasifikācija

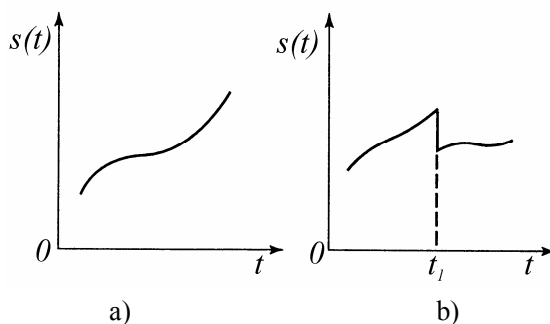
Šajā klasifikācijā visi signāli iedalīti pēc divām galvenajām pazīmēm:

- ✓ pēc signāla izmaiņas laikā (analogie un diskrētie),
- ✓ pēc iespējas matemātiski aprakstīt signāla izmaiņas likumu (determinētie un gadījumsignāli).

Signāli var būt nepārtraukta laika funkcijas – **analogie signāli** (saka arī **kontinuālie signāli**), vai arī diskrēta laika funkcijas - diskrēti signāli. Attēlā 5.1a, b, c, d un e parādītie ir analogi signāli, to vērtības tiek uzdotas nepārtrauktā laikā, visos laika momentos. Analogais signāls var būt (5.3 att.):

- ✓ nepārtraukts laikā un pēc amplitūdas (5.3a att.),
- ✓ gabaliem pārtraukts pēc amplitūdas un nepārtraukts laikā (5.3b att.).

Analogie signāli galvenokārt nāk no visiem sensoriem. Dabā un tehnikā pastāv tikai analogie procesi, jo nevienā šajā procesā nav pārtraukumi laikā. Analogajam signālam var būt ļoti straujas vai momentānas izmaiņas laikā (5.3b att.).



5.3 att. Analogie signāli

Ja signāls ir pārtraukts laikā, to sauc par **diskrēto signālu**. Attēlā 5.1f redzamais diskrētā signāla vērtības ir definētas tikai norādītajos laika momentos. Tas nenozīmē, ka starp šiem laika momentiem ir nulles vērtība. Citos laika momentos tas vispār nav definēts.

Ja diskrētā signāla vērtības tiek noapaļotas, t.i.- diskretizētas ar kādu norādītu vērtību soli (saka „kvantētas”) un izteiktas ciparu kodā, tad šādu signālu sauc par ciparu signālu.

Analogā signāla pārveidošanu diskrētajā sauc par kvantēšanu, bet formu, kādā tas tiek izteikts par kodu.

Gan analogos, gan diskrētos savukārt var iedalīt divās būtiski atšķirīgās grupās: determinēti signāli un gadījumsignāli.

Determinēti ir signāli, kuru vērtības precīzi nosakāmas jebkurā laika momentā. Tādus signālus var aprakstīt ar matemātisku formulu, piemēram, attēlā 5.1a parādītam signālam spēkā ir izteiksme:

$$s(t) = A \cdot \sin \omega t,$$

kur $s(t)$ – signāla izmaiņa laikā, A – sinusoīdas maksimālā amplitūda, ω – leņķiskā frekvence.

Pēc formulas var aprēķināt $s(t)$ vērtību jebkurā laika momentā. Tas nozīmē, ka analizēt determinētus signālus nav nekādas vajadzības, jo tie nesatur informāciju (informāciju satur tikai signāli, kuru vērtības nav precīzi aprēķināmas; tos analizējot, mēs iegūstam informāciju par procesiem, kuru iznākumu nevarēja precīzi paredzēt).

Gadījumsignāliem nav iespējams precīzi noteikt to vērtības laika momentos nākotnē pat, ja būtu precīzi zināmas visas iepriekšējās signāla vērtības. Te var runāt tikai par varbūtību, ar kādu signāla vērtības atradīsies interesējošā vērtību intervālā.

Tā kā jebkuram informāciju saturošam signālam raksturīga nenoteiktība, var secināt, mērīšanas sistēmās tiek noteikti un analizēti tikai gadījumsignāli. Tomēr arī determinētu signālu analīzei ir milzīga nozīme, jo tiek plaši lietoti sistēmas testēšanas un kalibrēšanas vajadzībām. Determinētu signālu pārvades analīze dažādās sistēmās ir ievērojami vienkāršāka nekā gadījumsignālu pārvades analīze. Savukārt, zinot kā sistēmā tiek pārveidoti determinēti signāli, iespējams iegūt priekšstatu arī par to, kas notiks ar gadījumsignāliem. Bieži tiek lietoti gadījumsignāli, kurus veido pēc gadījumlukuma nobīdītu precīzi noteiktas formas (determinētu) signālu secība. Piemēram, ciparu sakaru sistēmās pārraida taisnstūra impulsu secības; šeit impulss reprezentē „vieninieku”, bet pauze - „nulli”. Iepriekš nav zināms, kas sekos aiz kārtējā simbola.

Determinētie signāli (diskrētie un analogie) var būt gan **neperiodiski**, gan **periodiski**. Periodisko signālu vērtības pēc noteikta laika intervāla T (perioda) atkārtojas:

$$s(t) = s(t + T), \quad (5.1)$$

kur $s(t)$ – signāls, t – laiks, T – laika intervāls (periods).

Neperiodiskiem tāds laika intervāls nav atrodams.

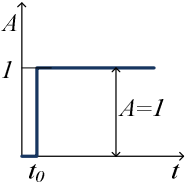
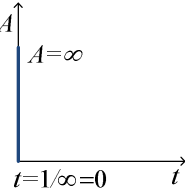
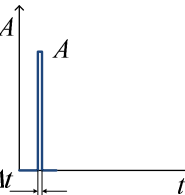
Gadījumsignālus, atkarībā no tā, vai to statistiskās īpašības mainās laikā vai nē, var iedalīt attiecīgi **nestacionāros** un **stacionāros**.

Stacionāru signālu statistiskās īpašības laikā nemainās. Piemēram, iekšdedzes motora vibrācijas noteiktos slodzes un rotācijas ātruma režīmos paliek laikā nemainīgas.

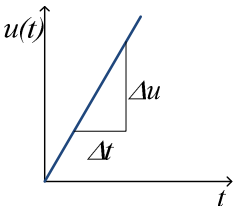
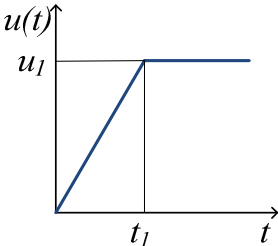
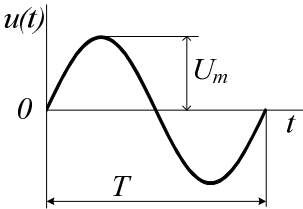
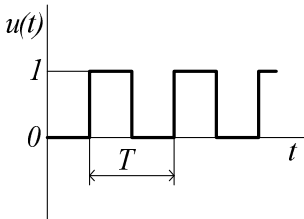
Mērot tā paša motora vibrācijas mainīgā slodzē, iegūsim nestacionāru gadījumsignālu, kas raksturo motora vibrācijas.

Praksē nepieciešams jebkuru no iepriekšminētajiem signālu veidiem analizēt un atrast tam piemērotu matemātisko modeli. Tas dod iespēju izprast fizikālā procesa būtību un apzināti vadīt to, kā arī optimizēt procesa norisi noteikta uzdevuma veikšanai. Biežāk lietoto determinēto signālu veidi un to īpašības redzamas 5.1 tabulā.

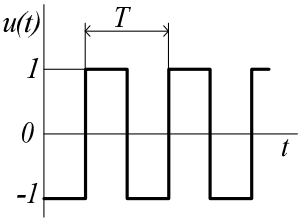
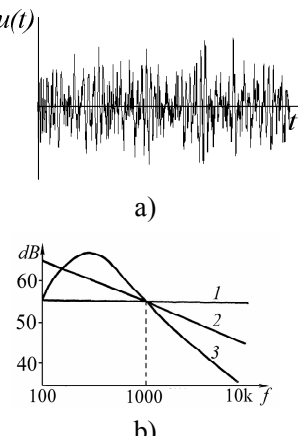
5.1 tabula **Signālu veidi**

Signāla veids	Raksturojums
Kāpņu (angl. <i>step</i>) funkcija	
	Plaši lietota funkcija sistēmu dinamisko parametru noteikšanai. Laika momentā t_0 funkcija vērtība no 0 momentāni pieaug līdz amplitūdai $A = I$. $\left. \begin{array}{ll} t < 0 & A = 0 \\ t > 0 & A = I \end{array} \right\}$
Impulsa funkcija	
	Tas ir teorētisks impulss, kura amplitūda ir bezgalīgi liela, bet ilgums ir bezgalīgi mazs. Praksē iespējama situācija, kad pārslēgšanas momentos var rasties ļoti īsi sprieguma lēcieni, kas ļoti daudzas reizes pārsniedz shēmas spriegumus un impulsa amplitūda uzskatāma par bezgalīgu lielu.
Ierobežotā impulsa (Dīraka, delta) funkcija	
	Delta funkcija ir ierobežotā impulsa funkcija ar amplitūdu A. Impulsa garums ir daudzkārt mazāks par sistēmas brīvo svārstību frekvences periodu.

5.1 tabulas turpinājums

Lineāri mainīgs (angl. <i>ramp</i> , slīpne) signāls	
	Signāls, kura amplitūda laikā $t=0$ ir $u(t)=0$. Signāla amplitūda ir lineāri mainīga un laikā $t=\infty$ tās amplitūda ir $u(t)=\infty$. Funkcijas slīpums ir $\Delta u/\Delta t$.
Lineāri mainīgs signāls ar ierobežojumu (angl. <i>terminated ramp</i>)	
	Signāls sāk lineāri mainīties laikā $t=0$ un laika momentā $t=t_1$ tās pieaugums apstājas un amplitūda ir u_1. $\left. \begin{array}{l} t < 0 \quad u(t) = 0 \\ 0 < t < t_1 \quad u(t) = k \cdot t \\ t > t_1 \quad u(t) = u_1 \end{array} \right\}$ Funkcijas sākuma punkts var būt nobīdīts laikā (angl. <i>time delay</i>). Signāls tiek izmantots dažādu sistēmu testēšanai līdzās pakāpiena funkcijai.
Sinusoidāls (kosinusoidāls) signāls	
	Sinusoidāla formas iedarbe ir visbiežāk lietotā funkcija elektronisku sistēmu gadījumos. Šīs funkcijas spektrā nav harmonisko sastāvdaļu. Tā satur tikai pamātfrekvenci. Signāla amplitūda $u(t) = U_m \cdot \sin \omega \cdot t$, kur leņķiskā frekvence $\omega = 2\pi f$ vai $\omega = \frac{2\pi}{T}$.
Taisnleņķa signāli	
	Vienpolārs taisnleņķa signāls ar amplitūdu $u=1$ Svārstību periods ir T. Signālu izmanto vienpolāras barošanas ciparu shēmu testēšanai. Signāla amplitūdu var izvēlēties atbilstoši shēmas jutībai.

5.1 tabulas turpinājums

	Divpolārs taisnleņķa signāls ar amplitūdu $u=\pm 1$ Svārstību periods ir T. Signālu izmanto dažādu elektronisku ierīču testēšanai. Signāla amplitūdu var izvēlēties atbilstoši shēmas jutībai.
Trokšņu signāli	
 a) b)	Trokšņu signāli. Plašāk izplatīti ir divi trokšņu veidi: „baltais” un „rozā” troksnis. „Rozā” trokšņa amplitūdas izmaiņa laikā redzama attēlā a). Attēlā b) redzamas amplitūdas-frekvenču līknes baltajam (1), rozā (2) un runas signālam (3). Balto un rozā troksni izmanto telpu akustikas parametru noteikšanai, skaņu aparātūras testēšanai un citur.

5.2. Furjē transformācijas

Bieži vien mērīšanas rezultātā iegūtais signāls ir ļoti sarežģītas formas un tam nav atrodams fizikāls matemātiskais modelis. Šādu signālu matemātiskai aprakstīšanai un analizēšanai ērti izmantojamās Furjē transformācijas. Pieņemot, ka lasītājs jau ir pazīstams ar Furjē rindām no matemātikas kursa, apskatīsim principus, kā tiek veidota signālu apstrāde un analīze izmantojot Furjē transformācijas.

Praktiski visus ierobežotā laika intervālā definētus signālus var aprakstīt ar trigonometrisku rindu:

$$s(t) = \frac{1}{2}C_0 + C_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_1) + C_2 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \varphi_2) + C_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi_3) + \dots \quad (5.2)$$

$$\dots + C_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n),$$

kur C_0 – pamatfrekvences amplitūda, $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ – spektra harmoniku amplitūdas, ω – leņķiskā pamatfrekvence, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$ – harmoniku fāzu nobīdes. Periodiskam signālam šāds pieraksts ir derīgs visā bezgalīgā laika periodā, jo rindu veidojošās funkcijas arī ir periodiskas.

Furjē rindas fizikālā nozīme.

Funkcija $s(t)$ formulā (5.2) raksturo periodisku procesu. Rindas (5.2) mainīgie locekļi katrs izsaka laikā sinusoidāli mainīgu procesu - **harmoniku**, bet šīs rindas konstantais loceklis $\frac{1}{2}C_0$ izsaka apskatāmā fizikālā lieluma vidējo vērtību. Koeficienti C_n ($n=1, 2, \dots$) ir šo harmoniku amplitūdas, no kurām F_1 ir pamatharmonikas amplitūda, bet $C_2, C_3, \dots$ - **augstākas kārtas harmoniku** amplitūdas, bet $n\omega$ ($n=1, 2, \dots$) ir attiecīgi harmoniku leņķiskās frekvences, kuras ir leņķiskās pamatfrekvences ω daudzkārtņi. Lielumi φ_n ir harmoniku sākuma fāzes.

Apskatāmā procesa harmoniku frekvenču kopu sauc par šī procesa **frekvenču spektru**. Tā kā periodiska procesa sadalījums harmoniku summā satur tikai harmonikas ar noteiktām diskrētām frekvencēm (kuras šeit ir pamatfrekvences daudzkārtņi), tad pieņem, ka periodiska procesa frekvenču spektrs ir diskrēts.

Amplitūdu C_n ($n=1, 2, \dots$) kopa raksturo periodiska procesa $s(t)$ harmoniku amplitūdu sadalījumu pa frekvencēm. Saka arī, ka šī kopa raksturo procesa **amplitūdu-frekvenču spektru** jeb, īsāk sakot, amplitūdu spektru.

Sākuma fāžu φ_n ($n=1, 2, \dots$) kopa raksturo procesu $s(t)$ harmoniku sākuma fāžu sadalījumu pa frekvencēm. Saka arī, ka šī kopa raksturo procesa **fāžu-frekvenču spektru**, jeb, īsāk sakot, fāžu spektru.

Tā, piemēram, ja funkcija $s(t)$ izsaka nesinusoidālas maiņstrāvas atkarību no laika, tad šīs funkcijas izvirkājums Furjē rindā izsaka minētās strāvas sadalījumu sinusoidālu maiņstrāvu - harmoniku summā. Šāds sadalījums ir spēkā ne tikai matemātiski (t.i., formāli), bet arī fizikāli (t.i., dabā), jo minētās harmonikas var fizikāli konstatēt un izmērīt ar īpašu aparātūru.

Periodiska procesa sadalīšanu harmoniku summā, attiecīgo periodisko funkciju izvirkzot Furjē rindā, sauc par šī procesa **spektrālanalīzi**.

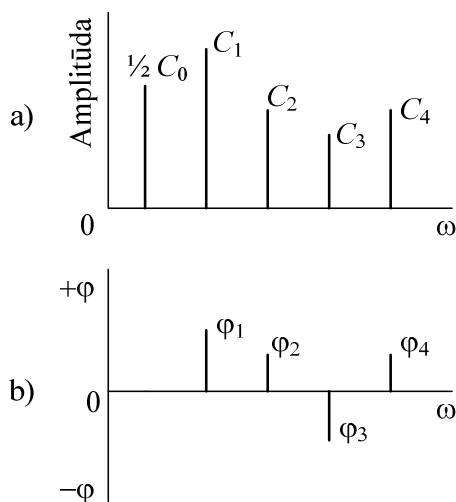
Instrumenti, kas spēj selektīvi reaģēt uz harmoniskām svārstībām, tiešām arī uzrāda šādas periodiska signāla sastāvdaļas. Tā kā šādi instrumenti ir gan cilvēka dzirdes un redzes orgāni, kā arī uz rezistīvu, induktīvu un kapacitatīvu elementu bāzes veidotās ierīces (tā ir praktiski visa elektroniskā un elektrotehniskā aparātūra), minētai rindai ir ārkārtīgi liela nozīme dažādās nozarēs: mērīšanas tehnikā, akustikā, fizikā un, protams, elektronikā un sakaru tehnikā. Visur tur, kur jānodarbojas ar signālu apstrādi, uzkrāšanu, pārraidi.

Lai aprakstītu reāla signāla izmaiņu laikā, nepieciešami trīs spektra sastāvdaļu raksturotāji:

- ✓ amplitūda,
- ✓ leņķiskā frekvence,
- ✓ fāze.

Rinda (5.2) rāda, ka pilnīgu informāciju par periodisku signālu dod tā harmoniku amplitūdas un fāzes. Tāpēc bezgalīgi daudzveidīgo laika funkciju $s(t)$ vietā signālu ērti

ir uzdot ar tā harmonisko sastāvdaļu amplitūdu un fāzu spektriem. Šos spektrus parasti attēlo grafiski, diagrammu veidā kā parādīts attēlā 2.1. Uz horizontālās ass tiek atzīmētas signāla harmonisko sastāvdaļu frekvences, un tiek atlikti nogriežņi, kuru garums atbilst sastāvdaļas amplitūdai (amplitūdu spektram) vai fāzei (fāzu spektram) (5.4 att.). Tādējādi šīs divas spektrogrammas dod pilnīgu informāciju par signālu. Kļūst skaidrs, kāda frekvenču josla jānodrošina signāla pārraidei vai pastiprināšanai, jo, ja netiks visas signāla sastāvdaļas vienādi pārvadītas, sistēmas izejā signāls atšķirsies no signāla tās ieejā. Iespējams signālu aprakstīt rindas veidā, izmantojot ne tikai trigonometriskas funkcijas, kā izteiksmē (5.2), bet arī daudzas citas. Funkcijas, kuras ir piemērotas Furjē transformāciju veikšanai sauc par **bāzes funkcijām**.



5.4 att. Signālam atbilstošu amplitūdas (a) un fāzu (b) spektra piemērs

Signālu pārvades analīzes uzdevums ir šāds: $s(t)$ pievadīts zināmas lineāras sistēmas ieejai. Jānosaka izejas signāls. Periodisku signālu pārvades analīzei ērti izmantot signāla izvērsi Furjē rindā. Tā kā lineāru sistēmu analīzē piemērojams ir superpozīcijas princips, varam noteikt katra Furjē rindas locekļa radīto reakciju sistēmas izejā un iegūt izejas signālu, summējot šīs reakcijas. Rezultāta ieguve kļūst sevišķi uzskatāma un vienkārša, ja Furjē rindā izmantotas tādas bāzes funkcijas, kas nemaina savu formu lineāru pārveidojumu rezultātā. Tad izejas signāls veidojas kā rinda, kura sastāv no tādu pašu skaita tādu pašu funkciju kā ieejas signāls. Protams, rindas locekļu koeficienti gan būs citi. Rezultātā jebkuras formas $s(t)$ pārvades analīze reducējas uz bāzes funkciju pārvades analīzi.

Trigonometriskās un kompleksās eksponentfunkcijas lineāru pārveidojumu rezultātā paliek tādas pašas (var mainīties tikai to amplitūdas un sākumfāzes). Tāpēc tās ir neaizstājamas, veicot periodisku signālu pārvades analīzi lineārās sistēmās. Šī

iemesla dēļ, radioelektronikā liela vērtība tiek pievērsta tieši harmoniskas svārstības $S_m \cos(\omega t + \psi)$ pārvadei lineārās ķēdēs.

Izmantojot trigonometriskās funkcijas kā bāzes funkcijas, Furjē rinda (5.2) tiek pierakstīta šādi:

$$s(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \cdot \omega \cdot t + b_n \sin n \cdot \omega \cdot t), \quad (5.3)$$

kur a_n un b_n – Furjē koeficienti. Lielums $\frac{1}{2}a_0$ izsaka signāla vidējo vērtību, kas ir vienāda ar līdzsprieguma komponenti elektriskajās ķēdēs. Līdzkomponentes esamību viegli novērtēt aplūkojot signāla izmaiņas grafiku. Tā var būt (+), (-) vai nulle. Ja signāls ir simetrisks attiecībā pret „0” potenciālu, tad līdzkomponente būs 0.

Rinda (5.3) apraksta signālu $s(t)$ intervālā $t \in [t_0, t_0 + T]$. Ja signāls ir periodisks ar periodu T , tad tā apraksta šo signālu bezgalīgā laika intervālā, jo bāzes funkcijas ir periodiskas.

Furjē koeficientus nosaka pēc formulām (5.4) un (5.5):

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) \cos(n \frac{2\pi}{T} \cdot t) dt, \quad (5.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) \sin(n \frac{2\pi}{T} \cdot t) dt, \quad (5.5)$$

$$\text{kur } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

No koeficientu aprēķina formulām varam secināt:

- ✓ ja signāls ir pāru funkcija ($s(t) = s(-t)$), tad visi b_n vienādi nullei;
- ✓ ja signāls ir nepāru funkcija ($s(t) = -s(-t)$), tad visi a_n vienādi nullei.

Šie secinājumi ļauj ietaupīt laiku un nemeklēt tos koeficientus, par kuriem jau no $s(t)$ laika diagrammas redzams, ka tie vienādi nullei. Bez tam, izvērsot periodisku signālu Furjē rindā, ir lietderīgi tā izvēlēties laika atskaites sākumu ($t=0$), lai signāls, kad tas iespējams, iznāktu pāru vai nepāru funkcija.

Izvēršim Furjē rindā periodisku taisnstūra impulsu signālu ar amplitūdu $\pm 1V$ (5.5 att.). Par atskaites laika sākumu izvēlamies $t=0$, kā redzam attēlā. Pie šādas $t = 0$ izvēles signāls ir nepāru funkcija, un Furjē rindai jāmeklē tikai b_n koeficienti. Tātad, harmoniku amplitūdas noteiksim pēc formulas:

$$C_n = b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^0 (-1) \cdot \sin(n \frac{2\pi}{T} \cdot t) dt + \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} 1 \cdot \sin(n \frac{2\pi}{T} \cdot t) dt. \quad (5.6)$$

Pēc integrēšanas iegūstam C_n vērtības:

$$C_n = \begin{cases} \frac{4}{\pi \cdot n}, & \text{ja } n=2k+1, k=0,1,2,\dots \\ 0, & \text{ja } n=2k \end{cases}$$

Ievietojot iegūstam:

$$s(t) = \frac{4}{\pi} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \frac{1}{3} \sin\left(3 \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \frac{1}{5} \sin\left(5 \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \frac{1}{7} \sin\left(7 \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \dots \right]. \quad (5.7)$$

Taisnstūra impulsu rindas pārveidošanas rezultāti sinusoidālu signālu rindā redzami 5.5 attēlā. Redzam, ka pēc katras nākošās harmonikas piesummēšanas, signāla forma aizvien vairāk tuvojas dotā signāla formai. Nepieciešamo harmoniku skaits ir atkarīgs no nepieciešamās aproksimācijas precizitātes. Lai iegūtu izejas signālu, kas atbilst teorētiskam taisnstūra signālam, nepieciešams bezgalīgs harmoniku skaits. Praksē parasti pietiek ar 9 līdz 15 harmonikām.

Līdzīgā veidā var atrast Furjē rindas vienādojumu jebkuram signālam. Praksē bieži vien tas ir ļoti darbietilpīgs process, kuru veic attiecīgas datu apstrādes programmas.

Furjē rinda diskrētiem signāliem

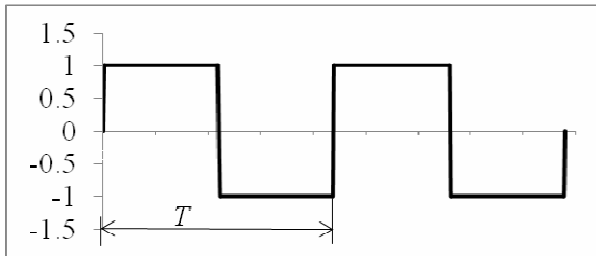
Diskrētu signālu matemātiskam pierakstam jāizmanto diskrēta laika funkcijas. Diskrētiem signāliem Furjē transformāciju izteiksme tiek pierakstīta šādi:

$$s(k) \approx \sum_{n=0}^N d_n \varphi_n(k), \quad (5.8)$$

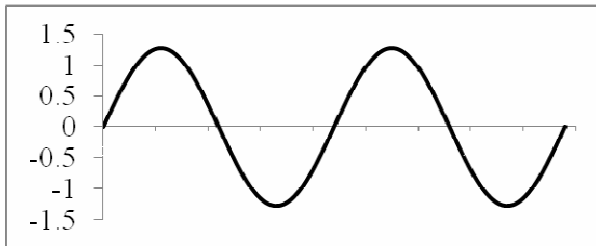
kur $s(k)$, $\varphi_n(k)$ attiecīgi diskrētā signāla un izvēlēto funkciju vērtības diskrētos laika momentos $t_k = k\tau$, $k = 0, K-1$, τ – laika diskretizācijas solis, d_n – Furjē koeficienti.

Diskrētās Furjē rindas koeficientu aprēķināšana ir visai darbietilpīga. Apstrādājot dažādus eksperimentos iegūtos datus, izmantojamo signāla vērtību skaits sniedzas simtos un tūkstošos. Tāpēc liela vērtība tika piegriezta efektīvu diskrēto Furjē transformāciju algoritmu meklējumiem. Sešdesmito gadu vidū tika izstrādāts efektīvs algoritms – **Ātrā Furjē Transformācija** jeb **FFT** (no *Fast Fourier Transform*). Tagad diskrēto signālu spektru aprēķinos ar datoru parasti tiek izmantots tieši šis algoritms. Datorprogrammas, ko izmanto mērījuma datu apstrādei, izmanto FFT algoritmus, lai veiktu signālu filtrēšanu un citas nepieciešamās darbības.

Izmantojot ciparu mērīšanas sistēmas, kuras izmanto FFT jāņem vērā īpatnības, kas var izsaukt mērījumu kļūdas. FFT strādā ar periodiskiem signāliem un, analizējot neperiodiskus signālus, iegūsim periodiski atkārtotu neperiodiskā signāla attēlu (5.6 att.).

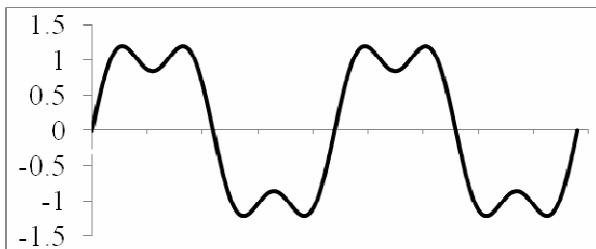


Dotais taisnstūra formas signāls izmantojot Furjē transformācijas izsakāms ar vienādojumu (5.7).

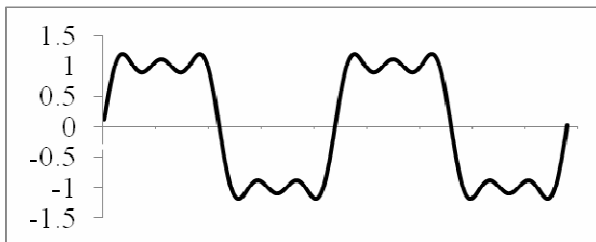


Pamatfrekvence (pirmā harmonika), kuru izsaka pirmais saskaitāmais:

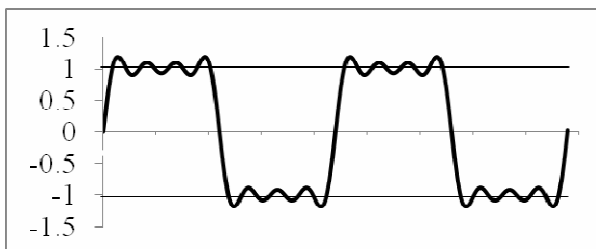
$$\sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right).$$



Signāla forma pēc pirmās un trešās harmonikas summēšanas.

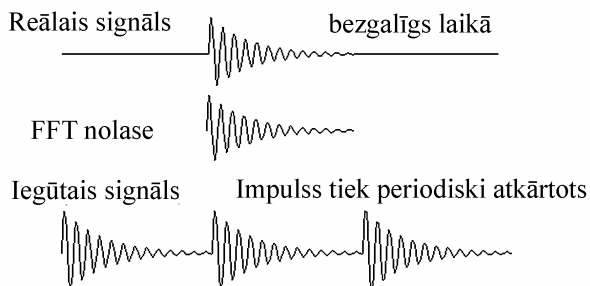


1.+3.+5. harmonika.



1.+3.+5.+7. harmonika.

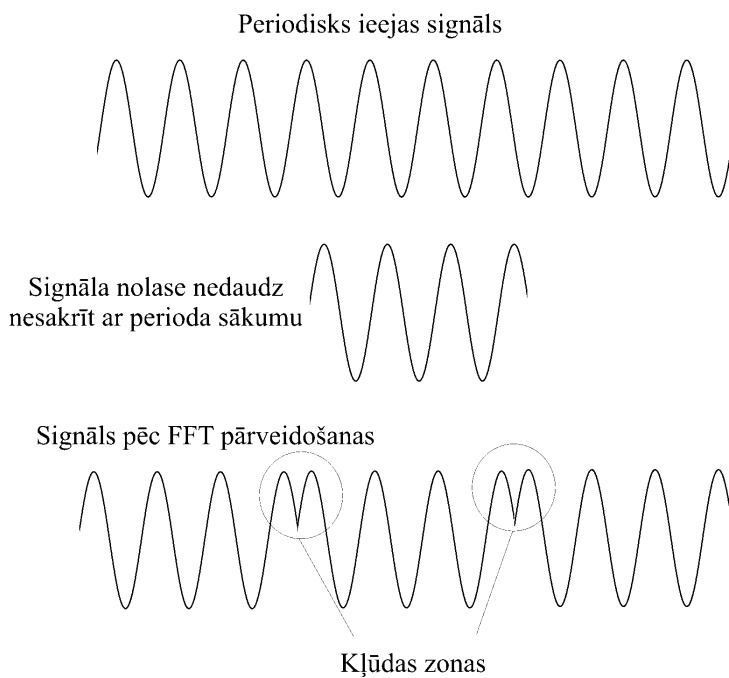
5.5 att. Taisnstūra formas periodiskas sprieguma izteikšana ar Furjē transformācijām



5.6 att. **FFT darbība neperiodisku nolašu laikā**

Redzam, ka FFT nolasa neperiodisku signālu, analizē to, un izejā atkārtoti rezultātu ar noteiktu periodu.

Ja FFT tiek izmantota periodiska signāla apstrādei, jāņem vērā, FFT strādā tikai tad, ja signāla periods ir pilnīgi nobeigts (5.7 att.).



5.7 att. **Periodiska signāla FFT radītās kļūdas**

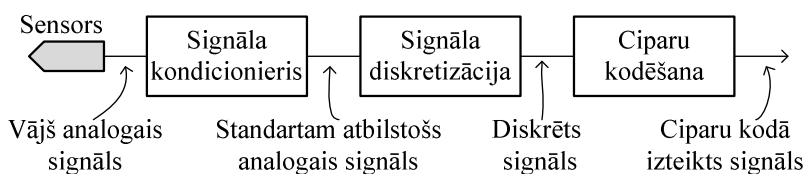
Ja signāla periods nav pilnīgi nobeigts, t.i. nesākas un nebeidzas „0” pārejas punktā, iekārta to uztver kā signāla zudumu un tajā vietā parādās kropļojums. Tas ir jāņem vērā izvēloties nolases laiku.

5.3. Analogā signāla digitālā apstrāde

Signāli, kas tiek iegūti no dažādiem devējiem un raksturo kāda objekta stāvokli nepārtrauktā laikā, piemēram, spriegums mikroфона izejā, spiediena izmaiņa hidrauliskajā sistēmā, rotācijas ātrums un citi, ir analogie signāli. Mērīšanas sistēmās šie signāli tiek pastiprināti un filtrēti, lai iegūtu izejas signālu atbilstoši pieņemtajiem tehniskajiem nosacījumiem un standartiem.

Modernajās mērsistēmās datu apstrādei, analīzei un uzkrāšanai izmanto datorus un attiecīgas datorprogrammas. Lai ievadītu analogo signālu datorā, tas jāpārveido atbilstošā ciparu kodā. Pārveidošanas procesa shēma redzama 5.8 attēlā.

No mērpārveidotāja iegūtais analogais signāls vispirms ir jāpārveido par diskretu signālu, un tad jāizsaka ciparu veidā, binārajā, Greja vai citā kodējumā.



5.8 att. Analogā signāla pārveidošana ciparu kodā

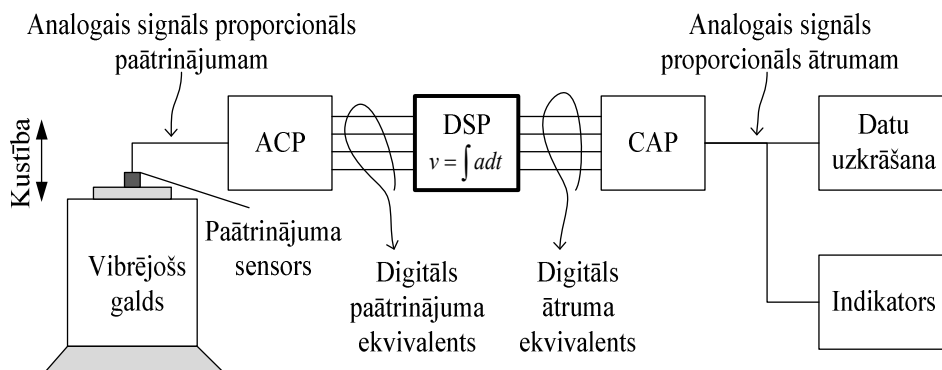
Signāla ciparu apstrādes sistēmas blokshēma redzama 5.9 attēlā. Tajā attēlota galda vibrāciju ātruma mērīšana shēma. Paātrinājuma sensors uztver galda vibrācijas un tā izejā parādās analogais signāls proporcionāls galda paātrinājumam. Signāls tiek pastiprināts un filtrēts (ja nepieciešams) analogo signālu kondicionierī. Analogais signāls ar frekvenču joslu f_a Analogu Ciparu Pārveidotājā (ACP) tiek pārveidots ciparu formā, diskretizējot to ar frekvenci f_s . Pārveidotais signāls nonāk Digitālajā Signālu Procesorā (DSP), kur tiek veikta nepieciešamā signāla apstrāde. Signāla apstrādes shēma strādā reālā laikā, tas nozīmē, ka visi pārveidošanas procesi notiek reizē ar signāla izmaiņu. Lai notiktu signāla apstrāde reālajā laikā, procesoram jāpabeidz signāla apstrāde diskretizācijas intervāla laikā $1/f_s$ un jāpadod signāls uz Ciparu Analogu Pārveidotāju (CAP), no kurienes apstrādātais analogais signāls nonāk indikatorā vai datu uzkrājējā. Šo signālu var izmantot arī automātiskās regulēšanas sistēmā kā atgriezeniskās saites signālu. Galvenā DSP funkcija ir signāla digitālo filtrēšanu un matemātiskā pārveidošana.

Jāņem vērā, ka CAP ir nepieciešams tikai tajos gadījumos, kad izejā nepieciešams iegūt analogo signālu, piemēram, skaņas ierakstos. Daudzos gadījumos, piemēram automātiskās regulēšanas un mērīšanas sistēmās signāls paliek ciparu formā un tiek tālāk izmantots pēc vajadzības.

Reālos ACP un CAP procesos ir divi galvenie signāla pārveidošanas etapi, kuri nosaka pārveidotā signāla kvalitāti: signāla kvantēšana pēc amplitūdas un diskretizācija laikā.

Galvenā priekšrocība šādai, visai sarežģītai mērāmā signāla apstrādei, ir iespēja veikt signāla digitālo filtrāciju, kura ir daudz efektīvāka par analogo filtrāciju. Jāņem vērā, ka efektīvi analogie filtri ir sarežģītas elektroniskas ierīces, kuru parametru izmaiņa ir visai sarežģīta. Ciparu filtrēšana notiek programmatiski (izmantojot Furjē transformācijas) un to raksturlīknes ir viegli pieskaņojamas.

Otra būtiska DSP izmantošanas priekšrocība ir iespēja plašās robežās veikt signāla matemātisko apstrādi un pārveidošanu (tas redzams arī attēlā). Nepieciešamības gadījumā var izmantot vairāku sensoru doto informāciju un veikt tās apstrādi pēc noteikta algoritma. Tas viss notiek programmatiski, un apstrādes algoritmi operatīvi var tikt mainīti.



5.9 att. Analogā signāla digitālās apstrādes shēma

Kopumā ciparu signāliem ir šādas priekšrocības:

- ✓ ciparu signāls viegli pārveidojams izmantojot datorprogrammas,
- ✓ signāls ļoti labi filtrējams izmantojot digitālos filtrus,
- ✓ ciparu signāls labi pārvadāms pa dažādām datu pārvades līnijām, to ievērojami mazāk ietekmē traucējumi,
- ✓ informāciju, ko satur ciparu signāls iespējams atjaunot traucējumu gadījumos,
- ✓ ciparu signāla informāciju var ilgstoši uzglabāt un pārkopēt bez informācijas zudumiem.

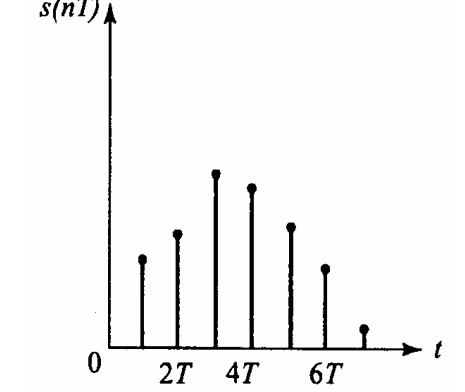
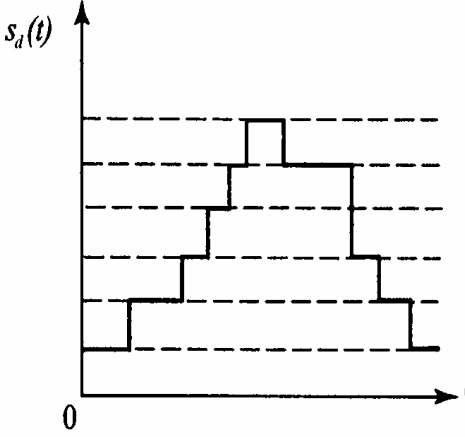
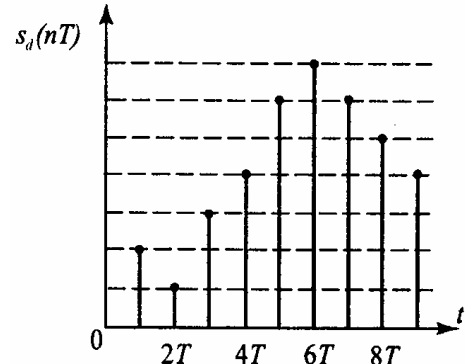
Galvenie ciparu signālu apstrādes trakta trūkumi:

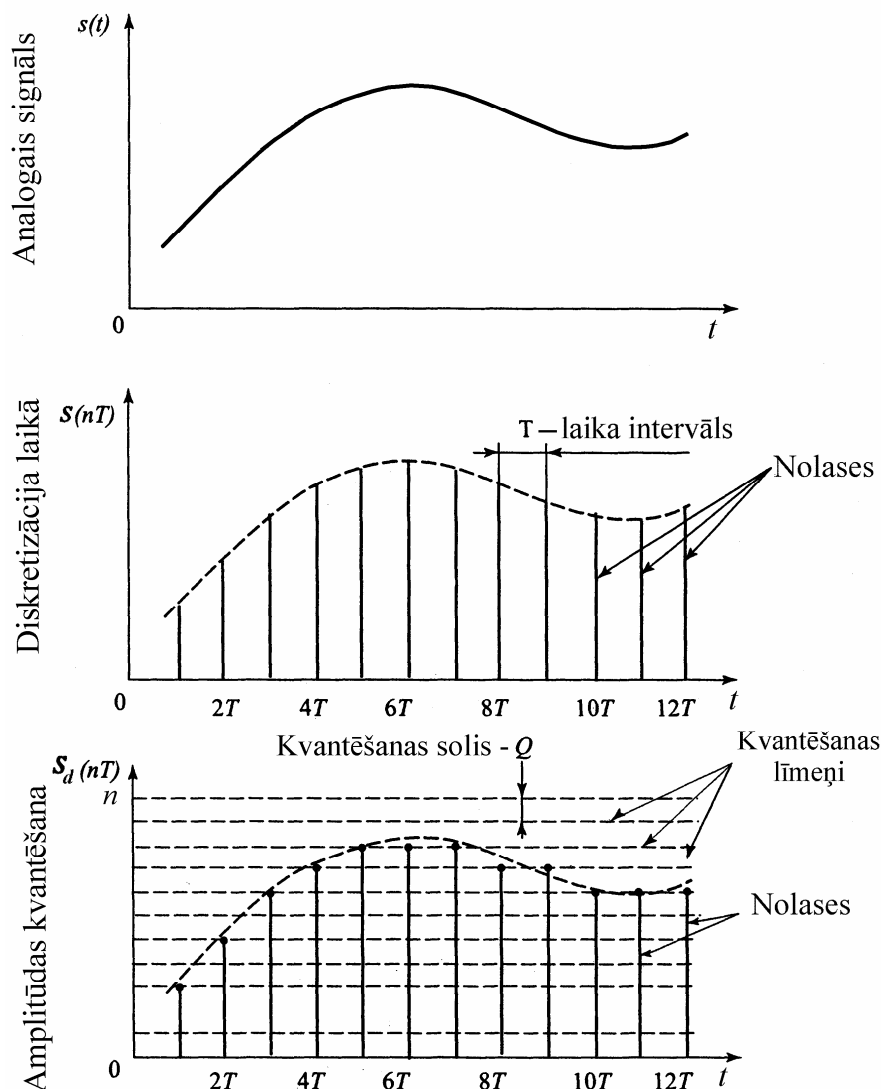
- ✓ iegūtais signāls tikai aptuveni satur analogajā signālā iekļauto informāciju,
- ✓ signāls satur plašāku frekvenču spektru,
- ✓ signāla apstrādes tehnika ir daudz sarežģītāka,
- ✓ ciparu sistēmām ir salīdzinoši augstāka cena. Taču attīstoties ciparu shēmu tehnoloģijām, elektronisko komponentu cenas pazeminās.

Analogā signāla diskretizācija

Lai analogo signālu pārveidotu ciparu signālā, tas vispirms jāpārveido par diskretu signālu (5.8 att.) To izdara 5.2 tabulā redzamajos veidos.

5.2 tabula **Diskrēto signālu veidi**

	Patvaļīgas amplitūdas, diskretizēts laikā. Signāla vērtība tiek noteikta stingri noteiktos laika periodos T. Signāla amplitūda var būt jebkura. Tā parasti atbilst analogā signāla vērtībai dotajā laika momentā.
	Diskrēts signāls nepārtraukts laikā, bet kvantēts pēc amplitūdas. Tas nozīmē, ka signāla amplitūdas skala ir sadalīta noteikta daudzuma vienādās pakāpēs. Atbilstoši analogā signāla izmaiņai tiek iegūta aptuvena tā izmaiņas histogramma.
	Signāls diskrēts laikā un kvantēts pēc amplitūdas. Tas nozīmē, ka analogā signāla vērtības tiek piesaistītas tuvākajam kvantēšanas līmeņa un diskretizācijas laika krustpunktam.



5.11 att. Analogā signāla diskretizācijas process

Pārveidojot analogo signālu diskrētajā, vispirms tiek veikta signāla kvantēšana (diskretizācija) laikā (5.11 att.). Laika intervālu, kurā tiek veiktas **nolases** sauc par **diskretizācijas periodu**, un tam apgriezto lielumu – par **diskretizācijas frekvenci**. Diskretizācijas frekvences izvēle ir ļoti būtiska, jo tā nosaka diskrētā signāla atbilstību dotajam analogajam signālam. Minimālo diskretizācijas frekvenci f_s nosaka augstākā mērāmā signāla spektra frekvence f_a un to sauc par Naikvista frekvenci:

$$f_s = 2 \cdot f_a. \quad (5.9)$$

Diskretizācijas frekvences noteikšanu sīkāk iztirzāsim nākamajā apakšnodaļā.

Amplitūdas kvantēšana (5.11 att.) ir signāla momentāno vērtību aizstāšana ar iepriekš izraudzītām, noteiktām lielumu vērtībām. Atšķirību starp blakusesošajām lielumu vērtībām parasti izvēlas konstantu un to sauc par **kvantēšanas soli**. Attēlā tas apzīmēts ar Q . Laika un amplitūdas kvantēšanu var veikt atsevišķi, bet visbiežāk to dara vienlaikus.

Amplitūdas kvantēšanā izraudzītās vērtības sauc par **kvantēšanas līmeņiem**. Parasti kvantēšanas līmeņu skaitu n izsaka bitos:

$$n = 2^m, \quad (5.10)$$

kur m – bitu skaits.

Ciparu sistēmās ir svarīgs informācijas pārraides ātrums, to izsaka bitos sekundē jeb **bodos** B . Ievērtējot mazāko diskretizācijas frekvenci un kvantēšanas līmeņu skaitu, nepieciešamais informācijas pārraides ātrums ir aprēķināms pēc formulas:

$$B = 2m \cdot f_a, \quad (5.11)$$

kur f_a – analogā signāla spektra augstākā frekvence.

No formulas (5.11) izriet, ka orientējoši kodētā signāla frekvence ir $2m$ reizes augstāka par augstāko signāla frekvenci. Tas nozīmē, ka signāla pārvades traktam ir jāuzstāda augstākas prasības.

Kā redzam attēlā 5.11 kvantēšanas rezultātā iegūtās nolašu vērtības tikai aptuveni atbilst analogā signāla faktiskajām vērtībām dotajos laika momentos. Jo lielāks būs kvantēšanas līmeņu skaits un augstāka diskretizācijas frekvence, jo mazāka būs kvantēšanas kļūda. Kā redzam tabulā 5.3, kvantēšanas līmeņu kļūda jau 12 bitu kodēšanā kļūst nenožīmīga (~0.2%). Šobrīd tiek ražoti plašam patēriņam ACP un CAP ar 12 – 16 bitu kvantēšanu diskretizācijas frekvencēm līdz vairākiem desmitiem un pat simtiem megahercu.

Svarīgi!

Jāņem vērā, ka ierīces faktiskā izšķiršanas spēja būs mazāka nekā tehniskajā dokumentācijā norādītā. Tas ir atkarīgs no daudziem faktoriem. Visvairāk faktisko izšķiršanas spēju ietekmē analogā signāla maksimālais līmenis ACP ieejā. Tam pēc iespējas jābūt tuvāk ACP maksimāli pieļaujamajam ieejas līmenim. Nekādā gadījumā nedrīkst pārsniegt maksimāli pieļaujamo ACP ieejas signāla līmeni, jo tas radīs ļoti lielus signāla formas un amplitūdas kropļojumus.

Nelineārā kvantēšana

Lai samazinātu nepieciešamo pārraidāmās informācijas ātrumu un daudzumu, izmanto nelineāro kvantēšanu (5.12 att.).

5.3 tabula **Kvantēšanas līmeņu radītā kļūda**

Izšķiršanas spēja N, biti	Līmeņu skaits 2^N	Spriegums	ppm FS	%FS	dB FS
2	4	2.5V	250000	25	-12
4	16	625 mV	62500	6.25	-24
6	64	156mV	15625	1.56	-36
8	256	39.1 mV	3906	0.39	-48
10	1024	9.77mV (10 mV)	977	0.098	-60
12	4096	2.44 mV	244	0.024	-72
14	16384	610 μ V	61	0.0061	-84
16	65536	153 μ V	15	0.0015	-96
18	262144	38 μ V	4	0.0004	-108
20	1048576	9.54 μ V (10 μ V)	1	0.0001	-120
22	4194304	2.38 μ V	0.24	0.000024	-132
24	16777216	596 nV*	0.06	0.000006	-144

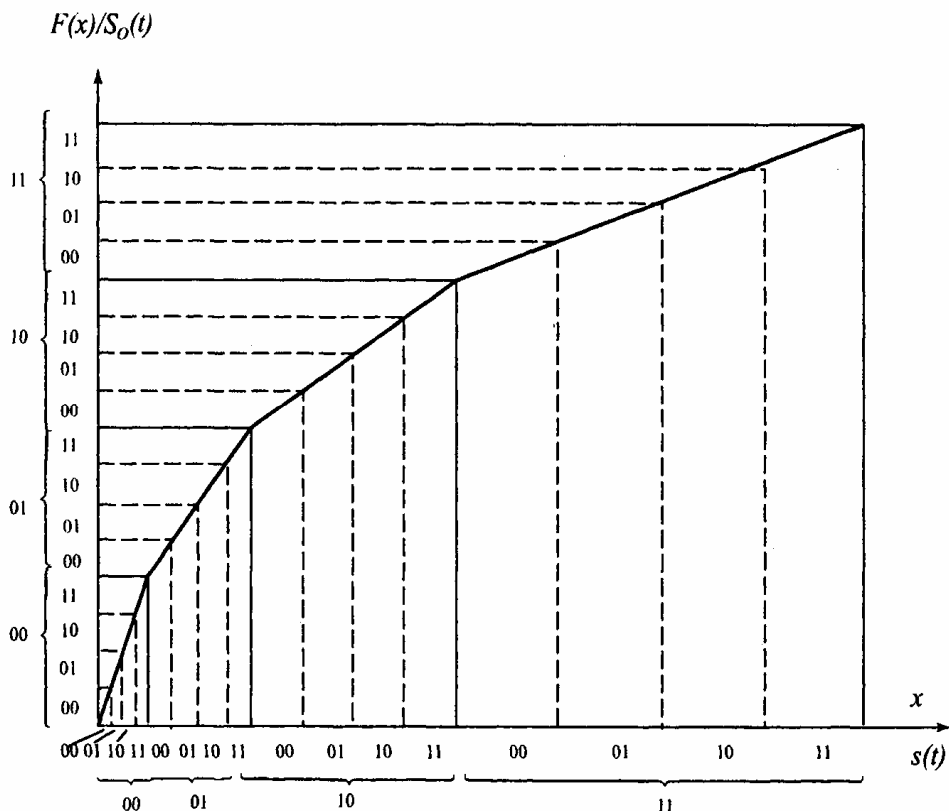
* 600 nV - Džonsona troksnis, ja signāla frekvenču joslas platums ir 10kHz

FS – (*full scale value*) pilnās skalas vērtība, FS=10V

Praksē signāla izmaiņas ātrums ir ļoti mainīgs. Bieži vien kāda no signāla daļām mainās ļoti strauji, bet pārējā laikā izmaiņas ātrums ir vairākas reizes mazāks. Tādā gadījumā ir izdevīgi izmainīt diskretizācijas frekvenci atbilstoši signāla izmaiņas straujumam. Ja DSP strādā pēc šāda algoritma, tad to sauc par **nelineāro kvantēšanu** (skat. 5.12 att.).

Katra kvantēšanas rezultātā iegūtā signāla nolases vērtība tiek izteikta binārajā kodā un to sauc par digitālo vārdu. Tas sastāv no nolasīto līmeņu grupas, kas izteikta digitālajā kodā. Digitālos vārdus var pārvadīt dažādos veidos; paralēlajā kodā – visi līmeņi parādās vienlaicīgi paralēlos sakaru kanālos, virknes kodā – līmeņi tiek pārvadīti pa vienu sakaru kanālu secīgi laikā.

Lai labāk izprastu ciparu signālu apstrādes principus, nedaudz atkārtosim darbības ar binārajiem skaitļiem. Binārie skaitļi satur tikai divus ciparus 0 un 1. Tos sauc arī par loģisko nulli un loģisko vieninieku. Tas izriet no loģisko mikroshēmu terminoloģijas, jo nosaka loģiskā elementa pārslēgšanās spriegumus. Loģiskā nulle ir sprieguma līmenis elementa ieejā, kurš neizsauc elementa stāvokļa maiņu. Loģiskais vieninieks ir sprieguma līmenis elementa ieejā, kurš garantē elementa pārslēgšanos.



5.12 att. Nelineārās kvantēšanas princips

TTL mikroshēmām $U_0=0$ līdz $0.6V$, $U_1=2.4$ līdz $5V$, MOP mikroshēmām $U_0=0$ līdz $0.6V$, $U_1=7$ līdz $9V$.

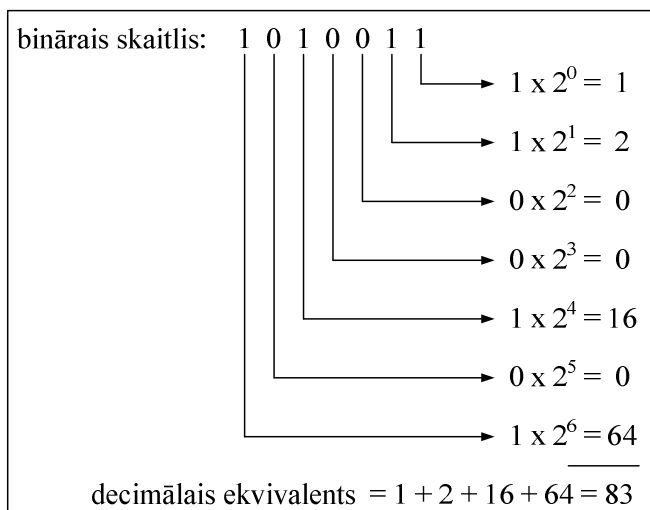
Bināro skaitļu pārveidošanai decimālajos ir vairākas metodes. Attēlā 5.13 redzami trīs varianti, kā noteikt binārā skaitļa decimālo ekvivalentu. Bināro skaitli sāk analizēt no labās puses un katram ciparam piekārto skaitļa 2 pakāpi, sākot no 2^0 . Binārā skaitļa decimālais ekvivalents veidojas summējot kopā visas skaitļa 2 pakāpes, kurām binārajā skaitlī atbilst vieninieki.

Bināro skaitļu rēķinos, it sevišķi mērīšanas tehnikā, ir bieži tiek lietoti termini LSB un MSB. Šie termini ir starptautiski un tādēļ tos latviski netulkosim. **LSB** – *Least Significant Bit*, no angļu valodas – **jaunākās kārtas bits**.

1101 1110 – LSB ir binārā skaitļa labās puses malējais bits. Šī bita izmaiņa rada vismazāko kļūdu. Parasti diskrētajās mērīšanas sistēmās kļūda ir $\pm 1\text{LSB}$.

MSB – *Most Significant Bit*, **vecākās kārtas bits**.

1101 1110 – MSB ir binārā skaitļa kreisās puses malējais bits. Tā vērtība ir vislielākā un MSB kļūdaina izmaiņa rada ļoti lielas mērījuma kļūdas.



2 pakāpe: 16 8 4 2 1

binārais skaitlis: 1 0 1 1 0

decimālais skaitlis = $16 + 4 + 2 = 22$

binārās kārtas: 2^3 2^2 2^1 2^0 2^{-1} 2^{-2}

2 pakāpe: 8 4 2 1 0.5 0.25

binārais skaitlis: 1 0 0 1. 0 1

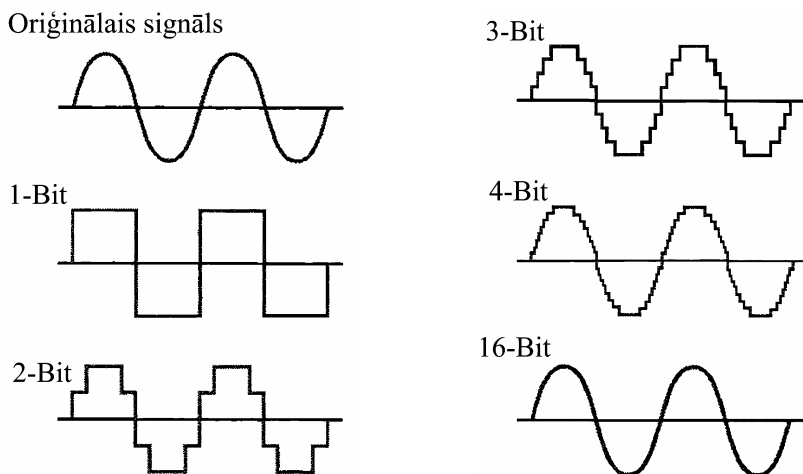
decimālais skaitlis = $8 + 1 + 0.25 = 9.25$

5.13 att. Bināro skaitļu pārveidošana decimālajos

Jāatzīmē, ka ciparu tehnoloģijās lieto arī skaitļus ar bāzi 8 un 16. Mērīšanas sistēmās tos izmanto retāk, tāpēc šeit sīkāk darbības ar tiem neanalizēsim.

Kvantēšanas līmeņu skaits ietekmē izejas signāla formu. Attēlā 5.14 parādīta sinusoidāla signāla formas izmaiņa atkarībā no kvantēšanas līmeņu skaita. Ja kvantēšanas līmeņu skaits ir virs 8-Bit, tad vizuāli signāla formas atšķirība nav manāma. Jāņem vērā, ka pārveidotais signāls tiek filtrēts ar ciparu filtriem, kuri sašaurina caurlaides joslu, izslēdzot kvantēšanas frekvences radītās harmonikas.

Iepriekš aprakstītajam binārajam kodam piemīt būtiski trūkumi, kas var radīt lielas mērījumu kļūdas, piemēram absolūtajos enkoderos, kas tika aprakstīti 4. nodaļā. Kļūdas var rasties arī ACP un CAP darbībā. Sīkāka ACP-CAP kļūdu analīze tiks aplūkota 8. nodaļā, šeit tikai pieminēsim vienu no iespējamajām kļūdām – izlaisto kodu.



5.14 att. Kvantēšanas līmeņu ietekme uz izejas signāla formu

Gan absolūtajos enkoderos, gan elektroniskajās shēmās dažādu iemeslu dēļ kāds no digitālā vārda bitiņiem var tikt nolasīts nepareizi. Ja tas ir LSB, tad kļūda būs minimāla un nenozīmīga. Attēlā 5.15 (kreisajā pusē) redzama virzes kustības absolūtā enkodera maska, kura izveidota binārā koda iegūšanai. Pieņemsim, ka kļūdaini tiek nolasīta ar svītru iezīmētā pāreja. Tādā gadījumā kļūda var parādīties MSB nolasījumā. Rezultātā binārā skaitļa 0111 vietā var parādīties skaitlis 1111. Nolasījuma kļūda būs 50% no FS.

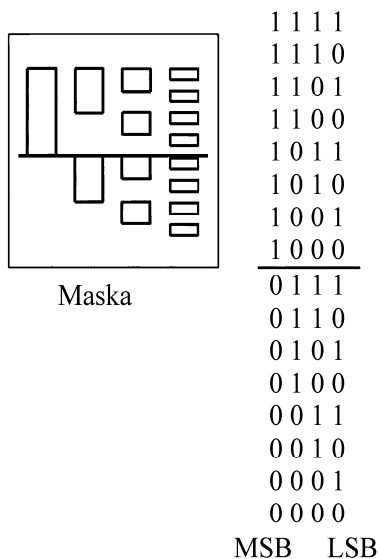
Lai novērstu šādu kļūdu veidošanās iespēju, tiek izmantots reflektētais binārais kods jeb **Greja kods**. Pirmo reizi Greja kods tika patentējis Elīza Greja (*Elisha Gray*) 1878. gadā. Otrreiz atkārtoti to patentēja Franks Grejs (*Frank Gray*) 1949. gadā. Lai arī Greja kods ir ekvivalents binārajam kodam tas reti tiek izmantots digitālajā matemātikā datoros. Mērīšanas sistēmās un signāla analoģu – ciparu pārveidotājos tam ir būtiska nozīme, jo Greja koda izmantošana pasargā no lielu pārveidošanas kļūdu rašanās.

Attēlā 5.15 labajā pusē redzams absolūtais enkoders, kas atbilst Greja kodam. Šeit arī redzam bināro skaitļu rindu, kas atbilst 4-Bit kodējumam. Redzam, ka nevienā vietā kļūdaina nolasījuma dēļ digitālais skaitlis neizmainās vairāk par 1Bit. Tas nozīmē, ka maksimālā nolasījuma kļūda nepārsniedz vienu bitu.

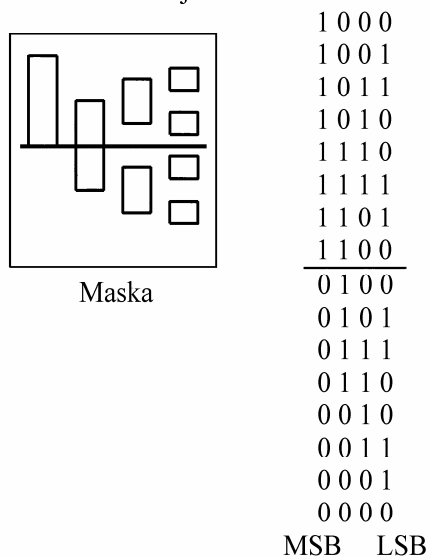
Attēlā 5.16 redzami absolūtie enkoderi vārpstas rotācijas parametru noteikšanai. Greja kodam atbilstošais enkoders ir izveidots tā, ka visās binārā skaitļa pārejas vietās izmainās tikai viens bits.

Šāda pārveidotāja konstrukcija nodrošina nolases kļūdu ne lielāku par vienu bitu. Līdzīga situācija veidojas arī analoģu – ciparu pārveidotājos, kur nolases kļūdu cēlonis ir elektriskas dabas traucējumi.

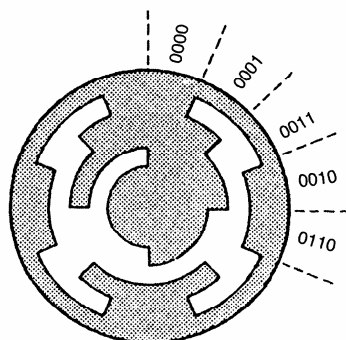
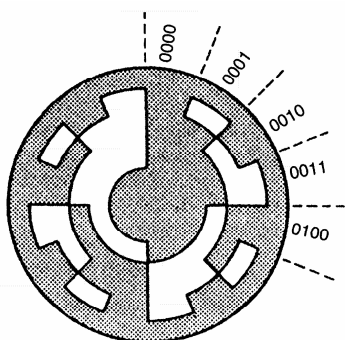
4-bitu binārais kods



4-bitu reflektētais binārais kods Greja kods



5.15 att. Binārais un Greja kods



5.16 att. Vārpstas rotācijas absolūtie enkodēri

Lai varētu iegūto digitālo signālu tālāk izmantot datoros un citās ciparu sistēmās, kur nepieciešams tiešais binārais kods, ir izveidotas elektroniskās shēmas, kuras veic koda pārveidošanu.

5.4. Diskrēta laika Furjē transformācijas

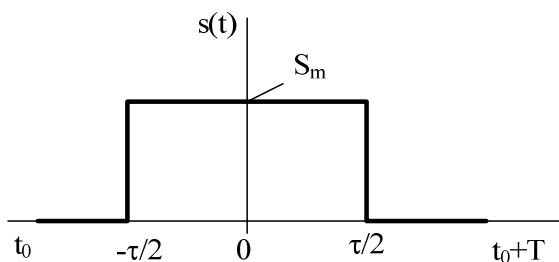
Iepriekš noskaidrojām, kādas kļūdas izejas signālā rada kvantēšanas līmeņu izvēle. Diskretizācijas frekvences pareiza izvēle ir tikpat būtiska kā kvantēšanas līmeņu izvēle. Lai noskaidrotu diskretizācijas frekvences izvēles kritērijus atgriezīsimies pie Furjē transformācijām. Šajā gadījumā jārunā par diskrēta laika Furjē transformācijām.

Signāli parasti tiek iegūti no dažādiem devējiem un raksturo kāda objekta stāvokli nepārtrauktā laikā, piemēram, spriegums mikroфона izejā, spiediena izmaiņa hidrauliskajā sistēmā, seismogramma. Vairumā gadījumu tie ir neperiodiski signāli. Lai aprēķinātu šāda signāla spektru un veiktu dažādus tā pārveidojumus, izmantojot datorus, mikroprocesorus vai dažādas specializētas, signālu apstrādei radītas mikrosēmas, jāpielieto atbilstošas skaitliskās metodes un uz to pamata veidoti algoritmi. Tāpēc ir svarīgi saprast, kā pareizi izmantot diskrētos laika momentos fiksētās signāla vērtības – **signāla nolases**, lai pietiekoši precīzi aprēķinātu tā spektru, vai arī – kā veikt inversu operāciju – izmantojot **spektra nolases**, aprēķinātu signālu.

Sakarības, kas saista savā starpā signāla nolases ar tā spektru un signālu ar tā spektra nolasēm, sauc par **Diskrēta Laika Furjē Transformācijām (DLFT)**.

Signālu ciparapstrāde balstās uz **Nolašu teorēmas** atziņu, ka signālam ar ierobežotu spektru iespējams izvēlēties tādu nolašu izvietojuma soli, kas nodrošina precīzu signāla spektra iegūšanu. Tas nozīmē, ka šādi izvietotas nolases satur visu informāciju par signālu; to iespējams pārraidīt un apstrādāt (filtrēt, izdalīt no trokšņiem, veikt īsās Furjē transformācijas, u.t.t), operējot tikai ar šīm nolasēm.

Neperiodisku signālu var aplūkot kā sastāvošu no visu frekvenču harmoniskām svārstībām, tikai katrai no šīm svārstībām amplitūda ir bezgalīgi maza. Tādēļ to raksturošanai ievieš jaunu jēdzienu: **spektrālais blīvums**, kas ir katras konkrētās svārstības bezgalīgi mazās kompleksās amplitūdas attiecība pret bezgalīgi mazo tuvāko svārstību frekvenču starpību. Tādējādi spektrālais blīvums ir galīga lieluma frekvences funkcija, kas dod priekšstatu par signālu veidojošo harmonisko svārstību amplitūdu un fāzu atkarību no frekvences.



5.17 att. Neperiodisks taisnstūra impulss

Spektrālie priekšstati par signālu ir ļoti svarīgi. Tie ļauj noteikt, kādām jābūt to sistēmu frekvenču raksturlīknēm, kas paredzētas konkrētu signālu pārraidei, uzkrāšanai, reproducēšanai. Tie ļauj analizēt lineāru sistēmu radītos signālu kropļojumus, atpazīt signālus, pētīt tos procesus, par kuru norisi informē signāls. Lai noteiktu spektrālā blīvuma aprēķina izteiksmi, pieņemsim, ka ir dots neperiodisks taisnstūra impulss ar amplitūdu S_m un impulsa platumu τ (5.17 att.).

Aprakstot doto signālu ar Furjē rindu ierobežotā laika apgabalā $t \in [t_0, t_0 + T]$, iegūsim rindu, kas periodiski atkārtos doto signālu ar periodu T . Atbilstošā Furjē rinda kompleksā formā:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \dot{C}_n e^{jn \frac{2\pi}{T} t}, \quad (5.12)$$

kur $\frac{1}{2} \dot{C}_n$ nosaka pēc formulas:

$$\frac{1}{2} \dot{C}_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) e^{-jn \frac{2\pi}{T} t} dt. \quad (5.13)$$

Lai iegūtu neperiodisku signālu, T jāpalielina līdz bezgalībai. Kas notiks, ja $T \rightarrow \infty$? Redzam, ka, palielinoties T , Furjē rindas koeficienti samazinās, līdz pie $T = \infty$ tie kļūst bezgalīgi mazi. Tajā pašā laikā atstarpe starp Furjē rindas sastāvdaļu frekvencēm $1/T$ vai $2\pi/T$ arī samazinās, līdz pie $T = \infty$ arī tā kļūst bezgalīgi maza. Tas nozīmē, ka neperiodisku signālu veido visu frekvenču kompleksu eksponentfunkciju pāri (vai arī harmoniskas svārstības) ar bezgalīgi mazām amplitūdām. Lai par to uzskatāmi pārliecinātos, noteiksim koeficienta $\frac{1}{2} \dot{C}_n$ vērtību 5.17 attēlā parādītajam signālam pēc formulas (5.13).

Iegūstam sekojošu izteiksmi:

$$\frac{1}{2} \dot{C}_n = S_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin\left(n\pi \frac{\tau}{T}\right)}{n\pi \frac{\tau}{T}}. \quad (5.14)$$

Redzam, ka, palielinoties attiecībai T/τ , t.i., paplašinot laika intervālu, kurā tiek aprakstīts signāls, Furjē rindas locekļu amplitūdas samazinās, samazinās arī starpība starp to frekvencēm. Robežgadījumā, pie $T/\tau = \infty$ spektra līnijas saplūdis, jo tās būs bezgalīgi mazas.

Ievēdīsim attiecību (5.15), kas nav atkarīga no T :

$$\frac{\frac{1}{2} \dot{C}_n}{\frac{1}{T}} = \dot{S}\left(n \frac{2\pi}{T}\right) = \dot{S}(n\omega). \quad (5.15)$$

Iegūto lielumu $\dot{S}(n\omega)$ sauc par **spektrālo blīvumu** frekvencei $(n\omega)$.

Izmantojot formulas (5.13), (5.14) un (5.15) iegūstam **tiešo Furjē transformāciju**:

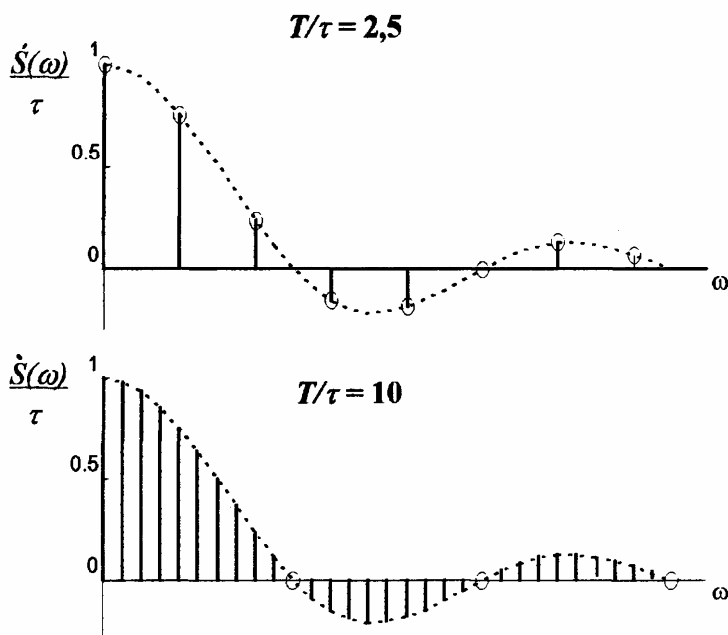
$$\dot{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (5.16)$$

Pēc iegūtā vienādojuma var noteikt neperiodiska signāla spektrālo blīvumu, ja ir zināma funkcijas amplitūdas izmaiņa laikā $s(t)$.

Ja ir zināms spektrālais blīvums $\dot{S}(\omega)$, varam noteikt funkcijas izmaiņu laikā, izmantojot **apgriezto Furjē transformāciju**:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\omega) \cdot e^{j\omega t} dt. \quad (5.17)$$

Tātad, signālu var uzdot ar laika funkciju $s(t)$ vai arī ar frekvences funkciju $\dot{S}(\omega)$ – spektrālo blīvumu. Abas šīs funkcijas precīzi attēlo signālu, savstarpēji tās saista Furjē transformāciju pāris (5.16) un (5.17).



5.18 att. Spektrālā blīvuma izmaiņa dažādām attiecībām T/τ

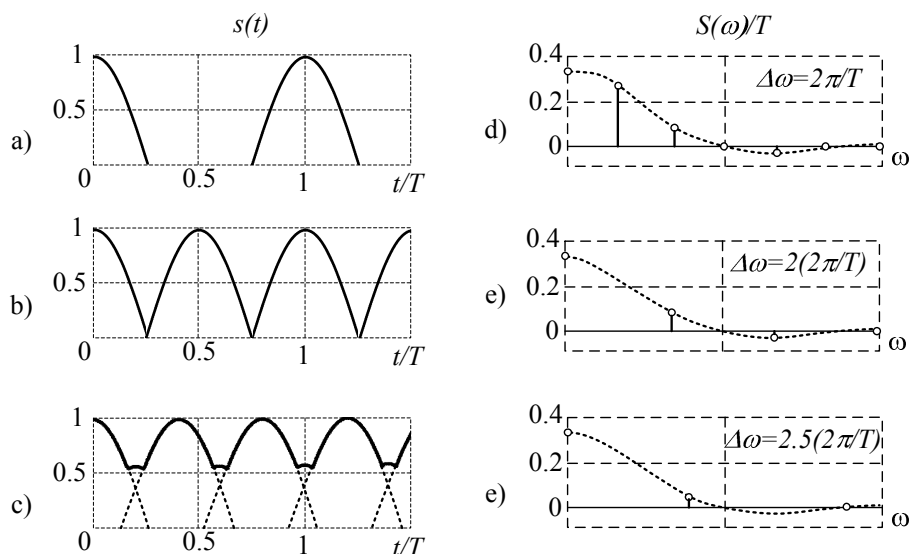
Attēlā 5.18 redzama sakarība starp periodiska signāla spektru un viena šī signāla periodam atbilstoša neperiodiska signāla spektrālā blīvuma vērtībām, par piemēru izmantojot signālu no 5.17 attēla. Redzam, ka, palielinoties attiecībai T/τ , spektrālā blīvuma vērtības nesamazinās un tas precīzi atbilst neperiodiska signāla spektrālā blīvuma vērtībām.

Šī sakarība ir noderīga dažādos gadījumos. Piemēram, zinot periodiska signāla spektru, iespējams noteikt vienam šī signāla periodam atbilstoša neperiodiska signāla spektrālā blīvuma vērtības pie frekvencēm, kas vienādas periodiskā signāla harmoniku frekvencēm.

Pieņemsim, ka zināms ierobežota garuma signāla $s(t)$, $t \in [t_0, t_0 + T]$ spektrālais blīvums $S(\omega)$. Spektrālā blīvuma vienmērīgi izvietotas nolases, noteiktas ar frekvences soli $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$, saistītas ar Furjē rindas locekļu kompleksajām amplitūdām tādām periodiskam signālam, kura vienu periodu veido $s(t)$ (izteiksme (5.15), attēls 5.18). Tātad:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{S}\left(n \frac{2\pi}{T}\right) \frac{1}{T} e^{jn \frac{2\pi}{T} t}. \quad (5.18)$$

Tas nozīmē, ka ierobežota garuma signālu pilnībā reprezentē tā vienmērīgi izvietotas spektrālā blīvuma vērtības – **spektra nolases**, fiksētas ar frekvences soli $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$.



5.19 att. Signāla spektra diskretizācijas ilustrācija

Ja frekvences diskretizācijas solis ir izvēlēts lielāks, spektra nolases reprezentē periodisku signālu, kura periods ir mazāks par dotā $s(t)$ ilgumu T , – notiek signālu pārklāšanās. Tas uzskatāmi redzams 5.19 attēlā.

Viena pusviļņa kosinusoidai atbilstoša impulsa spektrālais blīvums pozitīvajā frekvenču apgabalā parādīts ar punktētu līniju attēlos d), e), f). Ar nepārtrauktiem līnijas nogriežņiem un aplīšiem parādītas izvēlētās spektra nolases. Tās ievietojot izteiksmē (5.18), iegūstam periodisku signālu, kura viens periods precīzi attēlo impulsu gadījumos a) – d) un b) – e), bet neatbilst tam gadījumā c) – f). Šeit attālums starp spektra nolasēm pārkāp liels, – laika apgabalā notiek signālu pārklāšanās. Labākai uzskatāmībai pārklājošos impulsu turpinājumi vienam periodam parādīti ar raustītu līniju.

Secinājums

Visu informāciju par ierobežota garuma signālu $s(t)$, $t \in [t_0, t_0 + T]$ satur tā vienmērīgi izvietotas spektrālā blīvuma vērtības, fiksētas ar soli $\Delta\omega \leq \frac{2\pi}{T}$.

Tā ir **nolašu teorēma frekvenču apgabalā**.

Līdzīgā veidā var veikt signāla diskretizāciju laika apgabalā. Ņemot vērā laika-frekvences dualitāti Furjē transformācijās, varam sagaidīt, ka šādi aprēķinātais spektrs periodiski atkārtosies pa frekvenču asi, līdzīgi tam, kā periodiski atkārtojās signāls 5.19 attēlā. Un tāpēc precīzu spektru varēs iegūt tikai tādā gadījumā, ja tas ir ierobežots frekvenču joslā no $-\Delta f_{\max}$ līdz $\Delta f_{\max}$. Jāņem vērā, ka tāds ierobežots spektrs var būt tikai neierobežota garuma signālam, jo signāls nevar vienlaicīgi būt ierobežota garuma un ar ierobežotu spektru.

Pieņemsim, ka ir dots signāls $s(t)$, kura spektrs $\dot{S}_p(2\pi f)$ atšķirīgs no nulles ierobežotā frekvenču apgabalā $f \in [-f_{\max}, f_{\max}]$. Šo spektru var izvērst kompleksu eksponentfunkciju rindā, tādējādi iegūstot periodisku frekvences funkciju:

$$\dot{S}_p(2\pi f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \dot{A}_k e^{jk \frac{2\pi}{F} f}, \quad (5.19)$$

kur F – spektra atkārtosšanās periods; F jābūt ne mazākam par $2f_{\max}$, lai (5.19) aprakstītu $\dot{S}_p(2\pi f)$ visā tā platumā, $\frac{1}{2} \dot{A}_k$ – Furjē rindas koeficienti.

Furjē koeficientus aprēķina pēc formulas (5.20):

$$\frac{1}{2} \dot{A}_k = \frac{1}{F} \int_{-\frac{F}{2}}^{\frac{F}{2}} \dot{S}(2\pi f) \cdot e^{-jk \frac{2\pi}{F} f} df. \quad (5.20)$$

Ievērojam, ka $\frac{1}{2}\dot{A}_k = \frac{1}{F}s(-k\tau)$, kur $s(-k\tau)$ – signāla vērtība (nolase) laika momentā $\tau = -k \cdot \frac{1}{F}$. Tas nozīmē, ka signāla spektru aprakstošās Furjē rindas (5.19) koeficienti ir proporcionāli signāla vērtībām, fiksētām diskrētos laika momentos $k \cdot \frac{1}{F}$, kur $k = -\infty \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots \infty$. Līdz ar to signāla spektru, ja tas ir ierobežots, var precīzi aprēķināt, izmantojot signāla nolases $s(k\tau) = s(k)$, kas fiksētas vienmērīgi izvietotos laika momentos ar soli $\tau = \frac{1}{F} \leq \frac{1}{2f_{\max}}$:

$$\dot{S}_p(2\pi f) = \frac{1}{F} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} s(k) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{F}f}, \quad (5.21)$$

$$s(k) = \int_{-f_{\max}}^{f_{\max}} \dot{S}(2\pi f) \cdot e^{j\frac{2\pi}{F}f} df. \quad (5.22)$$

Izteiksmes (5.210 un (5.22) ir diskrēta laika Furjē transformācijas.

Secinājums

Visu informāciju par signālu ar ierobežotu spektru satur tā vērtības (nolases), kas fiksētas vienmērīgi izvietotos laika momentos ar soli:

$$\tau \leq \frac{1}{2f_{\max}}, \quad (5.23)$$

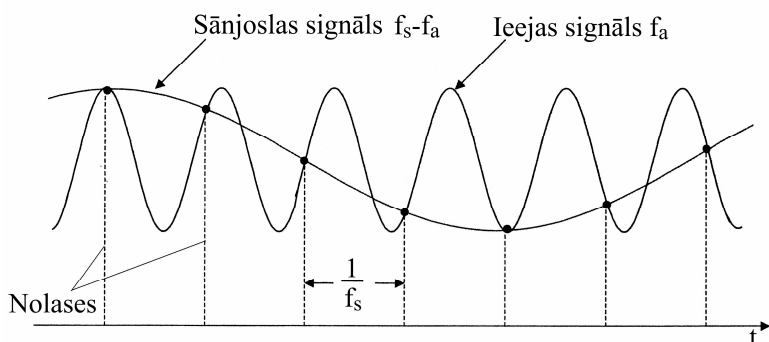
kur $f_{\max}$ – maksimālā frekvence signāla spektrā.

Tā ir **nolašu teorēma**.

Pie šīs teorēmas ir neatkarīgi nonākuši vairāki zinātnieki, tāpēc dažādu valstu grāmatās tā tiek dēvēta dažādi. Angļu valodā izdotās grāmatās to bieži saista ar K. Šennona vārdu, bet krievu literatūrā tā parasti tiek saukta par Kotelnikova teorēmu. Ar šo teorēmu saistīts arī ievērojamais zviedru izcelsmes amerikāņu elektrosakaru inženiera H. Naikvista vārds. Tāpēc minimāli pieļaujamo nolašu sekošanas frekvenci $1/\tau$ sauc par **Naikvista frekvenci**.

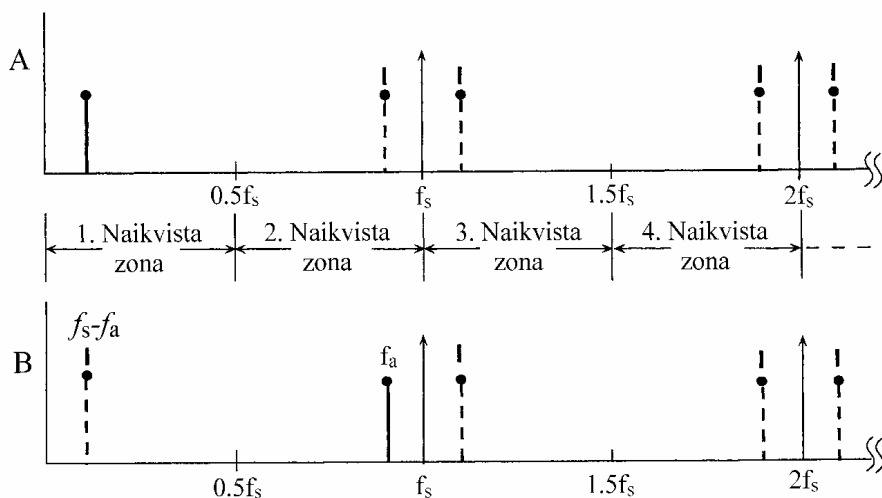
Mērīšanas sistēmās mēramā analogā signāla apstrāde tiek veikta digitālajā signālu procesorā (DSP). Signāla apstrādei tiek izmantotas ātrās Furjē transformācijas (FFT, *angl.*). Ja nolašu frekvence ir mazāka par Naikvista frekvenci, tad notiek spektru pārklāšanās un signālā spektrā parādās summārās frekvences svārstības jeb sāņjoslas signālā (5.20 att.).

Attēlā redzamajā situācijā diskretizācijas frekvence f_s tikai nedaudz lielāka par ieejas signāla frekvenci f_a .



5.20 att. Sānjoslas signāla rašanās laika apgabalā

Tādā gadījumā nolases ir tikai vienu reizi katrā ieejas signāla periodā. Pēc iegūtā diskrētā signāla apstrādes DSP un filtrācijas, tiek iegūts izejas signāls, kura frekvence ir $f_s - f_a$. Šādā situācijā informācija par ieejas signāla parametriem ir zaudēta pilnībā. Minētās situācijas attēlojums frekvenču apgabalā redzams attēlā 5.21B.



5.21 att. Sānjoslu signāli un periodiskās Naikvista zonas

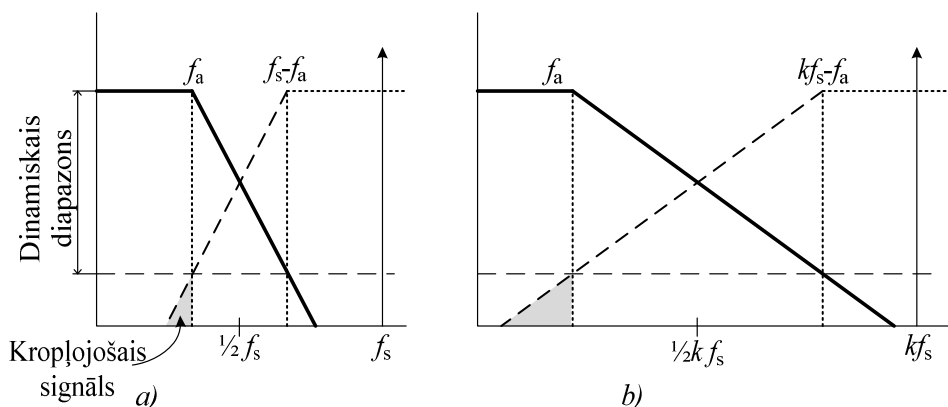
Redzam, ka pirmajā Naikvista zonā ir tikai signāls ar frekvenci $f_s - f_a$. Ieejas signāls ir ārpus pirmās Naikvista zonas un tāpēc netiek identificēts.

Attēlā 5.21A redzama situācija, kad nolašu frekvence atbilst Naikvista kritērijam, t.i. $f_s \geq 2f_a$. Šajā gadījumā notiek harmoniku summēšanās un teorētiski veidojas bezgalīgi daudzas Naikvista zonas, kuru frekvenču spektrs sastāv no frekvenču summas daudzkārtņiem $|\pm kf_s \pm f_a|$, kur $k=1,2,3,\dots,n$.

Praksē signāla pārveidošanu veic ACP, kuru vada FFT procesors un tas nodrošina signāla filtrēšanu atbilstoši pirmajai Naikvista zonai, nodrošinot frekvenču joslu no 0 līdz $0.5f_s$.

Ja signāla augstākā frekvence iziet aiz Naikvista pirmās zonas robežām (5.21B attēls), tad tā var būt tikai neliels mazāka par diskretizācijas frekvenci, kas atbilst situācijai, kas tiek attēlota attēlā 5.20. Redzam, ka tādā gadījumā, kad signāls neatrodas Naikvista pirmajā zonā, tā sastāvdaļas $f_s \cdot f_a$ atrodas zonas iekšpusē. Pēc DSP signāls saturēs šīs jaunradītās frekvences, kuras radīs signāla kropļojumus un rezultātā novedīs pie mērījuma kļūdām.

No tā izriet, ka jāveic analogā signāla filtrēšana pirms tā diskretizēšanas. Filtra caurlaides josla jāizvēlas tikai tik plata, cik plaša frekvenču josla nepieciešama fizikālā procesa raksturošanai. Analogā filtra raksturlīknes izvēlas atkarībā no tā cik tuvu Naikvista frekvencei atrodas signāla augstākās frekvences.



5.22 att. Diskretizācijas frekvences ietekme uz filtra vājinājumu

Nemot vērā to, ka augsta vājinājuma analogie filtri ir ļoti sarežģīti, labāk izvēlēties diskretizācijas frekvenci pēc iespējas lielāku. Šobrīd pieejamie ACP ļauj izvēlēties diskretizācijas frekvences, kuras inženiertehniskos procesos pārsniedz signāla augstākās frekvences vairāk nekā desmit reizes. Jo augstāka būs diskretizācijas frekvence, jo varēs izmantot vienkāršākus analogos filtrus un iegūt mazākas pārveidošanas kļūdas (5.22 att.).

Pieņemsim, ka ieejas signāla frekvenču josla tiek ierobežota ar zemo frekvenču filtru, kura caurlaides josla ir f_a . Frekvences, kas atrodas virs filtra ierobežošanas zonas tiek vājinātas. Daļa filtra raksturlīknes iestiepjas arī otrajā Naikvista zonā, un tas nozīmē, ka rodas sāņjoslas signāli ar frekvenci $f_s \cdot f_a$, kas atrodas derīgā signāla zonā. Ja šo sastāvdaļu amplitūda ir pietiekoši liela, sistēmas dinamiskais diapazons tiek ievērojami samazināts (5.22a att.).

Filtra vājinājuma zonas platums ir atkarīgs no signāla frekvenču joslas platumā, diskretizācijas frekvences un dinamiskā diapazona. Sistēmas dinamiskais diapazonu izvēlas atkarībā no nepieciešamās signāla pārveidošanas precizitātes.

Piemēram, lai nodrošinātu filtra vājinājumu 60dB ar Battervorta filtru frekvenču joslā no 1 līdz 2MHz (1 oktāva), nepieciešams desmitās kārtas filtrs, jo katra filtra pakāpe

dod vājinājumu 6bB uz oktāvu. Šāda filtra projektēšana ir ļoti sarežģīta.

Problēmu lielā mērā var atrisināt izvēloties lielāku diskretizācijas frekvenci (5.22b att.). Palielinot diskretizācijas frekvenci k reizes salīdzinājumā ar Naikvista frekvenci, nepieciešamais filtra raksturlīknes stāvums ievērojami samazinās. Tas dod iespēju lietot daudz vienkāršākus filtrus, lai iegūtu to pašu sistēmas dinamisko diapazonu.

Daudzos gadījumos fizikālais process ir tāds, ka signāla frekvences, kas atrodas virs f_a , ir ar mazu amplitūdu, un, pieņemsim, ka summārā frekvence $f_s - f_a$ nekad nepārsniedz XdB virs pamatsignāla amplitūdas. Tādā gadījumā prasības filtra vājinājumam aiztures joslā, varam samazināt par tikpat daudz decibeliem. Izmantojot šo metodi, ir jābūt ļoti uzmanīgiem, jo var parādīties neparedzēti ārējie traucējumi, kas atrodas filtra vājinājuma zonā un to amplitūda pārsniedz signāla amplitūdu caurlaides joslā. Tas radīs izejas signāla ievērojamus kropļojumus.

Secinājums

Izvēloties signāla diskretizācijas sistēmas parametrus, ieteicams pēc iespējas izvēlēties augstāku diskretizācijas frekvenci.

5.5. Signālu filtri

Iepriekš noskaidrojām, ka jebkura signāla spektra sastāvdaļa, kas atrodas ārpus pirmās Naikvista zonas, diskretizācijas procesā radīs zemas frekvences spektrālās komponentes signāla frekvenču joslā. Lai samazinātu šo svārstību kaitīgo ietekmi, pirms ACP jālieto zemo frekvenču (ZF) filtri. Signāla filtrēšana nepieciešama arī, lai izslēgtu nevajadzīgās frekvences no signāla spektra un arī samazinātu ārējo traucējumu ietekmi.

Signāla filtrēšana sākas jau pašā mērpārveidotājā, izmantojot dažādus fizikālus efektus. Galvenā signāla filtrēšana notiek elektriskajā apstrādes traktā. Rekomendējams veikt signāla filtrēšanu visā mērsistēmas traktā, izvēloties efektīvākās metodes katrā sistēmas daļā.

Filtru klasifikācija

Filtriem mērīšanas tehnikā ir ļoti svarīga loma. Tie ir elementi, kas novērš traucējumu iekļūšanu un kropļojumu rašanos mērīšanas sistēmās. Daudziem filtriem ir ļoti atšķirīga uzbūve un fizikālie darbības principi, bet daudzas pazīmes tiem ir kopējas. Tāpēc filtrus klasificē pēc to kopīgām pazīmēm. Tas ļauj prognozēt filtra iedarbību uz sistēmu, neatkarīgi no tā uzbūves. Filtru klasifikācija dota attēlā 5.23.

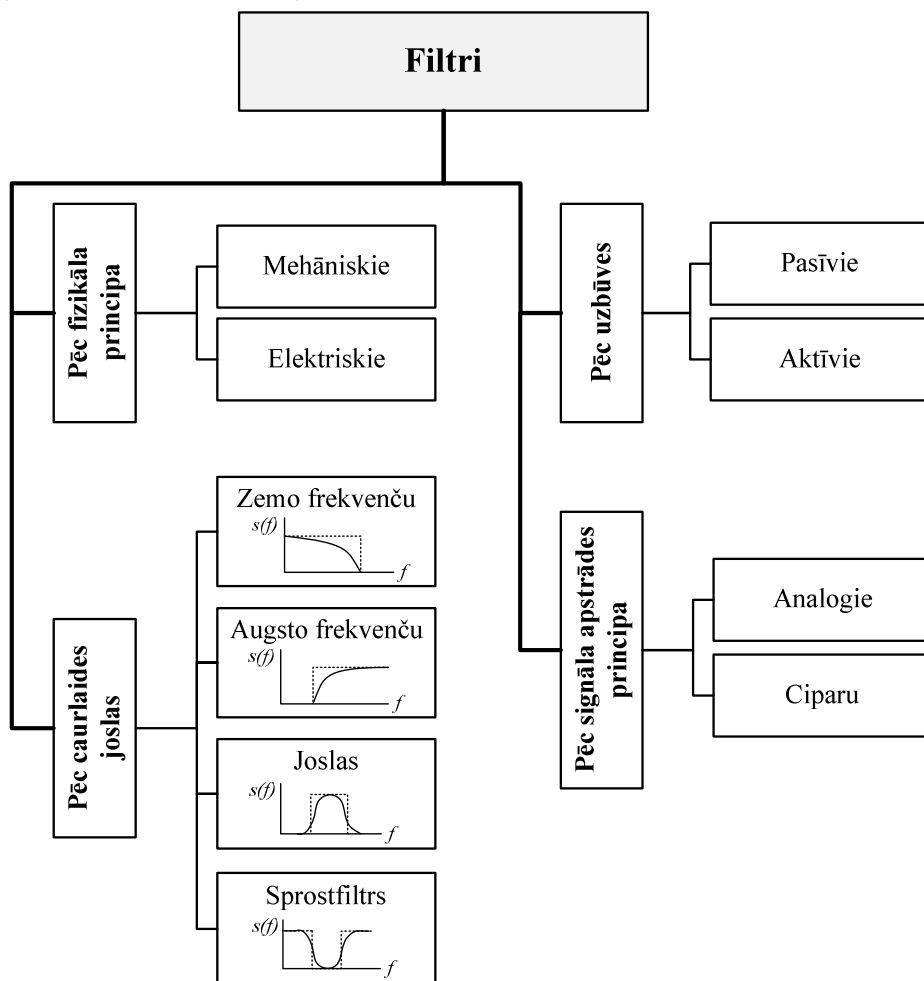
Pēc fizikālā principa filtri iedalās mehāniskajos un elektriskajos. Mehāniskie filtri atrodas pašos mērpārveidotājos un izmanto mērāmā lieluma fizikālās īpatnības, lai novērstu dažādas nevēlamas parādības. Piemēram, ja spiediena devējam jāreģistrē tikai lēnas spiediena izmaiņas, tad spiediens jutīgajam elementam tiek padots caur kapilāru, kurš darbojas kā zemo frekvenču filtrs.

Mehāniskie filtri ir ļoti dažādi pēc uzbūves un katrā gadījumā tie ir īpaši veidoti. Pie mehāniskajiem filtriem pieder hidrauliskie, pneimatiskie, termiskie, optiskie un citi neelektriskas dabas elementi, kas konkrētā gadījumā izpilda filtra lomu. Sīkāk mehāniskos filtrus analizēsim nodaļās par atsevišķu fizikālo lielumu mērījumiem.

Elektriskie filtri tiek izmantoti elektriskā signāla filtrēšanai signāla apstrādes ķēdēs. Tie var būt gan analogas darbības, gan ciparu.

Pēc uzbūves filtrus iedala pasīvajos un aktīvajos.

Pasīvie filtri parasti ir elektriski vai mehāniski. Tie sastāv no pasīvajiem elementiem, kuru slēguma raksturlīknes ir atkarīgas no iedarbes signāla frekvences. Elektriskajās ķēdēs parasti lieto RC vai RL slēgumus. Šo filtru uzbūve ir relatīvi vienkārša, bet tie parasti nenodrošina augstu filtrēšanas pakāpi. Šie filtri rada lielus signāla zudumus caurlaides joslā.



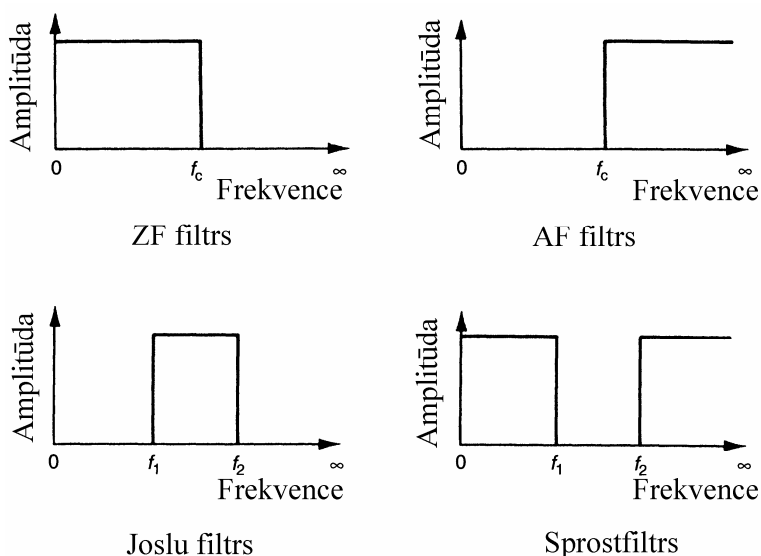
5.23 att. Filtru klasifikācija

Aktīvie filtri satur pastiprinātājus, kas ievērojami palielina filtru vājinājuma pakāpi ārpus caurlaides zonas. Aktīvajiem filtriem pastiprinājuma koeficients parasti ir aptuveni viens, bet tas var būt arī lielāks.

Filtru raksturlīknes attēlo amplitūdas-frekvenču formā. Tās rāda kā mainās signāls filtra izejā atkarībā no frekvences, ja ieejas signāla amplitūda paliek nemainīga. Filtra raksturlīknēs amplitūdu attēlo relatīvos lielumos, kā izejas sprieguma U_{iz} attiecību pret ieejas sprieguma amplitūdu U_i izteiktu decibelos:

$$dB = 20 \lg \frac{U_{iz}}{U_i}. \quad (5.24)$$

Būtiskākais ir filtru iedalījums pēc to caurlaides joslas. Tas raksturo filtra tiešo ietekmi uz signāla frekvenču spektra izmaiņu. Filtra raksturlīknes analizē pieņemot, ka ieejas signāla amplitūda ir nemainīga visa frekvenču spektra robežās. Attēlā 5.24 ir redzamas ideālu filtru raksturlīknes.



5.24 att. Ideālu filtru raksturlīknes

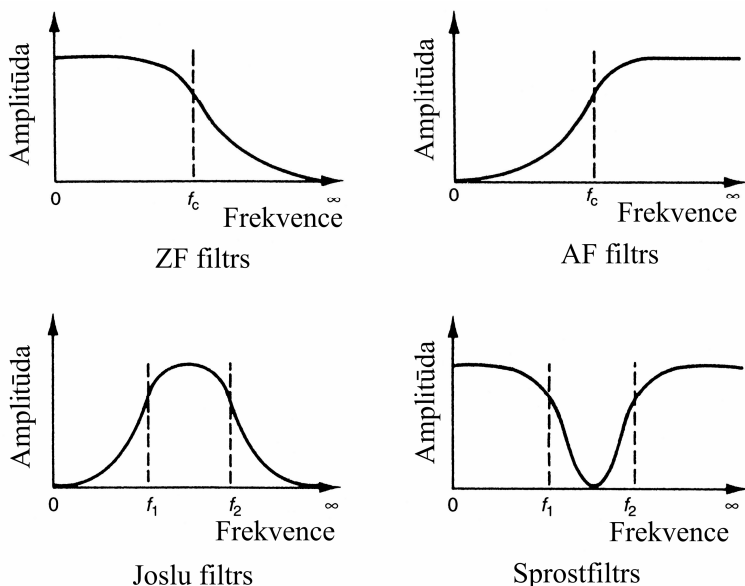
Ideālu filtru raksturlīknes ir taisnstūra formas un caurlaides josla norobežojas ar vertikālu līniju dotajā frekvencē. Zemo un augsto frekvenču filtru robežfrekvence ir f_c , bet joslu filtru un sprosfiltru - no f_1 līdz f_2 .

Par **zemo frekvenču** (ZF) filtru sauc ierīci, kas labi pārvada signālus ar frekvenču joslu no 0Hz līdz f_c , bet aiztur frekvences, kas augstākas par f_c . Šos filtrus izmanto augstāku frekvenču ierobežošanai signāla spektrā. Iepriekš analizējam signālu diskretizācijas kļūdu samazināšanu, izmantojot ZF filtrus. ZF filtrus izmanto arī nevajadzīgo augsto frekvenču samazināšanai signāla spektrā un traucējumu novēršanai. Piemēram, nosakot hidrauliskās sistēmas spiediena izmaiņu slodzes

iespaidā, sensors uzrādīs arī sūkņa radītās spiediena pulsācijas ar ievērojami augstāku frekvenci. Šajā gadījumā sūkņa pulsācijas nenēs mums derīgu informāciju, un, lai samazinātu mērījuma kļūdas, tās vēlams nofiltrēt. ZF filtres mērīšanas sistēmās izmanto ļoti plaši.

Par **augsto frekvenču** (AF) filtru sauc ierīci, kura labi pārvada signālus ar frekvenču joslu no f_c līdz bezgalībai, bet ierobežo signālus ar frekvencēm, kas mazākas par f_c . Šos filtres izmanto gadījumos, kad nepieciešams analizēt signāla augstāko frekvenču daļu. Piemēram, veicot hidrauliskās sistēmas izmēģinājumus, jānosaka sūkņa radīto spiediena pulsāciju lielums. Spiediena pulsāciju frekvence parasti ir augstāka par slodzes radīto spiediena izmaiņu frekvenci, tāpēc ir lietderīgi izslēgt zemo frekvenču spektra daļu no signāla spektra.

Joslu filtrs pārvada signālus ar frekvencēm no f_1 līdz f_2 , bet ierobežo visas pārējās spektra frekvences. Šos filtres izmanto, ja nepieciešams analizēt noteiktu signāla spektra daļu. Joslu filtru var izveidot apvienojot ZF filtru ar caurlaides joslu $f_c = f_2$ un AF filtru ar caurlaides joslu $f_c = f_1$.



5.25 att. Reālu filtru raksturlīknes

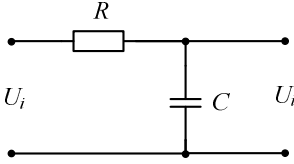
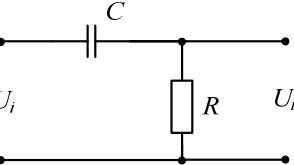
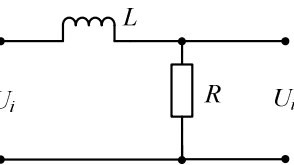
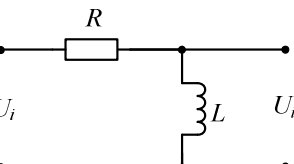
Sprosfilters ierobežo signāla pārvadīšanu frekvenču joslā no f_1 līdz f_2 , bet visas pārējās signāla spektra frekvences filtrs pārvada. Šos filtres izmanto, lai no signāla spektra izņemtu šauru frekvenču joslu, kura rada traucējumus. Parasti tā ir 50Hz frekvence, kas uzklājas signālam elektrisko traucējumu veidā.

Praksē nav iespējams realizēt filtres ar ideālām raksturlīknēm, un tāpēc, reālu filtru ārpus caurlaides joslas esošo frekvenču vājinājums notiek pakāpeniski (5.25 att.). Filtru vājinājuma pakāpi izsaka decibelos uz oktāvu (divkārtīga frekvences izmaiņa)

vai decibelos uz dekādi (desmitkārtīga frekvences izmaiņa). ZF un AF filtrus raksturo robežfrekvence, bet joslu un sprostfiltrus – caurlaides joslas vai sprostjoslas platumus.

Elektriskos filtrus veido no reaktīvo pretestību slēgumiem. Visplašāk izmanto RC ķēžu slēgumu un LR slēgumus. Filtrus iedala pirmās, otrās, trešās u.t.t. kārtas filtros, atkarībā no reaktīvo elementu skaita. Pasīvo filtru pamatelementu shēmas un to īpašības apkopotas 5.4 tabulā.

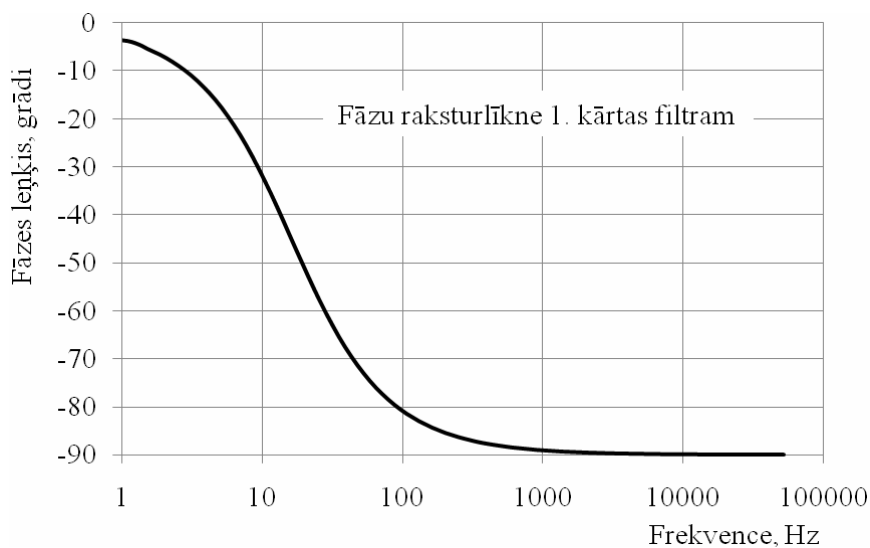
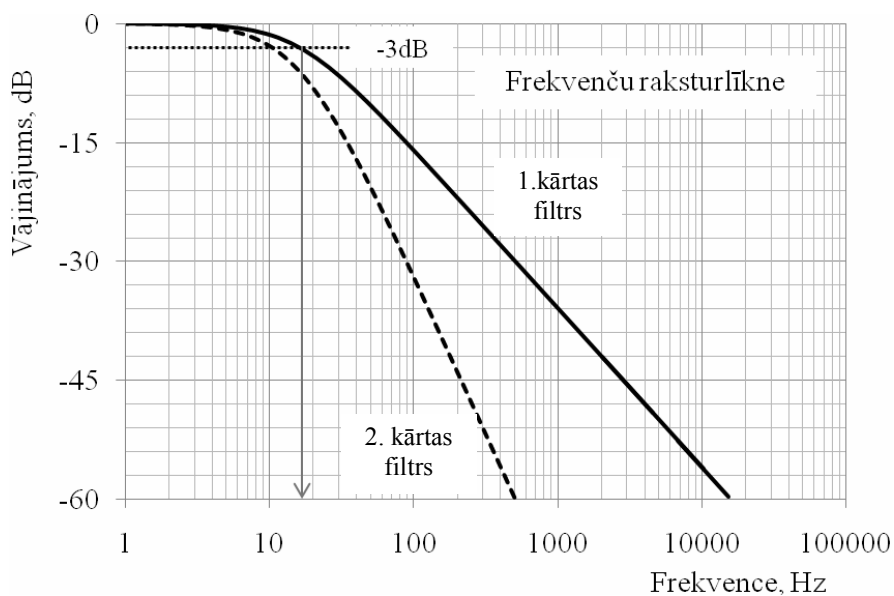
5.4 tabula **Pasīvo filtru pamatelementu raksturojums**

Shēma	Filtra veids	Laika konstante	Formula
	ZF filtrs	$\tau=RC$	$\frac{U_{iz}}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} \approx \frac{1}{\omega \cdot \tau}$ $\phi = -\arctg(R\omega C)$
	AF filtrs	$\tau=RC$	$\frac{U_{iz}}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{\omega^2\tau^2}}} \approx \omega \cdot \tau$ $\phi = \arctg\left(\frac{1}{R\omega C}\right)$
	ZF filtrs	$\tau = \frac{L}{R}$	$\frac{U_{iz}}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} \approx \frac{1}{\omega \cdot \tau}$ $\phi = -\arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$
	AF filtrs	$\tau = \frac{L}{R}$	$\frac{U_{iz}}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{\omega^2\tau^2}}} \approx \omega \cdot \tau$ $\phi = \arctg\left(\frac{R}{\omega L}\right)$

Apskatot dotos filtrus redzam, ka tie ir frekvences atkarīgi sprieguma dalītāji. Reaktīvo elementu kompleksā pretestība ir atkarīga no signāla frekvences, un, tāpēc sprieguma dalījuma koeficients ir atkarīgs no frekvences. RC zemo frekvenču filtra raksturlīkne redzama 5.26 attēlā.

Pirmās kārtas filtrs nodrošina vājinājumu 6 bB uz oktāvu. Filtra caurlaides joslu parasti nosaka -3dB līmenī. Redzam, ka dotajam filtram caurlaides josla -3dB līmenī ir 17Hz. Pievienojot filtram otru pakāpi vājinājums pieaug līdz 12dB uz oktāvu. Jāņem vērā, ka katra filtra pakāpe izmaina signāla fāzes pagriezienu leņķi. Redzam, ka fāzes pagriezienu leņķis 1. kārtas filtram sasniedz 90 grādus. Filtru radītās

fāzu nobīdes jāņem vērā, ja signāls tiek izmantots atgriezeniskajā saitē automātiskās regulēšanas sistēmās.

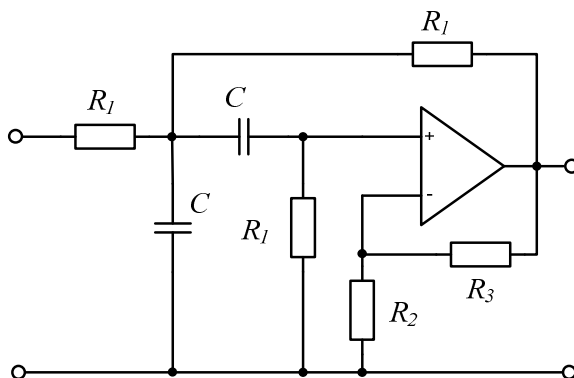


5.26 att. **ZF filtra raksturlīknes**

Jāņem vērā, ka ieslēdzot filtru shēmā, tam tiek pieslēgta nākamās pakāpes ieejas pretestība, kura noslogo filtru. Tā rezultātā pasliktinās filtra vājinājums. Tāpēc pasīvo filtru izejā jāpieslēdz pastiprinātājs ar augstu ieejas pretestību.

Lai panāktu lielus vājinājumus nepieciešami daudzpakāpju filtri. Šādu filtru aprēķins ir visai komplicēts. Pasīvie filtri rada arī lielu signāla vājinājumu filtra caurlaides zonā.

Filtra parametrus ievērojami var uzlabot izveidojot **aktīvos filtrus**. Šajos filtros frekvences jutīgie sprieguma dalītāji tiek apvienoti ar operacionālajiem pastiprinātājiem. RC ķēdes veido operacionālo pastiprinātāju atgriezeniskās saites, un tādā veidā palielina filtra vājinājuma pakāpi.



5.27 att. Aktivā joslu filtra shēma

Šajā shēmā elementi R_1 un C veido frekvences jutīgos sprieguma dalītājus, bet rezistori R_2 un R_3 nosaka shēmas pastiprinājuma koeficientu. Aktīvo filtru vājinājums sasniedz 12 – 15dB uz oktāvu.

Ir izstrādātas ļoti daudzas aktīvo analoģo filtru shēmas. Vairāki filtri ir nosaukti to izstrādātāju vārdos un tiek plaši izmantoti elektroniskajās shēmās. Piemēram, Battervorta, Čebiševa, Besseļa un citi filtri.

Ciparu filtri

Iepriekš secinājām, ka informāciju par signālu ar ierobežotu spektru satur tā vērtības (nolases), kas fiksētas vienmērīgi izvietotos laika momentos ar soli ko nosaka pēc formulas 5.23:

$$\tau \leq \frac{1}{2f_{\max}}, \quad \text{kur } f_{\max} - \text{maksimālā frekvence signāla spektrā.}$$

Visu praksē sastopamo signālu spektri ir ierobežoti un tiem iespējams novērtēt maksimālo frekvenci $f_{\max}$. To nosaka gan signāla avota īpatnības, gan tehniskās ierīces (pastiprinātāji, filtri, sakaru kanāli), kas saista signāla avotu ar signāla apstrādes vai pārraides sistēmu. Tātad, praktiski visus signālus var diskretizēt un tālāko apstrādi vai pārraidi veikt, operējot tikai ar signāla nolasēm. Šīs nolases tiek izteiktas ciparu formā un tiek apstrādātas digitālajā signālu procesorā (skatīt attēlu 5.9). Turpmākā, nu jau

ciparu signāla, apstrāde notiek izmantojot noteiktu programmu. Ierīci vai procesu, kas pēc uzdotā algoritma pārveido ieejas ciparu signālu izejas ciparu signālā sauc par **ciparu filtru**. Ciparu signāls satur visu informāciju par signāla spektrālo sastāvu, amplitūdām un fāzu nobīdēm izteiktu matemātiskā formā. Tas dod iespēju izstrādāt tādus programmu algoritmus, kas izmaina signāla spektrālo sastāvu lietotājam nepieciešamā formā.

Ciparu filtru darbība balstās uz FFT un Z-transformācijām.

Filtrētais ciparu signāls, nepieciešamības gadījumā, ar CAP tiek pārveidots analogā signālā, un filtrēts ar analogo filtru, lai samazinātu pārveidošanas rezultātā radušās augstākās harmonikas.

Secinājums

Modernajās signālu apstrādes sistēmās tiek izmantoti gan analogie filtri, gan ciparu filtri. Katram no tiem ir sava vieta un noteiktas funkcijas. Atbilstoša abu filtru veidu izvēle un izmantošana garantē kvalitatīvu, nekropļotu izejas signāla iegūšanu.

5.6. Signālu pārvade

Iepriekš noskaidrojām, ka reālā modernā mērīšanas sistēmā pastāv abu veidu signāli – analogie un ciparu. Šie signāli ir jāpārvada starp atsevišķām sistēmas daļām, atkarībā no mērāmā objekta atrašanās vietas, izmēriem, kā arī ar iegūtā signāla izmantošanas. Signāla pārvadīšanas attālums ir ļoti dažāds, sākot no dažiem centimetriem līdz vairākiem simtiem metru. Ciparu signālus var pārraidīt ļoti lielos attālos, izmantojot bezvadu tīklus vai internetu.

Signālu pārvadīšanas paņēmieni ir atkarīgi no pārvadāma signāla veida un signāla līmeņa. Bieži vien ir jāpārvada mazi (ar spriegumu mērāmu mikrovoltos vai milivoltos) signāli, kurus ļoti ietekmē apkārtējās vides radītie traucējumi.

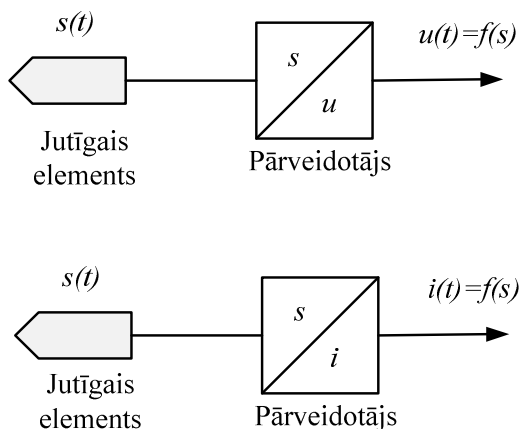
Analogo signālu pārvade

Analogo signālu pārvadīšana ir atkarīga no ierīces izejas signāla veida. Ir divu veidu izejas signāli – sprieguma izeja un strāvas izeja (5.28 att.).

Pirmajā gadījumā jutīgais elements uztver mērāmā fizikālā lieluma izmaiņas $s(t)$, un tālāk tās tiek pārveidotas proporcionālā spriegumā $u(t)=f(s)$. Pārveidotāja izejā parādās spriegums, kura izmaiņa ir proporcionāla mērāmā fizikālā lieluma izmaiņai. Šādu ierīces izejas izveidojumu sauc par sprieguma izeju.

Otrajā gadījumā jutīgā elementa uztvertās fizikālā lieluma izmaiņas tiek pārveidotas proporcionālā strāvas izmaiņā $i(t)=f(s)$. To veic īpaša ierīce, ko sauc par **strāvas ģeneratoru**.

Pieņemsim, ka iegūtais analogais signāls ir jāpārvada noteiktā attālumā un jāpadod nākamā sistēmas bloka ieejā. Piemēram, signāls no spiediena mērpārveidotāja jāpievada analogu – ciparu pārveidotājam.



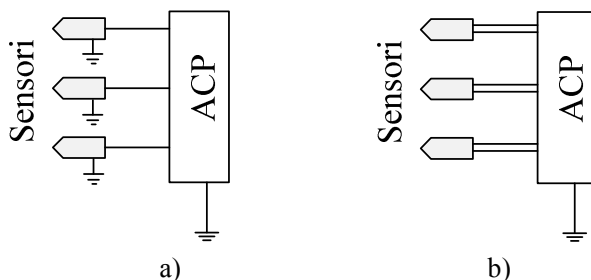
5.28 att. Signāla pārveidošanas shēmas

Sprieguma pārvade

Ja mērpārveidotājs ir ar **sprieguma izeju**, tad iespējami divi signāla pārvades veidi:

- ✓ viencilārais (angliski, *single ended*),
- ✓ diferenciālais (angliski, *differential*).

Vienpolārais pārvades veids ir redzams attēlā 5.29a. To sauc arī par nesimetrisko līniju, un ierīces ir ar nesimetrisko izeju un ieeju.



5.29 att. Signāla pārvade ar sprieguma izeju

a) – viencilārais pieslēgums, b) – diferenciālais pieslēgums

Vienpolārajā pieslēgumā izejas signāls ir sprieguma starpība starp ierīces ieeju un „zemi” jeb pieņemto potenciāla nulles punktu. Šis pieslēguma veids ir ļoti populārs un bieži tiek izmantots daudzās nozarēs.

Pieslēguma priekšrocības:

- ✓ vienkāršs,
- ✓ lēts,
- ✓ viegli izprotama darbība,
- ✓ plašs iekārtu piedāvājums.

Trūkumi:

- ✓ jutīgs pret traucējumiem,
- ✓ mazs datu pārraides ātrums,
- ✓ nepieciešams pārdomāts ekranējums un pareiza zemēšana,
- ✓ derīgs īsām līnijām,
- ✓ neder mazu spriegumu ($\mu\text{V}, \text{mV}$) pārvadei.

Diferenciālajā slēgumā izejas signāls parādās kā sprieguma starpība starp divām izejas līnijām, kuru potenciāls pret „zemi” ir vienāds. Lai sistēma darbotos, nākamajai pakāpei jābūt ar diferenciālo ieeju.

Pieslēguma priekšrocības:

- ✓ nejutīgs pret traucējumiem,
- ✓ nav nepieciešams zemējums,
- ✓ lielāki pārvades attālumi,
- ✓ lielāks datu pārraides ātrums,
- ✓ var pārvadīt vājus signālus.

Trūkumi:

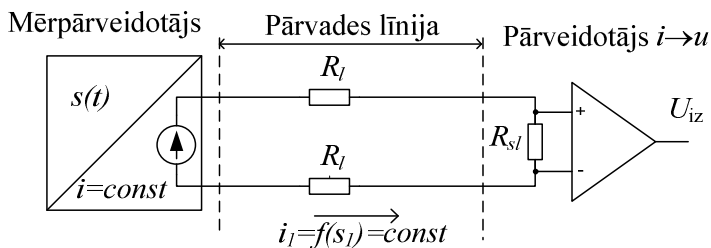
- ✓ dārgāks, vajadzīgi īpaši kabeļi,
- ✓ sistēmai jānodrošina simetriskās ieejas un izejas.

Vienpolāro sprieguma signālu pārvadi parasti izmanto, lai pieslēgtu analogos sensorus ar izejas spriegumu ne mazāku par 5V un diskrēta (ciparu) signāla avotus. Signāla pārvadīšanas attālums parasti nepārsniedz dažus metrus.

Diferenciālo slēgumu izmanto, lai pieslēgtu signāla avotus ar mazu izejas spriegumu, pārvadītu signālus lielākos attālos (daži desmiti metru) un gadījumos, kad nepieciešama augsta traucējumu noturība.

Strāvas pārvade

Ja ierīces izeja izveidota ar **strāvas izeju** (5.30 att.), tad signālu pārvadīšanai izmanto „**strāvas cilpu**” (angliski, *current loop*).



5.30 att. Strāvas pārvades princips

Pieņemsim, ka fizikālais lielums sensorā tiek pārveidots proporcionālā strāvas izmaiņā $s(t)=f(i)$. To veic speciāla ierīce, ko sauc par **konstantās strāvas ģeneratoru**. Ja kādā laika momentā fizikālā lieluma vērtība ir s_1 , tad izejas ķēdē plūdis strāva $i_1=\text{const}$.

Lai pieslēgtu ierīces ar strāvas izeju var izmantot gan vienpolāro slēgumu, gan diferenciālo slēgumu. Attēlā 5.30 redzams strāvas cilpas diferenciālais slēgums. Pieņemsim, ka savienojošās līnijas vadu pretestība ir R_l . Lai sistēma darbotos, nepieciešams nodrošināt optimālu slodzes pretestību R_{sl} .

Ja izejas strāva ir atkarīga tikai no fizikālā lieluma vērtība, tad sprieguma kritumu uz slodzes pretestību nosaka pēc Oma likuma: $u_{sl} = i_l \cdot R_{sl}$. Redzam, ka izejas spriegums nav atkarīgs ne no vadu pretestības, ne no mērpārveidotāja izejas sprieguma. Iegūtais izejas spriegums u_{iz} būs atkarīgs no operacionālā pastiprinātāja sprieguma pastiprinājuma koeficienta. Iegūtā izejas sprieguma precizitāte būs atkarīga tikai no slodzes rezistora precizitātes un tā parametru stabilitātes, kā arī OP slēguma stabilitātes.

Praksē ir divi strāvas izejas standarta lielumi: 0 – 20mA un 4 – 20mA. Lai iegūtu slodzes sprieguma maksimālo vērtību 5V, nepieciešama slodzes pretestība $R_l = U_{sl}/i = 5/20 \cdot 10^{-3} = 250\Omega$. Lai iegūtu maksimālo spriegumu 10V, slodzes pretestība jāpalielina 2 reizes.

Kā redzam, šajā gadījumā signāla pārvades līnijā plūst pietiekoši liela strāva, kas novērš traucējumu rašanos pārvades līnijā. Traucējošie signāli parasti nāk no sprieguma avotiem ar lielu iekšējo pretestību, un tāpēc tie nevar radīt ievērojamus trokšņu signālus strāvas ķēdē.

Strāvas pārvades priekšrocības:

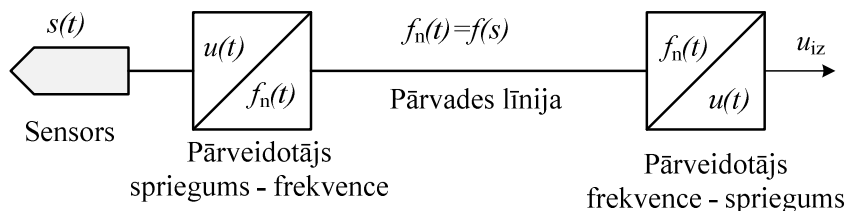
- ✓ laba traucējumu noturība,
- ✓ iespējams pārvadīt signālus lielos attālumos (līdz dažiem kilometriem),
- ✓ iespējams iegūt standartam atbilstošus izejas spriegumus (5V vai 10V).

Trūkumi:

- ✓ nepieciešamas atbilstošas ierīces signāla saņemšanai,
- ✓ sistēma ir slīdzinoši dārgāka.

Signālu pārvade izmantojot nesējsignālu

Šajā gadījumā signāla pārvadīšanai tiek izmantots maiņsprieguma vai impulsveida nesējsignāls. Sistēmas darbības shēma redzama 5.31 attēlā.



5.31 att. Nesējsignāla izmantošanas shēma

Šajā gadījumā no sensora iegūtais signāls tiek pārveidots impulsu signālā, kura frekvence ir proporcionāla mērāmā lieluma izmaiņai. Šajā gadījumā tiek pāriets no informācijas, ko satur signāla amplitūda, uz informāciju, kas kodēta signāla frekvencē, t.i. laikā. Tā ir ļoti būtiska priekšrocība, jo laika parametrus praktiski neietekmē ārējie traucējumi. Signāls ar mainīgu impulsu frekvenci tiek pārvadīts uztvērējam, kur notiek signāla pretēja pārveidošana uz atbilstošas amplitūdas spriegumu.

Līdzīgā veidā strādā arī ierīces, kur signāls tiek modulēts uzklājot to nesējfrekvencei. Lai šādu signālu uztvertu, nepieciešams atbilstošs demodulators. Šādos gadījumos izmanto frekvences, fāzes vai impulsa platuma modulāciju.

Minēto signālu pārvades veidu priekšrocība ir laba traucējumu noturība, jo informāciju satur laika parametrs un traucējumi to ietekmē ļoti maz. Signālus var pārvadīt ļoti lielos attālumos, izmantojot modulācijas principu, pārvade var notikt arī ar radioviļņu starpniecību.

Sistēmas trūkums – ierīces ir sarežģītas un līdz ar to arī dārgākas.

Optiskā datu pārvade

Pēdējā laikā optiskās datu pārraides sistēmas izmanto arvien plašāk, it sevišķi ciparu signāla pārvadīšanai. Iekārtas darbības shēma ir līdzīga 5.31 attēlā redzamajai, tikai šajā gadījumā signāls tiek pārveidots proporcionālā gaismas impulsu signālā, un tālāk pārvadīts pa optisko šķiedru kabeli. Signāla uztveršanai nepieciešama atbilstoša ierīce, kas pārveido gaismas impulsus proporcionālā sprieguma izmaiņā.

Optisko pārvades sistēmu priekšrocības:

- ✓ ļoti augsta traucējumu noturība,
- ✓ vairāku signālu pārvade pa vienu optisko vadu,
- ✓ informācijas pārvade lielos attālumos.

Trūkumi:

- ✓ sarežģītas pārveidošanas iekārtas,
- ✓ sarežģīts remonts optiskā kabeļa bojājuma gadījumos,
- ✓ relatīvi liels signāla vājinājums, pārvadot lielos attālumos nepieciešami optiskie pastiprinātāji,
- ✓ optiskās šķiedras novecošana,
- ✓ augsta cena.

Ciparu signālu pārvade

Ciparu signālus iespējams pārvadīt visos iepriekš minētajos veidos. Taču šeit jāņem vērā īpatnības, kas piemīt ciparu signāliem.

Ciparu signālu apmaiņa parasti notiek starp ierīcēm, kuras ir pieskaitāmas „inteligētajām” mērīšanas sistēmām. Tās satur signāla apstrādes procesorus, kuru darbībai nepieciešama informācija ne tikai par mērāmā signāla parametriem, bet arī par digitālā vārda sākumu, beigām, sinhronizāciju u.c. Tāpēc šādu signālu pārvadīšanai

ir izstrādātas speciālas saskarnes (interfeisi), kas katrā gadījumā nodrošina nepieciešamās informācijas nodošanu un saņemšanu. Datu pārvadīšanai plašāk izmanto divu veidu saskarnes: virknes un paralēlo.

Viens no senākajiem virknes interfeisiem ir RS232 ar asinhrono datu pārraides standartu. Datu pārraides ātrums sasniedz 19200 biti/s.

Virknes saskarnes RS422 un RS485 nodrošina sinhrono datu pārraidi. Šīs saskarnes plaši izmanto rūpniecībā sensoru datu pārraidīšanai.

Vēsturiski ir izveidotas vairākas paralēlās datu saskarnes, piemēram, *Multibus*, *IEEE488* un citas. Šo saskarņu datu pārraides ātrums praksē ir 250 – 500Kbit/s. Jāatzīmē, ka minēto saskarņu izmantošanu ierobežo savienojošo kabeļu garums, parasti līdz 20m. Tāpēc tas parasti izmanto datu pārraidei starp „inteliģentajām” mērsistēmām un izpildmehānismiem vienas telpas robežās.

Pēdējā laikā virtuālo instrumentu pievienošanai datoram arvien plašāk izmanto USB saskarni.

Iekārtu diagnostikai no attāluma un datu pārraidei ļoti lielos attālumos izmanto interneta pieslēgumus.

6. Mērķēdes

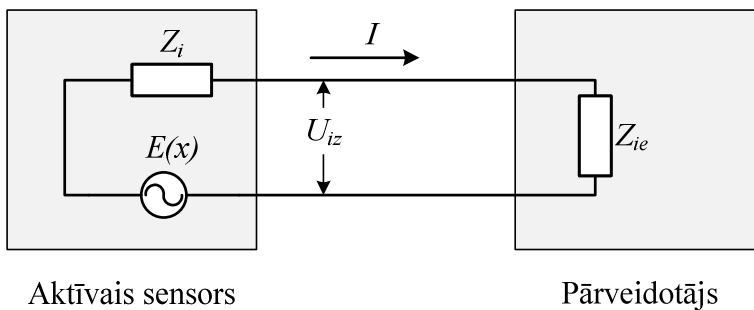
Iepriekšējās nodaļās noskaidrojām, ka mērpārveidotāju izejā ir elektriskas dabas signāls, kas proporcionāls mērāmajam lielumam. Lai šo signālu tālāk apstrādātu un pārvadītu, nepieciešamas noteiktas elektriskās ķēdes, ko tālāk saucsim par **mērķēdēm**.

Turpmāk izklāstītās vielas apguvei nepieciešamas priekšzināšanas fizikā un elektrisko ķēžu aprēķinos.

Tālāk analizēsim mērķēdes, kas nepieciešamas gan aktīvo, gan parametrisko mērpārveidotāju pieslēgšanai līdzstrāvas un maiņstrāvas barošanas spriegumiem.

6.1. Aktīvo sensoru mērķēdes

Aktīvie mērpārveidotāji (sensori) izejā ģenerē EDS $E(x)$ proporcionālu mērāmajam fizikālajam lielumam. Tālāk šis signāls tiek padots caur mērķēdi pārveidotāja vai pastiprinātāja ieejā. Lai izprastu sistēmas darbību, izmantosim četrpola principu. Pieņemsim, ka sensors ir četrpols ar iekšējo pretestību Z_i , kas vispārējā gadījumā ir komplekss lielums, jo sastāv no aktīvās pretestības daļas un reaktīvās (induktīvās un kapacitatīvās) daļas (6.1. att.). Praksē lielākajā daļā gadījumu signāla frekvences ir zemas, tāpēc izejas pretestības reaktīvā daļa, salīdzinājumā ar aktīvo daļu, ir nenozīmīga un ar pietiekošu precizitāti var pieņemt, ka $Z_i \approx R_i$, kur R_i – sensora izejas (iekšējās) pretestības aktīvā daļa.



6.1 att. Aktīvā sensora pieslēguma shēma

Sensors tiek pieslēgts pārveidotājam (pastiprinātājam), kas slogo aktīvā sensora iekšējo EDS avotu ar ieejas komplekso pretestību Z_{ie} . Līdzīgi kā iepriekš varam pieņemt, ka $Z_{ie} \approx R_{ie}$, kur R_{ie} – pārveidotāja ieejas pretestības aktīvā daļa.

Pēc Oma likuma var noteikt strāvu I , kas plūst sensora izejas ķēdē:

$$I = \frac{E(x)}{R_i + R_{ie}}. \quad (6.1.)$$

Sensora izejas spriegums U_{iz} nosakāms pēc formulas:

$$U_{iz} = I \cdot R_{ie} = \frac{E(x) \cdot R_{ie}}{R_i + R_{ie}}. \quad (6.2.)$$

Kā redzam sensora izejas spriegums ir atkarīgs no pārveidotāja ieejas pretestības, kas šajā gadījumā ir sensora slodzes pretestība. Ja šī pretestība ir liela salīdzinājumā ar sensora iekšējo pretestību un tiecas uz bezgalību $R_{ie} \rightarrow \infty$, tad $U_{iz} \rightarrow E(x)$.

Īsslēguma gadījumā $R_{ie}=0$. Sensora izejas strāva sasniedz savu maksimālo vērtību I_0 :

$$I_0 = \frac{E(x)}{R_i}. \quad (6.3.)$$

Sensora ģenerēto jaudu P aprēķina pēc formulas (6.4):

$$P = U_{iz} \cdot I = I^2 \cdot R_{ie} = \frac{(E(x))^2 \cdot R_{ie}}{(R_i + R_{ie})^2}. \quad (6.4.)$$

Sensors ģenerē maksimālo jaudu, ja $R_i = R_{ie}$.

6.2. Parametrisko sensoru mērķēdes

Parametrisko mērpārveidotāju izejas signāls ir kāda elektriskas dabas parametra (aktīvās pretestības, induktivitātes, kapacitātes) izmaiņa proporcionāli fizikālā parametra izmaiņai. Lai šo izejas signālu pārvērstu sprieguma vai strāvas izmaiņā lieto īpašas elektriskās shēmas jeb mērķēdes. Atkarībā no mērpārveidotāja veida, lieto gan līdzstrāvas, gan maiņstrāvas mērķēdes. Līdzstrāvas mērķēdes parasti lieto sensoriem, kuru izejas parametrs ir omiskā (aktīvā) pretestība, bet induktivitātes un kapacitātes gadījumos jālieto maiņstrāvas mērķēdes.

Tālāk analizēsim līdzstrāvas mērķēžu veidus un to darbību un maiņstrāvas mērķēžu īpatnības, jo pamatslēgumi abu veidu mērķēdēm ir līdzīgi.

Visbiežāk parametriskā mērpārveidotāja izejas lielums ir aktīvās pretestības izmaiņa $R = f(x)$, kur $f(x)$ – mērāmā fizikālā lieluma izmaiņas funkcija. Katram rezistīvajam mērpārveidotājam ir noteikta sākotnējā pretestība R_0 , kad uz to neiedarbojas mērāmā parametra izmaiņa. Mērāmā parametra (piemēram, temperatūras) iedarbība izsauc sensora pretestības izmaiņu par $\pm \Delta R$.

Sensora pretestības izmaiņu izteiksim šādi:

$$R = R_0 \pm \Delta R. \quad (6.5.)$$

Analizējot parametrisko mērpārveidotāju mērķēdes pieņemsim, ka shēmas barošanas avots nodrošina pietiekošu elektrisko jaudu un barošanas spriegums (vai strāva) paliek nemainīgi darba laikā. Līdz ar to pārveidotāja patērētā jauda ir atkarīga tikai no barošanas avota sprieguma un sensora pretestības.

Maksimālā jauda nedrīkst pārsniegt katra sensora pieļaujamo izkliedes jaudu. Neievērojot šo noteikumu, darba laikā sensors sāk silt un tas izsauc ļoti lielas mērījuma kļūdas. Piemēram, temperatūras sensors silstot uzrādīs savu temperatūru nevis mēramās vides temperatūru.

Parametriskos mērpārveidotājus raksturo sekojoši galvenie parametri:

- ✓ sākotnējā pretestība R_0, Ω ;
- ✓ relatīvā pretestības izmaiņa $\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R_0}$;
- ✓ pieļaujamā jauda $P_{\max}, \text{mW}$;
- ✓ maksimālais barošanas spriegums, V;
- ✓ maksimāli pieļaujamā strāva, mA.

Izvēloties darba spriegumu, jāvadās no pārveidotāja maksimāli pieļaujamās izkliedes jaudas P_p . Devēja barošanas spriegums nedrīkst pārsniegt lielumu $U_{b\max}$:

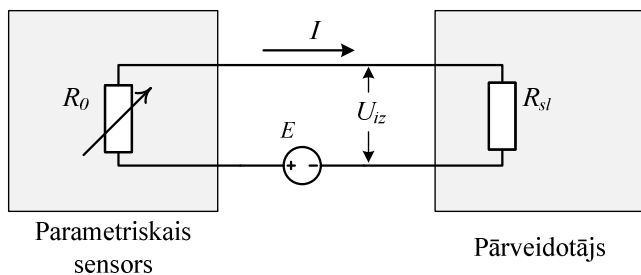
$$U_{b\max} \leq \sqrt{\frac{P_p}{R_0 - \Delta R}}. \quad (6.6)$$

Parametrisko mērpārveidotāju pieslēgšanai izmanto trīs veidu mērķēdes:

- ✓ virknes slēgumu,
- ✓ sprieguma dalītāju,
- ✓ tilta slēgumu.

Virknes slēgums

Virknes slēgumā sensora pretestība, slodzes pretestība un barošanas avots tiek saslēgti virknē (6.2 att.).



6.2 att. Parametriskā sensora pieslēgums izmantojot virknes slēgumu

Pieņemsim, ka barošanas avota iekšējā pretestība ir daudzkārt mazāka par sensora un slodzes pretestībām, un barošanas spriegums ir konstants un vienāds ar E .

Izmantojot Oma likumu līdzstrāvas ķēdēm, izteiksim izejas sprieguma lielumu kā funkciju no sensora pretestības izmaiņas ΔR :

$$U_{iz} = \frac{R_{sl} \cdot E}{R_{sl} + R_0 \pm \Delta R}. \quad (6.7)$$

Ja $\Delta R=0$, izejas spriegumu U_0 aprēķina pēc formulas (6.8):

$$U_0 = \frac{R_{sl} \cdot E}{R_{sl} + R_0}. \quad (6.8)$$

Kā redzam no formulām (6.6) un (6.7), izejas spriegums ir atkarīgs no sensora un slodzes pretestību attiecības. Apzīmēsim attiecību $\frac{R_{sl}}{R_0} = a$.

Izejas spriegums U_0 atbilst spriegumam mērķēdes izejā, ja uz sensoru neiedarbojas mērāmais lielums. Tas ir parazītiskais spriegums, kas samazina mērīšanas sistēmas jutību. Mērsistēmas derīgais izejas signāls, kas dod informāciju par mērāmo fizikālo lielumu ir nosakāms pēc formulas:

$$\Delta U_{iz} = U_{iz} - U_0. \quad (6.9)$$

Ievietojot vienādojumā (6.9) formulas (6.7) un (6.8) un lielumus a un ε , pēc algebriskiem pārveidojumiem iegūstam mērķēdes izejas sprieguma vērtību atbilstoši fizikālā lieluma izmaiņai:

$$\Delta U_{iz} = \frac{a \cdot E \cdot (\pm \varepsilon_R)}{(1+a)(1+a \pm \varepsilon_R)}. \quad (6.10)$$

Analizējot vienādojumu (6.10), varam pierādīt sekojošas mērķēdes īpašības:

- ✓ maksimālais izejas spriegums ir gadījumā, ja $R_{sl}=R_0$,
- ✓ mērķēdes izejas signāla raksturlīkne atkarībā no ε_R ir nelineāra.

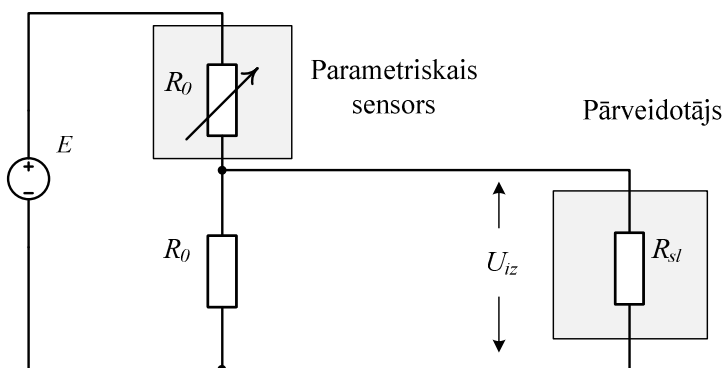
Praksē virknes slēgumu lieto samērā reti, jo izejas signāls ir mazs, tas nepārsniedz 50mV, ja barošanas spriegums $E=12V$.

Sprieguma dalītājs

Sprieguma dalītājus mērķēdēs lieto divos gadījumos:

- ✓ ja pārveidotājs ar mainīgu pretestību,
- ✓ ja ir potenciometriskais pārveidotājs.

Ja mērpārveidotājs ir ar mainīgu pretestību, piemēram, termorezistors, tā pieslēgšanai var izmantot mērķēdi, kas redzama 6.3. attēlā.



6.3 att. Parametriskā sensora pieslēgums ar sprieguma dalītāju.

Izmantojot Oma likumu un iepriekš aprakstītos pieņēmumus, varam noteikt sensora izejas sprieguma izmaiņu atkarībā no sensora pretestības izmaiņas:

$$\Delta U_{iz} = - \frac{E \cdot a \cdot (\pm \varepsilon)(1 + a)}{(1 + 2a)^2 \pm \varepsilon(1 + 3a + 2a^2)}. \quad (6.11)$$

Kā redzams no formulas (6.11), sakarība starp izejas spriegumu un sensora pretestības izmaiņu nav lineāra, jo mainīgais ε ietilpst gan skaitītājā, gan saucējā. Raksturlieknes nelinearitāti izsauc divi faktori:

- ✓ caur sensoru plūstošās strāvas izmaiņa mainīgās pretestības daļas ΔR iedarbībā,
- ✓ slodzes pretestības ietekme.

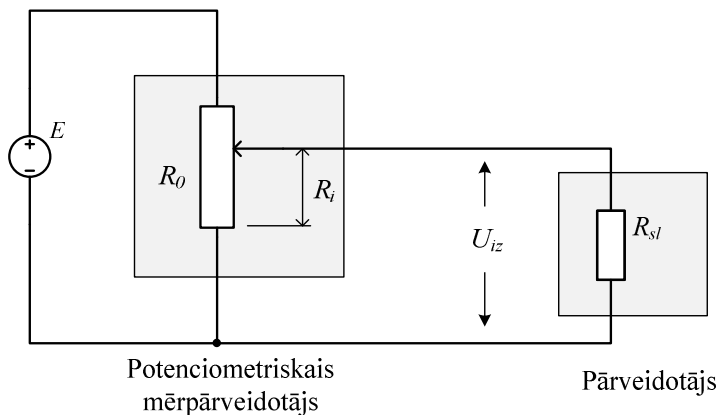
Slodzes pretestības ietekmi var samazināt līdz nenozīmīgai vērtībai, pieslēdzot sensoru pastiprinātājam ar augstu ieejas pretestību.

Mērpārveidotāja raksturlieknes nelinearitāti var novērst aizstājot konstanta sprieguma barošanas avotu ar konstantās strāvas ģeneratoru. Šādā gadījumā caur sensoru plūdis nemainīga strāva un izejas spriegums būs lineāri mainīgs atkarībā no ΔR . Jāņem vērā, ka tas būs spēkā tikai tad, ja slodzes pretestība R_{sl} būs daudzkārt lielāka par sensora pretestību R_0 . Praksē sensoru relatīvā pretestības izmaiņa ε nepārsniedz 1% līdz ar to raksturlieknes nelinearitāte nepārsniedz 0.1% un šāds slēgums nodrošina pietiekoši lineāru sensora izejas raksturliekni.

Mērķēdes trūkums – izejas spriegums ΔU_{iz} ir ļoti mazs salīdzinājumā ar sākotnējo izejas spriegumu U_0 . Parasti sprieguma dalītāja pretestību R_0 izvēlas aptuveni vienādu ar sensora sākotnējo pretestību. Šādā gadījumā sākotnējais spriegums U_0 ir aptuveni vienāds ar pusi no barošanas sprieguma. Sensora relatīvā pretestības izmaiņa praksē nepārsniedz 1% no R_0 . Pieņemsim, ka izveidota mērķēde ar sprieguma

dalītāju, sensoram, kura sākotnējā pretestība $R_0=100\Omega$, pretestības relatīvā izmaiņa $\varepsilon=0.01$, slodzes pretestība $R_{sl}=100k\Omega$ un barošanas spriegums $E=12V$. Aprēķinot izejas spriegumu pēc formulas (6.11), iegūstam $\Delta U_{iz}=30mV$. Salīdzinājumā ar sākotnējo spriegumu $U_0=6V$ tas ir tikai $\sim 0.5\%$. Lai nodrošinātu mērījuma precizitāti vismaz 1% robežās, būtu nepieciešams sprieguma mērītājs ar precizitāti vismaz 0.005%.

Potenciometriskos pārveidotājus parasti izmanto pārvietojuma mērīšanai un shēmā ieslēdz potenciometriskā slēgumā, skat. 6.4 att.



6.4 att. Potenciometriskā slēguma mērķēde.

Pieņemsim, ka potenciometra pretestība ir R_0 . Potenciometra slīdnim pārvietojoties, izmainās potenciometra apakšējās daļas pretestība R_i . Šī pretestība ir proporcionāla mērāmajam pārvietojumam. Izejas spriegumu nosakām izmantojot Oma likumu līdzstrāvas ķēdei:

$$U_{iz} = \frac{E \cdot R_i \cdot R_{sl}}{R_0 \cdot R_i + R_0 \cdot R_{sl} - R_i^2}. \quad (6.12)$$

Ja slodzes pretestība ir ļoti liela salīdzinājumā ar potenciometra pretestību $R_{sl} \gg R_0$, tad izejas spriegums nosakāms pēc formulas (6.13):

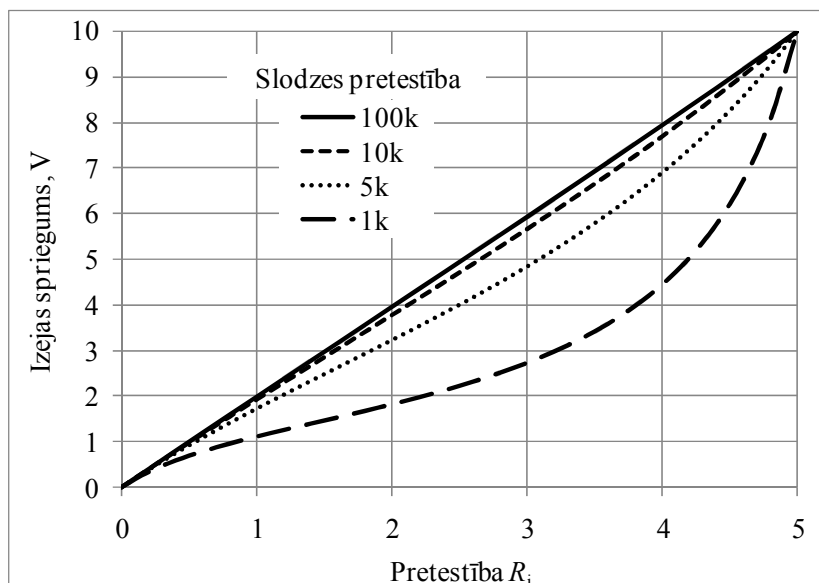
$$U_{iz} = \frac{E \cdot R_i}{R_0}. \quad (6.13)$$

Lai novērtētu slodzes pretestības ietekmi uz sensora raksturlīknes nelinearitāti, pieņemsim, ka potenciometra pretestība ir $R_0=5k\Omega$ un barošanas avota EDS $E=10V$. Aprēķinot izejas sprieguma izmaiņu pie dažādām slodzes pretestībām, iegūstam 6.5 attēlā redzamās raksturlīknes.

Kā redzam, slodzes pretestībai samazinoties pieaug izejas sprieguma nelinearitāte. Ja slodzes pretestība ir $1000k\Omega$, tad maksimālā nelinearitāte ir 0.12%.

Varam uzskatīt, ka šajā gadījumā raksturlīkne ir pilnīgi lineāra. Samazinot slodzes pretestību, nelinearitāte $\delta\%$ izmainās sekojoši:

$R_{sl}=1000k\Omega$	$R_{sl}=100k\Omega$	$R_{sl}=10k\Omega$	$R_{sl}=5k\Omega$	$R_{sl}=1k\Omega$
$\delta\%=0.12\%$	$\delta\%=1.24\%$	$\delta\%=6\%$	$\delta\%=20\%$	$\delta\%=56\%$



6.5 att. Potenciometriskā sensora izejas sprieguma izmaiņas nelinearitāte

Lai iegūtu pietiekoši mazu nelinearitāti, potenciometriskā mērpārveidotāja slodzes pretestība jāizvēlas vismaz 100 līdz 200 reizes lielāka par paša sensora pretestību. To nodrošina pieslēdzot sensoru sprieguma atkārtotājam ar lielu ieejas pretestību.

Potenciometriskie mērpārveidotāji nodrošina lielu izejas spriegumu, kas var sasniegt barošanas avota sprieguma vērtību. Tāpēc šiem sensoriem nav nepieciešams lietot pastiprinātājus ar lielu sprieguma pastiprinājumu.

6.3. Mērtilti

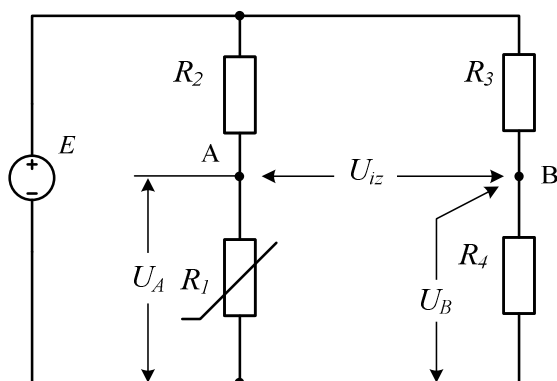
Iepriekš noskaidrojām, ka parametrisko sensoru pieslēgšanai var izmantot sprieguma dalītāju. Šīs metodes trūkums ir pārlietu liels sākotnējais spriegums, kas samazina mērījuma precizitāti. Lai novērstu šo trūkumu lieto balansa shēmas, kas vēsturiski ieguvušas nosaukumu „tilta shēmas” jeb mērtilti. Ir zināmi ļoti daudzi mērtiltu shematiskie risinājumi, taču izmantotais līdzsvara princips visos risinājumos ir vienāds. Tā kā mērtiltus mērīšanas shēmās izmanto ļoti plaši, tālāk analizēsim šo

shematisko risinājumu darbības principus, mērtiltu veidus un to priekšrocības un trūkumus.

Praksē plašāk izplatīti un shematiski vienkāršākie ir līdzstrāvas nelīdzsvarotie mērtilti, ko literatūrā bieži sauc par Vīstouna (Wheastone) tiltiem.

Līdzstrāvas nelīdzsvarotie mērtilti

Nelīdzsvaroto tiltu ķēžu uzbūves pamatideja balstās uz sprieguma dalītāja izejas signāla sākuma vērtības kompensāciju, nodrošinot izejas sprieguma sākotnējo vērtību $U_0=0$. Veidojot tilta shēmu, izmanto sprieguma dalītāju no rezistoriem R_1R_2 . Sprieguma dalītājam R_1R_2 (6.6. att.), kas satur devēju R_1 , tiek pievienots vēl viens sprieguma dalītājs R_3R_4 .



6.6 att. Vīstouna tilta principiālā shēma

Iegūstam mērķēdi, kuras izejas spriegumu noņem punktos A un B. Rezistoru pretestības izvēlas tā, lai sākotnējais spriegums starp punktiem A un B tilta diagonālē būtu $U_{AB}=U_{iz}=0$. Tas iespējams tādā gadījumā, ja sākotnējā stāvoklī $U_A=U_B$. To nodrošina izvēloties tilta rezistorus ar sekojošām pretestībām: $R_2=R_3$ un $R_1=R_0=R_4$, kur R_0 – devēja sākotnējā pretestība.

Ja uz sensoru iedarbojas mērāmais fizikālais lielums, pretestība R_1 izmainās par lielumu ΔR , iegūstot lielumu $R_1=R_0\pm\Delta R$. Tilts iziet no līdzsvara stāvokļa un tilta izejā parādās spriegumu starpība $U_{iz}\neq 0$.

Tāda struktūra mērķēdēs ir ne tikai elektriskiem, bet arī optiskiem, magnētiskiem un citiem tiltiem, kur līdzīga situācija veidojas nevis no elektriskās strāvas, bet magnētiskās plūsmas, gaismas un citām plūsmām.

Lai iegūtu kvantitatīvu sakarību starp mērāmo lielumu un tilta izejas spriegumu, nepieciešams noskaidrot sekojošas sakarības:

Kādi ir tilta līdzsvara nosacījumi?

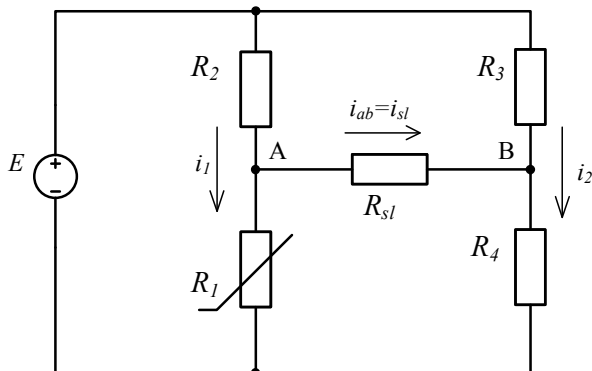
Kā noteikt tilta izejas spriegumu un tā izmaiņas linearitāti?

Kāda ir slodzes pretestības iedarbība tilta izejas parametriem?

Kādi praktiski lietojami tilta shēmu risinājumi iespējami un kādas ir to raksturīgākās īpašības?

Tilta līdzsvara nosacījumus jau noskaidrojām iepriekš. Ir pierādīts, ka tilta parametri ir optimāli, ja tilta rezistorus izvēlas visos zaros vienādus $R_1=R_2=R_3=R_4=R_0$. Tādā gadījumā sākotnējie spriegumi tilta zaros $U_A=U_B=0.5E$.

Lai noskaidrotu tilta izejas spriegumu un tā izmaiņas linearitāti, pieņemsim, ka slodzes pretestība starp punktiem A un B ir bezgalīgi liela un strāva slodzē neplūst (6.7. att.).



6.7 att. Vistouna tilts ar slodzes pretestību

Piemēram, tilts ir pieslēgts pastiprinātājam ar ļoti augstu ieejas pretestību salīdzinot ar tilta pretestību, tad šajā gadījumā tilta slodzes strāva i_{sl} irniecīga salīdzinājumā ar tilta plecos plūstošajām strāvām. Šī situācija aptuveni atbilst praksei, jo daudzi sprieguma mērinstrumenti (elektroniskais voltmetrs, osciloskops utt.) un pastiprinātāji ir ar ieejas pretestību $1\text{M}\Omega$ vai vairāk.

Ja $i_{sl}=0$, tad strāvas tilta zaros var noteikt pēc formulām:

$$i_1 = \frac{E}{R_1 + R_2} \text{ un } i_2 = \frac{E}{R_3 + R_4}. \quad (6.14)$$

Sprieguma kritums uz R_1 ir:

$$U_A = i_1 R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E. \quad (6.15)$$

Sprieguma kritums uz R_4 ir:

$$U_B = i_2 R_4 = \frac{R_4}{R_4 + R_3} E. \quad (6.16)$$

Izejas spriegums ir spriegumu starpība starp punktiem A un B:

$$U_{AB} = U_A - U_B = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) E. \quad (6.17)$$

Kā redzams, izejas spriegums ir lineāra funkcija no tilta barošanas sprieguma E , bet nelineāra funkcija no pretestībām R_1, R_2, R_3, R_4 .

Pieņemsim, ka tilts sākumā ir līdzsvarā un $R_1 = R_0$, izmaiņām sākoties pretestība pieaugs (vai samazināsies) un iegūs lielumu $R_1 = R_0 + \Delta R$.

Ievietojot iegūto sakarību formulā (6.17), iegūstam tilta izejas sprieguma izmaiņu:

$$U_{AB} = \left(\frac{R_1 + \Delta R}{(R_1 + \Delta R) + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \cdot E. \quad (6.18)$$

Strāva i_1 izmainās un iegūst lielumu, ko aprēķina pēc formulas (6.19):

$$i_1 = \frac{E}{(R_1 + \Delta R) + R_2}. \quad (6.19)$$

Redzam, ka strāvas izmaiņa atkarībā no R_1 ir nelineāra, un tas ir tilta izejas sprieguma izmaiņas nelinearitātes cēlonis. Strāva otrā tilta zarā i_2 paliek nemainīga un neietekmē izejas signāla izmaiņu.

Lai novērstu mērīšanas kļūdas mērķēdes nelinearitātes dēļ, mērīšanas laikā jānodrošina tilta zaros nemainīgas strāvas.

Ir zināmas trīs metodes tilta nelinearitātes novēršanai:

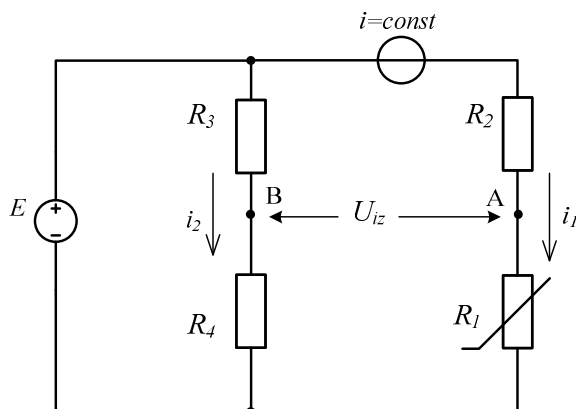
- ✓ tilta aktīvajā zarā ieslēdzot konstantas strāvas ģeneratoru, kas nodrošina $i_1 = \text{const}$,
- ✓ izmantojot tilta aktīvajā zarā divus jutīgos elementus ar pretēji mainīgām pretestībām. Šajā gadījumā mērpārveidotājs sastāv no diviem aktīvajiem elementiem R_1 un R_2 , kuru pretestības mērījuma laikā izmainās pretējos virzienos, t.i. $\Delta R_1 = -\Delta R_2$,
- ✓ nodrošinot, ka $R_0 \gg R$.

Pirmajā gadījumā tilta aktīvajā zarā ieslēdzam konstantās strāvas ģeneratoru, kas nodrošina tilta zara strāvas nemainību mērīšanas laikā $i_1 = \text{const}$ (skat. 6.8 att.). Pārveidojot formulas (6.15) un (6.16), noteiksim tilta izejas sprieguma izmaiņu atkarībā no sensora pretestības izmaiņas ΔR . Tilta pasīvajā zarā sprieguma kritums uz pretestību R_4 izsakāms sekojoši:

$$U_B = i_2 R_4 = \frac{R_4}{R_4 + R_3} E. \quad (6.20)$$

Tilta aktīvajā zarā tiek nodrošināta nemainīga strāva $i_1 = i$. Pārveidojot formulu (6.15) nosakām sprieguma kritumu uz pretestības R_1 :

$$U_A = i_1(R_1 + \Delta R) = i \cdot (R_1 + \Delta R). \quad (6.21)$$



6.8 att. Vīstouna tilts ar konstantās strāvas ģeneratoru

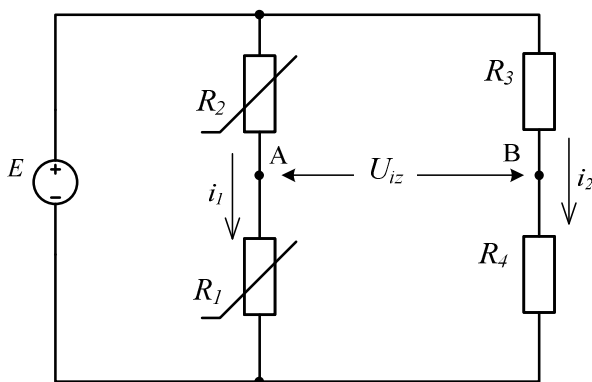
Tilta izejas spriegumu U_{iz} nosakām kā spriegumu starpību starp punktiem A un B:

$$U_{iz} = i \cdot (R_1 + \Delta R) - \frac{R_4}{R_4 + R_3} E. \quad (6.22)$$

No vienādojuma (6.22) izriet, ka sakarība starp izejas spriegumu un mainīgo pretestību ΔR ir lineāra, jo strāva šajā tilta zarā ir nemainīga.

Šī risinājuma trūkums ir tas, ka tilta barošanai nepieciešami divi avoti, kas sarežģī mērķķēdes montāžu uz sadārdzina sistēmu.

Daudzos gadījumos ir iespējams izveidot mērpārveidotāju ar diviem aktīvajiem elementiem, kuru pretestība izmainās pretējos virzienos (skat. 6.9. att.). Šo metodi bieži izmanto mehānisko spriegumu mērīšanā.



6.9 att. Vīstouna tilts ar diviem aktīviem elementiem

Aktīvie elementi R_1 un R_2 tiek novietoti tā, lai to pretestības darba laikā izmainītos sekojoši: $R_1 = R_0 + \Delta R$ un $R_2 = R_0 - \Delta R$, kur R_0 – aktīvā elementa sākotnējā

pretestība. Ievietojot vienādojumā (6.15) iegūtās pretestību vērtības nosakām spriegumu U_A :

$$U_A = i_1(R_0 + \Delta R) = \frac{R_0 + \Delta R}{(R_0 + \Delta R) + (R_0 - \Delta R)} \cdot E. \quad (6.23)$$

Ievietojam iegūto izteiksmi vienādojumā (6.18) un izsakām izejas spriegumu:

$$U_{AB} = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \cdot E. \quad (6.24)$$

Ņemot vērā, ka parasti $R_3=R_4=R_0$, iegūstam tilta izejas sprieguma aprēķina izteiksmi atbilstoši shēmai 6.9 attēlā:

$$U_{AB} = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{E}{2} \cdot \varepsilon_R. \quad (6.25)$$

Kā redzams no vienādojuma (6.25), atkarībā no sensora pretestības izmaiņas izejas spriegums mainās lineāri.

Praksē daudzos gadījumos jutīgo elementu pretestības izmaiņa attiecībā pret sākotnējo pretestību ir niecīga un ε_R nepārsniedz 1%. Tādā gadījumā vienādojumu (6.18) var pārveidot un izejas spriegumu aprēķina vienkāršākā veidā, pieņemot, ka $R_1 + \Delta R \approx R_1$:

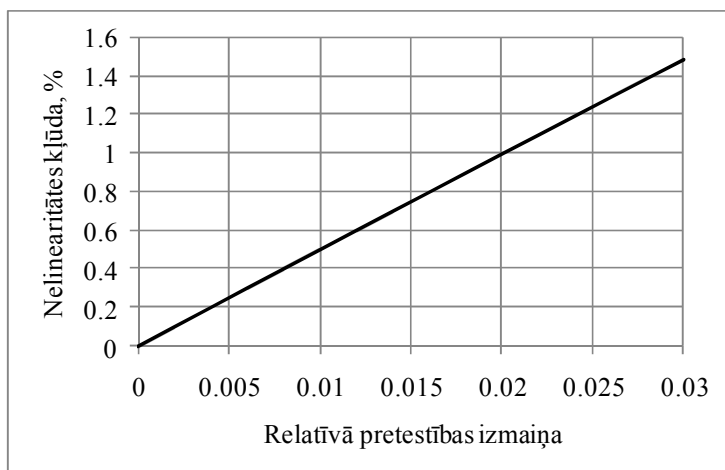
$$U_{AB} = \left(\frac{R_1 + \Delta R}{(R_1 + \Delta R) + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \cdot E \approx \left(\frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \cdot E. \quad (6.26)$$

Noteiksim linearitātes kļūdu dažādiem ε_R pieņemot, ka $R_1=R_2=R_3=R_4=R_0=100\Omega$ un $E=12V$. Aprēķinu veic izmantojot vienādojumus (6.18) un (6.26).

Linearitātes kļūdu nosaka kā procentuālo atšķirību starp tilta izejas spriegumu pēc linearizētā vienādojuma (6.26) un izejas spriegumu aprēķinātu pēc precīzā vienādojuma (6.18).

Ja relatīvā pretestības izmaiņa tilta zarā nepārsniedz 1%, tad maksimālā nelinearitātes radītā kļūda nepārsniedz 0.5%. Tā ir pietiekoša precizitāte daudzos tehniskos mērījumos. Kalibrējot mēriekārtu un nosakot atbilstošu lineārās regresijas koeficientu, šo kļūdu var samazināt vairākas reizes.

Rezistīvajiem temperatūras sensoriem relatīvā pretestības izmaiņa var sasniegt pat 30 – 50% no termorezistora sākotnējās vērtības. Šādos gadījumos jāveic sensora raksturlīknes linearizācija izmantojot strāvas stabilizatorus vai, ja mērījumi tiek veikti izmantojot datortehniku, raksturlīkne jālinearizē ar programmatiskiem līdzekļiem.



6.10 att. **Nelinearitātes kļūdas izmaiņa atkarībā no tilta relatīvās pretestības izmaiņas**

Līdz šim aplūkojām mērtilta darbību pieņemot, ka tikai viena no četrām tilta pretestībām ir aktīva, t. i. izmainās proporcionāli mērāmajam lielumam. Praksē iespējami gadījumi, kad vienā mērtiltā vienlaicīgi darbojas vairāki aktīvie elementi. Jāņem vērā, ka pareizai tilta darbībai, aktīvo elementu pretestības izmaiņai jābūt ar noteiktu zīmi atkarībā no tā, kurā mērtilta zarā elements ir ieslēgts.

Mērtilta barošanai var izmantot gan nemainīga sprieguma, gan konstantās strāvas avotus.

Turpmākā izklāstā analizēsime iespējamās mērtiltu slēgumus, to priekšrocības un trūkumus.

Mērtiltu slēgumu parametri

Iespējamie mērtilta slēgumi un to parametri redzami 6.1 tabulā. Visos gadījumos tilta rezistoru pretestības sākotnēji ir vienādas.

Linearitātes kļūda tiek noteikta procentos pilnai skalas vērtībai uz katru pretestības izmaiņas % attiecībā uz sākotnējo aktīvā elementa pretestību. Piemēram, pieņemsim, ka aktīvā elementa sākotnējā pretestība $R_0=100\Omega$ un $\Delta R=1.5\Omega$ jeb 1.5% no R_0 . Tas nozīmē, ka ieslēdzot šo elementu ceturtdaļtiltā linearitātes kļūda sasniegs $0.5 \times 1.5 = 0.75\%$.

6.1 tabula. Mērtilta ar nemainīgu barošanas spriegumu raksturlielumi

1	2	3	4
Viens aktīvais elements. Ceturtdaļtilts	Divi aktīvie elementi Pustilts	Divi aktīvie elementi Pustilts	Četri aktīvie elementi Pilnais tilts
$U_{iz} = \frac{E}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$	$U_{iz} = \frac{E}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$	$U_{iz} = \frac{E}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$	$U_{iz} = E \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$
Linearitātes kļūda $\delta = 0.5\%/ \%$	Linearitātes kļūda $\delta = 0.5\%/ \%$	Linearitātes kļūda $\delta = 0$	Linearitātes kļūda $\delta = 0$
Temperatūras kompensācija - vāja	Temperatūras kompensācija - vāja	Temperatūras kompensācija – kompensēts pilnībā	Temperatūras kompensācija – kompensēts pilnībā

Svarīgi!

- ✓ Jebkura mērtilta izejas spriegums ir tieši proporcionāls barošanas spriegumam. No tā izriet, ka mērīšanas precizitāte nevar būt augtāka par barošanas sprieguma precizitāti. Nodrošiniet teicamu barošanas sprieguma stabilizāciju.
- ✓ Izmantojot tilta slēgumā vairākus aktīvos elementus, to pretestības izmaiņai pretējos zaros pa diagonāli jābūt ar vienādu zīmi. Vienā zarā aktīvo elementu pretestības izmaiņai jābūt ar pretēju zīmi.
- ✓ Vislielāko izejas spriegumu un pilnīgu raksturlīknes linearitāti nodrošina pilnais tilta slēgums ar četriem aktīvajiem elementiem (4. slēgums, 6.1 tabula).
- ✓ Izvēloties pustilta slēgumu aktīvos elementus novietojiet vienā tilta zarā. Tas nodrošina lielāku izejas spriegumu un pilnīgu raksturlīknes linearitāti (3. slēgums, 6.1 tabula).
- ✓ Izvēloties ceturtdaļtilta vai pustilta slēgumus (1. un 2. slēgums), jānodrošina aktīvā elementa temperatūras izmaiņu radīto kļūdu kompensācija. Tas neattiecas uz gadījumu, kad mērtilts tiek izmantots temperatūras mērīšanai.

6.2 tabula. Mērtilta ar nemainīgu barošanas strāvu raksturlielumi

1	2	3	4
Viens aktīvais elements. Ceturtdaļtilts	Divi aktīvie elementi Pustilts	Divi aktīvie elementi Pustilts	Četri aktīvie elementi Pilnais tilts
$U_{iz} = \frac{I \cdot R}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{4}} \right]$	$U_{iz} = \frac{I}{2} [\Delta R]$	$U_{iz} = \frac{I}{2} [\Delta R]$	$U_{iz} = I [\Delta R]$
Linearitātes kļūda $\delta=0.25\%/ \%$	Linearitātes kļūda $\delta=0$	Linearitātes kļūda $\delta=0$	Linearitātes kļūda $\delta=0$
Temperatūras kompensācija - vāja	Temperatūras kompensācija - vāja	Temperatūras kompensācija – kompensēts pilnībā	Temperatūras kompensācija – kompensēts pilnībā

Kā redzam no tabulas 6.2, mērtilta raksturlielumi, veicot tilta barošanu no konstantās strāvas avota, ir labāki. Jāņem vērā, ka barošanas strāvas stabilitātei ir izšķiroša loma mērījuma precizitātes nodrošināšanā.

Atcerieties, ka dotā linearitātes kļūda attiecas tikai uz paša mērtilta radīto kļūdu, nevis uz sensora kopējo nelinearitāti.

Mērtilta slodzes pretestības ietekme

Līdz šim mērtiltu darbību analizējām, pieņemot, ka slodzes pretestība ir bezgalīgi liela vai daudzkārt pārsniedz tilta pretestību lielumu un tās ietekmi var neņemt vērā. Ja mērtilts tiek pieslēgts operacionālajam vai instrumentālajam pastiprinātājam, tad slodzes pretestība (šajā gadījumā pastiprinātāja ieejas pretestība) ir daudzkārt lielāka par tilta pretestību un tās iedarbību var neņemt vērā. Praksē var būt arī gadījumi, kad lieto augstomīgus tiltus un tad slodzes pretestības ietekme kļūst vērā ņemama.

Ja tilta izejā (skat. 6.7. att.) ir pieslēgta slodzes pretestība, tad, parādoties izejas spriegumam, rodas slodzes strāva i_{sl} . Slodzē plūstošo strāvu aprēķina, pieņemot, ka tilts ir sprieguma avots ar noteiktu iekšējo pretestību, kas ekvivalenta tilta rezistoru slēguma summārajai pretestībai.

Slodzes strāvu aprēķina pēc formulas (6.27):

$$i_{sl} = E \cdot \frac{R_2 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_3}{R_{sl} (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}. \quad (6.27)$$

Tilta izejas spriegumu nosaka pēc formulas 6.28:

$$U_{sl} = E \cdot \frac{R_2 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + \left[\frac{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}{R_{sl}} \right]}. \quad (6.28)$$

No vienādojuma redzams, ka slodzes pretestība palielina tilta raksturlīknes nelinearitāti un samazina tilta izejas spriegumu. Tilta izejas sprieguma samazināšanās pakāpi nosakām izdalot tilta izejas sprieguma ar slodzi aprēķina formulu (6.28) ar neslogota tilta izejas sprieguma formulu (6.17).

Pieņemot, ka sākotnējās pretestības tiltā ir vienādas, iegūstam sekojošu slogota tilta sprieguma pazeminājuma koeficienta β_U vienādojumu:

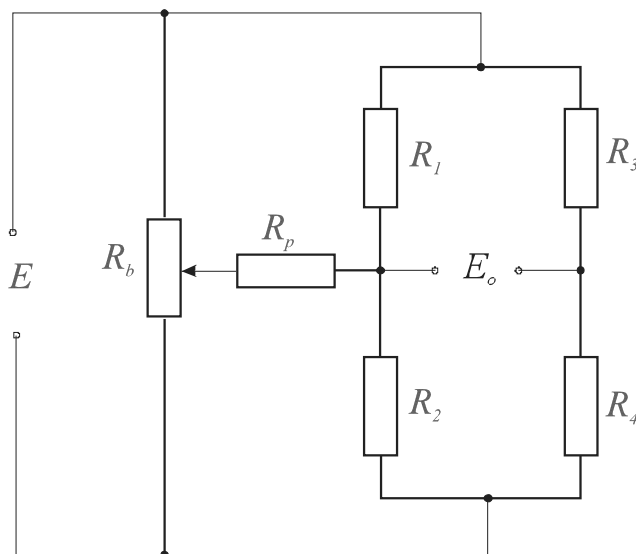
$$\beta_U = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_{sl}}}. \quad (6.29)$$

Ja slodzes pretestība ir 10 reizes lielāka par tilta pretestību, izejas spriegums samazinās gandrīz par 9%. Ja šī attiecība ir 100 reizes, spriegums samazinās apmēram par 1%.

Mērtiltu līdzsvarošana un kalibrēšana

Lai mērtilts darbotos kvalitatīvi, sākuma stāvoklī tiltam jāatrodas līdzsvarā, t.i. izejā spriegumam jābūt vienādam ar nulli. Rezistori un aktīvie elementi, kuri veido tilta shēmu, tiek izgatavoti ar lielu precizitāti, taču tie nav ar ideāli vienādu pretestību. Tāpēc, veidojot tilta slēgumus, nepieciešams nodrošināt tilta līdzsvarošanas iespējas. Ir izstrādātas daudzas līdzsvarošanas shēmas, bet tām visām ir viens darbības princips – tilta līdzsvars tiek nodrošināts izmainot sākotnējās strāvas tilta zarus.

Viena no praktiski lietojamām balansēšanas shēmām parādīta 6.11. attēlā. Pieņemot, ka tilta pretestība R_0 , vienāda ar $R_0=R_1=R_2=R_3=R_4$, tad līdzsvarošanas potenciometra pretestība jāizvēlas $R_b \approx 10R_0$, un papildpretestība $R_p \approx 25R_0$. Parasti šāda parametru izvēle nodrošina pietiekošu regulēšanas laidenumu un arī pietiekošu regulēšanas diapazonu. Ja nepieciešama regulēšana plašākā diapazonā, ar potenciometru R_b virknē ieslēdz precīzās regulēšanas potenciometru reostata slēgumā. Tā pretestību izvēlas apmēram $0.1R_b$.



6.11 att. Mērtilta līdzsvarošanas shēma.

Laika gaitā tilta elementi nolietojas un tā parametri izmainās. Lai novērstu mērījumu kļūdas, ekspluatācijas laikā nepieciešams operatīvi novērtēt mērķēdes parametru atbilstību sākotnēji iestatītajiem. Lai to izdarītu daudzos gadījumos mērtiltā shēmā tiek iestrādāta kalibrēšanas iespēja.

Būtisks mērtilta parametrs ir tā **jūtība**. Jūtības koeficientu S nosaka kā izejas sprieguma attiecību pret aktīvā elementa pretestības izmaiņu ΔR .

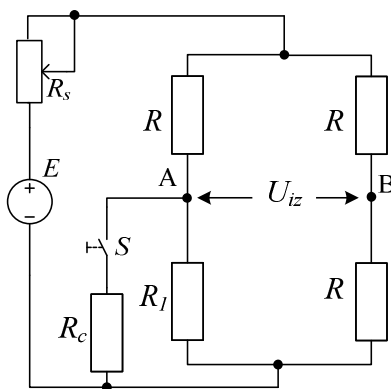
Jūtības koeficientu ceturdaļtiltam aprēķina pēc formulas (6.30) (skat. 6.1. tabulu):

$$S = \frac{U_{iz}}{\Delta R} = \frac{E}{4 \left(R + \frac{\Delta R}{2} \right)}. \quad (6.30)$$

Kalibrēšanu veic kādam tilta pasīvajam rezistoram pieslēdzot paralēli kalibrēšanas rezistoru ar pretestību R_c (6.12 att.). Kalibrēšanas rezistors ir izgatavots ar augstu precizitāti. Pretestības izmaiņu ΔR aprēķina pēc formulas (6.31):

$$\Delta R = R_1 - \frac{R_1 \cdot R_c}{R_1 + R_c}. \quad (6.31)$$

Ar slēdzi S pieslēdz kalibrēšanas rezistoru R_c paralēli rezistoram R_1 un nosaka izejas spriegumu. Iegūto sprieguma vērtību salīdzina ar mērtilta dokumentācijā uzrādīto.



6.12 att. Mērtilta kalibrēšana

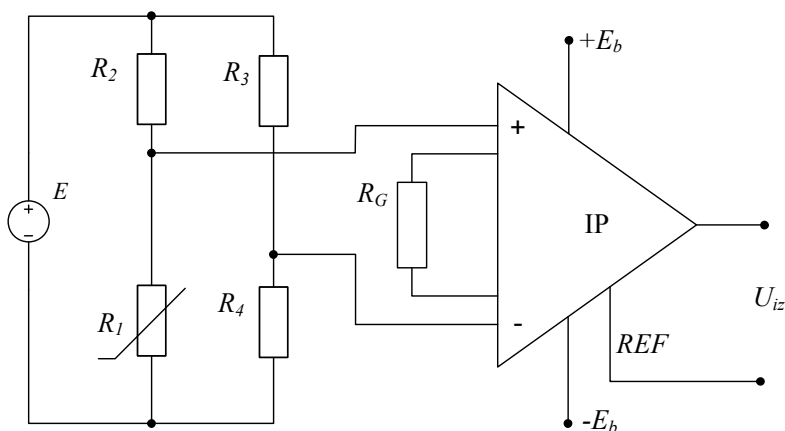
Rūpnieciski ražotajās iekārtās parasti kalibrēšanas rezistors ir iebūvēts un arī paredzēta tā pieslēgšanas iespēja. Iekārtas dokumentācijā ir dota kalibrēšanas kārtība un iegūto rezultātu novērtējums. Pēc formulas (6.30) nosaka tilta jutības koeficientu un, nepieciešamības gadījumā, veic tilta jutības regulēšanu ar potenciometru R_s (6.12. att.).

Svarīgi!

Iepriekš minētā kalibrēšanas metode nodrošina tikai mērtilta elektriskās daļas jutības pārbaudi un ieregulēšanu. Tā nenodrošina sensora kalibrēšanu atbilstoši mērāmajam fizikālajam lielumam.

Mērtiltu izejas raksturliķņu linearizēšana

Mērtiltu izejas sprieguma pastiprināšanai var izmantot operacionālos pastiprinātājus diferenciālā slēgumā (skat. 7. nodaļu). Labākus rezultātus iegūst izmantojot instrumentālos pastiprinātājus (IP) (6. 13 att.).



6.13 att. Ceturdaļtilta slēgums ar instrumentālo pastiprinātāju

Slēgums nodrošina teicamu pastiprinājuma koeficienta stabilitāti. To ieregulē ar mērogpretestības R_G izmaiņu. IP izvads REF ir references sprieguma izvads. Atkarībā no šī sprieguma lieluma pastiprinātāja izejā var iestatīt sākuma nobīdes spriegumu.

Izejas signāla raksturlīknes nonlinearitāte šajā gadījumā saglabājas, jo to nosaka paša mērtilta nonlinearitāte.

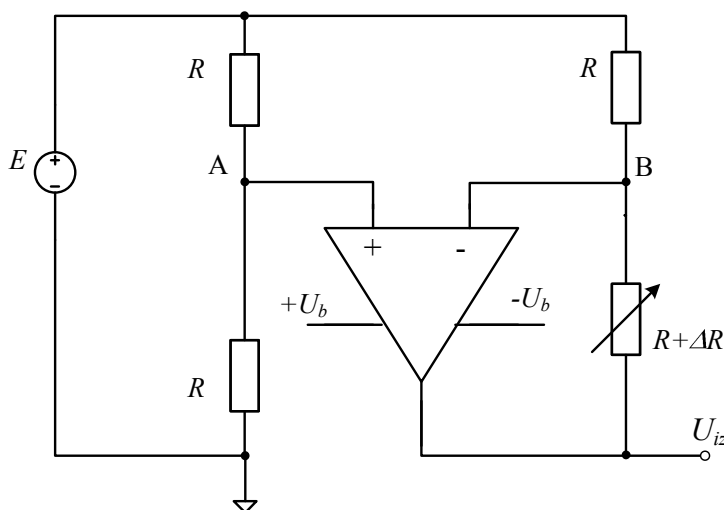
Mērtiltu izejas raksturlīkņu linearizēšanai ir izstrādātas daudzas shēmas, taču jāņem vērā tas, ka galvenais uzdevums ir panākt lineāru sakarību starp mērāmo fizikālo lielumu un mērsistēmas izejas elektrisko signālu.

Piemēram, temperatūras mērīšanai tiek izmantots aktīvais elements RTD (rezistīvais temperatūras devējs) un mērtilts ir izveidots tā, ka tas ir ideāli lineārs. Temperatūras mērīšanas skala šim mērinstrumentam tomēr nebūs lineāra, jo paša RTD pretestības izmaiņa atkarībā no temperatūras nav lineāra.

Ceturtdaļtilta linearizāciju panāk ieslēdzot aktīvo elementu operacionālā pastiprinātāja negatīvās atgriezeniskās ķēdē (6.14 att.). Aktīvā elementa pretestības izmaiņa rada sprieguma izmaiņu mērtilta diagonālē AB. Šis spriegums vienlaicīgi ir arī negatīvās atgriezeniskās saites spriegums.

Slēguma sprieguma pastiprinājuma koeficients ir divi. Shēmas izejas spriegumu aprēķina pēc formulas (6.32):

$$U_{iz} = -E \cdot \frac{\Delta R}{2R}. \quad (6.32)$$



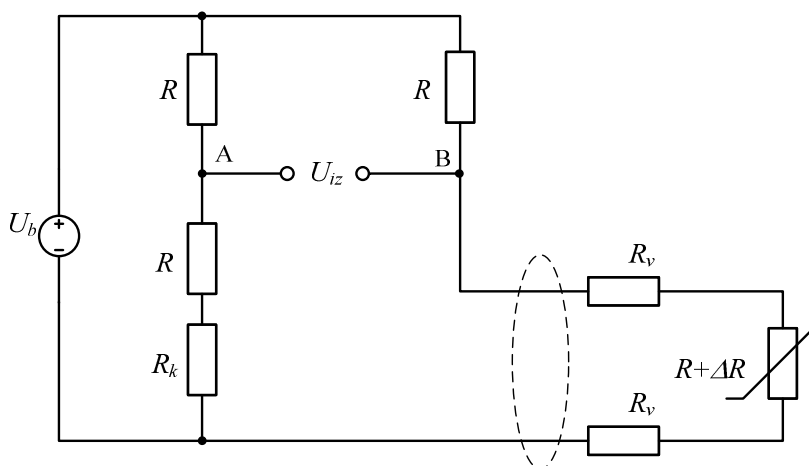
6.14 att. Ceturtdaļtilta linearizēšanas shēma

Slēguma izejas pretestība ir neliela un tā ir atkarīga no tilta rezistoru pretestības. Shēmas izejas spriegums ir atkarīgs no aktīvā elementa pretestības izmaiņas. Mērtilta raksturlīkne būs lineāra gan mazai ΔR izmaiņai, gan lielai ΔR izmaiņai. Praksē šīs shēmas izejas spriegums nav liels tāpēc jālieto sprieguma pastiprinātājs.

Mērtiltu pieslēgšana

Praksē mērtilts vai tā aktīvais elements atrodas vietā, kur notiek mērāmā fizikālā parametra iedarbība, bet signāla apstrādes ierīces ir attālinātas un atrodas mērījuma rezultātu nolasīšanas vietā. Savienošanas kabeļu garums var sasniegt pat 20 - 30 metrus. Pievienošanas vadi parasti ir izgatavoti no vara un savīti pāros.

6.15 attēlā redzama tenzometriskā tilta ar vienu aktīvo elementu slēguma shēma. Pieņemsim, ka tilta rezistoru un tenzorezistora pretestība sākuma stāvoklī ir 350Ω . Tenzorezistora pievienošanas kabeļa garums ir 30m un katra vada pretestība 25°C temperatūrā ir 10.5Ω . Vara pretestības temperatūras koeficients $\lambda=0.385\%/^\circ\text{C}$. Mērtilta barošanas spriegums $U_b=10\text{V}$. Kopējā vada pretestība, kas ieslēgta virknē ar tenzorezistoru ir $R_v+R_v=2\times 10.5\Omega=21\Omega$. Lai tilts būtu līdzsvarā, vada pretestības kompensācijai, pretējā tilta pusē ieslēgsim rezistoru R_k ar pretestību 21Ω . Maksimālā tenzorezistora pretestības izmaiņa ir $+1\%$, t.i. 3.5Ω .



6.15 att. Tilta pieslēguma vadu ietekmes novērtēšanas shēma

Pieņemsim, ka sākumā mērtilts ir līdzsvarā un pievienošanas vadu pretestība vienāda ar nulli. Slodzes ietekmē tenzorezistora pretestībai izmainoties par 1% , tilta izejas spriegumu aprēķina pēc ceturdaļtilta aprēķina formulas (skat. 6.1 tabulu) $U_{iz0}=24.88\text{mV}$

Pievienošanas vadu pretestība rada sekojošu negatīvu ietekmi uz tilta pretestību:

- ✓ samazina tilta izejas sprieguma lielumu,
- ✓ rada tilta „nulles” nobīdi vides temperatūras izmaiņas ietekmē,
- ✓ rada izejas signāla izmaiņu vides temperatūras ietekmē.

Noteiksim mērtilta parametrus ievērtējot pievienošanas vadu pretestību un pieņemot, ka apkārtējās vides temperatūra palielinās par 10°C .

Tilta izejas spriegums ievērtējot vadu pretestību $U_{iz}=23.45\text{mV}$. tas nozīmē, ka

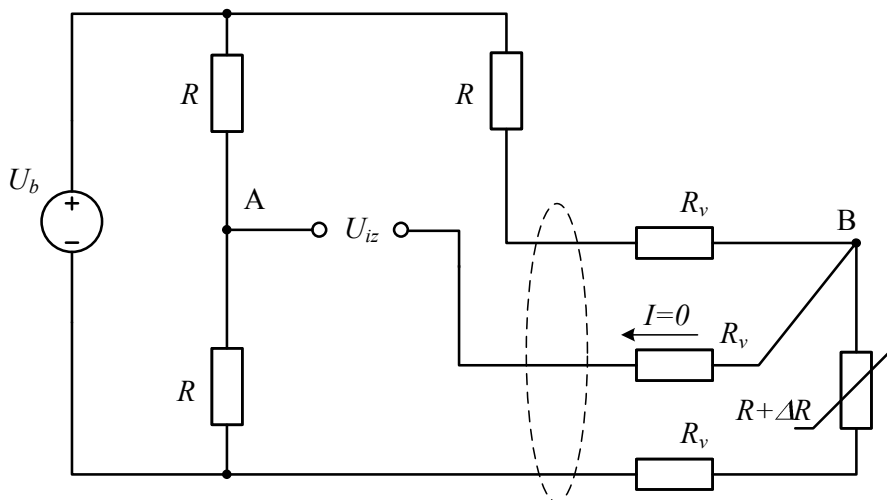
tilta jutība samazināsies par 5.7%. Nulles dreifs temperatūras ietekmē $\Delta t=10^{\circ}\text{C}$ sasniedz 5.44mV (23% no maksimālā izejas sprieguma). Vadu pretestības pieaugums temperatūras ietekmē samazina tilta jutību par 0.26%. Kopumā tilta izejas signāla kļūda, temperatūrai izmainoties par 10°C , sasniegs 23% no skalas pilnās vērtības. Apkārtējās vides temperatūra parasti nav stabila, tāpēc iepriekšminēto kļūdu kompensācija nav iespējama ar tilta pielāgošanu.

Jāņem vērā, ka iepriekšējā izklāstā ir ievērtēta tikai savienojšo vadu ietekme, bet nav ievērtēta paša aktīvā elementa temperatūras ietekmes radītā kļūda.

Trīsvadu pieslēguma shēma

Pieslēguma vadu ietekme ievērojami samazinās izmantojot aktīvā elementa trīsvadu pieslēgumu, skatīt 6.16 att.

Šajā gadījumā tenzorezistors tiek pievienots tilta pasīvajai daļai ar trīsvadu kabeli, kura vadu pretestība ir R_v .



6.16 att. Tilta aktīvā elementa trīsvadu pieslēguma shēma

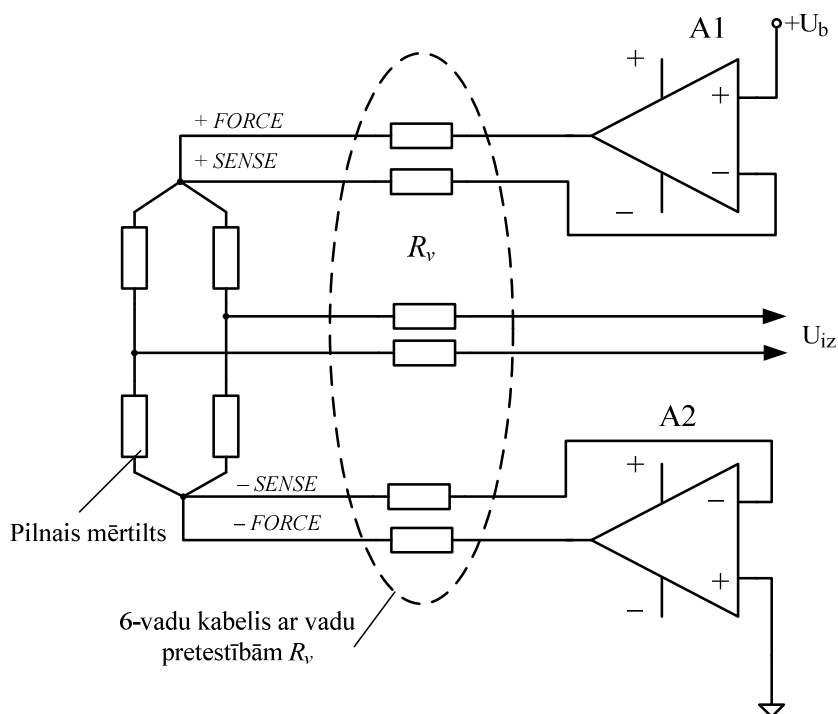
Tilta aktīvo zaru veido tenzorezistors ar pretestību $R+\Delta R$ un pievienošanas vada pretestība R_v , ar kuru virknē ieslēgta pasīva pretestība R un pievienošanas vada pretestība R_v . Tilta izejas spriegums tiek mērīts starp punktiem AB. Ja tilta slodzes pretestība ir daudzārt lielāka par tilta pretestību, tad var uzskatīt, ka slodzes strāva $I=0$. Redzam, ka pievienošanas vadu pretestības R_v ir ieslēgtas tilta aktīvā zara pretējās pusēs, un to izmaiņa temperatūras ietekmē neizmaina punkta B potenciālu. Līdz ar to tiek novērsts „nulles” dreifs un izejas sprieguma izmaiņa apkārtējās vides temperatūras izmaiņas gadījumā. Izmainoties pievienošanas vadu pretestībai izmainās tilta jutība. Pieņemot, ka tilta parametri ir tādi paši kā divvadu slēguma gadījumā, aprēķinām jutības izmaiņas rezultātā radušos kļūdu, tā nepārsniedz 0.08%.

Ja tilta slodzes pretestība ir salīdzināma ar tilta zaru pretestību, pievienošanas vados plūst slodzes strāva un tilta temperatūras stabilitāte samazinās. Šo slēgumu parasti izmanto rezistīvo temperatūras sensoru pieslēgšanai.

Četrvadu pieslēguma shēma

Tilta jutību ietekmē arī barošanas avota sprieguma stabilitāte. Spēka sensoros izmanto pilnā tilta slēgumu ar četriem aktīvajiem elementiem. šajā gadījumā arī barošanas spriegums tiek pievadīts pa garu kabeli un vadu pretestības izmaiņa ietekmē faktisko sensora barošanas spriegumu.

Lai kompensētu sprieguma zudumus kabelī, izmanto četrvadu barošanas avota pieslēgumu (Kelvina metode). Šādu slēgumu sauc arī par 6-vadu tiltu, jo pieslēguma kabelī ir seši vadi: četri barošanai un divi izejas signālam (6.17 att.).



6.17 att. Pilnā tilta četrvadu barošanas slēgums (Kelvina metode)

Tilta barošana tiek veikta pievadot spriegumu no operacionālo pastiprinātāju izejām ($\pm FORCE$). No barošanas vadu pievienošanas vietas pa vadiem ($\pm SENSE$) uz operacionālo pastiprinātāju invertējošajām augstomīgajām ieejām tiek padota faktiskā tilta barošanas sprieguma vērtība. Tā tiek realizēta negatīvā atgriezeniskā saite, kas ievērtē sprieguma zudumus kabelī. Temperatūras ietekmē mainoties vadu pretestībai

barošanas spriegums tiek uzturēts konstants. Tādā veidā tiek nodrošināta stabila mērtilta darbība neatkarīgi no pievienošanas kabeļa garuma un apkārtējās vides temperatūras. Jāatzīmē, ka operacionālajiem pastiprinātājiem jābūt maztrokšņojošiem ar minimālu nobīdes spriegumu un nulles dreifu.

Iepriekšminētais slēgums tiek realizēts praktiski visos pustiltu un pilno tiltu slēgumos rūpnieciski ražotajos signālu kondicionieros. Vadu apzīmējumi doti angļu valodā atbilstoši rūpnīcas marķējumam.

Tilta barošana ar konstantu strāvu

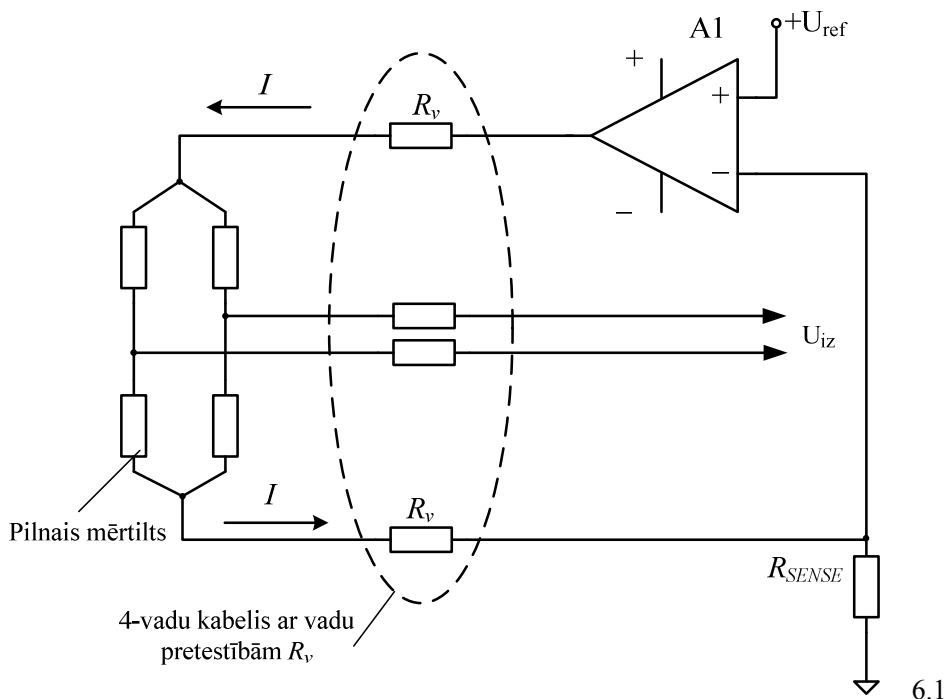
Iepriekš noskaidrojām, ka konstantās strāva barošana nodrošina labāku tilta linearitāti. Lai izslēgtu pievienošanas vadu pretestības ietekmi uz mērtilta parametriem, ieteicams izmantot 6.18 attēlā redzamo mērtilta barošanas shēmu.

Barošanas strāvas lielumu aprēķina pēc formulas (6.33):

$$I = \frac{U_{ref}}{R_{SENSE}}, \quad (6.33)$$

kur: U_{ref} – references (atbalsta) spriegums, R_{SENSE} – strāvu uzdodošā pretestība.

Tilta barošanas strāvas lielumu izvēlas atbilstoši mērtiltā izmantoto aktīvo elementu pieļaujamajai strāvai dotajos apstākļos.



8 att. Mērtilta barošanas shēma ar konstantu strāvu

Operacionālajam pastiprinātājam jābūt izvēlētam ar atbilstošu nominālo slodzes strāvu.

Svarīgi!

Lai iegūtu stabilus mērtilta parametrus un augstu mērījuma precizitāti, jānodrošina precīzs un stabils references spriegums, precīza un nemainīga rezistora R_{SENSE} pretestība un stabili operacionālā pastiprinātāja parametri.

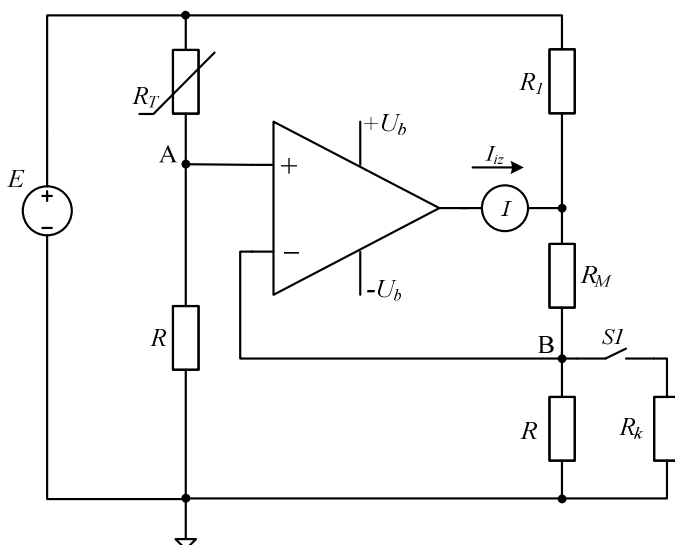
Līdzsvarotie mērtilti

Izmantojot operacionālos pastiprinātājus, var veidot tiltu slēgumus, kas mērīšanas laikā paliek līdzsvarā. Tas nodrošina augstu tilta linearitāti un mērījuma precizitāti (6.19. att.).

Tilta aktīvais elements ir metāla temperatūras sensors R_T . Sākuma stāvoklī tilta līdzsvaru nosaka sakarība $R_T = R = (R_M + R_I)$, kur R_M – tilta mērogpretestība, kas nosaka negatīvās atgriezeniskās saites stiprumu.

Šim tiltam ir strāvas izeja un sākuma stāvoklī izejas strāva $I_{iz} = 0$, jo tilta diagonālē AB (un vienlaicīgi arī OP ieejā) spriegums vienāds ar nulli. Izmainoties temperatūrai, izmainīsies arī sensora R_T pretestība un OP izejā izmainīsies strāva tā, lai kompensētu sprieguma izmaiņu tilta diagonālē AB. Strāvas izmaiņa būs proporcionāla R_T izmaiņai plašās robežās. Mērinstrumenta skala būs lineāra. Mērogpretestības R_M lielums nosaka izejas strāvas izmaiņas straujumu atkarībā no sensora pretestības izmaiņas. Tas nosaka arī mērinstrumenta jutību mērīšanas diapazonu.

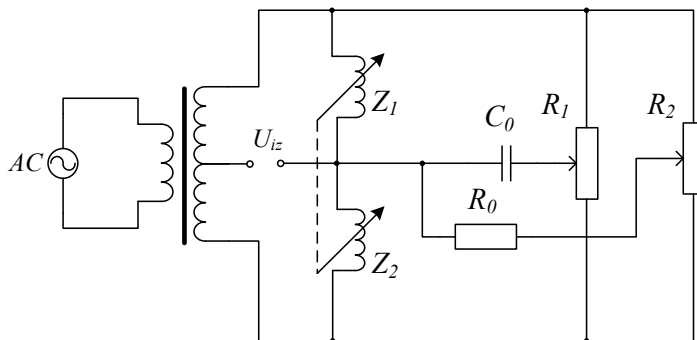
Rezistors R_k paredzēts mērtilta kalibrēšanai.



6.19 att. Līdzsvarotā mērtilta shēma

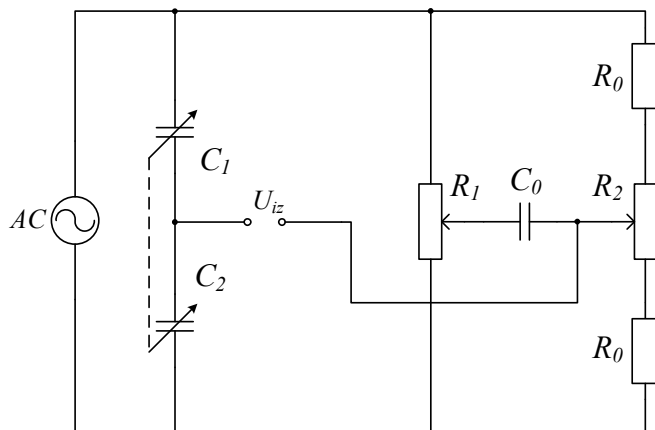
Mainstrāvas mērtilti

Induktīvo un kapacitatīvo aktīvo elementu pieslēgšanai nav iespējams izmantot līdzstrāvas mērķēdes, jo šajos gadījumos elementam piemīt reaktīvā pretestība maiņstrāvai. Parasti šo sensoru slēgumos izmanto tilta shēmas, kuras pēc uzbūves un darbības principiem ir līdzīgas līdzstrāvas tiltiem. Protams, tiltu barošanai tiek izmantots maiņspriegums un aktīvā elementa pretestībai ir komplekss raksturs. Tuvināti pieņem, ka induktīvajiem sensoriem pretestība ir induktīva un aktīvā daļa ir tuva nullei, bet kapacitatīvajiem sensoriem pretestība ir kapacitatīva un aktīvā pretestība ir bezgalīgi liela.



6.20 att. Mainstrāvas mērtiltis ar induktīvajiem aktīvajiem elementiem

Induktīvajos un kapacitatīvajos sensoros parasti izmanto diferenciālas darbības aktīvos elementus tāpēc mērtiltu veido kā pustilta slēgumu ar diviem aktīvajiem elementiem (skat. 6.19 un 6.20 att.).



6.20 att. Mainstrāvas tilts ar kapacitatīvajiem aktīvajiem elementiem

Induktīvo aktīvo elementu mērtilts tiek barots no maiņsprieguma ģenerators caur transformatoru, kura sekundārais tinums ir ar viduspunkta izvadu (6.19 att.). Transformatora sekundārais tinums vienlaicīgi tiek izmantots kā tilta pasīvais zars. Sensora induktivitātes ar kompleksajām pretestībām Z_1 un Z_2 konstruktīvi izveidotas tā, ka $\Delta Z_1 = -\Delta Z_2$, t.i. ja viena no induktivitātēm palielinās, tad otra samazinās par tādu pašu lielumu. Praksē pieņem, ka sensora kompleksā pretestība aptuveni vienāda ar tā induktīvo pretestību.

Maiņstrāvas tiltu līdzsvarošana ir sarežģītāka nekā līdzstrāvas tiltu līdzsvarošana. Kā redzam attēlā 6.19, tilta līdzsvarošanai izmanto divus potenciometrus R_1 un R_2 .

Izgatavojot aktīvos elementus, nav iespējams panākt pilnīgu identitāti gan aktīvajai, gan reaktīvajai pretestības sastāvdaļām. Arī montāžas vadi rada parazītiskās kapacitātes un induktivitātes. Lai līdzsvarotu šādu maiņstrāvas mērtiltu, nepieciešams līdzsvarot gan kompleksās pretestības aktīvo, gan reaktīvo komponenti.

Potenciometrs R_2 , atkarībā no slīdņa stāvokļa, caur rezistoru R_0 šuntē vienu vai otru sensora komplekso pretestību un līdzsvaro pretestības aktīvo komponenti. Otrs līdzsvarošanas potenciometrs R_1 ir pieslēgts caur kondensatoru C_0 un veic tilta reaktīvās komponentes līdzsvarošanu. Parasti elementu parametru tehnoloģiskā izkliede nepārsniedz $\pm 5\%$ un tilta līdzsvarošanai ir pietiekami izvēlēties C_0 tā, lai tā kapacitatīvā pretestība būtu aptuveni 10% no aktīvā elementa reaktīvās pretestības. Tāpat izvēlas arī rezistora R_0 pretestību.

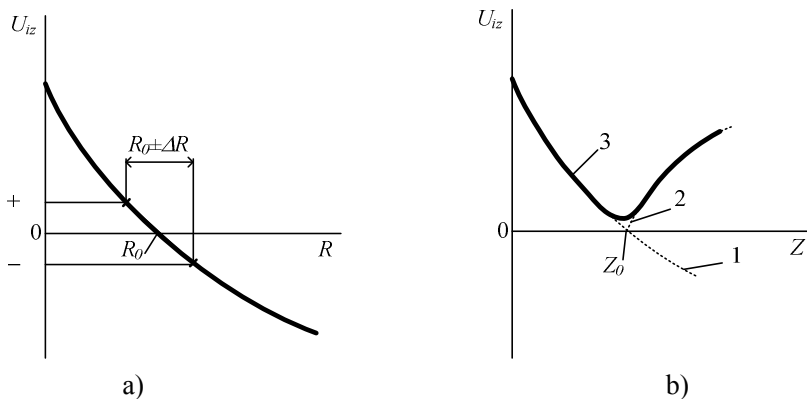
Jāatzīmē, ka tilta līdzsvarošana šuntējot tā aktīvo zaru, samazina mērtilta jutību. Labāks variants ir parādīts 6.20 attēlā, kur kapacitatīvā tilta līdzsvarošanas ķēdes šuntē tilta pasīvo zaru un nesamazina tā jutību.

Barošanas sprieguma frekvenci izvēlas atkarībā no izmantotā aktīvā elementa induktivitātes vai kapacitātes tā, lai elementa kompleksā pretestība būtu robežās no 100Ω līdz $1k\Omega$. Tas nodrošina pietiekoši lielu tilta jutību un nerada vērā ņemamu sensora pašsasilšanu. Parasti maiņstrāvas tiltu barošanas spriegums ir robežās no 3 līdz 12V un frekvence no 2 līdz 20kHz. Atsevišķos gadījumos šīs vērtības var būt arī atšķirīgas.

Maiņstrāvas tiltus var izmantot arī rezistīvu aktīvo elementu gadījumā, piemēram, spēka sensoros ar tenzorezistoriem. Šādos gadījumos, neskatoties uz sarežģītāku uzbūvi, maiņstrāvas tiltiem ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar līdzstrāvas tiltiem. Rezistīvos maiņstrāvas tiltus analizēsim nodaļā par spēka mērīšanu.

Jāatzīmē vēl viena maiņstrāvas tiltu īpatnība, kas nepiemīt līdzstrāvas tiltiem. Maiņstrāvas tilta izejas sprieguma izmaiņa atkarībā no sensora pretestības izmaiņas principiāli atšķiras no līdzstrāvas tilta izejas raksturlīknes.

Līdzstrāvas mērtilta izejas spriegums izmainās atkarībā no sensora pretestības izmaiņas. Ja tilts ir līdzsvarā (aktīvā elementa pretestība ir R_0), tad tā izejas spriegums ir vienāds ar nulli.



6.21. att. Mērtiltu izejas raksturlīknes

a – līdzstrāvas mērtilta raksturlīkne, b – maiņstrāvas mērtilta raksturlīkne

Aktīvā elementa pretestībai izmainoties par $+\Delta R$, izejas spriegums izmainās ar vienu zīmi, bet elementa pretestībai izmainoties par $-\Delta R$, izejas sprieguma zīme mainās uz pretējo. Tādejādi izejas sprieguma zīme var būt gan pozitīva, gan negatīva. Kā redzam attēlā 6.21a, pie nelielām ΔR izmaiņām šī sakarība ir praktiski lineāra.

Maiņstrāvas tilta gadījumā izejas spriegums $U_{iz}=f(Z)$, ja $Z < Z_0$, izmainās pa līkni 1 (att. 6.21b). Ja $Z=Z_0$, tad izejas spriegums $U_{iz}=0$. Aktīvā elementa pretestībai palielinoties $Z > Z_0$, izejas spriegums izmainās pa līkni 2. Nulles punktā notiek izejas signāla fāzes izmaiņa par 180° . Līdzsvarojošā tilta nevar iestatīt precīzu „0” spriegumu, jo pilnīga līdzsvarošana iespējama tikai barošanas sprieguma pamatharmonikai sinusoidāla signāla gadījumā. Praksē dažādu iemeslu dēļ barošanas sprieguma spektrā ir augstākās harmonikas (otrā, trešā u.c.), kas līdzsvara stāvoklī, kad $Z=Z_0$, rada nobīdes spriegumu un mērtilta izejas raksturlīkne atbilst līknei 3 (att. 6.21b).

Maiņstrāvas tilta trūkumi:

- ✓ nav iespējams noteikt fizikālā lieluma izmaiņas zīmi,
- ✓ nulles punkta tuvumā tilta jutība samazinās un tuvojas nullei,
- ✓ tilta raksturlīkne ir nelineāra, līkne 3 (att. 6.21b).

Šos trūkumus novērš tilta izejā pieslēdzot sinhrono fāzu detektoru. Šie detektori ir jutīgi tikai pret ierosinošā sprieguma pamatfrekvenci, bet nejutīgi pret pārējām harmonikām. Fāzes maiņas gadījumā fāzu detektora izejas signāla zīme mainās uz pretējo un tas dod iespēju noteikt mērāmā lieluma izmaiņas zīmi. Fāzu detektora raksturlīkne ir lineāra un ļauj izdarīt mērījumus ar augstu precizitāti.

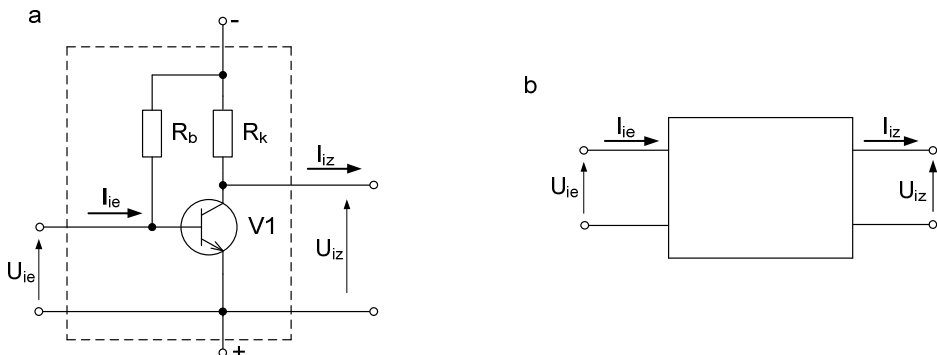
7. Instrumentālie pastiprinātāji

Elektrisko signālu pastiprināšanai izmanto speciālas ierīces, kuras sauc par pastiprinātājiem. Pastiprinātājus raksturo:

- ✓ strāvas un sprieguma pastiprināšanas koeficienti;
- ✓ pastiprināmo signālu frekvenču diapazons;
- ✓ ieejas un izejas ķēžu pretestības;
- ✓ termostabilitāte;
- ✓ pastiprināmo signālu kropļojumi.

7.1. Pastiprinātāja darbības princips

Apskatīsim tranzistora pastiprinātāju (7.1a att.), kuram ir divi ieejas, divi izejas un divi barošanas izvadi. Ja neņem vērā barošanas izvadus, tad šo pastiprinātāju var uzskatīt par četrpolu, kuru grafiski attēlo kā četrstūri ar četriem izvadiem (7.1b att.) un tā analīzei parasti izmanto četrpolu teoriju. Četrpola ieejas spailēm pievada pastiprināmo signālu, bet izejas spailēm pieslēdz slodzi. Četrpolu teorijā tā ieejā plūstošo strāvu un spriegumu apzīmē ar indeksu 1 (U_1, I_1) bet izejā – ar 2 (U_2, I_2).



7.1 att. Tranzistora pastiprinātājs un četrpola grafiskais apzīmējums

Dotos lielumus pieņemot par argumentiem un apzīmējot tos ar x , bet meklējamās lielumus pieņemot par funkcijām un apzīmējot ar y , varam vispārīgā veidā uzrakstīt sakarību:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \varphi(x_1, x_2) \\ y_2 &= f(x_1, x_2) \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Ja argumentu x_1 un x_2 vērtības iegūst nelielas izmaiņas Δx_1 un Δx_2 tad funkciju pieaugumus Δy_1 un Δy_2 var atrast izmantojot Teilora rindu. Atmetot otrās un augstāku

pakāpju locekļus kā ļoti mazus, iegūstam vienādojumus, kas izsaka funkcijas φ un f

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_1 &\approx \frac{\partial y_1}{\partial y_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \Delta x_2, \\ \Delta y_2 &\approx \frac{\partial y_2}{\partial y_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_2}{\partial x_2} \Delta x_2, \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

Par neatkarīgajiem mainīgajiem lielumiem (x_1 un x_2) var pieņemt jebkuru no četriem četrpola parametriem. Līdz ar to izraudzītajai parametru grupai iespējami seši vienādojumu pāri:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \varphi_1(i_1, i_2) \\ u_2 &= f_1(i_1, i_2) \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \varphi_2(u_1, u_2) \\ i_2 &= f_2(u_1, u_2) \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \varphi_3(u_2, i_1) \\ i_2 &= f_3(u_2, i_1) \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \varphi_4(u_1, i_2) \\ i_1 &= f_4(u_1, i_2) \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \varphi_5(u_2, i_2) \\ i_1 &= f_5(u_2, i_2) \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \varphi_6(u_1, i_1) \\ i_2 &= f_6(u_1, i_1) \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

Izmantojot izteiksmi (7.2), nosaka funkcijas φ un f :

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &\approx \frac{\partial u_1}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial u_1}{\partial i_2} \Delta i_2, \\ \Delta u_2 &\approx \frac{\partial u_2}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial u_2}{\partial i_2} \Delta i_2. \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

Parciālie atvasinājumi ir lineāru sistēmu vienādojumu koeficienti. Izvēloties koeficientiem attiecīgus apzīmējumus, var uzrakstīt sešus četrpola vienādojumu pārus:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= z_{11} \Delta i_1 + z_{12} \Delta i_2, \\ \Delta u_2 &= z_{21} \Delta i_1 + z_{22} \Delta i_2, \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_1 &= y_{11} \Delta u_1 + y_{12} \Delta u_2, \\ \Delta i_2 &= y_{21} \Delta u_1 + y_{22} \Delta u_2, \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= h_{11}\Delta i_1 + h_{12}\Delta u_2, \\ \Delta i_2 &= h_{21}\Delta i_1 + h_{22}\Delta u_2; \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_1 &= g_{11}\Delta u_1 + g_{12}\Delta i_2, \\ \Delta u_2 &= g_{21}\Delta u_1 + g_{22}\Delta i_2; \end{aligned} \right\} \quad (7.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= a_{11}\Delta u_2 + a_{12}\Delta i_2, \\ \Delta u_2 &= g_{21}\Delta u_2 + a_{22}\Delta i_2; \end{aligned} \right\} \quad (7.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= b_{11}\Delta u_1 + b_{12}\Delta i_1, \\ \Delta i_2 &= b_{21}\Delta u_1 + b_{22}\Delta i_1. \end{aligned} \right\} \quad (7.15)$$

Koeficienti z , y , h , g , a , b ir diferenciālie parametri, kuri raksturo četrpolu attiecīgajā darba punktā. Ar indeksiem, kas sastāv no cipariem 1 un 2 norāda uz parametra būtību. Cipars 1 apzīmē lielumu ieejā, cipars 2 lielumu izejā, indeksi 11 un 22 ieejas un izejas parametrus – sakarību starp strāvu un spriegumu, bet 12 un 21 atgriezenisko un tiešo pārvadi. Pastiprinātāju aprēķinos lieto pirmās trīs vienādojumu sistēmas, z , y , h .

Ar parametriem z un y tiek noteikti pastiprinātāja parametri tukšgaitas un īsslēguma režīmos, bet h parametrus nosaka, ja viens no argumentiem ir konstants. Ja $U_2 = \text{const}$, tad $\Delta U_2 = 0$, un no vienādojumiem (7.9) atrodam, ka:

✓ četrpola diferenciālā ieejas pretestība:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad (7.16)$$

✓ četrpola strāvas pārvades koeficients:

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad (7.17)$$

Ja $I_1 = \text{const}$, tad $\Delta I_1 = 0$ un no vienādojumiem (7.12) izriet, ka:

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad (7.18)$$

Tas ir četrpola atgriezeniskās saites koeficients;

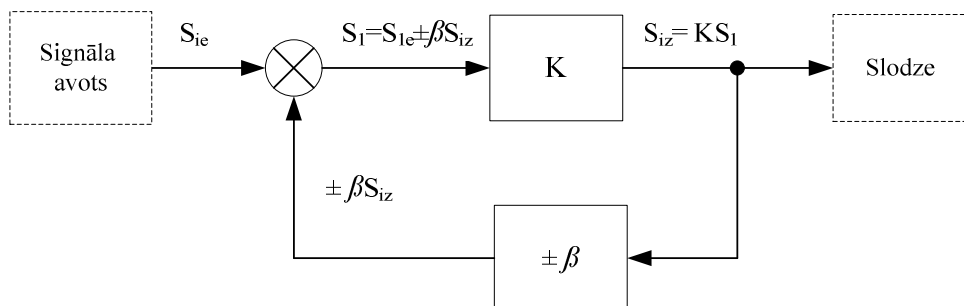
Savukārt:

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad (7.19)$$

ir četrpola izejas diferenciālā vadītspēja.

7.2. Atgriezeniskā saite

Pastiprinātāju darbības kvalitātes uzlabošanai lieto atgriezenisko saiti, t.i. daļu izejas signāla pievada pastiprinātāja ieejai. Šāda pastiprinātāja funkcionālā shēma parādīta 7.2 attēlā. Atgriezeniskās saites ķēdi raksturo atgriezeniskās saites koeficients β , kas rāda, kāda daļa no izejas signāla S_{iz} tiek pievadīta pastiprinātāja ieejai (tādēļ $\beta \leq 1$). Atgriezeniskā saite var būt pozitīva vai negatīva.



7.2 att. Pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti

Negatīvo atgriezenisko saiti sauc arī par pretsaiti, bet pozitīvo atgriezenisko saiti par līdzsaiti. Pozitīvas atgriezeniskās saites gadījumā daļu izejas signāla pievada pastiprinātāja ieejai fāzē ar ieejas signālu, tādējādi palielinot pastiprinājumu. Signāla vērtību pastiprinātāja izejā izsaka vienādojums:

$$S_{iz} = KS_1 = K(S_{ie} + \beta S_{iz}) = KS_{ie} + K\beta S_{iz}. \quad (7.20)$$

Vienkāršojot izteiksmi atrodam: $S_{iz}(1 - \beta K) = KS_{ie}$ vai $S_{iz} = \frac{KS_{ie}}{(1 - \beta K)}$.

No vienādojuma (7.20) varam noteikt pārvades (pastiprinājuma) koeficientu pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti K_{as} :

$$K_{as} = \frac{S_{iz}}{S_{ie}} = \frac{K}{(1 - \beta K)}, \quad (7.21)$$

kur S_{ie} un S_{iz} - ieejas un izejas signāli (strāva vai spriegums).

Parasti līdzsaiti izmanto, lai palielinātu pastiprinājuma koeficientu, un, ja līdzsaitei $\beta K \rightarrow 1$, tad arī saucējs tuvojas nullei, un $K_{as} \rightarrow \infty$. Tas nozīmē, ka jebkurš mazs signāls tiek pastiprināts bezgalīgi, un pastiprinātājs pārvēršas par svārstību ģeneratoru.

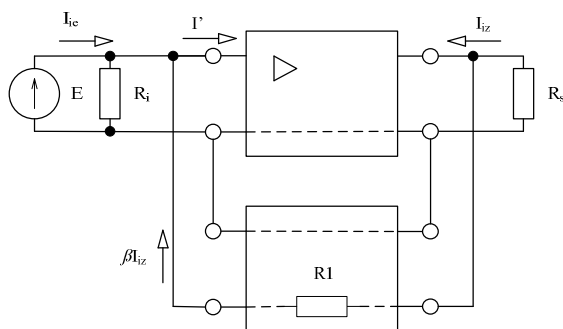
Negatīvas atgriezeniskās saites gadījumā atrodam, ka pastiprinātāja pārvades koeficients ir:

$$K_{as} = \frac{S_{iz}}{S_{ie}} = \frac{K}{(1 + \beta K)}. \quad (7.22)$$

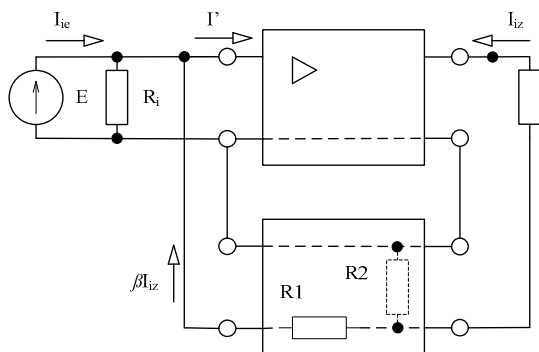
No izteiksmes (7.22) redzam, ka negatīvā atgriezeniskā saite samazina pastiprinājumu $1 + \beta K$ reizes. Tikpat reižu samazinās nelineārie kropļojumi un frekvenču kropļojumi. Ja atgriezenisko saiti veido tikai ar rezistoru, tad atgriezeniskās saites koeficients ir nemainīgs, bet, ja tās veidošanā izmanto kondensatorus vai induktivitātes, tad koeficients kļūst atkarīgs no frekvences. Otro īpašību plaši izmanto, veidojot speciālus platjoslas vai šaurjoslas pastiprinātājus.

Pretsaites slēgumu veidi

Pastiprinātāju ar negatīvu atgriezenisko saiti var attēlot ar diviem četrpoliem; viens ir invertējošs pastiprinātājs, otrs pretsaites četrpols. Pretsaites slēguma veidu apzīmē ar diviem vārdiem, no kuriem pirmais raksturo abu četrpolu ieeju savstarpējo slēgumu, bet otrais raksturo to izeju savstarpējo slēgumu. Kā pirmo apskatīsim pastiprinātāju ar negatīvu atgriezenisko saiti, kurā izmantots **paralēlā – paralēlā** slēgums (7.3 att.). Pastiprinātājam saslēgtas paralēli abu četrpolu ieejas un izejas. Šajā slēgumā no ieejas strāvas I_{ie} jāatņem pretējā fāzē esošā atgriezeniskās saites strāva βI_{iz} , kā rezultātā samazinās pastiprinātāja strāvas pastiprinājuma koeficients, bet sprieguma pastiprinājuma koeficients nemainās.



7.3 att. Pastiprinātāja slēgums *paralēlais – paralēlais*

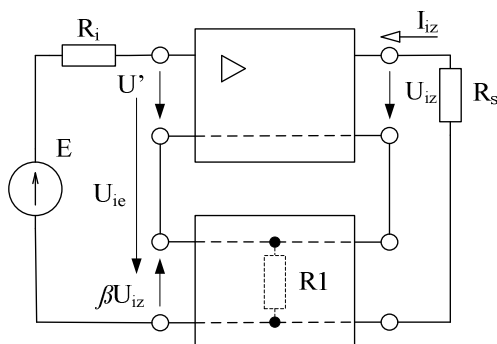


7.4 att. Pastiprinātāja *paralēlais – virknes* slēgums

Pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti, kurā izmantots **paralēlais – virknes** slēgums (7.4 att.).

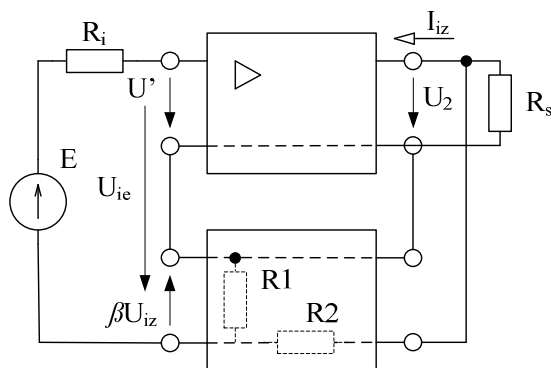
Pastiprinātājam saslēgtas paralēli abu četrpolu ieejas, bet abu četrpolu izejas slēgtas virknē. Paralēli – virknes slēgumā no ieejas strāvas I_{ie} jāatņem pretfāzē esošā atgriezeniskās saites strāva βI_{iz} , kā rezultātā samazinās pastiprinātāja strāvas pastiprinājuma koeficients, bet sprieguma pastiprinājuma koeficients paliek nemainīgs.

Pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti, kurā izmantots **virknes – virknes** slēgums (7.5 att.), virknē slēgtas abu četrpolu ieejas un izejas. Pastiprinātājam virknē slēgtajām ieejai un izejai palielinās pastiprinātāja ieejas un izejas iekšējās pretestības, bet spriegumam U_{ie} jāpieskaita pretfāzē esošais atgriezeniskās saites spriegums βU_{iz} , kā rezultātā samazinās spriegums U' un līdz ar to arī pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients, bet strāvas pastiprinājuma koeficients paliek nemainīgs.



7.5 att. Pastiprinātāja **virknes – virknes** slēgums

Pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti, kurā izmantots **virknes – paralēlais** slēgums (7.6 att.), paralēli saslēgtas abu četrpolu ieejas, bet abu četrpolu izejas saslēgtas virknē. Tā kā virknes slēgumā spriegumi summējas, tad ieejas spriegumam U_{ie} jāpieskaita pretfāzē esošais spriegums βU_{iz} , kā rezultātā spriegums U' un sprieguma pastiprinājuma koeficients, bet strāvas pastiprinājuma koeficients nemainās.



7.6 att. Pastiprinātāja **virknes – paralēlais** slēgums

7.3. Pastiprinājuma mērvienība decibels

Elektronisko pastiprinātāju jaudas, sprieguma un strāvas pastiprinājuma raksturošanai lieto specifisku, akustikā lietotu mērvienību – decibels, kuru apzīmē kā dB. Akustikā šo mērvienību lieto, lai raksturotu skaņas intensitāti, skaņas spiedienu, skaļumu, kā arī trokšņu līmeņa un skaņas kropļojumu novērtēšanai.

Kā izriet no mērvienības nosaukuma saliktna „deci” tā ir desmitā daļa lielākas mērvienības „bels”. Šīs mērvienība nosaukta telefona izgudrotāja, mūziķa un akustiķa A. Bela vārdā. Bels ir skaņas divu jaudu P_1 un P_2 attiecības decimāllogaritms

$$N_{(B)} = \lg \frac{P_2}{P_1}. \quad (7.23)$$

Šī vienība radusies sakarā ar cilvēka dzirdes īpatnībām. Skaļuma sajūta nav proporcionāla skaņas spiedienam, bet gan skaņas spiediena logaritmam. Vislielākā dzirdamā skaņas spiediena (sāpju sliekšņa) attiecība pret vismazāko dzirdamo skaņas spiedienu (dzirdamības sliekšni) ir $10^{13}:1 = 10^{13}$. Tātad cilvēka auss **dinamiskais** diapazons ir 13 B. Tā kā bels ir ļoti liela vienība, praksē lieto desmit reizes mazāku vienību – **decibelu** (dB):

$$N_{(dB)} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}. \quad (7.24)$$

Skaņas jaudas pieaugumu no 1W līdz 2W auss jūt vienmēr, bet pieaugumu no 50W līdz 51W vairs nejūt. Turpretī skaņas izmaiņu par vienu decibelu auss var konstatēt pie jebkuras sākuma jaudas. Tātad auss izšķiršanas spēja ir 1 dB, dzirdamības sliekšnis – 0 dB un sāpju sliekšnis 130 dB.

Elektrisko jaudu var izteikt šādi:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 R, \quad (7.25)$$

tad jaudu attiecība:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2, \quad (7.26)$$

Ievietojot formulā (7.24):

$$N_{(dB)} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg \frac{I_2}{I_1}. \quad (7.27)$$

Tātad decibelos var izteikt divu jaudu, divu spriegumu vai divu strāvu attiecības. Pastiprinātājiem, kuriem $U_2 > U_1$, $I_2 > I_1$ un $P_2 > P_1$, pastiprinājuma koeficienti K_u , K_I

un K_p ir pozitīvi, bet ierīcēm, kurām pastiprinājums ir mazāks par vienu, t.i. $U_2 < U_1$, $I_2 < I_1$ un $P_2 < P_1$ pastiprinājums decibelos ir negatīvs.

Decibelos var izteikt ne tikai divu lielumu attiecību, bet arī šo lielumu absolūtās vērtības. Šai nolūkā ir jāizvēlas mērāmā lieluma nulles līmenis. Par jaudas nulles līmeni pieņem jaudu $P_0 = 1\text{mW}$, kas izkliedējas rezistorā ar pretestību $600\ \Omega$. Šāds jaudas nulles līmenis radies vadu sakaru tehnikā. Vara divvadu līnijas pretestība $800\ \text{Hz}$ maiņstrāvai ir aptuveni $600\ \Omega$ un kvalitatīvs ogles mikrofons šādai līnijai atdod jaudu 1mW .

Sprieguma nulles līmeni U_0 atrod no jaudas formulas

$$U_0 = \sqrt{P_0 \cdot 600} = \sqrt{10^{-3} \cdot 600} \approx 0,775\text{V}$$

bet strāvas nulles līmeni – no formulas

$$I_0 = \sqrt{\frac{P_0}{600}} = \sqrt{\frac{10^{-3}}{600}} \approx 1,29\text{mA}$$

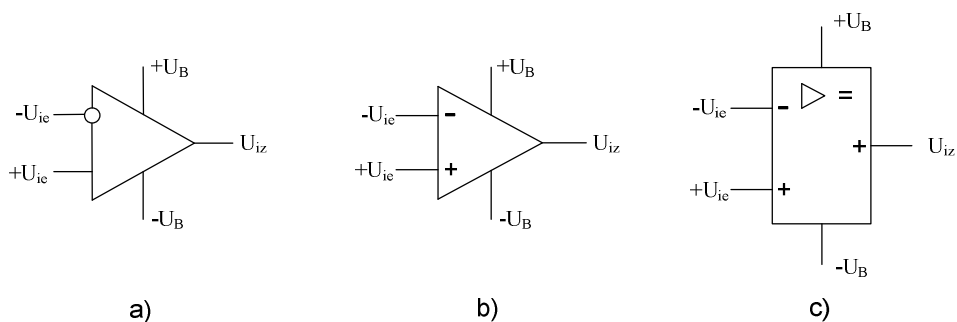
Visu jaudu, spriegumu un strāvu līmeņi, kas zemāki par nulles līmeni, ir negatīvi, bet līmeņi, kas augstāki par atbilstošajiem nulles līmeņiem, ir pozitīvi. Tā, piemēram, spriegums $77,5\ \text{V}$ ir 100 reizes lielāks par nulles līmeni $0,775\ \text{V}$, un tā lielums decibelos ir $20\lg 100 = +40\ \text{dB}$.

Matemātiskās darbības ar decibelu neatšķiras no darbībām ar logaritmiem: divu lielumu reizinājums atbilst šo lielumu summai decibelos, bet šo lielumu dalījums atbilst starpībai decibelos. Tā, piemēram, nosakot pirmās sprieguma pastiprināšanas pakāpes pastiprinājuma koeficientu K_u , izmērītais ieejas spriegums $U_1 = -3,5\ \text{dB}$ ($0,52\ \text{V}$) un izejas spriegums $U_2 = 15\text{dB}$ ($4,44\text{V}$).

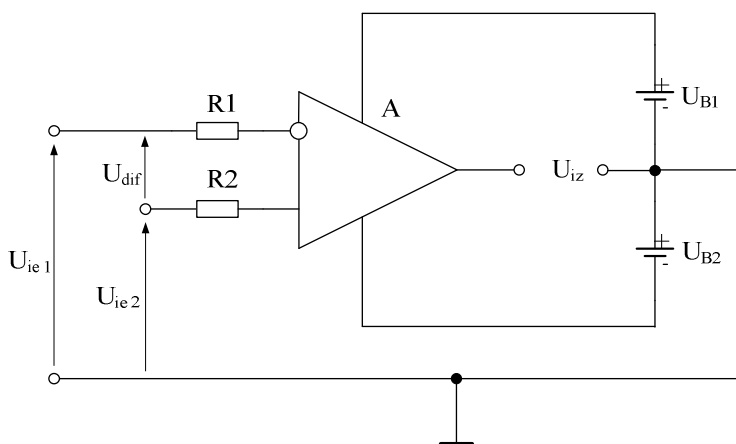
7.4. Operacionālā pastiprinātāja uzbūve

Operacionālais pastiprinātājs (OP) ir daudzpakāpju līdzstrāvas pastiprinātājs ar diferenciālu ieeju. OP izgatavo kā integrālās mikroshēmas. Operacionālo pastiprinātāju attēlošanai shēmās lieto grafiskus simbolus, kuri doti 7.7 attēlā. Pastiprinātājam ir divas ieejas – tiešā ieeja (U_{ie1}) un inversā ieeja (U_{ie2}), divi barošanas avoti ($+U_B$, $-U_B$) un viena izeja (U_{iz}).

Kā redzams 7.8 attēlā, abu avotu kopējais savienojuma punkts kalpo par pastiprinātāju sistēmas kopējo punktu, jo visi OP izejas un ieejas signāli tiek attiecināti uz šo kopējo vadu.



7.7 att. Operacionālā pastiprinātāja grafiskais simbols



7.8 att. Operacionālā pastiprinātāja pieslēguma shēma

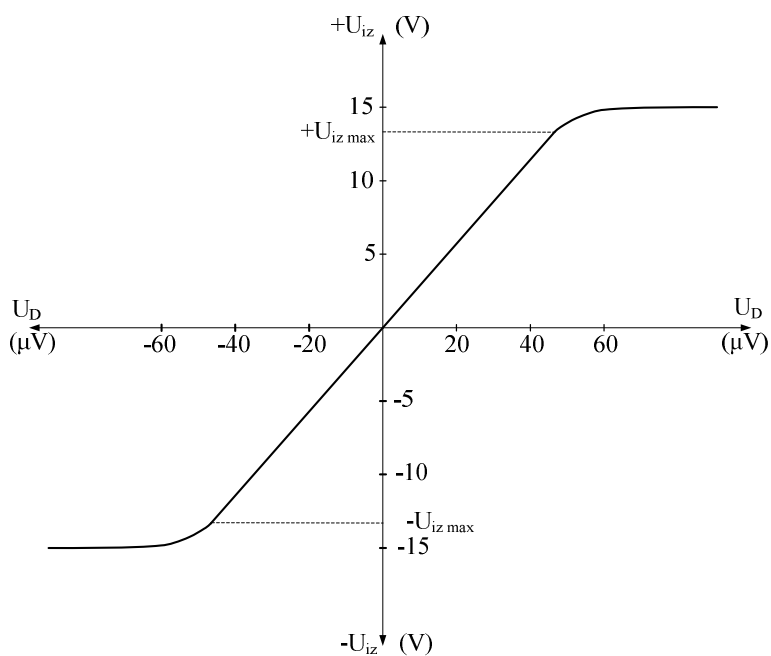
Spriegumu U_{ie1} un U_{ie2} diferenci apzīmē kā diferenciālo ieejas spriegumu U_{dif} . Operacionālais pastiprinātājs pastiprina tikai šo diferenciālo spriegumu U_{dif} , kuru apraksta vienādojums:

$$U_{dif} = U_{ie1} - U_{ie2} . \quad (7.28)$$

Diferenciālais ieejas spriegums U_{dif} ir iespējams gan pozitīvas, gan arī negatīvas vērtības. Līdz ar to pie simetriska OP barošanas sprieguma arī izejas spriegums U_{iz} var būt pozitīvs vai negatīvs. Bez tam OP izejas spriegums U_{iz} ir proporcionāls tā divu ieeju U_{ie1} un U_{ie2} starpībai;

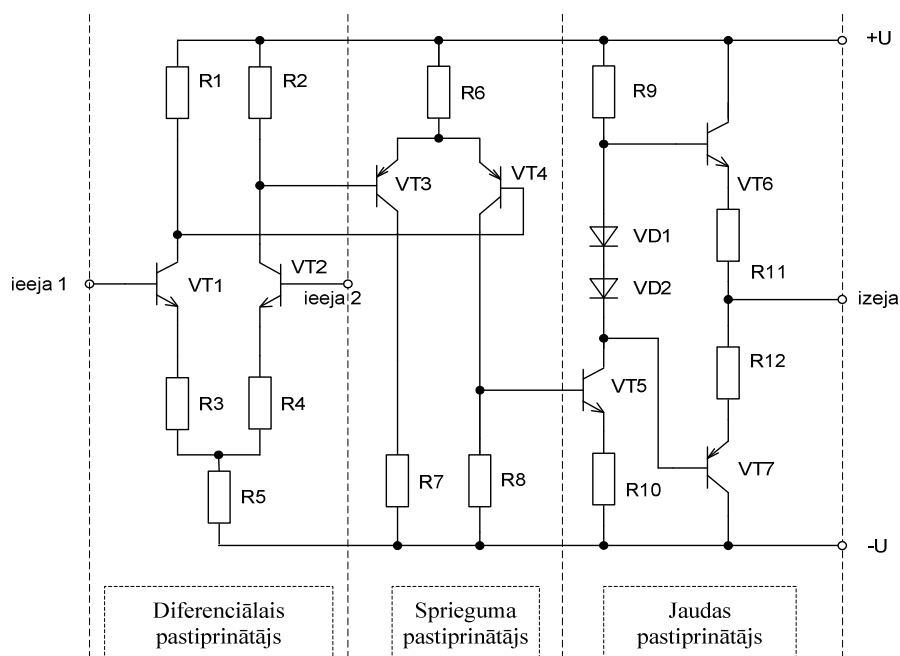
$$U_{iz} = K(U_{ie1} - U_{ie2}) \quad (7.29)$$

Operāciju pastiprinātāja pārvades raksturlīkne parādīta 7.9 attēlā. Redzam, ka noteiktā diapazonā OP strādā lineāri, bet sakarā ar lielo sprieguma pastiprinājumu jau pie maziem ieejas spriegumiem nonāk piesātinājumā.



7.9 att. Operacionālā pastiprinātāja izejas raksturlīkne

Apskatīsim vienkāršotu operacionālā pastiprinātāja shēmu, kura dota 7.10 attēlā.



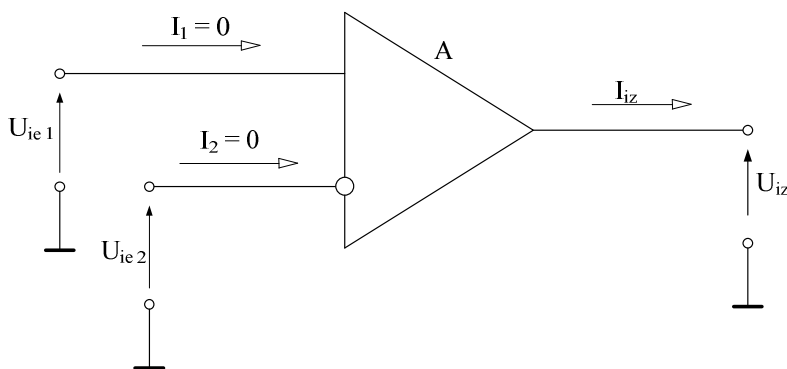
7.10 att. OP vienkāršota iekšējā elektroniskā shēma

Ieejas kaskāde izveidota kā simetriskais diferenciālais pastiprinātājs ar diviem tranzistoriem VT1 un VT2. Diferenciālā pastiprinātāja izejas signāls tiek padots uz sprieguma pastiprinātāju (tranzistori VT3, VT4), kurš arī ir izveidots kā nesimetriskais diferenciālais pastiprinātājs. Izejas kaskādi veido saskaņojošais tranzistors VT5 un komplementārais emitera atkārtotājs, kuru veido tranzistori VT6 un VT7.

Abas diferenciālo pastiprinātāju kaskādes nodrošina nepieciešamo sprieguma pastiprinājumu, bet izejas kaskāde nodrošina jaudas pastiprinājumu.

Ideālu OP (7.11 att.) apraksta (7.29) vienādojums, kur lielumu K sauc par pastiprinājuma koeficientu. Pastiprināšanas koeficientu K precīzi nosaka frekvenču īpašības, kuras nav atkarīgas no signāla līmeņa, laika un temperatūras, kā arī nemainās no ierīces uz ierīci. Bez tam jābūt izpildītam nosacījumam: $U_{iz} = 0$, ja $U_{ie1} = U_{ie2}$, neatkarīgi no tā, cik lieli tie būtu.

Reālā OP pastiprinājums K ir funkcija, kura atkarīga no signāla līmeņa, laika, temperatūras un barošanas avota sprieguma, kā arī mainās no iekārtas uz iekārtu – dažkārt saukts kā piecu lielumu faktors. Bez tam reālam operacionālajam pastiprinātājam ieejās ir nobīdes spriegums (parasti dažī milivolti), kurš pieskaitāms pie $U_{ie1} - U_{ie2}$ un var būt atšķirīgs katrai konkrētai ierīcei.



7.11 att. Ideāls operacionālais pastiprinātājs

Ideāla un reāla operacionālo pastiprinātāju raksturīgāko īpašību salīdzinājums dots 7.1. tabulā. Kā redzams no tabulas, vairums no reālā OP parametriem tuvinās ideāla OP parametriem.

Rezam, ka reāla OP raksturlielumi var mainīties plašās robežās. Tas ir atkarīgs gan no paša OP konstruktīvā izveidojuma, gan no atgriezenisko saišu izmantošanas veida.

Mūsdienu operacionālie pastiprinātāji nodrošina gan lielus pastiprinājuma koeficientus, gan ļoti labu temperatūras stabilitāti un plašu frekvenču joslu.

7.1 tabula. **OP raksturīgāko īpašību salīdzinājums**

Parametri	Ideāls OP	Reāls OP
Sprieguma pastiprināšanas koeficients K	∞	$20 \cdot 10^3 \dots 200 \cdot 10^3$
Ieejas pretestība R_{ie} , (Ω)	∞	$10^5 \dots 10^{15}$
Izejas pretestība R_{iz} , (Ω)	0	30 ... 2000
Caurlaides frekvenču josla, (Hz)	0 ... ∞	0 ... 10^7
Izejas spriegums, ja $U_{ie1} = U_{ie2}$, (V)	0	≈ 0
Temperatūras ietekme $\Delta U = f(^{\circ}\text{C})$	nav	$-50^{\circ}\text{C} \dots +75^{\circ}\text{C}$ nav vērā ņemama

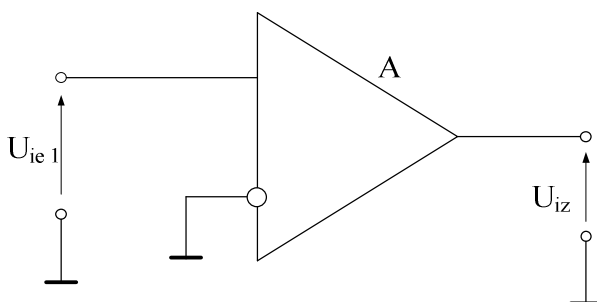
7.5. OP pamatslēgumu shēmas

Ideāls OP ir universāls pastiprinātājs, kuru var izmantot dažādu elektronisku ierīču izveidē. Tādēļ apskatīsim slēgumu veidus, kādus var izveidot ar OP.

Neinvertējošs pastiprinātājs

Ideālu operacionālo pastiprinātāju var izmantot kā neinvertējošu pastiprinātāju (7.12 att.), kur ieejas spriegums U_{ie1} ir pievadīts tiešās ieejas spailei. Izejas spriegumu nosaka izmantojot vienādojumu:

$$U_{iz} = K \cdot U_{ie}. \quad (7.30)$$



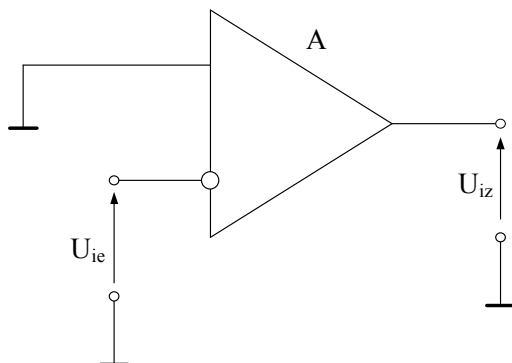
7.12 att. **Neinvertējošs pastiprinātājs**

Invertējošs pastiprinātājs

Ideāls operacionālais pastiprinātājs kā invertējošs pastiprinātājs redzams 7.13 attēlā, kuram ieejas spriegums U_{ie} pievadīts OP inversās ieejas spailei. Izejas

spriegumu nosaka izmantojot vienādojumu:

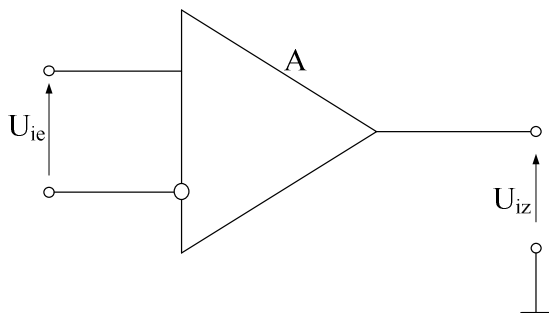
$$U_{iz} = -K \cdot U_{ie} \quad (7.31)$$



7.13 att. Invertējošs pastiprinātājs

Diferenciālais pastiprinātājs

Ideālu OP var izveidot kā diferenciālo pastiprinātāju ar mainīgu (peldošu) ieeju, kurš redzams 7.14 attēlā, un kuram sakarību starp izejas un ieejas lielumiem izsaka vienādojums (7.29).



7.14 att. Diferenciālais pastiprinātājs

OP ar atgriezenisko saiti

Lietojot operacionālo pastiprinātāju, tā īpašības var būtiski uzlabot, ja lieto piemērotu atgriezenisko saiti. Atgriezeniskā saite uzlabo stabilitāti, samazina traucējošos signālus, palielina darbības ātrumu un frekvenču joslas platumu, samazina nelinearitāti. Galvenā uzmanība būs veltīta negatīvai atgriezeniskai saitei (7.15 att. un 7.16 att.), tas ir gadījumam, kad daļa izejas signāla tiek pievadīta inversās ieejas spaiļei.

Invertējošam pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti ieejas signāls caur rezistoru R_1 pievadīts invertējošai ieejai un neinvertējošā ieeja saņemta, bet izeja caur rezistoru R_{atgr} savienota ar invertējošo ieeju. Ņemot vērā, ka OP ieejas pretestība ir bezgalīgi

liela, pastiprinātāja inversās ieejas strāva ir vienāda ar nulli, bet tas nozīmē, ka ieejas strāva I_1 plūst tikai caur rezistoru R_1 . Tādā gadījumā ieejas strāva

$$I_1 = \frac{U_{ie}}{R_1}, \quad (7.32)$$

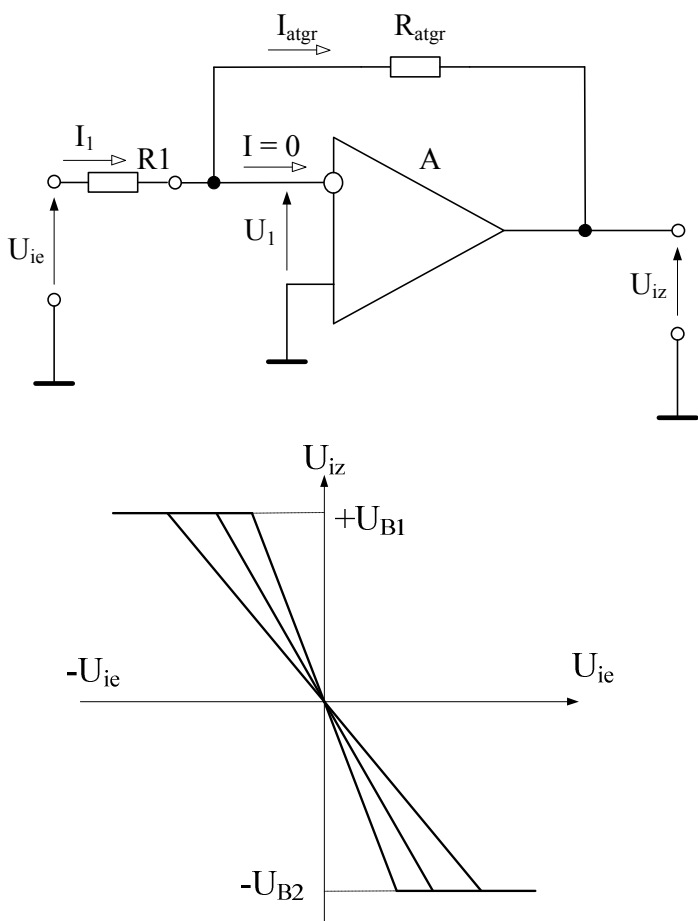
un šī strāva plūst tikai caur R_{atgr} .

Atbilstoši Kirhofa likumam $U_{iz} + U_{Ratgr} - U_1 = 0$, vai

$$U_{iz} = -U_{Ratgr}, \quad (7.33)$$

bet U_{Ratgr} nosaka strāva I_1 , kas plūst caur R_{atgr} , tas ir

$$U_{iz} = -I_1 R_{atgr} = -U_{ie} \frac{R_{atgr}}{R_1}. \quad (7.34)$$



7.15 att. Invertējošs pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti

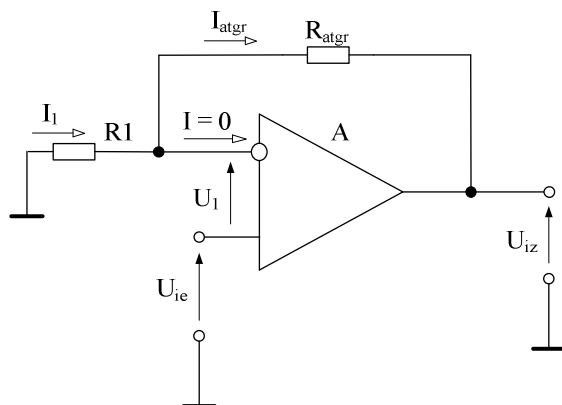
Šajā izteiksmē redzam, ka sakarību U_{iz} un U_{ie} nosaka rezistoru R_{atgr} un R_1 pretestību attiecība, tātad tā faktiski ir pastiprinājuma koeficients K . Tas ir spēkā, kamēr izejas sprieguma vērtības ir mazākas par barošanas spriegumu. Kā redzams no grafika (7.15 att.), jo lielāks pastiprinājums, jo mazāks ir U_{ie} izmaiņu diapazons, pie kura izejas spriegums U_{iz} mainās lineāri apgabalā no $+U_{B1}$ līdz $-U_{B2}$.

Neinvertējošam pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti spriegums starp invertējošo un neinvertējošo ieeju vienāds ar nulli, tad spriegums uz dalītāja R_1 - R_{atgr} rezistora R_1 ir vienāds ar U_1 . No izejas puses šo spriegumu var noteikt ar vienādojumu

$$U_1 = U_{iz} \frac{R_1}{R_1 + R_{atgr}}. \quad (7.35)$$

Izmantojot izteiksmi (7.35) var noteikt neinvertējošā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficientu:

$$K = \frac{U_{iz}}{U_{ie}} = \frac{R_1 + R_{atgr}}{R_1} \quad (7.36)$$

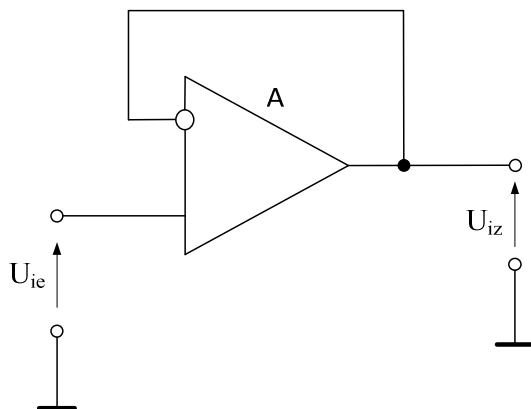


7.16 att. Neinvertējošs pastiprinātājs ar negatīvu atgriezenisko saiti

Ļoti svarīgi ir tas, ka neinvertējošā OP ieejas pretestība $r_{ie} = KU_1$ ir ļoti liela. Tās vērtība ir $10^{10} \dots 10^{13} \Omega$.

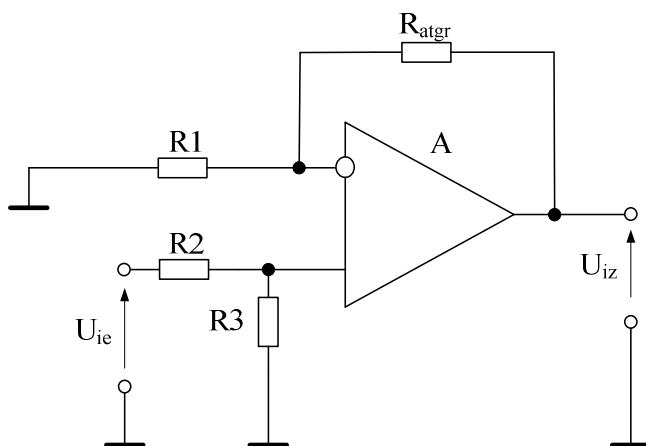
Sprieguma atkārtotājs

Ja ar vāju signālu jānodrošina samērā lielu slodzes strāvu, tad OP izveido kā sprieguma atkārtotāju. Sprieguma atkārtotājā izeju savieno tieši ar invertējošo ieeju, bet signālu pievada neinvertējošajai ieejai (7.17 att.). Tādā gadījumā $U_{iz} = U_{ie}$, pie kam mainoties sprieguma U_{ie} polaritātei, mainās arī U_{iz} polaritāte.



7.17 att. **Sprieguma atkārtotājs**

Gadījumā, ja nav nepieciešams nodrošināt ļoti lielu ieejas pretestību, tad sprieguma atkārtotāju izveido kā neinvertējošu pastiprinātāju ar sprieguma dalītāju ieejā (7.18 att.).



7.18 att. **Neinvertējošais OP ar sprieguma dalītāju ieejā**

Pastiprinātāja izejas spriegumu nosaka pēc vienādojuma:

$$U_{iz} = \frac{R_1}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_{atgr} + R_1}{R_1} U_{ie}. \quad (7.37)$$

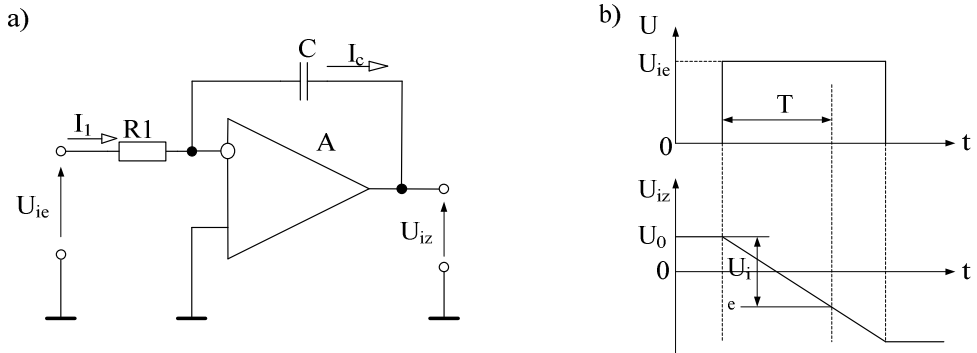
Ja tiek izpildīts nosacījums $R_1 = R_3$ un $R_{atgr} = R_2$, tad sprieguma pastiprinājums $K_u = 0$, un $U_{iz} = U_{ie}$.

Obligāti jāievēro nosacījums, ka pastiprinātāja neinvertējošās ieejas potenciāls nedrīkst pārsniegt barošanas spriegumu.

Integrators

Integrators ir operacionālais pastiprinātājs, kura atgriezenisko saiti veido caur kondensatoru C (7.14. att.). Integratoru apraksta sekojoši vienādojumi:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U_{ie}}{R_1} \\ I_c &= -\frac{dU_{iz}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (7.38)$$



7.19 att. Integratora shēma un sprieguma diagramma

Ņemot vērā, ka $I_1 = I_c$, atrodam, ka

$$\frac{U_{ie}}{R_1} = -C \frac{dU_{iz}}{dt} \quad (7.39)$$

Pārveidojot izteiksmi (7.39) $\frac{dU_{iz}}{dt} = -\frac{U_{ie}}{R_1 C}$ iegūstam:

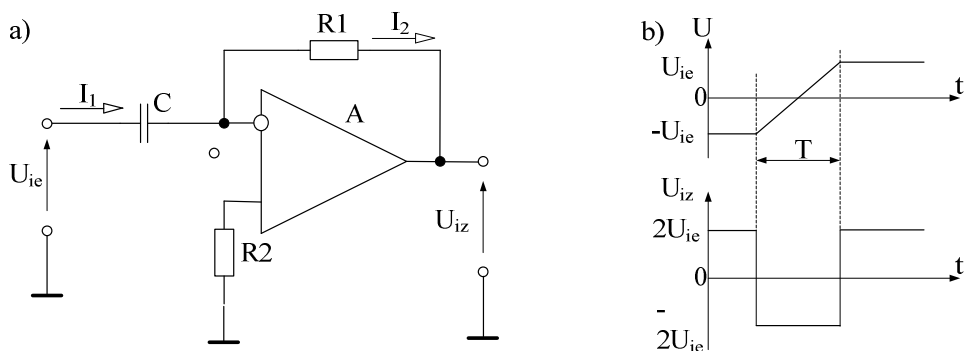
$$U_{iz} = -\frac{1}{T} \int U_{ie} dt + U_0, \quad (7.40)$$

kur $T = R_1 C$ - integrēšanas laika konstante, U_0 - sākotnējā sprieguma vērtība.

Ja integratora ieejas spriegums $U_{ie} = 0$, tad izejas spriegums nemainās. Bet ja ieejas signāls ir laikā nemainīgs un vienāds ar U_{ie} (7.19 b att.), tad intervālā $t = T$ izejas spriegums mainās par U_{ie} lielumu.

Diferenciators

Ierīci, ar kuru var izpildīt diferencēšanas operācijas sauc par diferenciatoru.



7.20 att. Diferenciatora shēma un sprieguma diagramma

To izveido, izmantojot operacionālo pastiprinātāju, kura ieejā ieslēgts kondensators C (7.20 att.). Vienādojumu sistēma, kas apraksta diferenciatoru ir:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= C \frac{dU_{ie}}{dt} \\ I_2 &= -\frac{U_{iz}}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (7.41)$$

Ņemot vērā, ka $I_1 = I_2$, iegūstam izejas sprieguma izteiksmi

$$U_{iz} = -R_2 C \frac{dU_{ie}}{dt} = -T \frac{dU_{ie}}{dt}, \quad (7.42)$$

kur $T = R_2 C$ - diferencēšanas laika konstante.

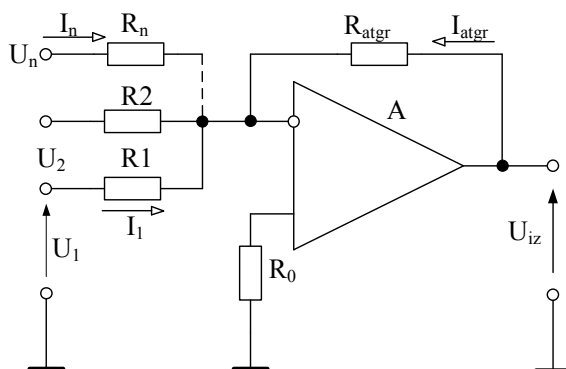
Summators

Ierīci, ar kuras palīdzību var veikt vairāku elektrisko signālu mēroga summēšanu, sauc par summatoru. Par summatoru izmanto operacionālo pastiprinātāju ar atgriezenisko saiti, kura ieeju veido n rezistori (7.21 att.). Ja visi rezistori, ieskaitot atgriezenisko saiti ir ar vienādu pretestību ($R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_{atgr}$), tad izejas spriegums ir ieejas spriegumu summa.

Pēc Kirhofa likuma $-I_{atgr} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$. Tā kā $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$, $I_2 = \frac{U_2}{R_2}$ utt.,

tad izejas spriegumu izsaka vienādojums:

$$U_{iz} = -\left(\frac{R_{atgr}}{R_1} U_1 + \frac{R_{atgr}}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_{atgr}}{R_n} U_n\right). \quad (7.43)$$



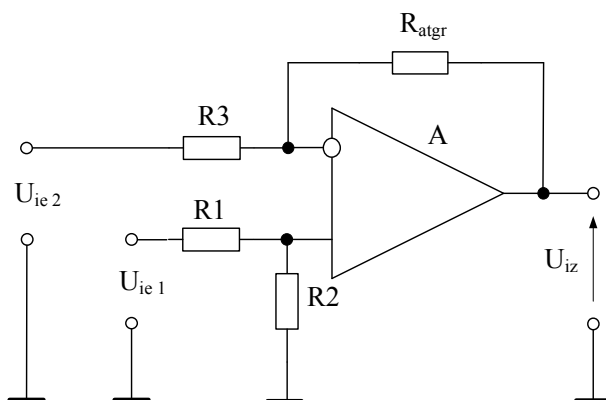
7.21 att. **Summatora shēma**

Tā kā visi rezistori ir ar vienādu pretestību, tad

$$U_{iz} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n) \frac{R_{atgr}}{R_{ie\Sigma}}. \quad (7.44)$$

Atskaitīšanas ierīce

Pieņemsim, ka mēs gribam parādīt izejas spriegumu, kas ir vienāds ar matemātisku starpību starp diviem ieejas spriegumiem. Tādu operāciju var izpildīt, lietojot operacionālo pastiprinātāju ar paņēmieni, kur signāli ir pievadīti caur atbilstošu rezistoru savienojumu invertējošajai un neinvertējošajai ieejai (7.22 att.).



7.22 att. **Atskaitīšanas ierīces shēma**

Ar superpozīcijas metodi mēs varam noteikt šīs elektriskās ķēdes izejas spriegumus katrai ieejai atsevišķi. Vispirms pieņemsim, ka inversā ieeja U_{ie2} ir sazemēta, tad spriegums, ko rada ieejai U_{ie1} pievadītais signāls, ir:

$$U^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ie1}, \quad (7.45)$$

bet, ievērtējot atgriezeniskās saites ietekmi, pilns izejas spriegums ir

$$U_{iz}^+ = \frac{R_3 + R_{atgr}}{R_3} U^+ = \left(\frac{R_3 + R_{atgr}}{R_3} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) U_{ie1}. \quad (7.46)$$

Tad pieņemam, ka saņemta ir ieeja U_{ie1} , un iegūstam izteiksmi

$$U_{iz}^- = \frac{-R_{atgr}}{R_3} U_{ie2}. \quad (7.47)$$

Tālāk atrodam rezultējošo izejas signālu gadījumam, ja ir abi ieejas signāli, tad to nosaka vienādojums

$$U_{iz} = U_{iz}^+ + U_{iz}^- = \left(\frac{R_3 + R_{atgr}}{R_3} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) U_{ie1} - \left(\frac{R_{atgr}}{R_3} \right) U_{ie2}. \quad (7.48)$$

Ja rezistoru pretestības izvēlētas, ievērojot noteikumu

$$R_1 = R_3 = R \text{ un } R_2 = R_{atgr} = A \cdot R, \quad (7.49)$$

Ievērojot noteikumu (7.49), pārrakstīsim vienādojumu (7.48) un iegūsim:

$$U_{iz} = \left(\frac{R + AR}{R} \right) \left(\frac{AR}{R + AR} \right) U_{ie1} - \frac{AR}{R} U_{ie2} = \frac{AR}{R} U_{ie1} - \frac{AR}{R} U_{ie2} = A(U_{ie1} - U_{ie2}). \quad (7.50)$$

Tad sakarība starp izejas lielumu un ieejas signāliem būs proporcionāls abu ieeju signālu mērogu starpībai.

Vispārējā gadījumā atskaitošo operacionālo pastiprinātāju raksturo vienādojums (7.51)

$$U_{iz} = a_1 U_{ie1} - a_2 U_{ie2} \quad (7.51)$$

kur koeficienti $a_1 = \left(1 + \frac{R_{atgr}}{R_3} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$ un $a_2 = \frac{R_{atgr}}{R_3}$.

Aproksimējošie pastiprinātāji

Lai varētu iegūt nelineāru sakarību starp OP ieejas un izejas spriegumiem izmanto aproksimējošos pastiprinātājus. Nelinearitāti izejas raksturlīknē panāk ar stabilitroniem, kurus pievieno paralēli atgriezeniskās saites rezistoram R_{atgr} (7.23a un b att.).

Lai iegūtu simetriskas raksturlīknes abos kvadrantos, stabilitronus $V1$, $V2$ un $V3$,

$V4$ savieno pretslēgumā. Stabilizācijas spriegums stabilitroniem $V1$ un $V2$ ir vienāds (U_{V1}), arī $V3$ un $V4$ stabilizācijas spriegums ir vienāds (U_{V2}).

Ja izejas spriegums ir mazāks par stabilitrona $V1$ stabilizācijas spriegumu, tad atgriezeniskā saite realizējas caur R_{atgr} un izejas spriegums

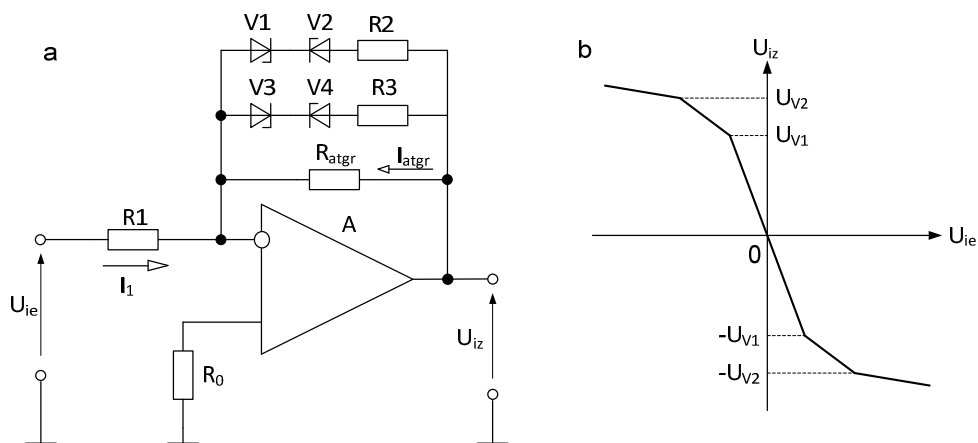
$$U_{iz} = -U_{ie} \frac{R_{atgr}}{R_1}. \quad (7.52)$$

Kad izejas spriegums kļūst lielāks par stabilitrona $V1$ stabilizācijas spriegumu, tad diodes $V1$ un $V2$ sāk vadīt strāvu. Strāvas izmaiņu caur diodēm apraksta vienādojums (7.53):

$$I_{V1} = \frac{\pm U_{iz} - U_{V1}}{R_2}. \quad (7.53)$$

Šajā gadījumā caur R_{atgr} plūstošā strāva samazinās attiecībā pret I_1 par stabilitrona strāvas daļu:

$$I_{Ratgr} = \frac{U_{ie}}{R_1} + \frac{U_{iz} \pm U_{V1}}{R_2}. \quad (7.54)$$



7.23 att. Aproximējošā pastiprinātāja shēma un raksturlīknes

Līdz ar to, turpinot palielināt ieejas spriegumu, izejas sprieguma pieaugums samazinās. Šo procesu apraksta vienādojums:

$$U_{iz} = \frac{-U_{ie} \frac{R_{atgr} \cdot R_1}{R_1} \pm U_{V1} R_{atgr}}{R_{atgr} + R_2}. \quad (7.55)$$

Kad izejas spriegums kļūst lielāks par stabilitrona $V3$ stabilizācijas spriegumu, tad arī diodes $V3$ un $V4$ sāk vadīt strāvu, un caur R_{atgr} plūstošā strāva attiecībā pret I_1 samazinās vēl vairāk

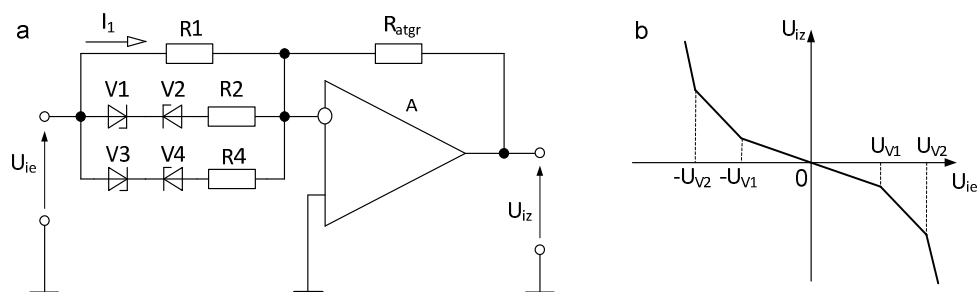
$$I_{Ratgr} = \frac{U_{ie}}{R_1} + \frac{U_{iz} \pm U_{V1}}{R_2} + \frac{U_{iz} \pm U_{V2}}{R_3}. \quad (7.56)$$

Rezultējošā izejas sprieguma atkarība no ieejas sprieguma dota 7.23b attēlā.

Otrā tipa aproksimējošu pastiprinātāju var izveidot, ja stabilitronus ievieto OP ieejas ķēdē (7.24a att.). Stabilitronus $V1$, $V2$ un $V3$, $V4$ pieslēdz paralēli ieejas rezistoram $R1$. Palielinot ieejas spriegumu U_{ie} , līdz tas sasniedz stabilitrona $V1$ stabilizācijas spriegumu, caur to sāk plūst strāva

$$I_1 = \frac{U_{ie}}{R_1} + \frac{U_{ie} \pm U_{V1}}{R_2}, \quad (7.57)$$

bet tas nozīmē, ka ieejas spriegumam turpinot palielināties, izejas spriegums pieaugs ātrāk. Tad, kad sāks vadīt arī $V3$, izejas spriegums palielināsies vēl vairāk. Sakarība starp izejas un ieejas spriegumiem parādīta 7.24b attēlā.



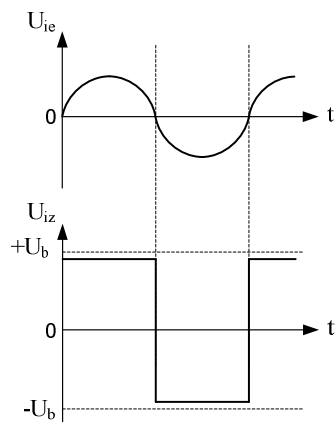
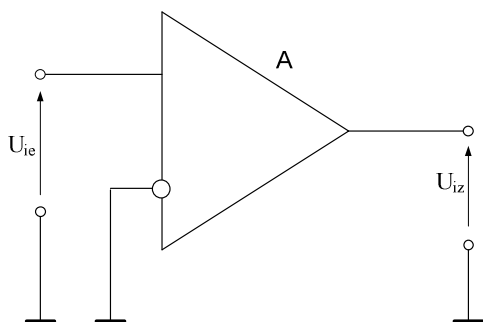
7.24 att. Otrā tipa aproksimējošā pastiprinātāja shēma un raksturliknes

Komparators

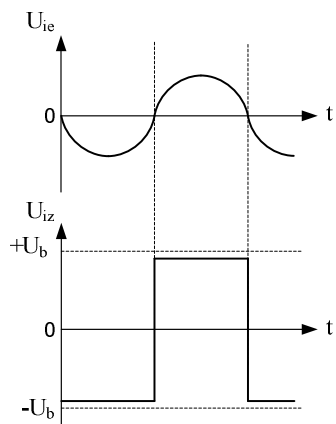
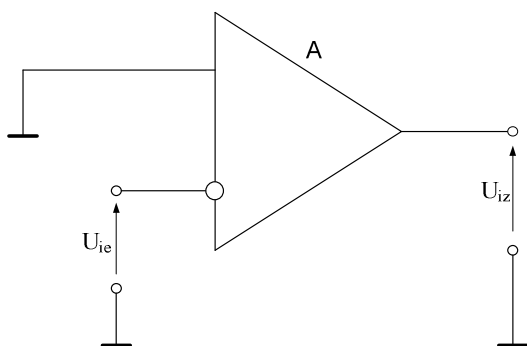
Tā ir elektroniska ierīce, kas veic divu ieejas signālu salīdzināšanu. Komparatora slēgumu shēmas un to spriegumu diagrammas parādītas 7.20. attēlā.

Pirmās divas shēmas domātas ieejas sprieguma salīdzināšanai ar nulles līmeni (7.25a un b att.). Pirmajā gadījumā (a) izejas spriegums U_{iz} sakrīt fāzē ar ieejas spriegumu U_{ie} . Pie tam U_{ie} tiek salīdzināts ar nulles spriegumu. Tā kā pastiprinātājam nav tiešās atgriezeniskās saites, tā pastiprināšanas koeficients ir bezgalīgi liels. Tas nozīmē, ka pastiprinātājs strādā sātstrāvas režīmā.

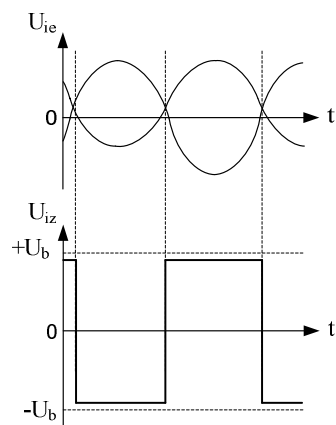
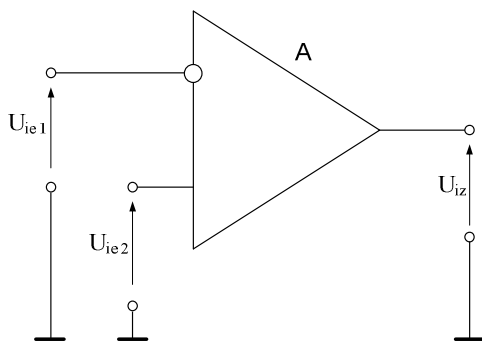
a



b



c



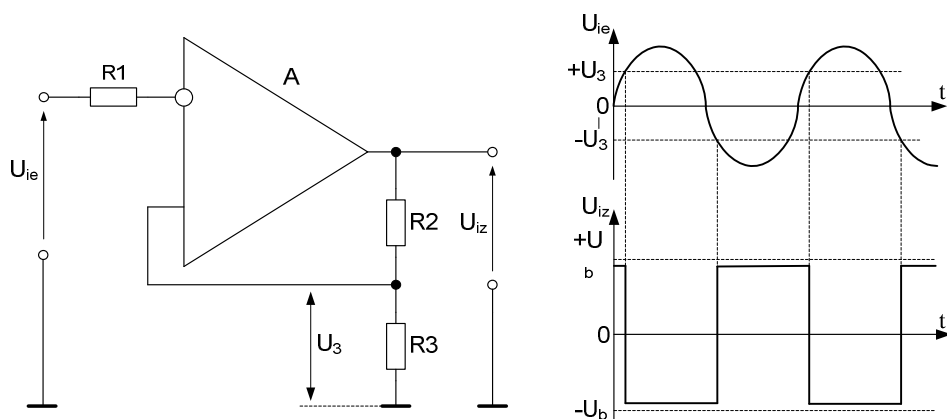
7.25att. Komparatoru slēgumu shēmas un spriegumu diagrammas

Ja kontrolējamā sprieguma avots pieslēgts pie invertējošās ieejas (7.25b att.), tad izejas spriegums nobīdīts pretfāzē. Pie shēmām esošie attēli parāda, kad un kā mainās ieejas un izejas spriegumi. Pie tam, ja $U_{ie} > 0$, tad $U_{iz} = |U_{piesāt}|$, kur $U_{piesāt}$ ir pastiprinātāja piesātinājuma spriegums, kurš ir tuvs barošanas spriegumam.

Abas aplūkotās shēmas (7.25a un b att.) sauc par nulles indikatoriem.

Ja ieejas signālus U_{ie1} un U_{ie2} pievada abām OP ieejām (7.25c att.), tad realizējas divu spriegumu salīdzināšana (komparācija).

Bez apskatītajiem variantiem vēl izmanto komparatoru shēmas ar pozitīvu atgriezenisko saiti (7.26 att.), kas realizē izejas signāla pārslēgšanu pie dažādiem ieejas signāla līmeņiem.



7.26 att. Komparators ar atgriezenisko saiti un spriegumu diagramma

7.6. Instrumentālais operacionālais pastiprinātājs

Ar diferenciālo operacionālo pastiprinātāju palīdzību izveidotu pastiprinātāju, kurš pastiprina signāla starpību, sauc par instrumentālo pastiprinātāju (IOP).

Instrumentālais pastiprinātājs ir OP ar diferenciālu ieeju, kuram iespējams mainīt ieejas signālu starpības pastiprinājumu. Tas sastāv no trim OP, kur pirmie divi OP ir savstarpēji saistīti neinvertējoši pastiprinātāji, bet trešais – diferenciālais pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti (7.28 att.). Parasti to ieejas pretestība starp abām diferenciālās ieejas spailēm ir $10^9 \Omega$ un vairāk. Līdz ar to ieejas strāva ir ļoti maza, parasti no 1 nA līdz 50 nA, bet izejas pretestība ļoti zema – pie zemām frekvencēm tikai daži miliomi.

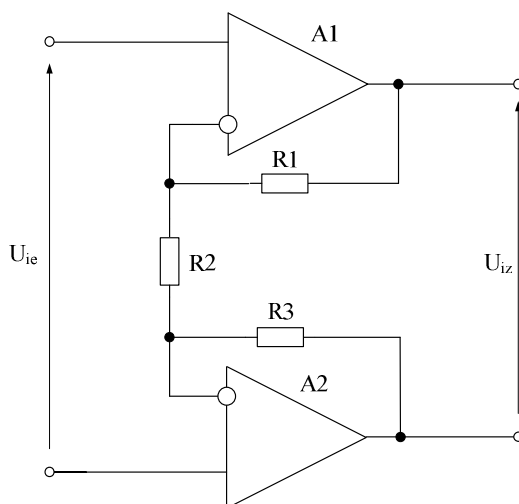
Apskatīsim IOP pirmo kaskādi - pastiprinātāju ar diferenciālu ieeju un diferenciālu izeju, kas izveidots no diviem neinvertējošiem diferenciāliem OP, kura shēma dota 7.27 attēlā.

Robežās, kad sprieguma starpība starp pastiprinātāja $A1$ tiešo un inverso ieeju ir

vienāda ar nulli un arī starp pastiprinātāja $A2$ tiešo un inverso ieeju ir vienāda ar nulli, var uzskatīt, ka operacionālo pastiprinātāju pastiprinājums K_1 un K_2 tiecas uz bezgalību. Tādā gadījumā spriegums uz rezistora $R2$ ir proporcionāls ieejas U_{ie} spriegumam un izejas spriegumu U_{iz} var noteikt izmantojot izteiksmi:

$$U_{iz} = U_{ie} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2}. \quad (3.58)$$

Praksē rezistorus R_1 un R_3 izvēlas ar vienādu pretestību.



7.27 att. Pastiprinātājs ar diferenciālu ieeju un diferenciālu izeju

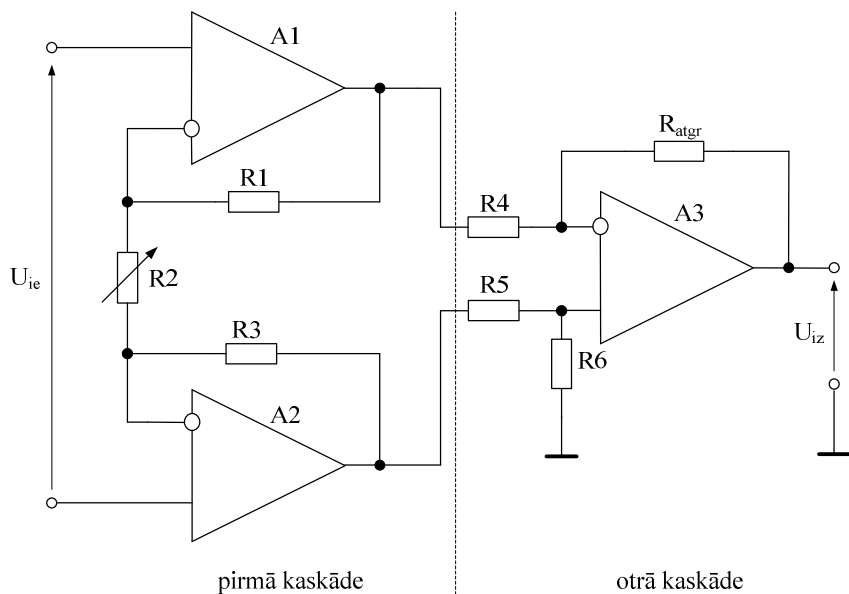
Tādam pastiprinātājam (7.27 att.) ar diferenciālu ieeju un izeju ir peldoša ieeja ar augstu iekšējo pretestību. Atšķirībā no diferenciālā OP, kurš dots attēlā 7.14, tā pastiprinājums ir atkarīgs tikai no rezistoru pretestības vērtības.

No pirmās pastiprināšanas kaskādes ($A1$, $A2$) diferenciālās izejas signāls tiek padots uz otro kaskādi - diferenciālo OP ar negatīvu atgriezenisko saiti $A3$. Ja šim pastiprinātājam rezistoru attiecība atbilst nosacījumam $R6/R5 = R_{atgr}/R4$ un tā operacionālo pastiprinātāju $A1$, $A2$ un $A3$ pastiprinājumi K_1 , K_2 un K_3 tiecas uz bezgalību, tad kopējo instrumentālā pastiprinātāja pastiprinājumu apraksta vienādojums

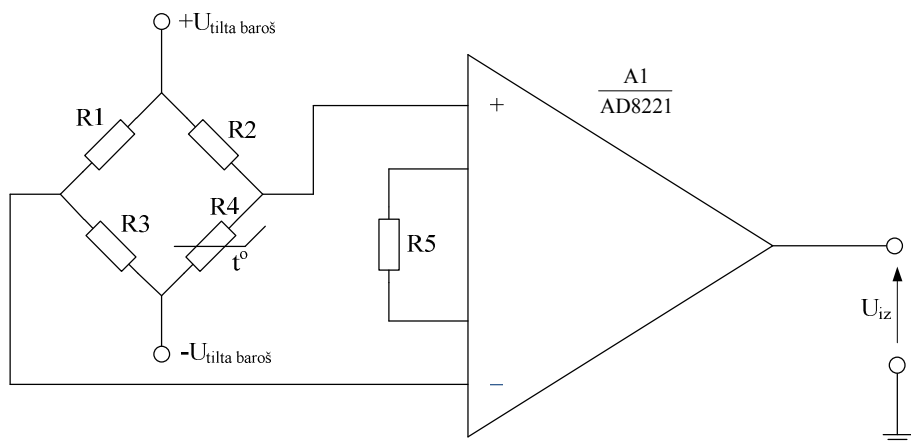
$$K_{IOP} = \frac{U_{iz}}{U_{ie}} = - \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} \frac{R_{atgr}}{R_4} \quad (3.59)$$

Instrumentālajam pastiprinātājam ir peldošā diferenciālā ieeja ar augstu ieejas pretestību, un tā pastiprinājumu galvenokārt nosaka tikai pretestību vērtības. Tomēr, atšķirībā no pastiprinātāja ar diferenciālo ieeju un diferenciālo izeju, instrumentālajam

pastiprinātājam ir tikai viena izeja. Bez tam, salīdzinājumā ar pirmo kaskādi, ir principiāla priekšrocība – tam lielāks kopējais pastiprinājums un mazāks nobīdes sprieguma pastiprinājums, kā arī ar rezistora R_2 palīdzību var mainīt pastiprinājuma koeficientu.



7.28 att. Instrumentālais operacionālais pastiprinātājs



7.29 att. Temperatūras mērīšanas shēma, izmantojot instrumentālo pastiprinātāju

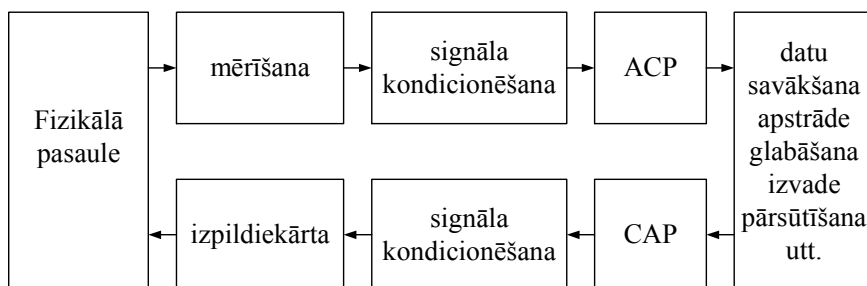
Instrumentālos pastiprinātājus izmanto mērīšanas iekārtās, kurās mērāmais lielums ir ļoti mazs signāls, piemēram, tiltveida mērīšanas pārveidotāja differences signālu pastiprināšana (7.29 att.), tenzometrisko mērīšanas pārveidotāju izejas signālu pastiprināšana, termopāra TEDS pastiprināšana u.c. Vēl instrumentālos pastiprinātājus plaši izmanto kardiosignālu un dažādu biopotenciālu mērīšanai.

8. Ciparanalogie un analogciparu pārveidotāji

8.1. Ievads

Pēdējos gadu desmitos, notiek strauja ciparu tehnoloģiju pielietojuma attīstība. Analogās vadības un datu apstrādes sistēmas tiek aizstātas ar ciparu sistēmām. Tas pamatojams ar ciparu tehnoloģijas daudzajām priekšrocībām, drošumu, stabilitāti, precizitāti, datu apstrādes un komunikācijas iespējām utt.

Dabā un tehnoloģijās lielākā daļa procesu ir nepārtraukti un mainīgi. Lai nodrošinātu saiti starp nepārtrauktajiem un mainīgajiem procesiem dabā un tehnoloģijā ciparu iekārtās ir jāveic signālu pārveidošana (skat. 8.1 att.). Signāls ir jāpārveido no analogā uz ciparu un pēc tam atpakaļ no ciparu signāla uz analogo.



8.1 att. Datu savākšanas un apstrādes funkcionālā diagramma

Analogā signāla pārveidošanu ciparu signālā, veic **analogciparu pārveidotājs** (ACP) (*A/D converter*). Ciparu signāla pārveidi analogajā, veic **ciparanalogu pārveidotājs** (CAP) (*D/A converter*).

Tehnoloģiskajās vadības sistēmās ciparanalogu pārveidotājs (CAP) tiek izmantots kā saites elements starp ciparsignālu apstrādes ierīcēm un ierīcēm, kuras vadāmas ar nepārtrauktu sprieguma signālu. Piemēram, ierosmes strāvas regulēšanai ģeneratoram, proporcionālajai elektropiedziņai ar frekvenču pārveidotājiem, mikroklimata proporcionālajai regulēšanai utt.

Ciparu analogie pārveidotāji (CAP) tiek plaši izmantoti skaņas, mērīšanas, tehnoloģisko procesu vadības un citās iekārtās, kur nepieciešams pārvērst ciparu signālu analogajā.

Binārais ciparu signāls, kas sastāv no n secīgām kārtām $2^0, 2^1, 2^2 \dots 2^{n-1}$, pa n vadiem padod uz CAP, kur tas tiek pārveidots nepārtrauktā analogā signālā - spriegumā vai strāvā.

Fizikālu lielumu mērīšanas rezultāts var būt nepārtraukti mainīgs spriegums vai strāva – analogais signāls. Tādi lielumi kā temperatūra, spiediens, ātrums, u.c. parasti tiek mērīti ar analogas darbības mērīšanas pārveidotāju. Rezultātā tiek iegūts analogais signāls. Lai šo signālu izmantotu datu apstrādei vai procesa vadībai, to nepieciešams pārveidot ciparu signālā.

Praksē izmanto dažādas tehnoloģiskas iekārtas, kuru vadībai izmanto analogo signālu, lai to pārvērstu ciparu vadības sistēmai saprotamos ciparu signālos, nepieciešams analogciparu pārveidotājs (ACP).

ACP un CAP plašu pielietojumu ir guvis audio un video tehnikā. Analogu skaņas apstrādes un ierakstu tehnoloģiju aizstāj ciparu tehnoloģija. Neaizstājamu vietu audiosignālu konvertēšanā ir ieņēmuši delta-sigma ACP un CAP, kuros izmanto bitu plūsmu.

Signāla pārveidošanas procesā rodas dažādi trokšņi, kas atkarībā no to intensitātes var radīt būtiskus traucējumus. Lai iegūtu konkrētajam uzdevumam piemērotu rezultātu, tiek izmantoti dažāda veidu ciparu analogie un analogciparu pārveidotāji.

8.2. CAP un ACP signāli

Lielākā daļa dabā un tehnikā sastopamo fizikālo procesu ir nepārtraukti un mainīgi. Ja mērījumu rezultātā iegūstam **nepārtrauktu** un mainīgu proporcionālu spriegumu vai strāvu, tad to sauc par **analogo** signālu. Analogais ACP ieejas signāls var būt pozitīvs pret masu, piemēram, 0...+10V, negatīvs, 0...-10V vai mainīgs $\pm 10V$ (divpolārs). Ieejas signāls var būt arī strāvas ķēde, piemēram, 4...20mA.

ACP nepieciešamais ieejas spriegums ne vienmēr atbilst spriegumam, kādu iegūstam mērīšanas procesā. Piemēram, elektrodinamiskā mikroфона izejas spriegums ir 5mV, tas ir jāpastiprina, jānofiltrē augsto frekvenču trokšņi, jānofiltrē zemo frekvenču trokšņi un tikai tad šo **kondicionēto** signālu varam padot uz ACP.

Ja no fizikālā procesa iegūtais signāls ir ar lielu vērtību, piemēram, elektriskā tīkla maiņspriegums 220V, kur amplitūda svārstās no -311V līdz +311V, signāls ir jāsamazina, to var izdarīt ar sprieguma dalītājiem.

Analogais signāls, kas iegūts ciparu analogajā pārveidošanas procesā satur trokšņus. No tiem daļēji var atbrīvoties filtrējot signālu. Analogu ciparu pārveidotāja izejā un ciparu analogu pārveidotāja ieejā ir ciparu signāls. Tas var būt nepārtraukta bināra ciparu virkne, kas iegūta, piemēram, skaņas pārveidošanas procesā, vai bināri skaitļi, kas sastāv no n secīgām kārtām $2^0, 2^1, 2^2 \dots 2^{n-1}$.

Iekārtas, kuras darbojas ar divlīmeņu sprieguma diskrētajiem signāliem, sauc par **diskrētajām** iekārtām. Diskrētās iekārtas ieejas un izejas signāliem, attiecībā pret visas sistēmas kopējo nulles vadu, jābūt ar divām noteiktām vērtībām, vai nu **zema** sprieguma līmeņa (L – low), vai **augsta** sprieguma līmeņa (H – high). Parasti zemā

sprieguma līmeņa signālu pieņem par loģisko „nulles” signālu, bet augstā sprieguma līmeņa signālu par loģiskā „vieninieka” signālu, piemēram, 0V un +5V.

Šādā veidā tiek formēti binārie diskrētie signāli, kas var būt 0 vai 1.

Ja diskrēto signālu amplitūda tiek izteikta binārajā ciparu kodā, to sauc par ciparu signālu. Bināros ciparu signālus izmanto, lai parādītu signāla skaitliskās vērtības binārajā skaitīšanas sistēmā. Piemēram, četriem ciparu signāliem ir vērtības 0V, +5V, 0V, +5V, binārajā sistēmā tas atbilst skaitlim 0101, kas ir ekvivalents skaitlim 5 decimālajā sistēmā. Datori, kontrolleri, kodu pārveidotāji, ciparanalogie un analogciparu pārveidotāji un citas diskrētās ierīces veic darbības, izmantojot tieši šos bināros skaitļus.

Mēs esam pieraduši izmantot decimālo skaitīšanas sistēmu, tāpēc mērījumu un aprēķinu rezultātus vēlamies ieraudzīt sev pazīstamā un viegli tveramā formā. Ciparu tehnikā datu apstrāde notiek binārā formā, ieslēgts, izslēgts, nulle, vieninieks. Lai varētu izmantot un novērtēt šos bināros datus, dažreiz ir nepieciešams tos pārvērst decimālā formātā.

Cipars ir rakstu zīme, kas attēlo skaitli, skaitlis sastāv no cipariem. Tāpat kā decimālajā sistēmā arī binārajā sistēmā cipara atrašanās vietai ir sava nozīme un svars. Decimālajā sistēmā šo svaru nosaka skaitļa 10 pakāpe – kārtā, piemēram:

$10^0 = 1$ nulltā kārtā – vieninieki;

$10^1 = 10$ pirmā kārtā – desmiti;

$10^2 = 100$ otrā kārtā – simti, utt.

Bināro skaitļu sistēmā katra kārtā tiek noteikta, ņemot par pamatu skaitļa 2 pakāpi:

$2^0 = 1$

$2^1 = 2$

$2^2 = 4$ utt.

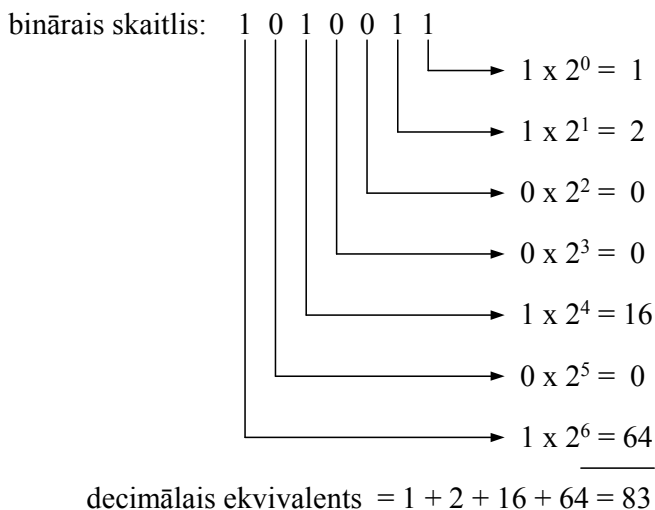
Binārā skaitļa pamatvienība ir **bits**. Binārais skaitlis var sastāvēt no atsevišķiem bitiem vai bitu virknes. No bināriem cipariem veidotas n kārtas skaitļa, kur katra kārtā var pieņemt vērtību 1 vai 0.

Binārā skaitļa pēdējais labās puses bits ir **jaunākās kārtas bits (LSB – least significant bit)**. Ja binārais skaitlis ir vesels skaitlis, tad jaunākās kārtas bits LSB ir $2^0 = 1$ un katrs bits pa kreisi ir par vienu kārtu lielāku vērtību.

Binārā skaitļa pēdējais kreisās puses bits ir **vecākās kārtas bits (MSB – most significant bit)**.

Lai pārvērstu bināru skaitli ekvivalentā decimālajā, ir jāaprēķina visu binārā skaitļa kārtu decimālā vērtība un jāsasummē (skat. 8.2 att.).

Vienkāršākais veids kā konvertēt bināro skaitli uz decimālo ekvivalentu ir uzrakstīt binārā skaitļa kārtu decimālās vērtības ...16, 8, 4, 2, 1 virs binārā skaitļa katra atbilstošās kārtas bita, sākot ar jaunāko kārtu LSB un beidzot ar vecāko kārtu MSB, un summējot to bitu decimālās vērtības, kuru statuss ir 1 (skat. 8.3 att.).



8.2 att. **Binārā skaitļa pārveidošana decimālajā**

2 pakāpe: 16 8 4 2 1

binārais skaitlis: 1 0 1 1 0

decimālais skaitlis = $16 + 4 + 2 = 22$

8.3 att. **Binārā skaitļa 10110 pārvēršana decimālajā**

Ja binārais skaitlis ir daļskaitlis, tad binārais punkts tāpat, kā decimālais punkts, atdala veselos skaitļus. Skaitļa 2 pakāpes kļūst negatīvas un samazinās virzienā uz labo pusi (skat. 8.4 att.).

binārās kārtas: 2^3 2^2 2^1 2^0 2^{-1} 2^{-2}

2 pakāpe: 8 4 2 1 0.5 0.25

binārais skaitlis: 1 0 0 1. 0 1

decimālais skaitlis = $8 + 1 + 0.25 = 9.25$

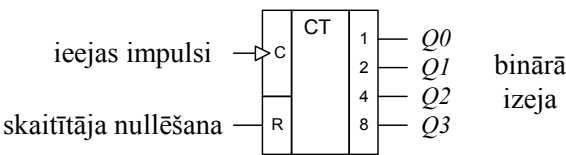
8.4 att. **Binārie daļskaitļi**

Daži ACP veido izejas vērtības 8-4-2-1 (*binary-coded-decimal*) (BCD) formā, kur katrs decimālais skaitlis tiek attēlots, kā 4 bitu virkne. Piemēram, ja analogā ieeja ir 14, tad pēc 8-4-2-1 izejas, tā izskatītos: $14 = (1=0001 \text{ un } 4=0100)$, tātad var redzēt, ka tā ir pavisam savādāka vērtība nekā patiesais binārais $14 = 1110$.

8.3. CAP un ACP shēmu elementi

Binārais skaitītājs ir viens no elementiem, ko izmanto analogciparu pārveidotājā (skat. 8.5 att.). Skaitītāja tipa ACP ar bināro skaitītāju secīgi tiek mainīts binārais kods un pārslēgtas CAP sprieguma dalītāju pakāpes.

Binārais skaitītājs ir elektroniska ierīce, kurai izejas binārais skaitlis palielinās par vienu (**summējošais skaitītājs**) vai samazinās par vienu (**atskaitošais skaitītājs**), ja uz ieejas tiek padots signāla impulss. Piemēram, 4-bitu summējošais binārais skaitītājs, pēc 6 impulsiem ieejā, izejā izvadīs skaitli 0110 (skat. 8.1 tabulu).



8.5 att. Binārais skaitītājs

Ir shēmu tehniskie risinājumi, kur skaitītāja ieejas impulsi tiek padoti ar fiksētu frekvenci, kuru dod taktēšanas signāla ģenerators (*clock*), šos impulsus sauc par **takts impulsiem**, vai par sistēmas takti (*system clock*).

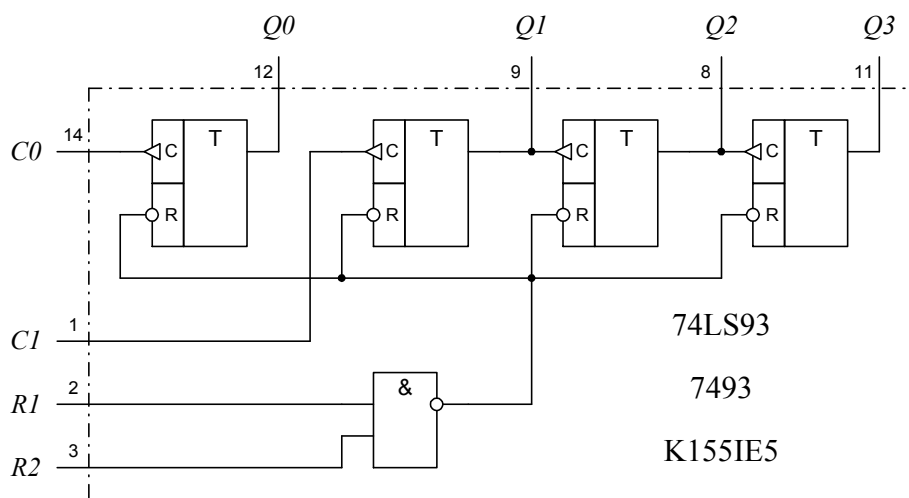
Skaitītāju sauc par summējošo skaitītāju (*up-counter*), ja skaitlis uz binārās izejas palielinās par 1 katru reizi, kad ienāk jauns takts (*clock*) impulss.

8.1 tabula. Summējošā binārā skaitītāja izejas vērtības

Impulsu kārtas skaitlis	Skaitītāja izejas			
	<i>Q3</i>	<i>Q2</i>	<i>Q1</i>	<i>Q0</i>
	2^3	2^2	2^1	2^0
0.	0	0	0	0
1.	0	0	0	1
2.	0	0	1	0
3.	0	0	1	1
4.	0	1	0	0
5.	0	1	0	1
6.	0	1	1	0
7.	0	1	1	1
8.	1	0	0	0
9.	1	0	0	1
10.	1	0	1	0
11.	1	0	1	1
12.	1	1	0	0
13.	1	1	0	1
14.	1	1	1	0
15.	1	1	1	1
16.	0	0	0	0

Lielākais binārais skaitlis, kuru var ģenerēt 4-bitu skaitītājs ir 1111, tas ir līdzvērtīgs decimālajam 15. Pēc sešpadsmitā impulsa skaitītājs sāk skaitīšanu no jauna, pārliedzot vērtību uz 0000 (skat. 8.1 tabulā). Tātad kopējais bināro ciparu skaits, ko var apstrādāt 4-bitu skaitītājs ir 16.

Binārais skaitītājs tiek veidots no virknē saslēgtiem trigeriem (skat. 8.6 att.). Piemēram, lai binārais skaitītājs 74LS93 darbotos skaitītāja režīmā, pirmās kārtas trigerā ieeja $C1$ jāsavieno ar jaunākās kārtas trigerā izeju $Q0$, uz ieeju $C0$ jāpadod ieejas impulsi. Uz skaitītāja nullēšanai paredzētajām ieejām $R1$ un $R2$ pastāvīgi jābūt loģiskās 0 līmenim.

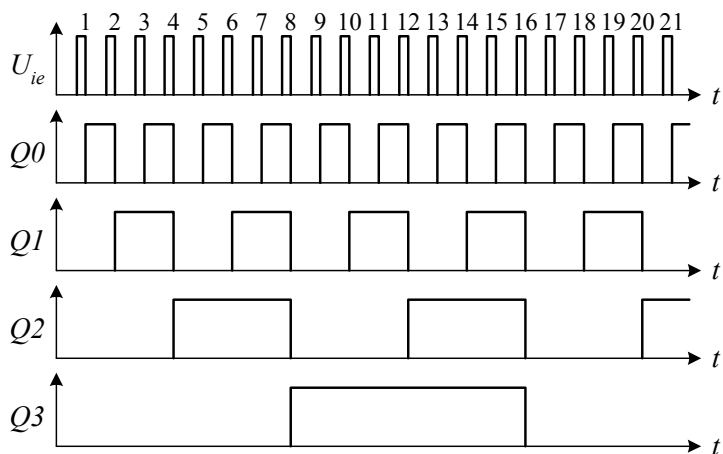


8.6 att. **Binārā skaitītāja 74LS93 principiālā shēma**

Apskatīsim četru kārtu summējošā skaitītāja signālu diagrammu (skat. 8.7 att.).

Jaunākās kārtas divpakāpju trigeris pārslēdzas uz katru ieejas impulsu U_{ie} , nākošās kārtas trigeris pārslēdzas, ja jaunākās kārtas trigeris pārslēdzoties izejā maina signālu no $Q=1$ uz $Q=0$. Jaunākās kārtas trigerā izejai Q ir jābūt savienotai ar nākošās kārtas trigerā ieeju C (skat. 8.6 att.). No skaitītāja signālu diagrammas redzams, ka katra nākošā trigerā izejas frekvence ir divreiz mazāka. Skaitītājs skaita līdz 15. impulsam, 16. impulss iestata visus skaitītāja trigerus nulles stāvoklī un sākās skaitīšana no nulles. 17. impulss darbojas līdzvērtīgi 1. impulsam.

Reversivajam 4-bitu binārajam skaitītājam 74LS193 ir divi darba režīmi, **summējošais** un **atskaitošais**. Lai skaitītājs strādātu summējošā režīmā ieejas signāla impulsi jāpadod uz $+I$ ieeju, bet lai strādātu atskaitošā režīmā uz $-I$ ieeju.



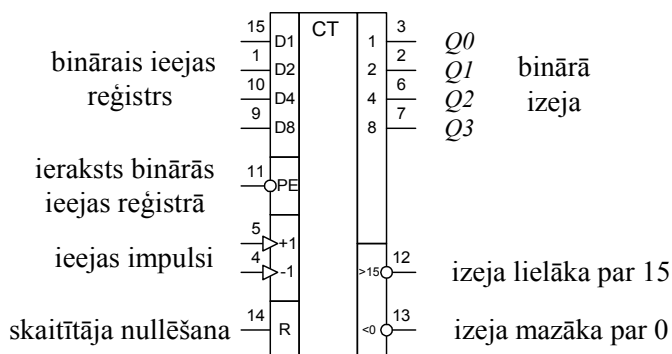
8.7 att. **Binārā skaitītāja signālu diagramma**

Atskaitošā skaitītājā (*down-counter*) skaitlis binārā izejā samazinās par 1, katru reizi, kad ienāk jauns takts (*clock*) impulss. Tātad 4-bitu atskaitošā skaitītāja izejas signāla izmaiņas secība izskatās 1111, 1110, 1101...0000, 1111, ... (skat. 8.2 tabulu).

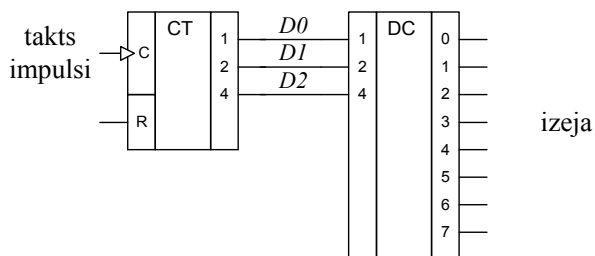
8.2 tabula. **Atskaitošā binārā skaitītāja izejas vērtības**

Impulsu kārtas skaitlis	Skaitītāja izejas			
	$Q3$	$Q2$	$Q1$	$Q0$
	2^3	2^2	2^1	2^0
0.	0	0	0	0
1.	1	1	1	1
2.	1	1	1	0
3.	1	1	0	1
4.	1	1	0	0
5.	1	0	1	1
6.	1	0	1	0
7.	1	0	0	1
8.	1	0	0	0
9.	0	1	1	1
10.	0	1	1	0
11.	0	1	0	1
12.	0	1	0	0
13.	0	0	1	1
14.	0	0	1	0
15.	0	0	0	1
16.	0	0	0	0

Skaitītājam 74LS193 ir četras binārās ieejas $D1, D2, D4, D8$ caur kurām skaitītāja trigeros var ierakstīt skaitli no kura turpināt skaitīšanu. Lai to izdarītu uz ieeju PE jāpadod loģiskais 0 līmenis (skat. 8.8 att.). Ja skaitītāja izejā ir skaitlis 1111, kas atbilst decimālajam 15 un pienāk nākošais impulss, izejā >15 parādās signāls. Ja skaitītājs darbojas atskaitošā režīmā un izejā ir skaitlis 0000, kas atbilst decimālajai 0, tad pienākot nākošajam atskaitošajam impulsam, izejā <0 parādās signāls. Šai mikroshēmai skaitīšana notiek, ja signāls uz ieejas $+1$ vai -1 izmainās no 0 uz 1, bet uz otras neizmantotās ieejas ir jābūt loģiskajam 1. Ir svarīgi kādā secībā tiek izmainīti loģiskie līmeņi uz ieejām, vai tas neiespaidos saskaitīto impulsu skaitu.



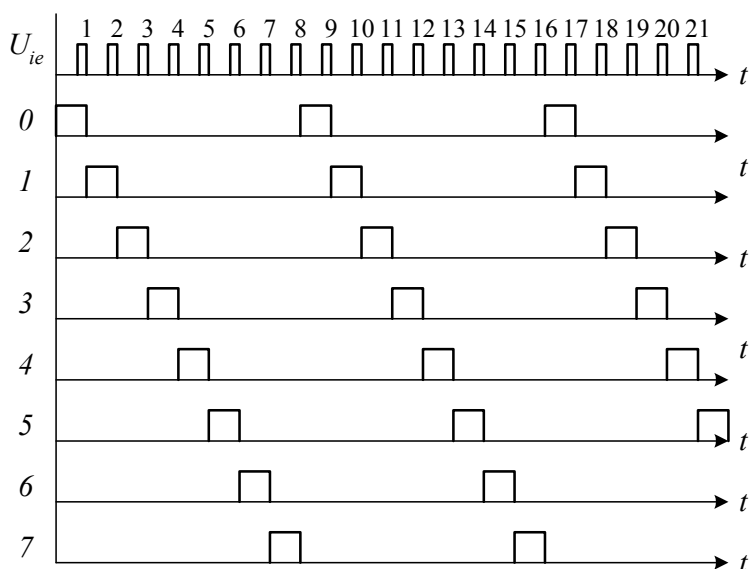
8.8 att. Četru kārtu reversīvais skaitītājs 74LS193



8.9 att. Trīs kārtu binārais skaitītājs ar dešifratoru

CAP sprieguma dalītāju komutēšanai izmanto elektroniskus slēdžus, kurus darbina dešifrators, kas pārvērš bināro kodu pozicionālajā.

Dešifratora izejas signāla diagramma (skat. 8.10 att.), uzņemta shēmai, kas sastāv no 3 bitu binārā skaitītāja un 8 pozīciju 3 bitu dešifratora (skat. 8.9 att.). Ieejas signāla impulsi U_{ie} , tiek padoti uz binārā skaitītāja ieeju. Skaitītājs skaita no 0 līdz 7, kur binārais skaitlis ir 111, pēc 8. impulsa skaitītāja izejā ir 000 un signāls uz dešifratora 0 pozīcijas izejas. Pēc 9. impulsa ieslēdzas dešifratora 1. izeja utt.



8.10. att. Dešifratora izejas signāla diagramma

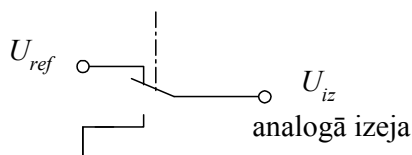
Praksē var būt arī citi dešifratora darbības kodi, piemēram, 7 segmentu ciparu kods. Šāda tipa dešifrators ir integrēts plaši izmantotajos ciparu voltmetra analogciparu pārveidotāja mikroshēmās K572PV2 un K572PV5, kurām ir tieša 4 kārtu decimālā signāla izvade.

Analogciparu un ciparanalogu pārveidotāju vadības shēmas var būt integrētas controllerī. Ja konstruējot iekārtas izmanto controllerus, ir iespējams izveidot un pielietot speciālus vadības algoritmus.

8.4. Rindu ciparanalogu pārveidotāji

Lielākā daļa parasti izmantojamo CAP ir binārie komutējošie CAP vai daudzposmu kāpņu tipa shēmas.

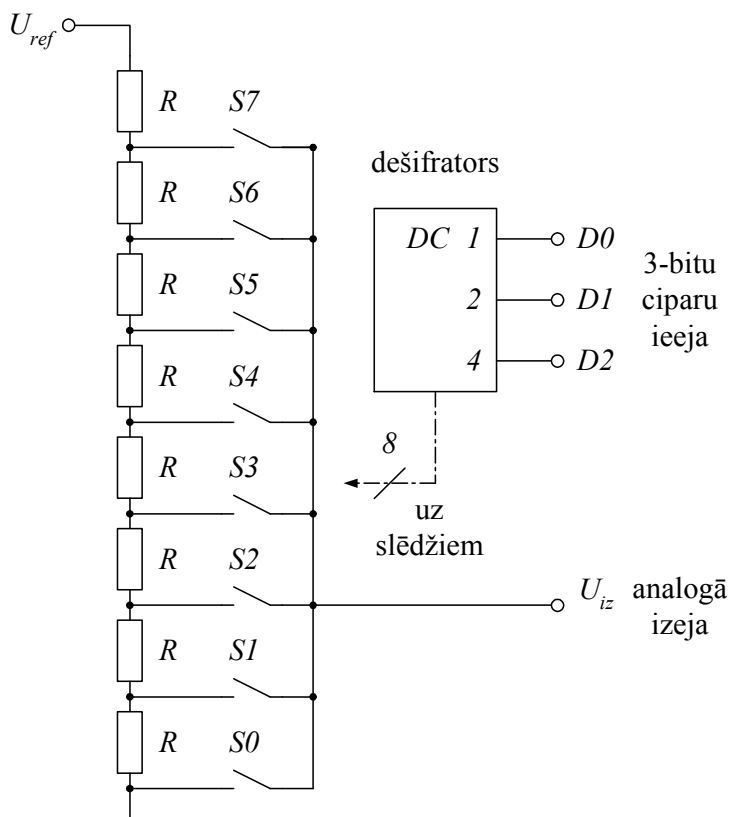
Apskatīsim pārslēdzozo slēdzi, kā 1-bita CAP (skat.8.11 att.). Atbilstoši ciparu signālam, tas pieslēdz analogajai izejai atbalsta spriegumu U_{ref} vai masu ar 0V spriegumu.



8.11 att. Vienkāršākais 1-bita CAP

Šī vienkāršā ierīce ir pamatelements daudz sarežģītākajiem CAP. Viena bita slēdzis kā pamatkomponents izmantots delta – sigma CAP un ACP, kur lieto viena bita virknes signālu.

Viena no vienkāršākajām CAP struktūrām ir Kelvina dalītājs (skat. 8.12 att.). Šī CAP N-bitu versija satur 2^N virknē savienotus vienādus rezistorus R , kas veido sprieguma dalītāju. Izejas signāls tiek noņemts no sprieguma dalītāja izvada ar vienu no 2^N slēdžiem $S0...S7$, pēc ieejas signāla dekodēšanas. Mūsdienīgie CAP, kas izmanto šādu arhitektūru tiek saukti par rindu CAP.



8.12 att. **Kelvina dalītājs**

Šī CAP arhitektūra ir vienkārša. Izejas analogais spriegums U_{iz} ir ar mainīgu vērtību un nodrošina monotonu signālu, arī gadījumā, ja kāda no pretestībām ir vienāda ar 0. Ja visi rezistori pēc vērtības ir vienādi, CAP ir lineārs, taču to var arī izgatavot nelineāru, ja ir nepieciešams nelineārs CAP. Tā kā pārslēgšanās momentā strādā tikai divi slēdži, šim risinājumam ir mazs maldu signāls (*low-glitch*).

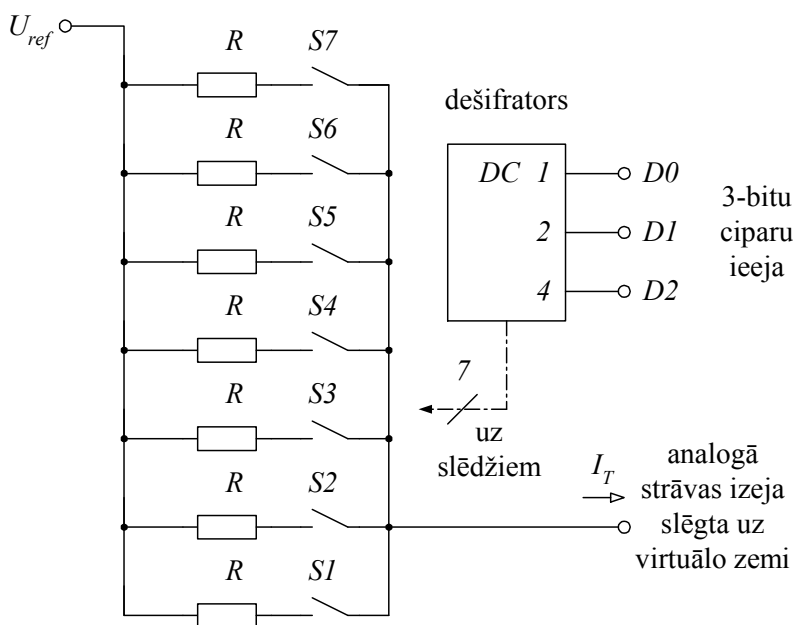
Lai nodrošinātu augstu izšķirtspēju, Kelvina dalītājam ir nepieciešams liels

rezistoru skaits. Tas ir galvenais šī risinājuma trūkums, tāpēc Kelvina dalītājs parasti netiek izmantots kā atsevišķa iekārta, bet kā komponente sarežģītās struktūras CAP.

Iepriekš apskatītajam līdzīgs ir CAP ar strāvas izeju, kas arī sastāv no 2^N rezistoriem, vai strāvas avotiem, taču tagad tie pieslēgti paralēli starp atbalsta spriegumu U_{ref} un virtuāli sazemētu izeju (skat. 8.13 att.).

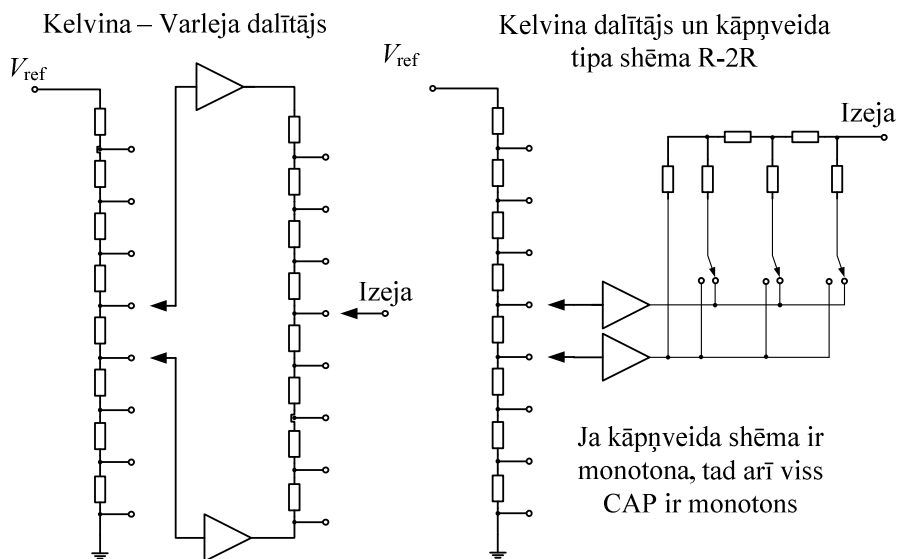
Dotajā CAP, tiklīdz kā kāds no rezistoriem pieslēdzas ķēdei, jebkurš tālākais ciparu koda palielinājums vairs nevar to atslēgt. Tādējādi struktūra jau sākotnēji ir monotona, neatkarīgi no rezistoru neprecizitātes, un līdzīgi kā iepriekšējā gadījumā var tikt izveidota nelinearitāte tur, kur šī nelinearitāte ir nepieciešama. Šādu CAP arhitektūru lieto reti, jo lai izgatavotu visu CAP būtu nepieciešams liels daudzums rezistoru un slēdžu, tāpēc tā tiek izmantota kā komponente sarežģītās struktūras CAP.

Pilnīgi – dekodējošo (*fully decoded*) CAP (8.12 att. un 8.13 att.) bieži izmanto kā komponenti sarežģītākos CAP. Daudz populārāks ir segmentētie CAP, kur daļa izejošā signāla no pilnīgi – dekodējošā CAP atkal tiek padota uz sprieguma dalītāju. Šādu struktūru izmanto tāpēc, ka pilnīgi – dekodējošais CAP ir sākotnēji monotons un ja nākošais dalītājs arī ir monotons, tad monotons ir arī viss no jauna izveidotais CAP.



8.13 att. Vienkāršākais CAP ar strāvas izeju

Segmentētos CAP ar sprieguma izeju (skat. 8.14 att.) signāls nokļūst no viena Kelvina rezistoru dalītāja uz citu Kelvina dalītāju vai uz CAP ar kādu citu struktūru.



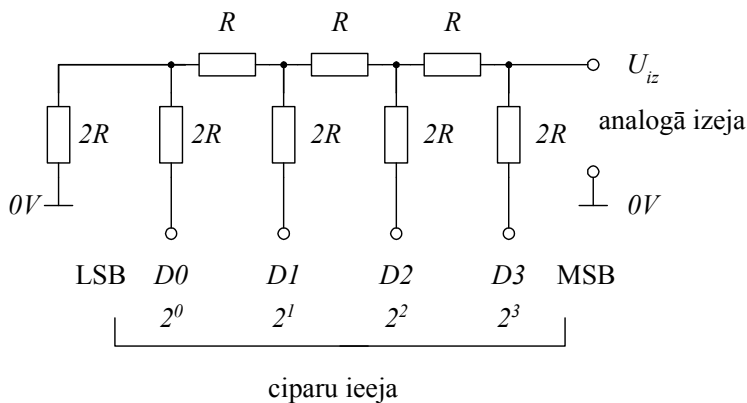
8.14. att. Segmentu CAP ar sprieguma izeju

Visos CAP izejas signāls U_{iz} veidojas, kā atbalsta sprieguma U_{ref} un ciparu kodu kombinācijas rezultāts. Tādējādi visi CAP ir reizinoši, bet daudzi no tiem labi strādā tikai ierobežotā U_{ref} diapazonā. Īstie reizinošie CAP (MDAC) ir orientēti darbam plašā U_{ref} diapazonā. Stingrie reizinošo CAP noteikumi prasa, lai tā balsta strāvas diapazons ietver 0 V, un daudzas shēmas, īpaši kāpņu tipa ar strāvas režīmu un CMOS pārslēdzējiem, pieļauj pozitīvu, negatīvu un mainīgu U_{ref} vērtību.

8.5. R-2R kāpņveida matrica

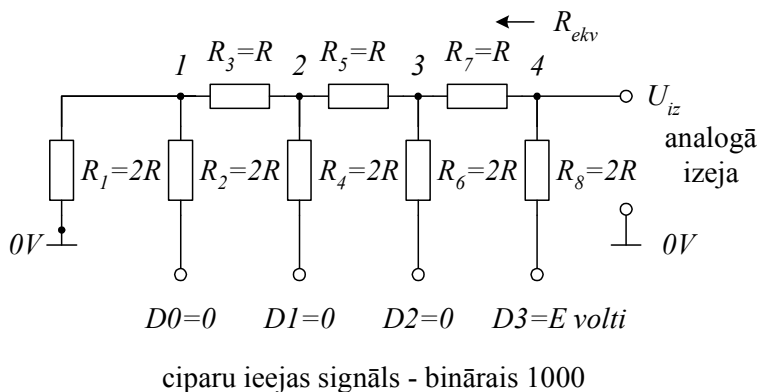
Vispopulārākā metode ciparu signāla pārveidošanai uz analogo, ir izmantojot kāpņveida tīkla dalītāju. Tas sastāv no vairākām paralēlām divu vērtību rezistoru R un 2R kombinācijām (skat. 8.15 att.). Lietojot R-2R kāpņveida matricas, vairāku kārtu bināro signālu tiešā veidā, bez dešifratora, var pārvērst analogajā signālā. Iepriekšējā nodaļā apskatītajiem **rindu CAP** 4 kārtu binārā signāla pārveidei ir nepieciešams dalītājs ar 16 rezistoriem un 16 slēdžiem, ja izmanto **R-2R kāpņveida matricu**, nepieciešami tikai 8 rezistori un 4 slēdži.

Iepazīsimies ar R-2R kāpņveida matricas darbību. Noskaidrosim sprieguma dalītāja izejas spriegumu, ja uz matricas ieeju padod bināro skaitli 1000. Pieņemsim, ka loģiskais 1 = E volti un loģiskā 0 = 0V (zeme). Attēlā 8.16 redzams, ka shēmā ieejai D3 ir pieslēgts E un visas pārējās ieejas ir sazemētas. Lai noteiktu izejas spriegumu aprēķināsim matricas kopējo ekvivalento pretestību R_{ekv} .



8.15 att. **R-2R kāpņveida matrica**

Pretestības aprēķinu sāksim no shēmas 1 punkta. Kreisajā shēmas pusē mēs varam redzēt, ka punktam 1 pieslēgtas trīs pretestības, pretestības R_1 un R_2 ar vērtību $2R$ ir saslēgtas paralēli, tātad to kopējā ekvivalentā pretestība ir $R_{12}=R$, šai pretestībai virknē slēgta pretestība $R_3=R$, summārā pretestība $R_{123}=2R$.



8.16 att. **R-2R matricas pētīšana, ja ieeja vērtība 1000**

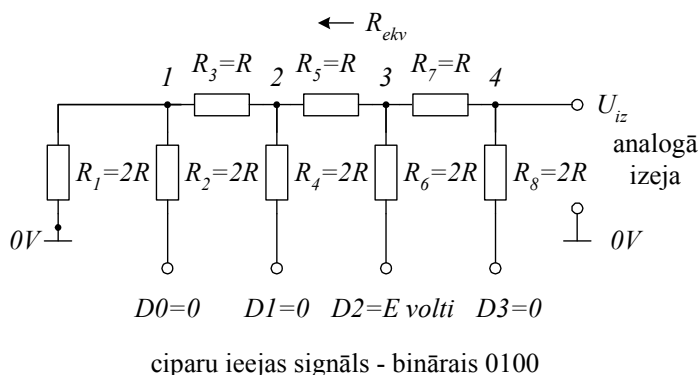
Ekvivalentajai pretestībai R_{123} paralēli slēgta $R_4=2R$, šo pretestību summa ir $R_{1234}=R$. Pretestībai R_{1234} virknē slēgta $R_5=R$, summējot iegūstam $R_{12345}=2R$. Ekvivalentā pretestība R_{12345} darbojas paralēli $R_6=2R$, tās saskaitot iegūstam $R_{123456}=R$. Virknē ar R_{123456} darbojas $R_7=R$, tās saskaitot iegūstam $R_{1234567}=R_{ekv}=2R$. Izejas spriegumu uz sprieguma dalītāja R_8 , $R_{1234567}$ izejas var aprēķināt, izmantojot tiešo proporcionalitāti pretestībai un sprieguma kritumam,

$$U_{iz} = \frac{E \cdot R_{1234567}}{R_{1234567} + R_8} = \frac{E \cdot 2R}{2R + 2R} = \frac{E}{2}.$$

Tātad, ja R-2R matricai pieslēdz ieejas signālu 1000, tad izejas signāls ir $1/2 E$. Katras kārtas binārajam signālam, kura vērtība ir loģiskais vieninieks, var aprēķināt izejas sprieguma komponenti,

$$U_n = \frac{E}{2^{N-n}}, \quad (8.1)$$

kur N - kopējais bināro ieeju (kārtu) skaits, n – binārās ieejas kārta, kurā ir loģiskais vieninieks.



8.17 att. R-2R matricas pētīšana, ja ieejas vērtība 0100

Piemēram, ja matricas ieejā ir binārais signāls 0100, tad $D0$, $D1$, un $D3$ ir saņemti, bet $D2$ ir E volti. (skat. 8.17 att.). Izejas analogo signālu varam aprēķināt:

$$U_n = \frac{E}{2^{N-n}} = \frac{E}{2^{4-2}} = \frac{E}{4}.$$

Piemērs:

Loģiskie līmeņi, kurus izmanto 4-bitu R-2R kāpnveida CAP ir $1 = +5V$ un $0=0V$. Atrast izejošo spriegumu, kad binārais signāls ieejā ir 0001 un 1010.

Ja ieejas signāls ir 0001, pēc izteiksmes (8.1) var aprēķināt izejas signālu,

$$U_0 = \frac{5V}{2^{4-0}} = \frac{5V}{16} = 0,3125V.$$

Ja ieejas signāls ir 1000, tad izejā ir

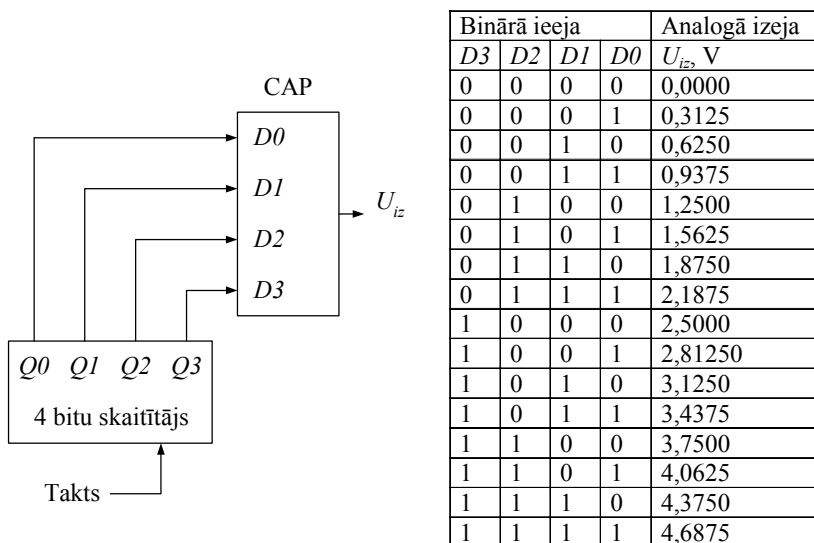
$$U_3 = \frac{5V}{2^{4-3}} = \frac{5V}{2} = 2,500V,$$

un kad ieejā ir 0010, tad izejā ir

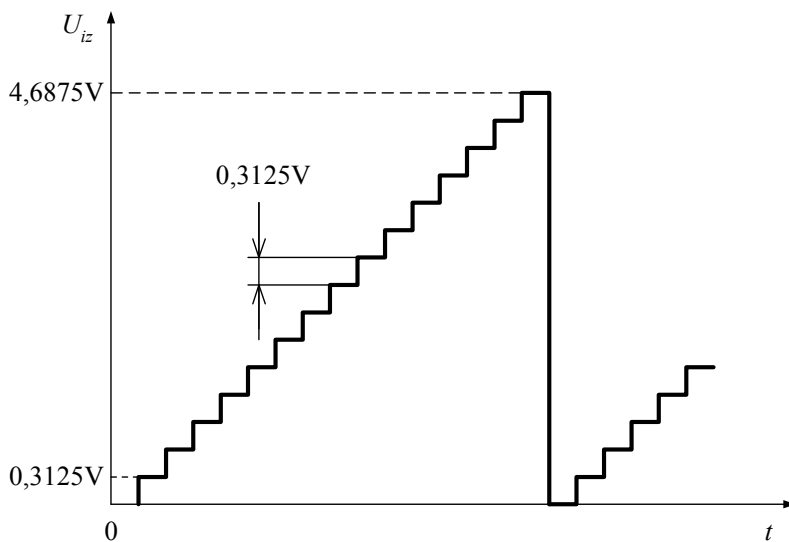
$$U_1 = \frac{5V}{2^{4-1}} = \frac{5V}{8} = 0,625V,$$

ja ieejā ir 1010, tad izejā ir

$$U_{iz} = U_3 + U_1 = 2,500 + 0,625 = 3,125V$$



8.18.att. CAP izejas signāla atkarība no ieejas koda



8.19 att. CAP izejas signāls

Analogo izejas spriegumu 4 bitu ciparu analogajam pārveidotājam var aprēķināt,

$$U_{iz} = E \left(\frac{D_3}{2} + \frac{D_2}{4} + \frac{D_1}{8} + \frac{D_0}{16} \right), \quad (8.2)$$

kur E – loģiskā vieninieka spriegums, V; D_3, D_2, D_1, D_0 – ieejas signāla biti, 1 un 0.

Piemēram, ja $E=5V$, tad ieejas signālam 1011 atbilst analogais signāls,

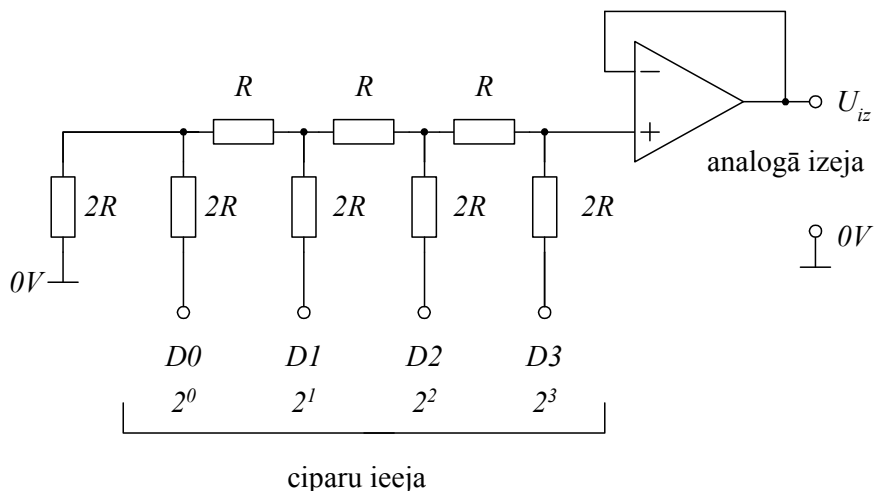
$$U_{iz} = E \left(\frac{D_3}{2} + \frac{D_2}{4} + \frac{D_1}{8} + \frac{D_0}{16} \right) = 5 \left(\frac{1}{2} + \frac{0}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} \right) = 3,4375V$$

Līdzīgu aprēķina sakarību var izveidot arī lielākam bitu skaitam,

$$U_{iz} = E \left(\frac{D_0}{2^{N-0}} + \frac{D_1}{2^{N-1}} + \frac{D_2}{2^{N-2}} + \dots + \frac{D_n}{2^{N-n}} \right), \quad (8.3)$$

kur N - binārās ieejas maģistrāles kārtu skaits (vadu skaits); n – binārā skaitļa kārta 0,1,2,... n .

Parasti sprieguma dalītāja matricas pretestību R un $2R$ vērtības izvēlas attiecīgi $10k\Omega$ un $20 k\Omega$. Lai novērstu sprieguma dalītāja papildus sloģošanu (*loading*) un lai palielinātu precizitāti, R-2R matricas izeju ir jāslēdz pie augstas pretestības ieejas. Veiksmīgu šī jautājuma risinājuma var redzēt nākamajā attēlā, kur šim nolūkam kalpo operacionālais pastiprinātājs (skat. 8.20 att.)



8.20 att. CAP ar R-2R matricu un sprieguma atkārtotāju

8.6. Strāvas avotu pārslēdzēja tipa CAP

Iepriekš apskatītie CAP ir sprieguma avota pārslēdzēju tipa, kur binārais ieejas signāls tiek padots uz pretestību matricu, kur to summē ar citiem ieejas spriegumiem. Strāvas var pārslēgt ātrāk, nekā spriegumus, tāpēc vairums CAP tiek izmantots kāds no strāvas pārslēgšanas (*current switching*) veidiem.

Strāvas avotu pārslēdzēju tipa CAP, binārais ieejas signāls tiek izmantots, lai atvērtu vai aizvērtu slēdžus, kuri savieno un atvieno iekšēji ģenerētās strāvas.

Strāvas tiek slēgtas atbilstoši binārā ieejas signāla kārtām un summētas ar operacionālo pastiprinātāju (skat. 8.21 att.).

R-2R matrica ir pieslēgta atbalsta sprieguma avotam, kurš shēmā ir apzīmēts ar U_{ref} . Strāva, kura plūst katrā 2R rezistorā ir:

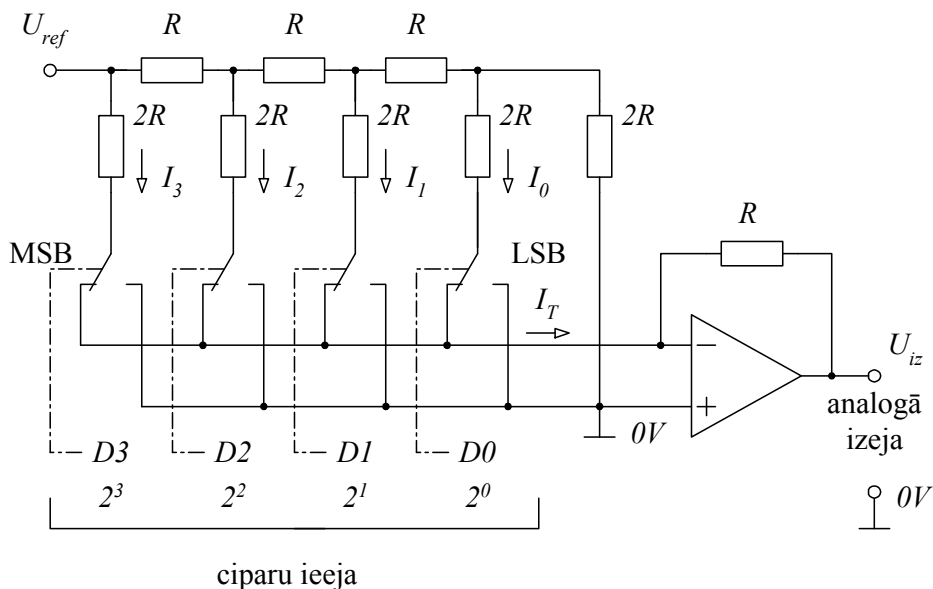
$$I_n = \left(\frac{U_{ref}}{R} \right) \frac{1}{2^{N-n}} \quad (8.4)$$

kur n – ieejas binārā signāla kārta, $n = 0, 1, \dots$, kurā ir loģiskais 1; N – kopējais bināro ieeju skaits.

Katra strāva tiek ņemta vērā attiecīgi pēc bitu pozīcijas, kuru tā reprezentē.

Piemēram, ja elementa $D1$ ieejā ir loģiskais 1 ($n=1$ un $N=4$), strāva 2R rezistorā,

$$I_1 = \left(\frac{U_{ref}}{R} \right) \frac{1}{2^{4-1}} = \frac{U_{ref}}{8R}.$$



8.21 att. Strāvas tipa CAP ar R-2R matricu.

Binārās ieejas $D0, D1, D2, D3$ slēdz elektroniskos slēdžus, kuri savieno strāvas ķēdes vai nu ar masu, vai ar pastiprinātāja ieeju. Pastiprinātājs summē visas ieslēgtās strāvas. Operacionālais pastiprinātājs pievienots invertējošā slēgumā un darbojas kā strāvas - sprieguma pārveidotājs, tā izejas spriegums ir:

$$U_{iz} = -I_T R \quad (8.5)$$

kur I_T – uz operacionālā pastiprinātāja ieeju padotā strāvu summa.

Piemēram:

Ja ieejā ir vērtība 1001, tad

$$I_T = \frac{U_{ref}}{R} \left(\frac{1}{2} \right) + \frac{U_{ref}}{R} \left(\frac{1}{16} \right) = \frac{U_{ref}}{R} \left(\frac{7}{16} \right)$$

un

$$U_{iz} = \left(\frac{U_{ref}}{R} \right) \left(\frac{7}{16} \right) R = -\frac{7}{16} U_{ref}.$$

Jaunākajos CAP izmanto kondensatorus, kuri nomaina iepriekš lietotos rezistorus.

8.7. CAP parametri

CAP izšķirtspēja

Ciparanalogu pārveidotājs, kuram ir 4-bitu ieeja, spēj formēt tikai 16 dažādus analogus izejas spriegumus (skat. 8.19 att.), attiecīgi 16 dažādas vērtības, kuras atbilst ieejā padotajam 4 bitu binārajam skaitlim. Tātad ciparanalogu pārveidotāja izejas spriegums nav viendabīgs analogs signāls, bet sprieguma pakāpes, kuru skaits atkarīgs no ieejas binārā signāla kārtu skaita. Ja ir 5-bitu ieeja, tad izejā iespējamas 32 dažādas vērtības, jo lielāks ieejas bitu skaits, jo lielāks ir izejas vērtību diapazons.

Izšķirtspēja nosaka, cik “sīki” pārveidotājam ir iespējams sadalīt izejošā sprieguma vērtības. Ja, piemēram, CAP izejas spriegums ir 0-10V un spēj to sadalīt 1024 izejošās vērtībās, izšķirtspēja ir augstāka salīdzinot ar to, kurš spēj sadalīt 512 izejošajās vērtībās. Tā kā izejas signāla līmeņu skaits ir tieši atkarīgs no ieejas bitu skaita, tad izšķirtspēja bieži vien tiek norādīta ar **bitu skaitu**.

Visbiežāk pieejamajiem pārveidotājiem ir 8, 10, 12 vai 16 bitu izšķirtspējas.

Izšķirtspēja tiek dota arī kā izejas sprieguma pakāpju kopējā skaita apgrieztais lielums. Piemēram, 8-bitu CAP izšķirtspēja var tikt parādīta procentuāli, kā:

$$\left(\frac{1}{2^8} \right) 100\% = 0,39\%.$$

Dažās CAP specifikācijās ir norāde uz 1 vai $\frac{1}{2}$ LSB (jaunākās kārtas bitu). Šajā kontekstā, LSB tiek uztverts, kā sprieguma pieaugums starp izejas sprieguma pakāpēm. Tā kā n-bitu pārveidotājam ir $(2^n - 1)$ tāda veida pieauguma pakāpes, tad

$$LSB = \frac{FSR}{2^n - 1},$$

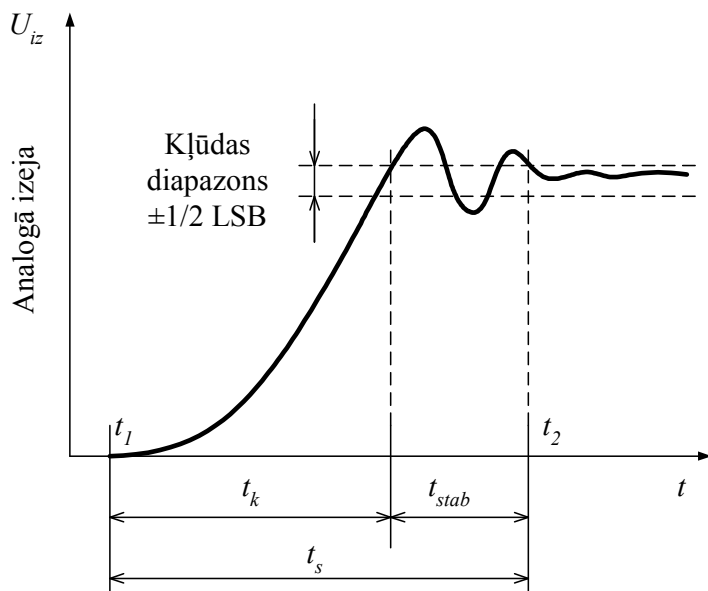
kur FSR - ir pilna izejas sprieguma skala, V.

Stabilizācijas laiks

Kad ciparanalogu pārveidotājā izeja maina savas vērtības no vienas uz citu, tā parasti nesakrīt ar jauno vērtību un var nedaudz svārstīties nelielā diapazonā no patiesās jaunās vērtības tik ilgi, kamēr tā kļūst par konstantu spriegumu.

CAP **stabilizācijas laiks** (*settling time*) ir kopējais laiks starp brīdi, kad ciparu signāls ieejā sāk mainīties un brīdi, kad izejas vērtība pēdējo reizi iekļūst noteiktā kļūdas robežā, parasti tas ir ± 1 vai $\pm 1/2$ LSB no izejas sprieguma maksimālās vērtības (skat. 8.22 att.).

Stabilizācijas laiks, biežāk pieejamajiem pārveidotājiem ir robežās no 50ns līdz dažām mikrosekundēm.



8.22 att. CAP izejas signāla stabilizācijas līkne

t_1 – ciparu signāla izmaiņas moments; t_2 – laiks, kad pēdējā svārstība pārsniedz pārregulējuma kļūdas diapazonu; t_k – kāpuma periods; t_{stab} – svārstību stabilizēšanās periods; t_s – CAP stabilizācijas laiks (*Settling time*).

Linearitātes kļūda

Ir maksimālā novirze starp analogo izejas signālu un ideālo izejas signālu. Tā kā ideālā gadījumā izejas signāls ir tieši proporcionāls ieejas signālam, tad ideālais izejas signāls izskatītos, kā taisna līnija, kura sākas no 0V. Linearitātes kļūdu parāda procentu veidā, kā procenti no pilnās - maksimālās pieļaujamās vērtības vai LSB.

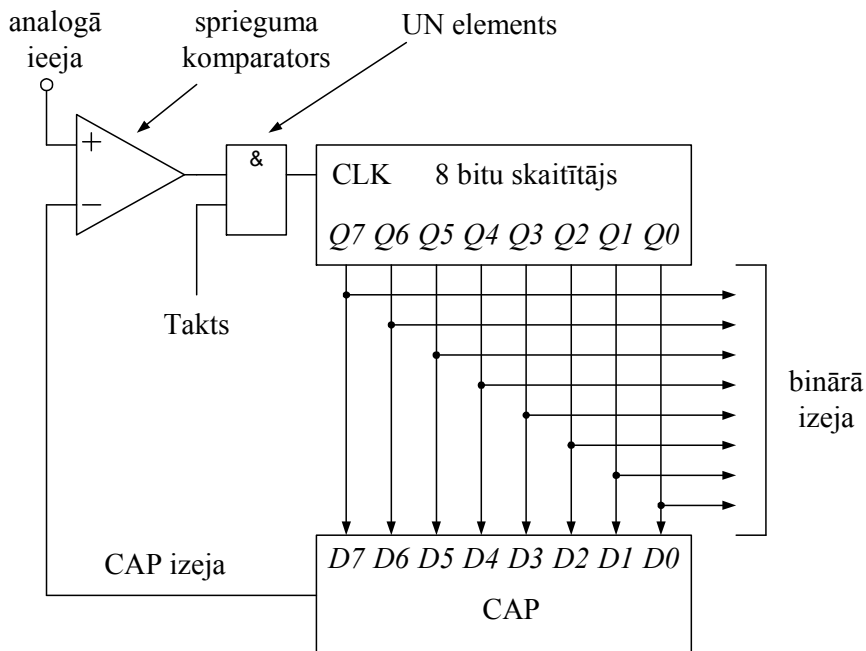
Maldu signāla zona

Maldu signāla zona (*Glitch area*) ir kopējais apgabals ar bojātiem – maldinošiem izejas spriegumiem (*Glitches*) (volti/sekundē vai ampēri/sekundē). Ražotajiem pārveidotājiem parasti tiek uzstādīti maldu signāla ierobežotāji (*deglitchers*), lai samazinātu šo zonu lielumu.

8.8. Skaitītāja tipa ACP

Vienkāršākais ACP tips ietver sevī bināro skaitītāju (*binary counter*), spriegumu komparatoru (*voltage comparator*) un CAP (skat. 8.23 att.).

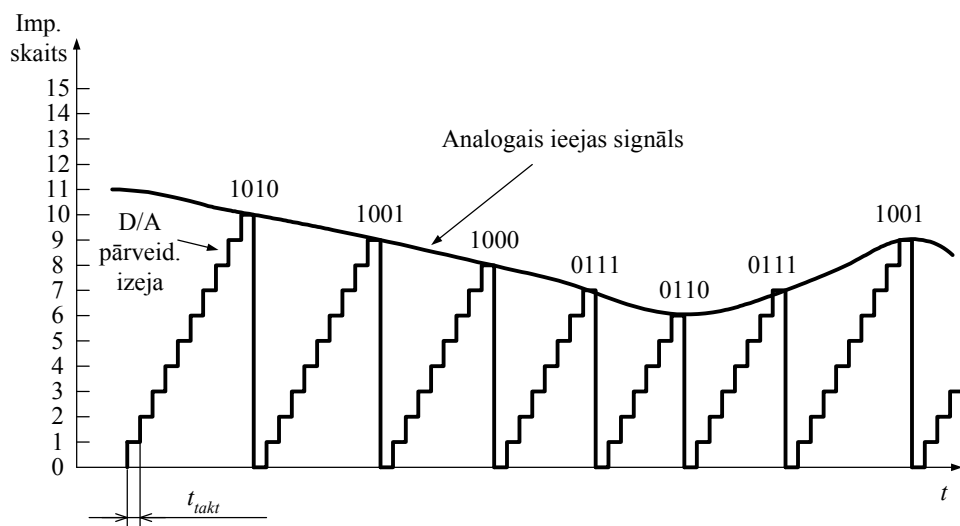
Izejas vērtība, kura nāk no sprieguma komparatora ir augsta tik ilgi, kamēr $v+$ ieejas vērtība ir lielāka par $v-$ ieeju.



8.23..att. 8-bitu ACP blokhēma

ACP analogā ieeja ir komparatora $v+$ ieeja. Tikmēr, kamēr spriegums uz tās ir lielāks par spriegumu uz $v-$, komparatora izejā ir augsts signāla līmenis. Uz loģiskā elementa UN ieejas ir 1 un takts (*clock*) impulsi tiek padoti uz skaitītāju (*counter*).

Ciparu signāls no skaitītāja ar CAP palīdzību tiek konvertēts uz analogo spriegumu un šis spriegums tiek padots uz komparatora $v-$ ieeju. Skaitītājs skaita līdz skaitlim, kura ekvivalentā, ar CAP iegūtā, analogā vērtība ir vienāda ar analogo ieejas signāla vērtību. Kad tās ir vienādas, komparatora pārslēdzas otrā režīmā (*switches low*) un uz UN elementa ieejas tiek padots 0 līmenis. Takts impulsi uz skaitītāja ieeju vairs nenonāk un skaitītājs pārtrauc skaitīt. Skaitis, kurš ir sasniegts ir ciparu izejas signāls, kurš ir proporcionāls ieejas analogajam signālam. Attēlā nav parādīta vadības shēmas daļa, kas tiek izmantota, lai fiksētu izejas signālu un pārslēgtu skaitītāju jaunam mērīšanas ciklam. Cikls tiek atkārtots, kad tiek saņemta jauna analogā ieejas signāla vērtība.



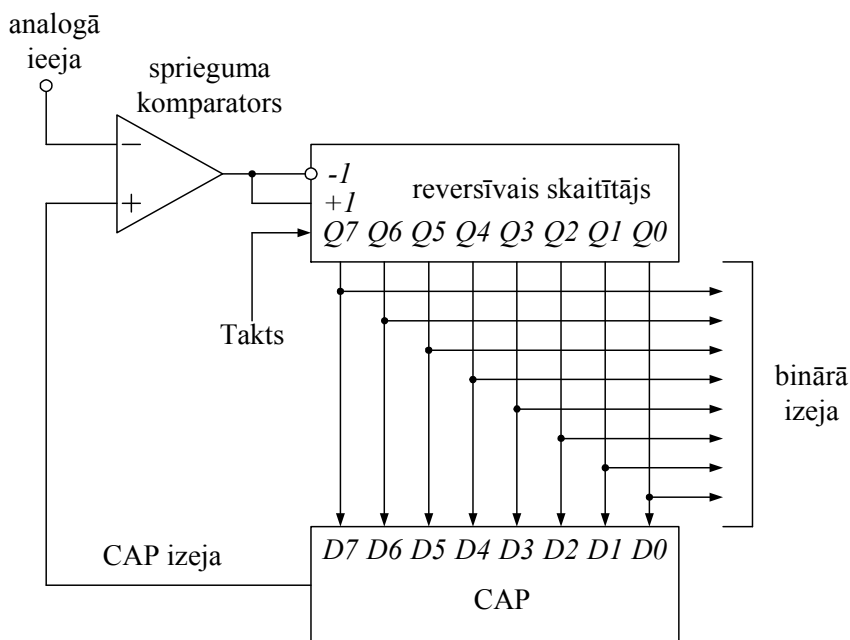
8.24 att. CAP izejas signāls 4-bitu ACP

Trūkums šāda veida pārveidotājam ir tāds, ka pārveidošanas laiku ietekmē analogā signāla vērtība: jo lielāka ieejas signāla vērtība, jo vairāk takts impulsi nepieciešams, lai sasniegtu vajadzīgo skaitu.

Piemēram, 8 bitu pārveidotājam nepieciešams līdz pat 255 takts impulsiem, lai veiktu pārveidošanu, tātad skaitītāja veida ACP ir diezgan lēndarbīgi, salīdzinājumā ar citu tipu ACP.

8.9. Sekotājtipa ACP (*Tracking*)

Lai samazinātu ACP pārveidošanas laiku, summējošo skaitītāju (*up-counter*) var nomainīt ar reversīvo skaitītāju (*up/down counter*), kurš darbojas gan kā summējošais, gan kā atskaitošais (skat. 8.25 att.). Skaitītājs skaita uz augšu un uz leju no tā pēdējās vērtības, lai sasniegtu tā nākamo stāvokli, nevis kā tas bija iepriekšējā tipa ACP, kur skaitītājs pārslēdzās uz 0 un sāka skaitīšanu no jauna.



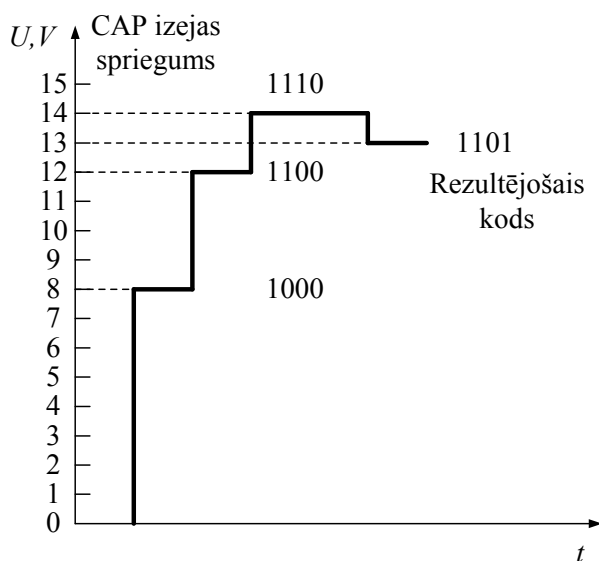
8.25 att. Sekojošais skaitītāja tipa ACP

Lai gan pārveidotāju veidi mūsdienās ir vairāk, bet neskaitot iepriekš aplūkotos, vēl pie ACP pazīstami ir *Flash* tipa ACP, kuri skaitās vieni no visātrākajiem, jo apstrāde notiek paralēlā režīmā sadalot spriegumu līmeņos un izmantojot prioritātes kodētāju (*priority encoder*), kā arī *Dual-Slope*, jeb integrējošie ACP.

8.10. Secīgās aproksimācijas ACP

Metode, kuru sauc par secīgo aproksimāciju ir vispopulārākais paņēmieni, kurš tiek izmantots ACP, un, ja neņem vērā *flash* tipa pārveidotājus, tad šie ir visātrākie. Secīgās aproksimācijas metodi vieglāk ir izskaidrot ar piemēra palīdzību. Pieņemsim, ka izejas vērtības no CAP ir robežās no 0V līdz 15V un tāvad binārā ieeja ir robežās no 0000 līdz 1111. attiecīgi apzīmējot 0000 = 0V, 0001 = 1V utt. Pieņemsim, ka

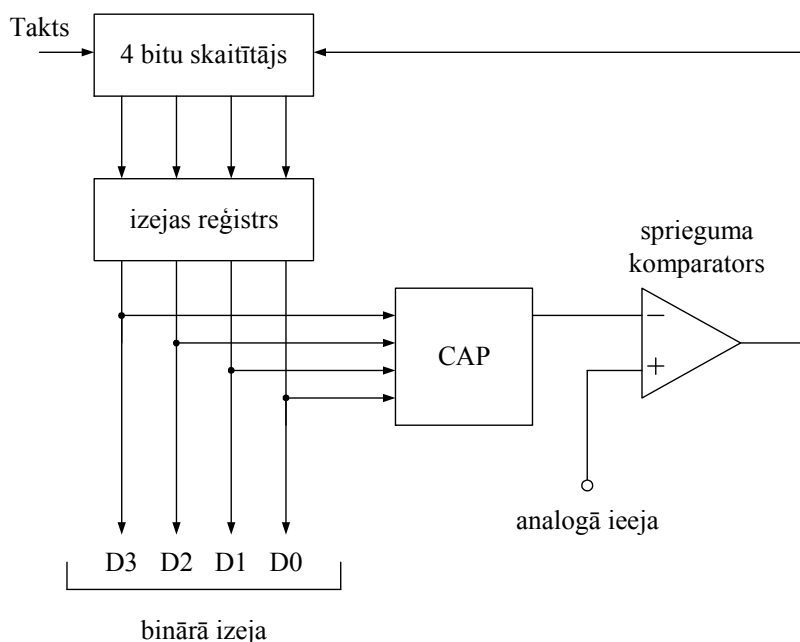
nezināmais analogais ieejas signāls ir 13V (skat. 8.26 att.). Pirmajā takts impulsā (*clock pulse*), izejas reģistrā (*output register*) tiek ielādēts 1000, kas tiek pārveidots ar CAP palīdzību uz 8V. Spriegumu komparators noskaidro, ka 8V ir mazāka vērtība par analogo ieejas signālu 13V, tad nākamā takts impulsā, kontroles shēma liek izejas reģistram ielādēt 1100. CAP izejas vērtība tagad ir 12V, kuru atkal komparators salīdzina ar analogo ieejas signālu un arī tas ir par mazu. Sekojoši nākamajā takts impulsā tiek ielādēta 1110. CAP izejas vērtība tagad ir 14V, kuru komparators tagad nosaka, kā lielāku par 13V analogo ieejas signālu. Tādēļ pēdējais 1, kas tika ielādēts reģistrā, tiek nomainīts uz 0 un 1 tiek ielādēts jaunākās kārtas bitā LSB. Šajā brīdī CAP izejā ir 13V, kas sakrīt ar analogo ieeju, tātad pārveidošana ir pabeigta. Izejas reģistrs satur vērtību 1101.



8.27 att. Secīgās aproksimācijas piemērs

Izmantojot aproksimācijas metodi, n -bitu pārveidošanai nepieciešami n takts impulsi. Jaunākajos šī veida pārveidotājos, jau tiek izmantota kondensatoru pārslēgšanas tehnoloģija (*switched-capacitor*).

Primārā komponente, kas iespaido secīgās aproksimācijas pārveidotāja precizitāti ir CAP. Attiecīgi atbilstoši CAP pievienotajam spriegumam un kāpnveida matricai (*ladder network*) ir jābūt precīzai, pretējā gadījumā nenotiks precīza pārveidošana. Arī analogajam signālam pārveidošanas laikā, vajadzētu būt fiksētam.



8.27 att. Secīgās aproksimācijas 4-bitu ACP

8.11. ACP parametri

ACP **izšķirtspēja** ir mazākā izmaiņa, kuru var nolasīt pie analogās ievades. Tāpat, kā CAP, izšķirtspēja ir tieši atkarīga no bitu skaita, tādēļ to bieži vien uzrāda vienkārši kā kopējo ievades iespējamo bitu skaitu. Patiesā vērtība ir atkarīga no analogās ievades pilnās skalas diapazona (*full scale range FSR*):

$$\text{izšķirtspēja} = \frac{FSR}{2^n}.$$

Dažiem ACP ir 8-4-2-1 BCD (binary-coded-decimal) (skat.8.2.nodaļā) izvade. BCD pārveidotāju izšķirtspēja bieži vien ir attiecināma kā decimālo skaitļu skaits, kuri ir pieejami izvadē. Attiecīgi, kur katrs skaitlis tiek attēlots kā 4-bitu virkne (4-bitu veidā). Šajā kontekstā termins “½ skaitļa” tiek izmantots atsaucoties uz vienu bināro izvadi.

Piemēram, izvades skaitlis 1 ½ tiek reprezentēts, kā 5-bitu virkne. Skaitlis ½ tiek izmantots, kā vecākās kārtas bits (MSB) un tā atrašanās skaitlī, dubulto decimālo vērtību skaitu, kuras var tikt prezentētas ar 4 BCD bitiem.

Dažiem BCD pārveidotājiem tiek izmantots multiplexors (*multiplexer*), lai

palielinātu ciparu izvades skaitu. Piemēram, Texas Instruments TLC 135C 4 ½-digit ACP, izteikts kā sprieguma izšķirtspēja:

$$\text{izšķirtspēja} = \frac{FSR}{10^d},$$

kur d - decimālo izvades skaitļu skaits.

Laiks, kas nepieciešams, lai pārveidotu vienu analogo ievadi uz digitālo izvadi tiek saukts par ACP “pārveidošanas laiku” (*conversion time*). Šis laiks var tikt uzrādīts, ieskaitot dažādas citas aiztures (*delays*), kā, piemēram, piekļuves laiku (*access time*).

Jaunākā bita sprieguma vērtība LSB ACP tiek definēta tādā pat veidā, kā CAP:

$$LSB = \frac{FSR}{2^n - 1},$$

kur FSR - ir pilnās skalas diapazons (*full scale range*), V.

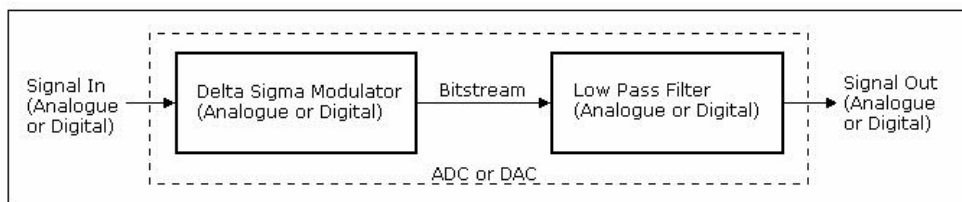
8.12. Delta – Sigma ACP un CAP

Delta – sigma CAP un ACP ir ātrdarbīgākie pārveidotāji, tos plaši izmanto skaņas signāla pārveidošanai ciparu signālā un ciparu ieraksta pārvēršanai skaņā. Delta – sigma ACP no analogā skaņas signāla veido viena bita ciparu virkni. Bināro viena bita ciparu virkni var izmantot CD ierakstam, vai konvertēt citā formātā.

Delta – sigma pārveidotāja izgudrotāji: Inose un Jasuda.

Matemātikā un fizikā liels grieķu burts delta (Δ) nozīmē atšķirību vai izmaiņu, savukārt liels burts sigma (Σ) nozīmē summēšanu.

Delta – Sigma CAP vai ACP (skat. 8.28 att.) vienmēr sastāv no **delta – sigma modulatora** un **zemo frekvenču filtra** (*low pass filter*).



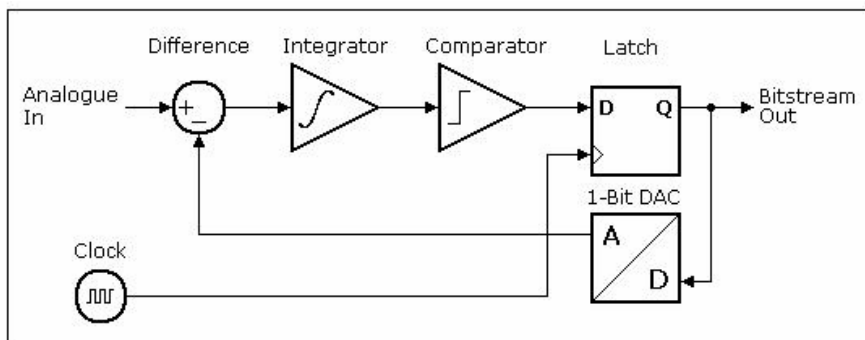
8.28 att. Delta – sigma pārveidotāja blokshēma

Zemo frekvenču filtrs

Zemo frekvenču filtrs izejā tiek izmantots, lai iegūtu izejas signāla vidējo līmeni no bitu virknes signāla. Bitu virkni var uzskatīt par signālu ar derīgo informāciju tā zemākajā frekvenču spektrā un dažādu troksni virs tā. Zemo frekvenču filtrs laiž cauri zemo frekvenču joslu, bet ierobežo augstāko frekvenču daļu.

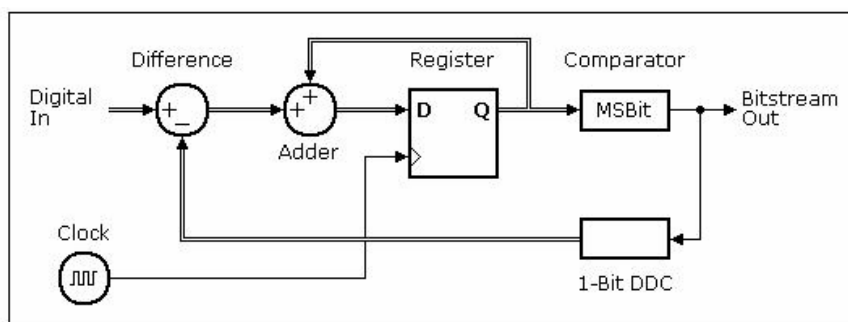
Delta – sigma modulators

Delta – sigma modulators ir delta – sigma pārveidotāja kodols. Tas rada bitu virknes. Vienkārša analogā pirmās kārtas delta – sigma modulatora blokshēma parādīta 8.29 attēlā.



8.29 att. Analogā pirmās kārtas delta – sigma modulatora blokshēma

Vienkārša ciparu pirmās kārtas delta – sigma modulatora blokshēma ir 8.30 attēlā.



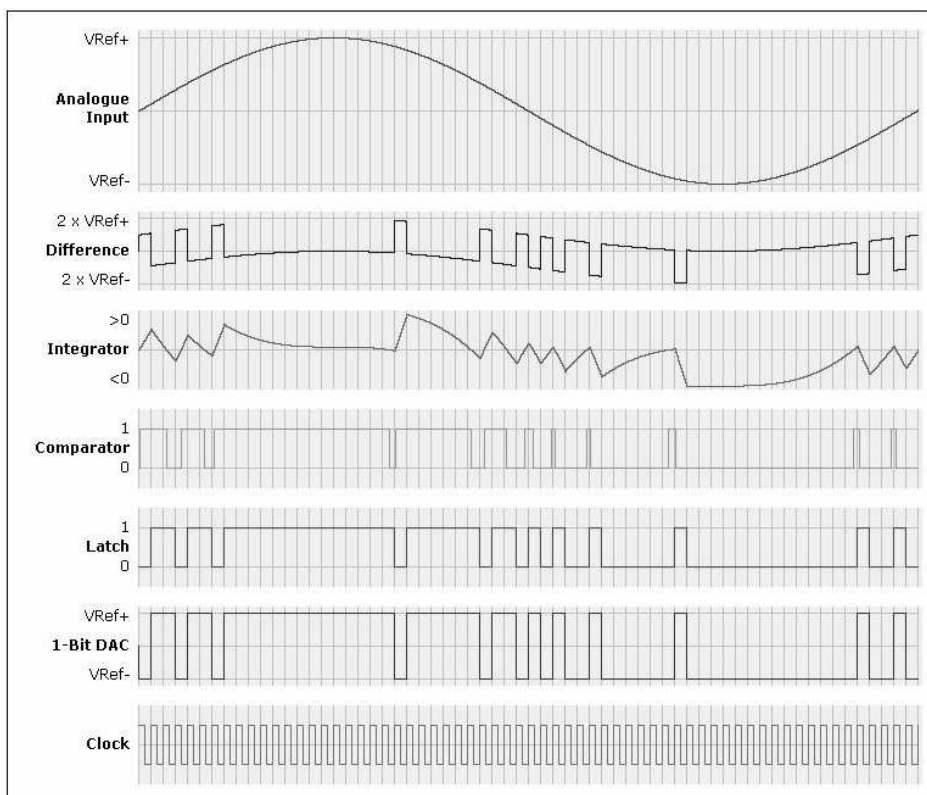
8.30 att. Ciparu pirmās kārtas delta – sigma modulatora blokshēma

Komparators nosvītro MSBitu no reģistra un 1-Bit DDC (*Digital-to-Digital Converter*) padod vienu bitu atpakaļ uz visiem pirmā summatora ieejas bitiem. Piemērā DDC konvertē 1 uz FFFF (hex) un 0 kļūst 0000 (hex).

Signāla diagramma (analogā versija) apskatāma 8.31 attēlā.

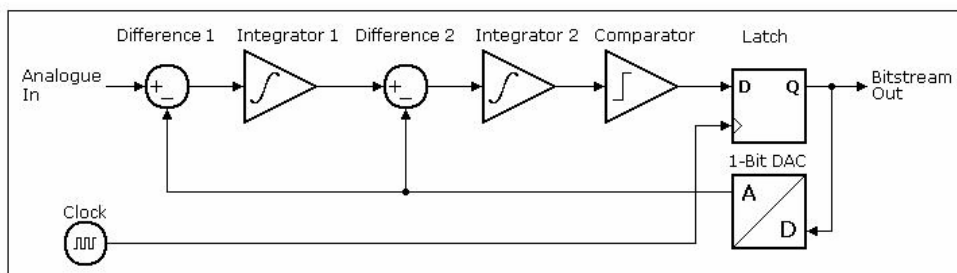
Vidējā (ar zemo frekvenču filtru filtrēta) bitu virkne precīzi neattēlo ieejas signālu. To vienmēr izmaina kāds troksnis.

Viena no metodēm kā cīnīties ar troksni ir palielināt takts frekvenci (*clock rate*). Naikvista teorēma nosaka, ka diskretizācijas frekvencei ir jābūt vismaz divreiz lielākai par ieejas frekvenci. Jebkura tālāka palielināšana tiek saukta par virsnolasi „oversampling”.



8.31.att. Signāli pirmās kārtas analogajā modulatorā

Piemērs: pieņem, ka audio signāls ir 20 kHz. Tipiska diskretizācijas frekvence ir 48 kHz. Tipiskā delta – sigma pārveidotāja takts frekvence būs $64 \times 48 \text{ kHz} = 3072 \text{ kHz}$. Tas ir vienāds ar 64 virsnolašu kārtām. Attēlā 8.31 takts frekvence 64 reizes augstāka par ieejas signāla frekvenci. Tas nozīmē, ka virsnolases frekvences kārtai ir jābūt mazākai par 32 pie dotās ieejas frekvences.



8.32.att. Analoga otrās kārtas delta – sigma modulatora blokskāme

Cits – vienkāršāks ceļš kā samazināt troksni ir izmantot augstākas kārtas delta –

sigma modulatoru. Bitu virknē, ko veido augstākas kārtas modulators, ir mazāk trokšņi zemo frekvenču filtra izejā.

Otrās kārtas delta – sigma modulators (skat. 8.32 att.).

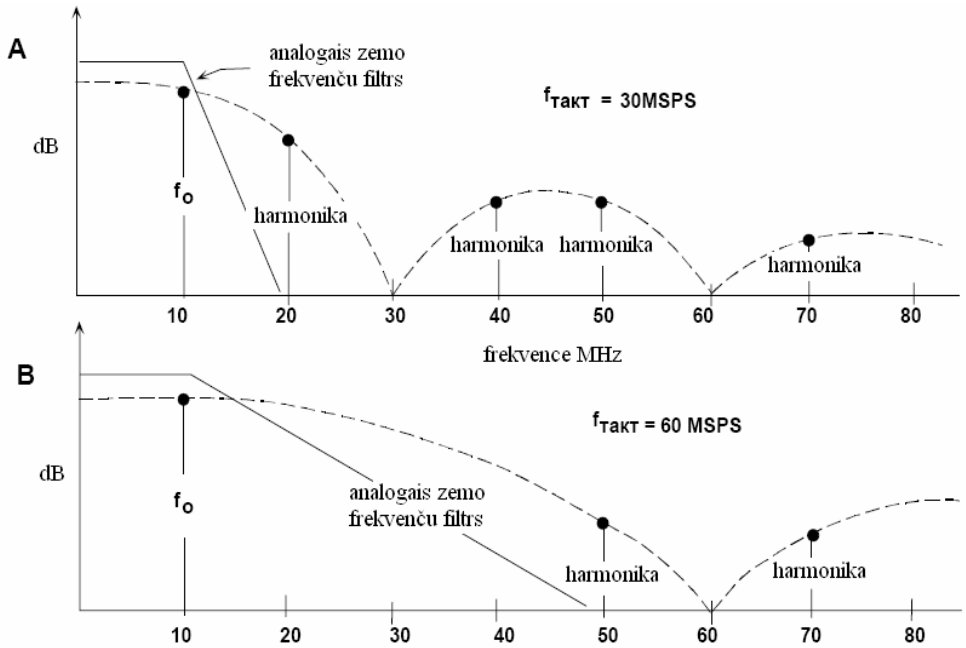
Delta – sigma modulatoru, kura kārtā ir lielāka par 2 ir iespējams uzkonstruēt, taču ne vienkārši pievienojot papildus pakāpes kā iepriekš. Iemesls tam ir fāzes pagriešana, ko rada vairāk kā divi integratori, kas padara sistēmu nestabilu. Delta – sigma ACP, ko izmanto audio, parasti lieto piektās kārtas modulatorus un virsnolasses frekvences 64.

8.13. Interpolējošie CAP

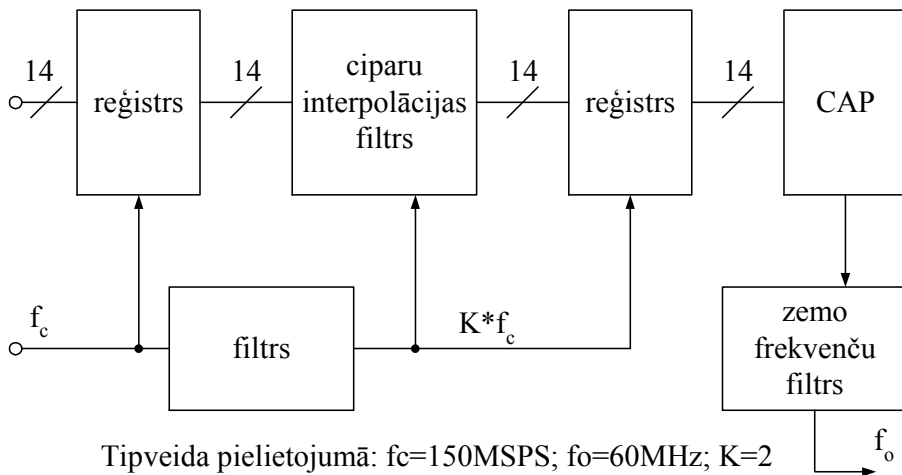
Sistēmās, kurās izmanto analogciparu pārveidošanu, rezervēta diskretizācija samazina prasības pret zemo frekvenču filtru (*antialiasing filter*). Delta - sigma ACP visvairāk piemīt šīs raksturīgās priekšrocības. Sistēmās, kas bāzējas uz ciparanalogu pārveidošanu (tādās kā tiešās ciparu sintēzes sistēmās, DDS), līdzvērtīga mērķa sasniegšanai var izmantot interpolācijas koncepciju. Šī koncepcija parasti tiek izmantota mūzikas CD atskaņotājos, kur datu atjaunošanas pamata ātrums no CD ir aptuveni vienāds ar 44 KSPS. „Nullu” pievienošana paralēlajai datu plūsmai palielina efektīvo atjaunošanas ātrumu četras, astoņas vai sešpadsmit reizes, salīdzinot ar pamatātrumu. Četrkārtīgu, astoņkārtīgu vai sešpadsmit kārtīgu datu plūsmu laiž caur ciparu interpolācijas filtru, kas ģenerē papildus datu vērtības.

Rezervētās diskretizācijas lielais ātrums ļauj palielināt signāla augšējo frekvenču (*image*) diapazonu, tādējādi pieļaujot izmantot mazāk sarežģītus filtrus ar daudz plašāku pārejas diapazonu. Viena bita delta-sigma CAP arhitektūra ir attīstītas koncepcijas piemērs un to bieži izmanto CD atskaņotājos.

Šī pati koncepcija var tikt izmantota arī ātrdarbīgos CAP. Pieņemsim, ka tradicionālie CAP darbojas ar diskretizācijas frekvenci 30 MSPS (skat. 8.33a att.). Ja CAP darbojas ar izejas frekvenci 10 MHz, blakus frekvences komponente $30-10=20$ MHz būtu jāfiltrē ar analogo zemo frekvenču filtru (*antialiasing*). Filtra pārejas diapazons atrodas no 10 līdz 20 MHz. Pieņemsim, ka blakus frekvences signālu jāsamazina par 60dB. Tāpēc filtra raksturlīknei ir jāiet no caurlaides joslas, kas beidzās 10 MHz punktā, līdz vājinājumam par 60 dB aiztures joslā, kas sākas 20 MHz punktā, tas ir caur pārejas diapazonu, kas atrodas 10 un 20 MHz (viena oktāva). Katra kārtā Batervorta filtram dod 6 dB vājinājumu uz katru oktāvu. Tāpēc lai nodrošinātu nepieciešamo vājinājumu kā minimums nepieciešama 10 kārtas filtrs. Filtri kļūst vēl sarežģītāki, ja ir nepieciešams vēl šaurāks pārejas diapazons. Pieņemsim palielinām CAP atjaunošanas ātrumu līdz 60MSPS un ieliekam „nulli” starp katriem sākuma datiem. Paralēlo datu plūsmas ātrums tagad ir 60 MSPS, taču ir jānosaka punktu skaits ar nulles datiem. Lai to izdarītu, datu plūsma ar 60 MSPS ar papildus pievienotajām nullēm, tiek laista caur ciparu interpolācijas filtru, kas aprēķina papildus datu vērtības.



8.33 att. Prasības analogajam filtram pie $f_0=10 \text{ MHz}$; $f_c=30 \text{ MSPS}$ un $f_c=60 \text{ MSPS}$



8.34 att. 14-bitu interpolējošais 150 MSPS CAP AD9772 TXDAC

Ciparu filtra reakcija pie divkārtas diskretizācijas parādīta 8.33b attēlā. Tagad analogā zemo frekvenču filtra (*antialiasing filter*) pārejas zona aizņem no 10 līdz 50

MHz. Šī pārejas zona ir nedaudz lielāka kā divas oktāvas un piektās vai sestās kārtas Batervorta filtrs ir pietiekošs.

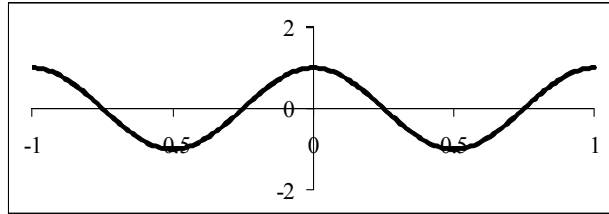
AD9772 mikroshēmas vienkāršota blokshēma 14-bitu interpolācijas CAP ar divkāršu diskretizāciju redzama 8.34 attēlā.

Iekārta, kas paredzēta 14-bitu ieejas datu apstrādei, kas tiek padoti ar frekvenci līdz 150MSPS. Maksimālā datu frekvence interpolatora izejā sasniedz 300 MSPS. Izejas frekvencei 60 MHz, atjaunošanas ātrums 150 MHz un diskretizācijas koeficienta 2 blakus frekvence vienāda ar $300 \text{ MHz} - 60 \text{ MHz} = 240 \text{ MHz}$. Tāpēc pārejas diapazons analogajam filtram ir 60 MHz – 240 MHz. Bez diskretizācijas blakus frekvence vienāda $150 \text{ MHz} - 60 \text{ MHz} = 90 \text{ MHz}$ un filtra pārejas diapazons atrodas intervālā no 60 MHz līdz 90 MHz.

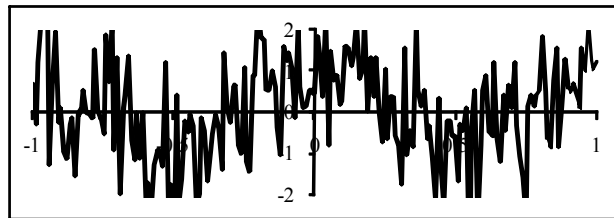
9. Traucējumu novēršana mērsistēmās

Elektriskās mērsistēmas ir pakļautas dažādu traucējumu iedarbībai, kuru rezultātā rodas mērījumu kļūdas. Gala rezultātā mērsistēmas izejā parādās signāls, kurš bez derīgā signāla satur arī dažādu iemeslu dēļ radušos trokšņu signālu piejaukumus (9.1. att.)

Derīgais signāls



Derīgais signāls +
trokšnis



9.1 att. Signāls un trokšnis

Kā redzam, trokšņa signāls summējas kopā ar derīgo signālu, izmaina tā formu un amplitūdu radot ievērojamas mērīšanas kļūdas.

Mērsistēmas trokšņu noturību raksturo attiecība signāls-trokšnis. To aprēķina pēc formulas:

$$S_n = 20 \lg \frac{U_n}{U_s}, \quad (9.1)$$

kur S_n – attiecība signāls - trokšnis, dB, U_n - trokšņa līmenis, V, U_s - signāla līmenis, V.

Trokšņus iedala divos veidos – iekšējie trokšņi un ārējie trokšņi.

Pie **iekšējiem trokšņiem** pieder elektronisko shēmu elementu radītie trokšņi. Tos rada gan aktīvie shēmas elementi (pusvadītāju ierīces, operacionālie pastiprinātāji u.c.), gan pasīvie elementi (rezistori, kondensatori u.c.),

Pie iekšējiem trokšņiem jāpieskaita arī signāla pārveidošanas trokšņi, piemēram, ACP radītie signāla diskretizācijas trokšņi. Modernās tehnoloģijas dod iespēju

izvēlēties signāla apstrādes ierīces ar ļoti mazu iekšējo trokšņu līmeni, tāpēc šos trokšņus sīkāk neaplūkosit.

Ārējos trokšņus rada dabiskie vai cilvēka darbības rezultātā radītie elektriskie vai magnētiskie lauki, kas iedarbojas uz mērīšanas sistēmas elementiem un inducē tajos trokšņu signālus. Traucējošie signāli nokļūst mērīšanas sistēmās pa dažādiem ceļiem un to novēršana ir viens no svarīgākajiem un grūtākajiem uzdevumiem, kas jārisina projektējot dotā procesa parametru mērīšanas vai automātiskās regulēšanas sistēmas.

Ārējo trokšņu avoti

Galvenie ārējo trokšņu avoti ir sekojoši:

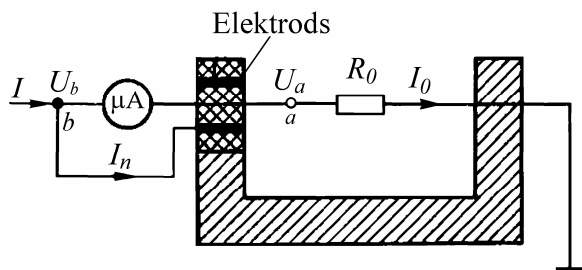
- ✓ noplūdes ieejas ķēdēs,
- ✓ termoelektriski vai ķīmiski EDS,
- ✓ elektromagnētiskā mijiedarbība, radiofrekvences iedarbe,
- ✓ signāli no blakusesošām iekārtām,
- ✓ elektriskā izlāde (elektriskais loks),
- ✓ nekvalitatīva montāža.

Noplūdes ieejas ķēdēs rodas nekvalitatīvas izolācijas rezultātā. Izolācijas pretestība būtiski samazinās, ja izolators ir mitrs un netīrs. Šajā gadījumā mitra netīrumu (putekļu) kārtiņa kļūst elektrovadoša un ķēdē rodas noplūdes. Parasti noplūžu rezultātā rodas mērīšanas instrumenta „nulles” nobīde, kas rada mērījuma statisko kļūdu.

Efektīvai noplūžu samazināšanai jāvēro sekojoši nosacījumi:

- ✓ ieejas ķēžu montāžai jāizmanto kvalitatīvi izolējošie materiāli,
- ✓ jānodrošina laba ieejas ķēžu izolēšana no mitruma piekļuves,

Īpašos gadījumos noplūžu kompensēšanai jāizmanto ekvipotenciāla metode (skat. 9.1 att.). Pieņemsim, ka augstomīga sensora R_0 viens izvads pievienots korpusam, bet otrs caur izolatoru izvadīts no korpusa un pievienots mikroampērmetram. Barošanas spriegums pievienots punktā b . Ja ārēju apstākļu dēļ caur izolatoru sāks plūst noplūdes strāva, mikroampērmetra rādījumi ievērojami izmainīsies radot mērījuma kļūdu.



9.1 att. Ekvipotenciāla metode noplūžu samazināšanai

Lai to novērstu, izolatorā iestrādā gredzenveida elektrodu, kuram pievieno barošanas avota spriegumu. Noplūdes strāva I_n plūdis apejot mikroampērmēru un mērījuma kļūda tiek novērsta.

Termoelektriskie EDS rodas Sībeka efekta rezultātā (skat. 4. nodaļu). Elektriskās shēmas montāžā tiek izmantoti dažādi metāli, piemēram, vara vada lodējums ar lodalvu, veido termopāri. Iekārta darbības rezultātā, atsevišķos tās mezglos izdalās siltums un temperatūra izmainās. Tā rezultātā parādās termiskais EDS, kurš noteiktos apstākļos var summēties ar ieejas signālu. Ja ieejas signāls ir vājš, tad šie spriegumi kļūst salīdzināmi vai pat vienādi. Rodas liela mērījuma kļūda. Lai izvairītos no šādām kļūdām, vājstrāvas ieejas ķēdes jānovieto pēc iespējas tālāk no siltumu izdalošām jaudas ķēdēm. Signāla pārvades ķēžu montāžai materiāli jāizvēlas tā, lai neveidotos termiskais EDS.

Elektroķīmiskai EDS rodas vietās, kur ir iespēja uzkrāties netīrumiem. mitruma rezultātā veidojas elektrolīts un starp dažādu metālu vadītājiem veidojas potenciālu starpība. Šis efekts novērojams vājstrāvas slēdžos, kur, nodiluma rezultātā, veidojas netīrumi kas mitrumā kļūst par elektrolītu. Elektroķīmiskos EDS novērš nodrošinot shēmas tīrību un atrašanos sausumā.

Lielākā traucējumu daļa nonāk mērīšanas sistēmā **elektromagnētiskās un elektrostatiskās indukcijas** ceļā. Jebkurā mērsistēmas elektrovadošā elementā inducējas parazītiskās strāvas, kas noteiktos apstākļos var summēties ar derīgo signālu un radīt mērījuma kļūdu. Šādu traucējumu novēršanai izmanto vairākas metodes:

✓ Signāla filtrēšana.

Metode efektīvi izmantojama gadījumos, kad derīgā signāla frekvence ir ievērojami atšķirīga no trokšņa frekvences. Signāla filtrēšanu mēs jau apskatījām 5. nodaļā.

✓ Ekranēšana.

Ekranēšanas uzdevums ir novērst magnētisko un elektrisko lauku iedarbību uz signāla pārvades līnijām.

✓ Zemēšana.

Traucējumu iedarbībai visvairāk ir pakļautas signāla pārvades līnijas. Bieži vien sensori ir ar sprieguma izeju un nelielu (10 – 50 mV) izejas sprieguma vērtību.

Gadījumos, kad signāls jāpārvada lielākos attālumos, vēlams izmantot strāvas izeju, kas dod iespēju pārvadīt signālus pat vairāku desmitu metru attālumos. Tas izskaidrojams ar to, ka traucējumu avoti ir uzskatāmi par sprieguma avotiem ar lielu izejas pretestību, savukārt derīgā signāla strāvas izejai raksturīga zema izejas pretestība. Tas nodrošina efektīvu traucējumu samazināšanu.

Ekranēšana un iezemēšana

Iekārtas elementu iezemēšana un ekranēšana ir efektīvi pasākumi traucējumu līmeņa samazināšanai. Diemžēl ne vienmēr šie pasākumi dod gaidīto efektu. Nepareiza

atsevišķu daļu iezemēšana un ekranēšana var radīt pretējo efektu - palielināt trokšņu līmeni iekārtas izejā.

Zemējuma uzdevumi:

- ✓ Pasargāt cilvēkus no augsta sprieguma iedarbības.
- ✓ Pasargāt iekārtas no statisko spriegumu iedarbības.
- ✓ Samazināt trokšņu līmeni.

Izšķir trīs zemējuma veidus:

- ✓ Iekārtu korpusu zemējums jeb **korpusa „zeme”**.

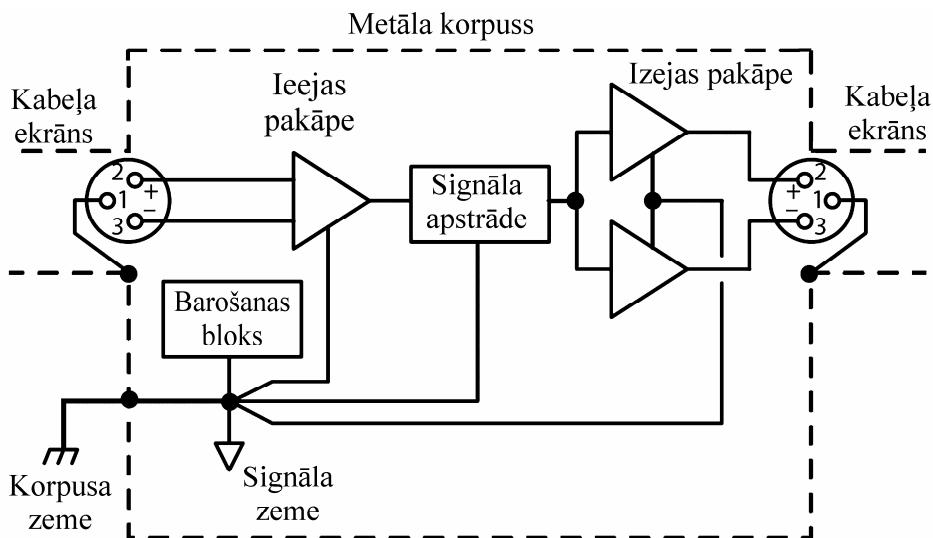
Iekārtas vai tās atsevišķu daļu metāliskos korpusus pievieno „0” potenciālam (tīkla zemei) izmantojot resnu vara vadu. „Zemes” pretestībai jābūt nelielai un stabilai.

- ✓ **Signāla „zeme”.**

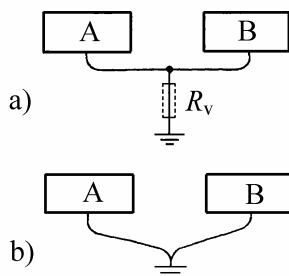
Signāla „zeme” ir ierīces elektroniskās shēmas kopējais nulles punkts, kurš ir savienots ar barošanas avota viduspunktu (dīvpolārājā barošanā) vai kādu no avota poliem (parasti ar negatīvo polu). Ja signāla pārvadīšanai tiek izmantota nesimetriskā līnija, viens no izejas vadiem tiek pievienots signāla zemei. Signāla „zemei” jāveido „zvaigznes” slēgums, un ar korpusa „zemi” jāpievienojas tikai vienā punktā (9.2 att.).

- ✓ Tīkla „zeme” jeb nullējums.

Tīkla zeme ir elektrotīkla nullvada potenciāls, kurš ir savienots ar trīsfāzu tīkla viduspunktu un tieši pievienots zemesvadam. **Nemiet vērā, ka ne vienmēr tā tas ir.** Sienas kontaktam ar zemējumu (trīsvadu) jāpienāk trīs vadiem, no kuriem viens ir savienots ar nullpunktu. Korpusa zemi pievieno šim nullējumam.



9.2 att. Korpusa un signāla zemes savienošana



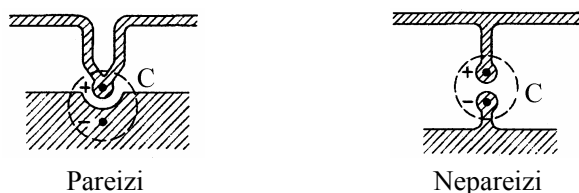
9.3 att. Iekārtu korpusu pievienošana tīkla zemei

a) nepareizi, b) pareizi

Attēlā 9.3 parādīti iekārtu korpusu zemējuma veidi. Iekārtu A un B korpusi savienoti kopā ar resnu vadu, un tad pieslēgti zemējuma punktam ar kopēju vadu (9.3a att.), kura pretestība ir R_v .

Lai arī vada pretestība ir niecīga, uz tās, klejojošo strāvu ietekmē, radīsies sprieguma kritums, kas palielinās trokšņa līmeni iekārtā. Šādas kļūdas bieži novērojamas, un, nepareizas zemēšanas dēļ, trokšņu signāli reizēm ievērojami pārsniedz derīgo signālu.

Pareiza zemējuma slēgums parādīts 9.3b. attēlā. Šajā gadījumā abu iekārtu korpusi ar atsevišķiem vadiem pieslēgti kopējai zemei vienā punktā. Šāds slēguma veids nodrošina efektīvu trokšņu līmeņa samazināšanu. Līdzīga situācija novērojama pievienojot barošanas sprieguma filtru kondensatorus kopējai signāla zemei (skat. 9.4 att.).



9.4 att. Pareizs un nepareizs stipras strāvas vadītāju izvietojums shēmu montāžā

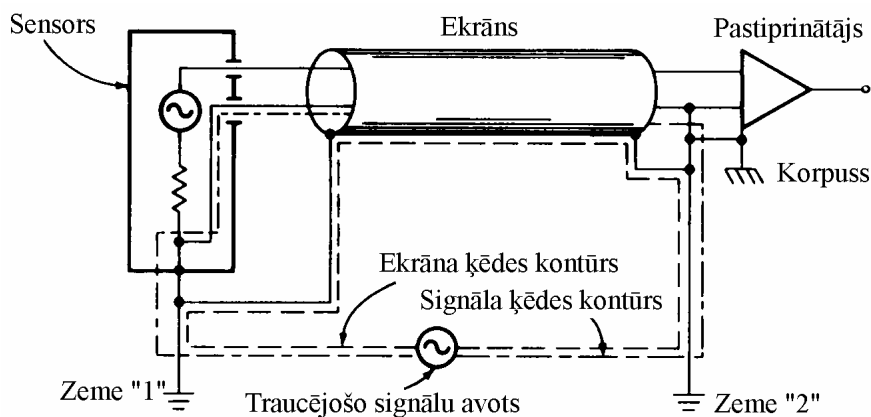
Signālu pārvadīšanai starp mērsistēmas atsevišķām daļām izmanto dažādus kabeļus. Lai samazinātu trokšņu inducēšanos pārvades līnijās, lieto ekranētos kabeļus ar iezemētiem ekrāniem. Jāņem vērā, ka nepareiza kabeļa ekrāna iezemēšana, radīs daudz lielāku trokšņu līmeni nekā neekranēts kabelis. Parasti lielākās kļūdas rodas gadījumos, kad sensora izeja ir vienpolāra (9.5 att.).

Raksturīgās kļūdas:

- ✓ kabeļa ekrānu pievieno zemei abos kabeļa galos,
- ✓ kabeļa ekrānu izmanto signāla pārvadei.

Pieņemsim, ka signāls no sensora ar nesimetrisku izeju, tiek pārvadīts pa ekranētu divdzīslu kabeli un kabeļa ekrāna abi gali ir iezemēti (9.5 att.).

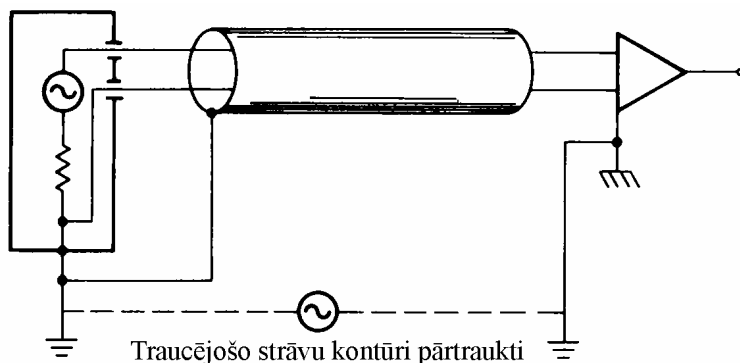
Zemējuma kontūrā starp punktiem Zeme"1" un Zeme"2" rodas klejojošās strāvas, kas darbojas kā traucējošo signālu avots. Šādā situācijā izveidojas divi noslēgti **traucējošā signāla kontūri** – signāla ķēdes kontūrs un ekrāna ķēdes kontūrs. Kontūros plūstošās trokšņu signāla strāvas summējas ar derīgā signāla strāvu un rezultātā izkropļo derīgo signālu. Šādos slēgumos trokšņu līmenis nereti pārsniedz derīgā signāla līmeni radot lielas mērījumu kļūdas.



9.5 att. Parazītisko strāvu kontūru veidošanās ekranētā kabelī nepareiza zemējuma gadījumā

Pareiza kabeļa ekrāna iezemēšana.

Lai novērstu trokšņu signāla nokļūšanu mērīšanas ķēdēs ir jāpārtrauc traucējošā signāla strāva ķēdes. To panāk pareizi iezemējot signāla pārvades kabeļa ekrānu (9.6 att.).



9.6 att. Pareizi izveidots signāla pārvades kabeļa zemējums

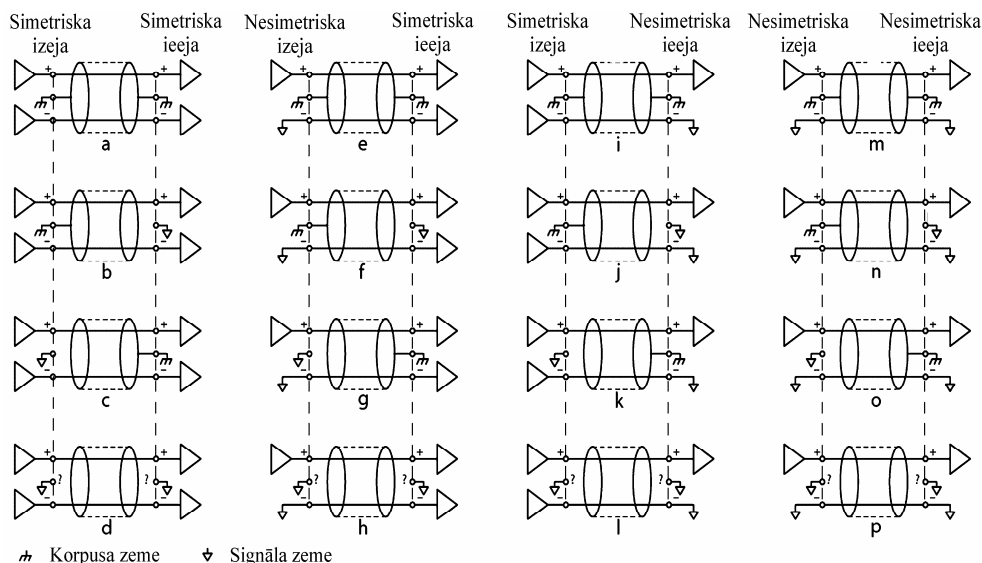
Kā redzam 9.6 attēlā kabeļa ekrāns ir iezemēts tikai vienā kabeļa galā (pie

sensora). Traucējošā signāla strāvas kontūri ir pārtraukti un trokšņu līmenis ievērojami samazināts. Kabeļa otrā galā iezemē tikai pastiprinātāja korpusu un barošanas avota viduspunktu.

Iepriekšējās nodaļās noskaidrojām, ka labākais slēgums ir simetriska ieeja un izeja. Šajā gadījumā signāla pārvade notiek pa diviem vadiem, kuru potenciāls attiecībā pret zemi ir vienāds. Šāds slēgums nodrošina vis labāku traucējumu noturību. Praksē nākas savienot atsevišķas mērsistēmas daļas ar dažādiem ieejas un izejas slēgumiem. Attēlā 9.7 redzamas iespējamās kombinācijas dažādu ieeju un izeju savienošanai.

Svarīgi!

Signāla pārvadei no viena sistēmas bloka uz otru jāizmanto **divdzīslu ekranēts kabelis**. **Signālu nedrīkst pārvadīt pa kabeļa ekrānu**. Vienpolāra slēguma gadījumos otrs kabeļa vads tiek izmantots saslēguma balansēšanai, kā tas redzams 9.7 attēlā.



9.7 att. Signāla pārvades slēgumi ar divdzīslu ekranētu kabeli

Ieteicamākie slēgumi parādīti augšējā rindā (9.7a,e,i un m). Redzam, ka šajos slēgumos kabeļa ekrāna abi gali ir pievienoti **korpusa zemei**. Šajā gadījumā uzskata, ka kabeļa ekrāns ir korpusa turpinājums. Jāņem vērā, ka korpusa un signāla zemes savienojumi izveidoti atbilstoši zvaigznes slēgumam.

Pārējos slēgumos virzienā uz leju (9.7 att.) trokšņu noturība samazinās un tie nav rekomendējami vājiem signāliem.

Ieteikumi traucējumu samazināšanai signāla apstrādes un pārvades ķēdēs:

1. Atsevišķas mērīšanas sistēmas daļas ievietojiet metāla ekrānos un iezemējiet tos

pievienojot kopējam zemējuma punktam ar atsevišķiem vadiem (zvaigznes slēgumā).

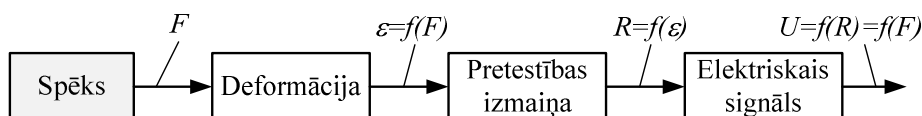
2. Nesimetriskas signāla pārvades līnijas gadījumā kabeļa ekrānu iezemējiet tikai vienā tā galā (vēlams signāla pusē). Veidojot slēguma shēmu pārliecinieties vai trokšņu signāla ķēdēs neveidojas noslēgti kontūri. Veidojiet slēgumu tā, lai tie tiktu pārtraukti.
3. Vienpolāras sprieguma avotu izejas ar mazu signāla līmeni pārveidojiet par simetriskām (balansa) izejām. Signāla pārvadei izmantojiet simetriskus ekranētos kabeļus vai vītos pārus. Labus rezultātus var panākt cieši savijot signāla pārvades vadus pat bez ekrāna. Šādā gadījumā jāņem vērā, ka var sašaurināties signāla frekvenču joslas platums.
4. Signāla pārvadīšanai lielākos attālumos izmantojiet sensorus ar strāvas izeju.
5. Pēc iespējas sašauriniet signāla apstrādes trakta caurlaides joslu izmantojot dažādus filtrus.
6. Montējot iekārtas signāla pārvades vadus novietojiet pēc iespējas tālāk no barošanas un citiem stiprās strāvas vadiem. Sekojiet, lai tie nebūtu paralēli viens otram. Signāla pārvades kabeļus novietojiet pēc iespējas tālāk no dažādiem transformatoriem. Transformatorus ievietojiet ekrānos.
7. Pārliecinieties vai zemējums kontūrs nodrošina stabilu „zemi” ar mazu pretestību. Zemēšanai izmantojiet tikai **izolētus vara vadus** ar pietiekoši lielu šķērsgriezuma laukumu.
8. Rūpējieties, lai vadu savienojumi būtu stabili un ar mazu pārejas pretestību. Savienojumu montāžai (lodējumiem) jābūt tīriem un pārklātiem ar aizsarglaku vai citu izolējošu pārklājumu.

B daļa

NEELEKTRISKO LIELUMU MĒRĪŠANA

1. Mehāniskā sprieguma, spēka un momenta mērīšana

Šajā nodaļā analizēsim mehānisko lielumu (spēka, momentu un spriegumu) mērīšanas iespējas, izmantojot elektriskās metodes. Tiešā veidā spēku var pārveidot elektriskā spriegumā, izmantojot pjezoelektriskos pārveidotājus. Taču šī metode savu ierobežojošo faktoru (skat. A-4.1 nodaļu) dēļ netiek plaši izmantota. To lieto vibrāciju mērīšanai. Spēku un momentu mērīšana noris pēc shēmas, kas redzama 8.1 attēlā.



8.1 att. Spēka mērīšanas principiālā shēma

Jebkura spēka iedarbībā ķermenis deformējas. Šajā gadījumā tas attiecas uz spēka sensora elementiem. Izmērot spēka radīto deformāciju, mēs varam precīzi noteikt tā lielumu. Lai būtu vienkāršāk izprast spēka mērīšanas principus, aplūkosim galvenās sakarības, kas saista mums nepieciešamos lielumus.

1.1. Spēki, momenti un spriegumi

Spēks ir vektoriāls lielums, kas raksturo divu ķermeņu savstarpējo mijiedarbību. Spēku kādam ķermenim var pielikt cits ķermenis vai nu tieši ar to saskaroties, vai ar spēka lauku iedarbību.

Spēkus rada elektriskie, magnētiskie un gravitācijas lauki. Elastības spēki rodas ķermenim deformējoties elastības robežās. Zemes gravitācijas radīto spēku sauc par smagumspēku.

Spēku nosaka, izmantojot otro Ņūtona likumu:

$$F = m \cdot a, \quad (8.1)$$

kur m – ķermeņa masa, kg; a – ķermeņa paātrinājums, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Spēka mērvienība SI sistēmā ir Ņūtons (N).

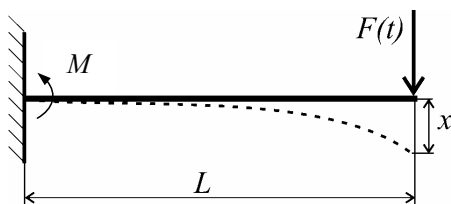
Ķermeņa smaguma spēku aprēķina sekojoši:

$G = m \cdot g$, kur g – brīvās krišanas paātrinājums.

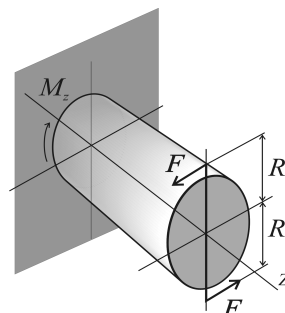
Spēku, kā vektoriālu lielumu raksturo tā modulis (vērtība), pielikšanas punkts un darbības virziens.

Par **spēka momentu** sauc spēka un sviras pleca reizinājumu. Spēka radīto momentu apzīmē ar burtu M , tā mērvienība ir $N \cdot m$. Ir divi momentu veidi: lieces momenti un vērpes momenti.

Lieces moments cenšas izliekt sijas asi, un to parasti izsaka pret x vai y asīm (8.2 att.).



8.2 att. Lieces moments



8.3 att. Vērpes moments

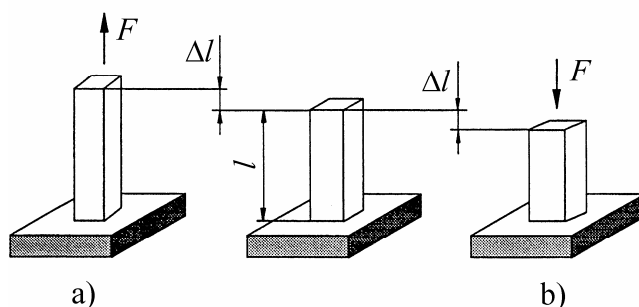
Spēka radīto lieces momentu pret sijas iespīlēto galu izsakām pēc formulas:

$$M_y = F(t) \cdot L. \quad (8.2)$$

Vērpes momentu M_z rada spēkapāris, kas pielikts sijas brīvajā galā (8.3 att.), to aprēķina:

$$M_z = 2F \cdot R. \quad (8.3)$$

Ja spēks iedarbojas uz stieni aksiālā virzienā (8.4 att.), tad stieņa garums, atkarībā no spēka darbības virziena, palielinās vai samazinās (8.4b un b att.).



8.4 att. Spēka iedarbība uz stieni

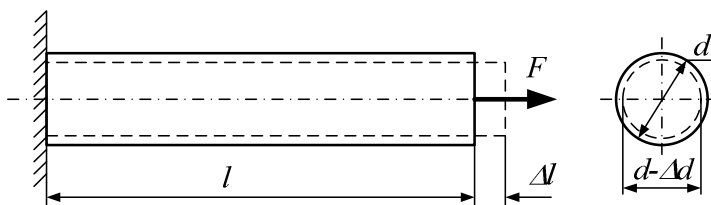
Lielumu Δl sauc par stieņa absolūto deformāciju. Ja stienis tiek pagarināts, tad šādu deformācijas veidu sauc par **stiepi** un pieņem, ka deformācija ir pozitīva. Ja stienis tiek saīsināts, tad to sauc par **spiedi**, un pieņem, ka deformācija ir negatīva.

Pētot ķermeņu deformācijas elastības robežas, angļu fiziķis Roberts Huks noskaidroja sakarību starp ārējā spēka iedarbību uz ķermeņa garuma izmaiņu –

deformāciju. To sauc par Huka likumu stiepē:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{E \cdot A}, \quad (8.4)$$

kur: Δl – ķermeņa pagarinājums, m, l – ķermeņa (sijas) garums, m, F – ārējais spēks, N, A – ķermeņa šķērsriezuma laukums, m^2 , E – elastības modulis, Pa.



8.4 att. Stiepta stieņa deformācijas

Elastības modulis ir koeficients, kurš raksturo dotā materiāla elastīgās īpašības. Piemēram, tēraudam $E=200\dots210$ GPa.

Lielumu $\frac{\Delta l}{l}$ apzīmē ar ε , un sauc par relatīvo deformāciju (8.4 att.). Tā ir attiecība starp ķermeņa pagarinājumu un tā sākotnējo garumu. Dažreiz ε izsaka procentos: $\varepsilon (\%) = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$.

Uz ķermeni var iedarboties vairāki ārējie spēki, kuri galarezultātā rada iekšējo spēku, ko apzīmē ar N un sauc par normālspēku. Normālspēks vienmēr darbojas stieņa garenass virzienā un ir perpendikulārs šķēluma laukuma plaknei.

Huka likumu var pārveidot sekojoši:

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot E}, \quad (8.5)$$

kur ε – relatīvā deformācija, N – normālspēks, N.

Attiecību N/A apzīmē ar σ (*sigma*), un sauc par **normālo spriegumu**. Tas ir šķidrums un gāzu spiediena analogs cietos ķermeņos. Normālspriegums darbojas perpendikulāri šķēluma laukuma plaknei.

Ņemot vērā sprieguma definīciju, Huka likumu pārraksta šādi:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (8.6)$$

Huka likums ir spēkā tikai elastīgo deformāciju robežās.

Deformējot ķermeni stiepē vai spiedē tā tilpums praktiski nemainās. Tā kā ķermeņa garums izmainās par lielumu Δl , tā šķērsizmērs izmainās par lielumu Δd (8.4 att.).

Lielumu $\frac{\Delta d}{d} = \varepsilon_{sk}$ sauc par relatīvo šķērsdeformāciju. Stiepē $\varepsilon_{sk} < 0$, spiedē $\varepsilon_{sk} > 0$.

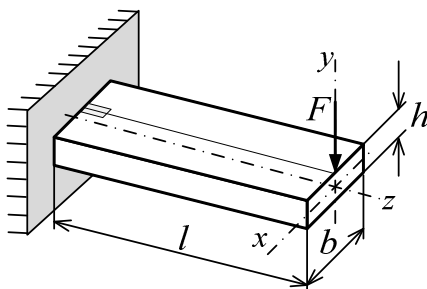
Attiecinot relatīvo šķērsdeformāciju pret relatīvo garendeformāciju, iegūst šķērsdeformācijas koeficientu (to sauc arī par Puasona koeficientu):

$$\mu = \frac{|\varepsilon_{sk}|}{\varepsilon}. \quad (8.7)$$

Puasona koeficients visiem materiāliem ir robežās no 0 (korķis) līdz 0.5 (kaučuks). Tērauda šķērsdeformācijas koeficients $\mu=0.27\dots 0.32$.

Liekta ķermeņa deformācijas

Apskatīsim vienā galā iespīlētu metāla siju, kura slogota ar ārējo spēku F . Šādu siju sauc par konsolsiju vai konsoli. (8.5 att.). Spēks F sijas šķērsgriezumos rada lieces momentu M_x , kas sasniedz savu maksimālo vērtību iespīlējuma vietā:

$$M_{x_{\max}} = M_x = F \cdot l.$$


8.5 att. Konsolsijas liece

Sprieguma izmaiņu sijas šķērsgriezumā analizēsim, pieņemot sekojošus vienkāršojumus:

- ✓ sijai ir taisnstūra šķēlums,
- ✓ sijas garums l ir daudzkārt lielāks par tās augstumu h ; $l \gg h$,
- ✓ sijas brīvā gala pārvietojums (deformācija) y ir daudzkārt mazāks par sijas garumu l un atrodas elastības robežās, $y \ll l$.

Deformācijas rezultātā sijas šķēlumos rodas stiepes un spiedes spriegumi. Sijas augšpuse tiek stiepta, maksimālais spriegums $+\sigma$, apakšējā puse tiek spiesta, spriegums $-\sigma$.

Tā kā sijai ir taisnstūra formas šķērsgriezums, kas ir simetriska figūra, tad ir spēkā sakarība: $\max \sigma = +\sigma_{\max} = |-\sigma_{\max}|$.

No deformējama ķermeņa mehānikas kursa ir zināma sakarība: $\sigma_{\max} = \frac{M_x}{W_x}$,

kur M_x – maksimālais lieces moments šķēlumā, W_x – sijas šķēluma laukuma pretestības moments, m^3 .

Taisnstūra šķēluma laukumam pretestības momentu aprēķina pēc formulas:

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}.$$

Ievietojot M_x un W_x izteiksmes sprieguma formā, iegūstam:

$$\sigma_{\max} = \frac{6F \cdot l}{b \cdot h^2}. \quad (8.8)$$

Izmantojot Huka likumu, nosakām relatīvo pagarinājumu uz sijas virsmas iespīlējuma vietā:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{6F \cdot l}{E \cdot b \cdot h^2}. \quad (8.9)$$

Vērpta stieņa deformācija

Ja spēka moments ir pielikts stienim tādā veidā, ka stienis tiek savērpts, tad šādu slogojumu sauc par vērpi un slodzi, kas to izraisa, par vērpes momentu M_z .

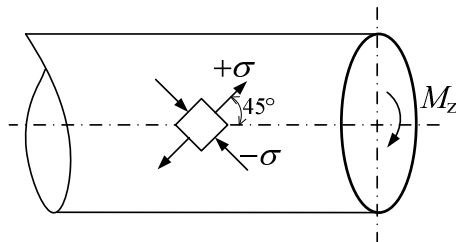
Vērpes rezultātā stieņa šķēlumi pagriežas par leņķi φ , ko sauc par savērpes leņķi. Savērpes leņķi aprēķina pēc formulas:

$$\varphi = \frac{M_z \cdot l}{G \cdot I_p}, \quad (8.10)$$

kur: M_z – vērpes moments, l – stieņa garums, G – bīdes modulis, I_p – stieņa šķērsriezuma laukuma polārais inerces moments.

Apaļstieņa polāro inerces momentu aprēķina: $I_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$, kur d – stieņa diametrs.

No materiālu pretestības kursa ir zināms, ka uz vērpta apaļstieņa virsmas maksimālie normālie spriegumi darbojas šķēlumos, kuri atrodas $\pm 45^\circ$ leņķī pret stieņa garenasi (8.6 att.).



8.6 att. Spriegumi vērptā stienī

Šos spriegumus var aprēķināt, izmantojot Huka likumu bīdē:

$$\tau = G \cdot \gamma = \sigma_{\pm 45^\circ} = |\sigma_{\max}|,$$

kur τ – tangenciālie spriegumi, stieņa asij perpendikulārā šķēlumā, G – bīdes modulis, γ – bīdes leņķis.

Bīdes leņķi nosaka pēc formulas: $\gamma = \frac{r \cdot \varphi}{l}$, kur r – stieņa rādiuss, φ – savērpes

leņķis. Izmantojot formulas γ , φ , τ noteikšanai un Huka likumu, varam atrast formulu relatīvās deformācijas noteikšanai $|\sigma_{\max}|$ virzienā. Iegūstam, ka stieņa virsmas relatīvā garendeformācija $\pm 45^\circ$ leņķī pret stieņa garenasi nosakāma pēc formulas:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{16 \cdot M_z}{E \cdot \pi \cdot d^3}. \quad (8.10)$$

Jāņem vērā, ka pēc Huka likuma tiek noteikti normālie spriegumi. Tāpēc pirms mērīšanas jāanalizē spriegumstāvoklis dotajā punktā un jānosaka galveno spriegumu virzieni, kuros tad arī jāveic deformācijas mērījumi.

Detalizētāka informācija par spriegumstāvokli noteiktā sloojumā iegūstama Materiālu pretestības kursā.

1.2. Deformāciju un spriegumu mērīšana

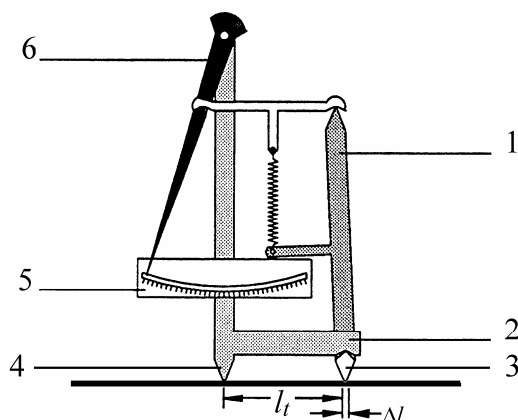
Stiprības aprēķinos galvenie lielumi, kas nosaka konstrukcijas izturību, ir spriegumi un deformācijas. Praksē bieži vien precīzs spriegumu un deformāciju aprēķins ir visai komplicēts. Tāpēc nepieciešams šos lielumus noteikt eksperimentāli. Spriegumu un deformāciju mērīšana nepieciešama arī ekspluatācijas laikā, lai pārbaudītu atbildīgu konstrukciju nestspēju. Piemēram, tiltiem tiek veiktas regulāras izturības kontroles. Mērījumi nepieciešami arī zinātniskām vajadzībām, lai noteiktu jaunu teorētisko rezultātu atbilstību reālajai situācijai.

Iepriekš noskaidrojām, ka tiešā veidā spriegumus izmērīt nevar. Tiešā veidā tiek izmērītas ķermeņa deformācijas nepieciešamajā vietā un virzienā, un izmantojot Huka likumu $\sigma = E \cdot \varepsilon$, tiek noteikti spriegumi. Daudzos gadījumos mērīšanas iekārtas šo pārveidojumu izdara pašas, mums tikai jāievada elastības moduļa vērtība.

Deformācijas mērīšanas īpatnība ir tāda, ka mērāmie pārvietojumi ir ļoti mazi lielumi. Parasti deformācijas ir mērāmas milimetra tūkstošdaļās (mikrometros). Ir izstrādātas daudzas metodes deformāciju mērīšanai. Vēsturiski pirmās bija mehāniskās metodes. Mērinstrumentus, ar kuriem veic deformāciju mērīšanu, sauc par **tenzometriem** un mērīšanas procesu par **tenzometriju**.

Vēsturiski pirmie tika izstrādāti mehāniskie tenzometri, kuru darbības princips ir

balstīts uz sviras principu (8.7 att.).



8.7 att. Mehāniskā tenzometra shēma

Mehāniskais tenzometrs sastāv no statnes 2 ar nekustīgo balstu 4, kurš izveidots no cieta tērauda prizmas, lai, nostiprinot tenzometru uz mērāmā materiāla, tas iespiestos tajā. Kustīgais balsts 3 izveidots kā dubulta prizma un savienots ar sviru 1, kura ar palīgsviru sistēmu pievienota rādītājam 6. Mērījumu nolasīšanai izveidota skala 5. Parasti tā ir izveidota, kā spoguļskala, lai novērstu paralakses nolasījumu kļūdas. Tenzometru nostiprina uz mērāmās konstrukcijas tā, lai abas prizmas iespiestos materiālā. Deformācijas rezultātā attālums starp balstiem palielinās un rādītājs novirzās. Tā kā sviru sistēmas, ko veido kustīgā prizma un pārējās divlecu sviras, kopējā plecu attiecība ir ļoti liela, tad jau pie niecīga pārvietojuma, rādītājs pārvietojas pietiekoši, lai varētu nolasīt datus. Attālumu l_t sauc par **tenzometra bāzi**. Parasti $l_t=20\text{mm}$. Relatīvo deformāciju aprēķina no absolūtās deformācijas (ko nolasa uz skalas) Δl pēc zināmās formulas $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_t}$.

Ja nepieciešams, normālo spriegumu vērtību aprēķina pēc Huka likuma. Parasti šādu tenzometru skalas iedaļas vērtība ir $1\mu\text{m}$. Ar papildbalstu tenzometra bāzi var palielināt līdz 5 reizēm un iegūt 5 reizes augstāku jutību. Skalas iedaļas vērtība tādā gadījumā būs $0.2\mu\text{m}$.

Mehānisko tenzometru priekšrocības:

- ✓ vienkārša un lēta mēriekārta,
- ✓ augsta jutība un precizitāte,
- ✓ apkalpošanai nav nepieciešama augsta darbinieku kvalifikācija.

Trūkumi:

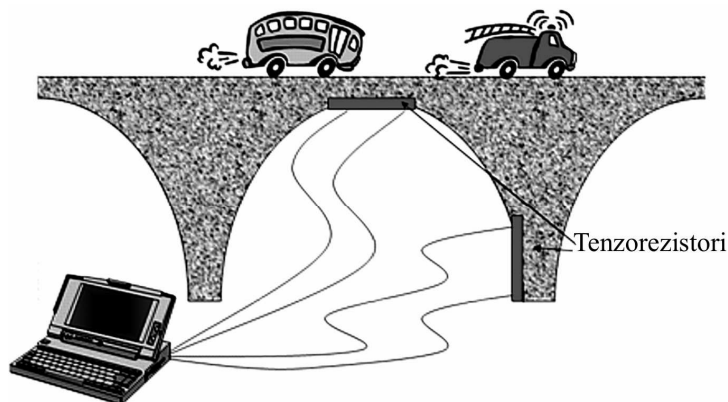
- ✓ sarežģīta uzstādīšana,

- ✓ darbietilpīga datu reģistrācija un uzkrāšana,
- ✓ smalks un precīzs mehānisms, kurš ir ļoti jutīgs pret mehānisku iedarbību.

Attēlā 8.8 redzama klasiska situācija tiltu izturības pārbaudē. Uztādīt mehāniskos tenzometrus un nolasīt datus šādā situācijā būtu ļoti sarežģīti.

Mehāniskos tenzometrus parasti izmanto laboratorijās tad, kad mērāmās konstrukcijas ļauj vienkārši nostiprināt tenzometrus un nav jāveic daudz nolasījumu.

Praktiski šobrīd izmanto deformāciju mērīšanas elektriskās metodes ar mērījumu reģistrāciju un uzglabāšanu datoros.



8.8 att. Tilta tenzometrēšana

Datorizēto mērsistēmu darbības principi un to elementi tika apskatīti šīs grāmatas A daļā.

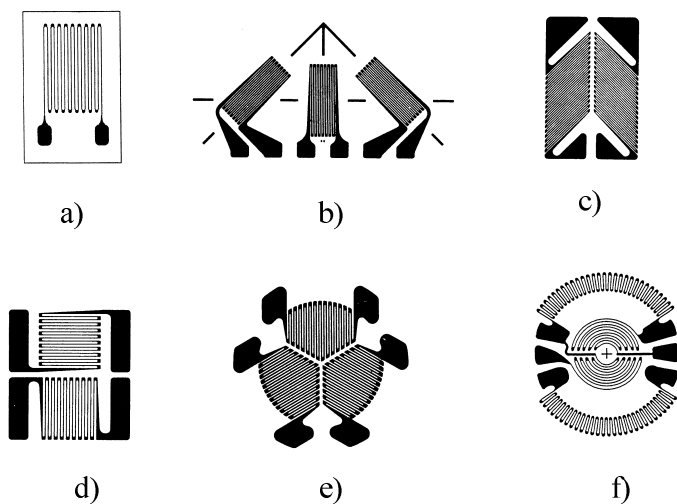
Deformāciju mērīšanā proporcionāla signāla iegūšanai izmanto tenzorezistorus. Tenzorezistoru uzbūve un darbība ir aprakstīti A-4 nodaļā, tāpēc šeit to neatkārtosim.

Rūpnieciski ražotie metāla tenzorezistori galvenokārt tiek izgatavoti no konstantāna vai līdzīga sakausējuma stieples vai folijas. Tenzorezistoru pretestība parasti ir 120, 350 vai 1000 Ω , pieļaujamā strāva no 5 līdz 40 mA; jutības koeficienti robežās no 2 līdz 4.

Reālās konstrukcijās bieži vien nepieciešams noteikt materiāla deformācijas dažādos virzienos. Iepriekš noskaidrojām, ka deformācijas visērtāk noteikt galveno spriegumu virzienos, šim nolūkam ir jāanalizē spriegumstāvoklis dotajā punktā un jāizvēlas pareizs tenzorezistoru novietojuma virziens. Tenzorezistori **jāuzlīmē galveno spriegumu darbības virzienā** dotajā punktā. Lai atvieglotu tenzorezistoru montāžu, līdzās vienkāršiem tenzorezistoriem, plaši tiek izmantotas dažādu konfigurāciju tenzorezistoru rozetes, kuras sekmīgi izmantojamas sarežģītu spriegumu mērīšanai (8.9 att.).

Ražotāji piedāvā tenzorezistoru rozetes normālo un tangenciālo spriegumu mērīšanai (8.9 att. b un c). Šie tenzorezistori lietojami saliktu slogojumu, piemēram,

liece + vērpe spriegumu noteikšanai. Rozete (att. 8.9d) paredzēta stiepta stieņa spriegumu noteikšanai. Stieņa šķērsvirzienā notiek negatīva deformācija, un tas ļauj sekmīgi veidot termokompensētas mērīšanas shēmas. Rozetē 8.9e tenzorezistori izvietoti zem 60° leņķa. Tas dod iespēju mērīt sarežģītus spriegumstāvokļus. Attēlā 8.9e redzamā rozete konstruēta speciāli lietošanai membrānas tipa spiediena sensoros.



8.9 att. Tenzorezistori un tenzorozetes

Kā jau tika norādīts, ka tenzorezistoru novietojumam uz mērāmā elementa jāatbilst galveno spriegumu virzienam dotajā slogojumā. Jāatceras, ka tenzorezistori uztver tikai tās deformācijas, kas vai nu izstiep, vai saspiež rezistora vadītājus. Šķērsvirzienā tenzorezistori uz deformācijām nereaģē.

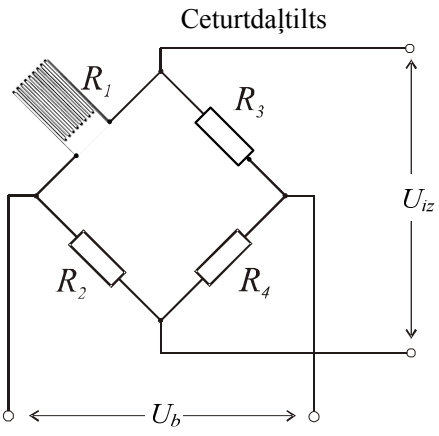
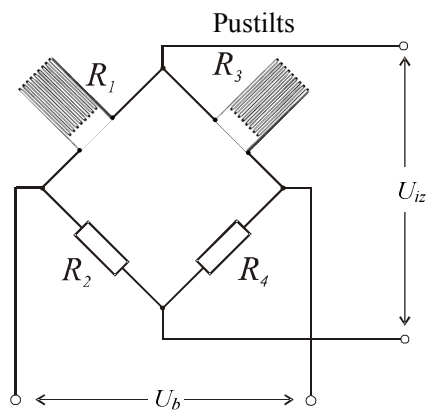
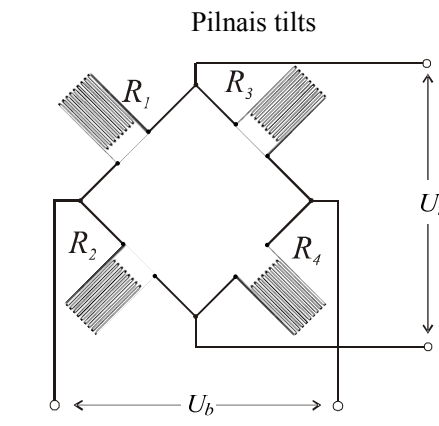
Tenzorezistorus ieslēdz elektriskajās shēmās izmantojot tilta slēgumus (skat. A-6 nodaļu).

Parasti tenzorezistora pretestības $R + \Delta R$ izmaiņa ir neliela un atbilst deformācijai. Tilta izejas spriegums arī ir neliels (3 – 20 mV) un ir atkarīgs no aktīvo rezistoru skaita tiltā (3.1 tabula). Praktiski mērīšanai pietiek ar vienu tenzorezistoru, pārējie var būt pasīvie rezistori. Tādu tilta slēgumu sauc par ceturtdaļtiltu. Šim slēgumam piemīt būtiski trūkumi:

- ✓ maza jutība un izejas signāls,
- ✓ liela temperatūras ietekme uz mērījumu rezultātu,
- ✓ nelineāra raksturlīkne.

Lai novērstu šos trūkumus, praksē lieto pustilta slēgumu – ar diviem aktīvajiem tenzorezistoriem un pilno tilta slēgumu ar četriem aktīvajiem tenzorezistoriem. Slēguma shēmas un to parametri doti 8.1 tabulā.

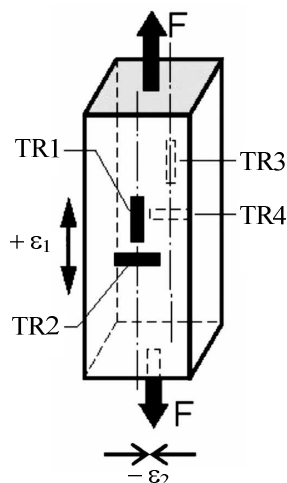
8.1 tabula Tenzorezistoru mērtiltu slēguma shēmas

Tilta slēguma shēma	Izejas sprieguma formula
Ceturtdaļtilts 	$U_{iz} = \frac{\Delta R}{4R} \cdot U_b = \frac{U_b}{4} \cdot k \cdot \varepsilon$
Pustilts 	$U_{iz} = \frac{\Delta R}{2R} \cdot U_b = \frac{U_b}{2} \cdot k \cdot \varepsilon,$ ja $\Delta R_1 = -\Delta R_3$
Pilnais tilts 	$U_{iz} = \frac{\Delta R}{R} \cdot U_b = U_b \cdot k \cdot \varepsilon,$ ja $\Delta R_1 = \Delta R_4 = -\Delta R_2 = -\Delta R_3$

Tenzorezistorus uz mēramā objekta nostiprina ar speciālu līmi. Liela uzmanība ir jāpievērš līmējuma kvalitātei. Ir izstrādātas īpašas līmēšanas un virsmas sagatavošanas tehnoloģijas, lai nodrošinātu pietiekoši izturīgu un laikā stabilu līmējumu (skat. A-4 nodaļu). Jāņem vērā tas, ka līmes kārtiņa deformējas kopā ar tenzorezistoru un, nekvalitatīva līmējuma gadījumā, tas var izsaukt mērījuma kļūdas.

Stiepes deformāciju un spriegumu mērīšana

Stiepes deformāciju un spriegumu noteikšanai aktīvos tenzorezistorus stienim uzlīmē paralēli stieņa asij. Otru tenzorezistoru pāri līmē šķērsām, jo tas ir nepieciešams temperatūras kompensācijai. Tas nedaudz arī palielina mērshēmas jutību, šķērsvirzienā notiek deformācija ar pretēju zīmi (8.10 att.).



8.10 att. Stiepes deformāciju mērīšana

Noteiksim tenzorezistoru deformācijas katrā virzienā. Tenzorezistoru TR1 un TR3 relatīvie pagarinājumi $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$. Tenzorezistoru pretestība izmainīsies par lielumu $\Delta R_1 = \Delta R_3 = k \cdot \varepsilon_1 \cdot R_1$, kur k – tenzorezistora jutības koeficients.

Pieņemam, ka mērtiltā visi tenzorezistori ir ar vienādu pretestību, t.i. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$.

Tenzorezistori TR2 un TR3 deformējas pretējā virzienā, un to relatīvais pagarinājums ir $-\varepsilon_2$. To nosakām, ievērtējot Puasona koeficientu μ .

No šejienes TR pretestības izmaiņa:

$$-\Delta R_2 = -\Delta R_4 = \mu \cdot k \cdot \varepsilon_1 \cdot R_2.$$

Mērtilta izejas signālu nosakām pēc formulas:

$$U_{iz} = \frac{k \cdot U_b}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{k \cdot U_b}{4} [\varepsilon_1 - (-\mu \cdot \varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\mu \cdot \varepsilon_3)], \quad (8.11)$$

kur U_b – tilta barošanas spriegums.

Ņemot vērā, ka $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$, varam rakstīt:

$$U_{iz} = \frac{k \cdot U_b \cdot \varepsilon}{2} (1 + \mu). \quad (8.12)$$

No formulas (8.12) nosakām stieņa deformāciju:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot U_{iz}}{k \cdot U_b \cdot (1 + \mu)}. \quad (8.13)$$

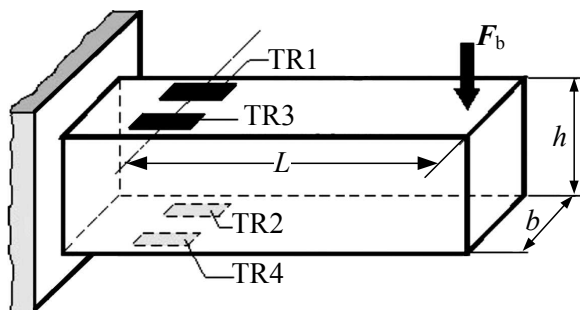
Normālos spriegumus nosakām pēc Huka likuma:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{2 \cdot E \cdot U_{iz}}{k \cdot U_b \cdot (1 + \mu)}. \quad (8.14)$$

Šī formula ļauj aprēķināt normālos spriegumus stiepes slogojumā, ja zināmi tenzorezistoru parametri un tilta barošanas spriegums.

Lieces spriegumu mērīšana

Lieces spriegumu noteikšanai tenzorezistorus uzlīmē liektās sijas pretējās pusēs (8.11 att.). Šajās vietās darbojas maksimālās deformācijas ar pretēju zīmi. Līdz ar to mērshēmai tiek nodrošināta maksimāla jutība un pilnīga temperatūras kompensācija.



8.11 att. Lieces deformāciju noteikšana

Ņemot vērā to, ka sijai ir taisnstūra šķērsgriezums, sijas augšējās un apakšējās daļas deformācijas pēc absolūtās vērtības būs vienādas. Šajā gadījumā mērtilta izejas spriegumu nosakām pēc formulas, kura dota 8.1 tabulā:

$$U_{iz} = U_b \cdot k \cdot \varepsilon. \quad (8.15)$$

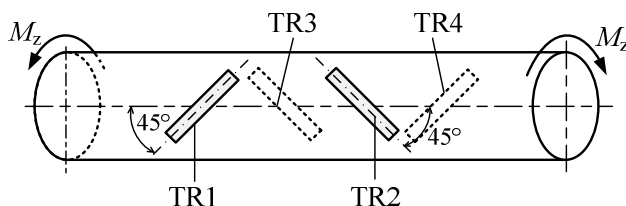
Ņemot vērā Huka likumu, no formulas (8.15) izsakām lieces spriegumu absolūto vērtību:

$$|\sigma| = \frac{E \cdot U_{iz}}{U_b \cdot k}. \quad (8.16)$$

Formula (8.16) ir izmantojama siju lieces normālo spriegumu mērīšanai, ja sija ir simetriska attiecībā pret lieces neitrālo asi. Nesimetriskām sijām jāievērtē spriegumu sadalījums sijas stieptajā un spiestajā daļā. Šajā gadījumā lietot pilno tiltu nav ieteicams. Jāveic spriegumu mērīšana atsevišķi sijas stieptajā daļā un spiestajā daļā, izmantojot puslilta slēgumus ar temperatūras kompensāciju.

Spriegumu noteikšana vērpē

Lai noteiktu vērpes spriegumu, tenzorezistorus uzlīmē 45° leņķī pret stieņa asi. Šajā virzienā darbojas galvenie spriegumi un tenzorezistoru vadītāji tiek slogoti stiepē vai spiedē (8.12 att.).



8.12 att. Vērpes deformāciju mērīšana

Šajā gadījumā tenzorezistoru slēguma shēma atbilst pilna tilta slēgumam un galveno spriegumu absolūto vērtību nosakām pēc formulas (8.16).

1.3. Spēka mērīšana

Lai noteiktu spēka lielumu ar pārvietojuma mērīšanu, izmanto dažāda veida elastīgos elementus (8.13 att.).

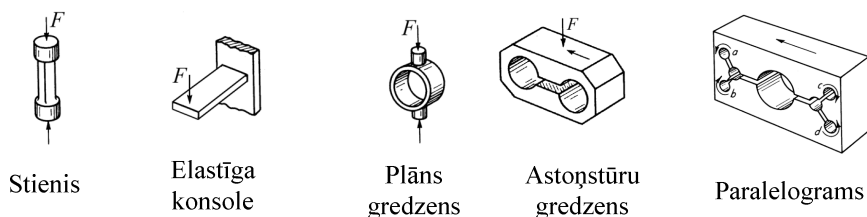
Visvienkāršākais spēka - pārvietojuma pārveidotājs ir parasta atsperē. Arī elastīga materiāla stieni var izmantot kā spēka-pārvietojuma pārveidotāju (3.30. att.). Spēku F aprēķina pēc formulas:

$$F = \frac{A \cdot E}{L} y, \quad (8.16)$$

kur A – šķērsgriezuma laukums, m^2 , L – garums, m , E – elastības modulis, Pa , y – absolūtais pagarinājums, m .

Zinot, ka relatīvais pagarinājums $\varepsilon = y/L$, pēc formulas (8.12) nosakām tilta izejas sprieguma izmaiņu atkarībā no stiepes spēka:

$$U_{iz} = \frac{k \cdot U_b \cdot F}{2E \cdot I} (1 + \mu). \quad (8.17)$$



8.13 att. Elastīgie elementi spēka mērīšanai

Elastīgas konsoles spēka un deformācijas (gala pārvietojuma) sakarību izsaka vienādojums:

$$F = \frac{3E \cdot I_x}{L^3} y, \quad (8.18)$$

kur I_x – šķēluma laukuma aksiālais inerces moments pret galveno asi.

Ja konsolei ir taisnstūra šķēluma laukums (skat. 8.11 att.), kura augstums ir h , tad, ņemot vērā formulas (8.8), (8.15) un (8.18), iegūstam sakarību starp spēku un mērtilta izejas spriegumu:

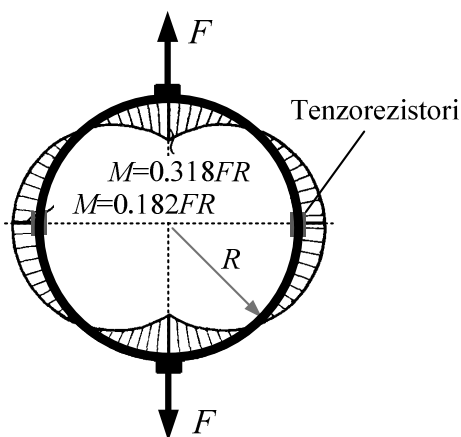
$$U_{iz} = \frac{3}{2} \frac{U_b \cdot k \cdot h}{L^2} y. \quad (8.19)$$

Plāna, elastīga gredzena spēka-deformācijas sakarību izsaka vienādojums:

$$F = \frac{16EI}{(\pi/2 - 4/\pi) \cdot d^3} y, \quad (8.20)$$

kur d – gredzena ārējais diametrs, I – gredzena šķēluma laukuma aksiālais inerces moments pret atbilstošo galveno centrālo asi. Šī formula derīga, ja gredzena ārējais diametrs ir daudzkārt lielāks par gredzena biezumu.

Attēlā 8.14 redzama lieces momenta epūra plānam gredzenam. Izmantojot gredzena spēka mērīšanai, tenzorezistorus uzlīmē spēka pielikšanas virzienam perpendikulārā plaknē (skat. 8.14 att.).



8.14 att. Plāna gredzena momenta epūras

Ja gredzena šķēluma laukums ir taisnstūris, tad, ņemot vērā formulu (8.16), lieces momenta izteiksmi gredzenam (skat. 8.14 att.) un spriegumu aprēķina izteiksmi liecē, iegūstam mērtilta izejas sprieguma aprēķina formulu:

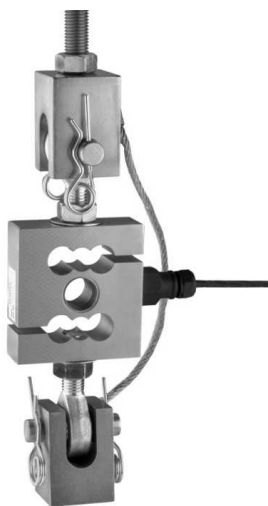
$$U_{iz} = \frac{0.182 \cdot F \cdot R \cdot U_b \cdot k}{W_x \cdot E}. \quad (8.21)$$

Praksē bieži izmanto sarežģītākas formas spēka-pārvietojuma pārveidotājus: astoņstūru gredzenus un paralelogramus. Šo pārveidotāju izmantošana ļauj atrast spēka vektora komponentes ar attiecīgu matemātisku funkciju palīdzību. Deformāciju (pārvietojumu) var izmērīt, izmantojot kādu no pārveidotājiem (LDT, kapacitatīvo), bet praksē visbiežāk lieto tenzorezistorus.

Tirgū daudzas firmas piedāvā plašu spēka mērpārveidotāju klāstu (8.15. attēls).



8.14 att. Rūpnieciski ražotie spēka pārveidotāji



8.15 att. S-veida sensors pacēlāja slodzes noteikšanai

Mērpārveidotāji paredzēti dažādām situācijām. Spēka sensori paredzēti diviem galvenajiem spēka darbības virzieniem – spidei un stiepei. Atkarībā no tā tiek veidoti

spēka sensoru elastīgie elementi.

Šobrīd stiepes spēka noteikšanai plaši tiek izmantoti S – veida elastīgie elementi (8.15 att.). Šie sensori tiek izmantoti dažādās celšanas iekārtās slodzes spēka noteikšanai.

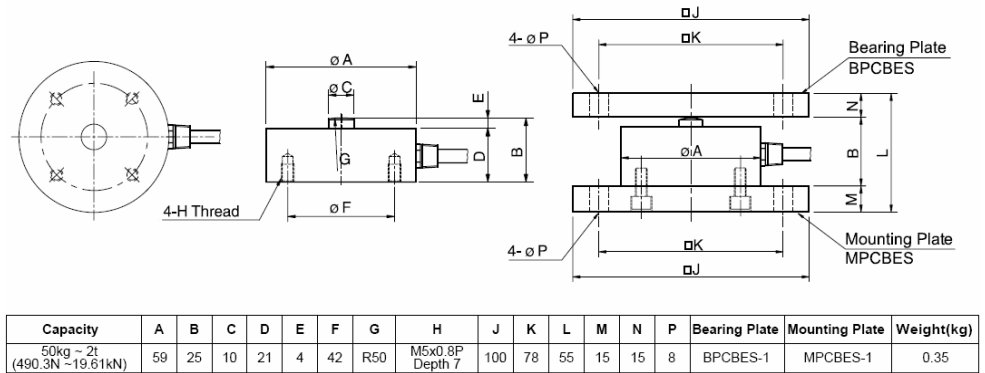
Jāpiezīmē, ka S-veida sensori ir derīgi gan stiepes spēka, gan spiedes spēka mērīšanai.

Spiedes spēka mērīšanai tiek ražoti membrānas tipa sensori, piemēram, CBES – 50 (skat. 8.16 att.), kompānija *Bongshin*.



8.16 att. Sensors CBES – 50

Šos sensorus izmanto elektronisko svaru izgatavošanai. Svaru platforma tiek balstīta uz četriem sensoriem, kuri tiek novietoti platformas stūros. Sensoru izejas signāli tiek elektroniski summēti un gala rezultātā iegūst kopējo svaru. Attēlā 8.16 ir redzama sensora uzbūve un tā izmēri milimetros.



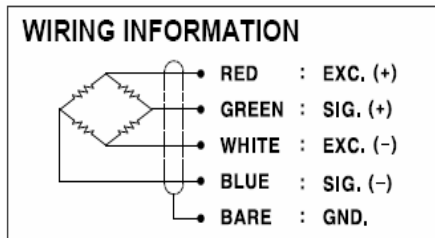
8.17 att. CBES – 50 tehniskie dati

8.2 tabula. CBES sensoru specifikācija

MODEL		CBES
Rated capacity (R.C.)		50, 100,200,500kg
		1,2,3,5, 10, 20t
Rated output(R.O.)		2mV/V $\pm$ 0.25%
Non-linearity		$\leq$ 0.1%R.O.
Hysteresis		$\leq$ 0.1%R.O.
Non-repeatability		$\leq$ 0.1%R.O.
Creep error		$\leq$ 0.03% in 20min.
Zero balance		$\leq$ 1%R.O.
Compensated temperature range		-10 – +70°C
Operating temperature range		-20 – +80°C
Temp. effect on rated output		$\leq$ 0.05% LOAD/10°C
Temp. effect on zero balance		$\leq$ 0.05%R.O./10°C
Terminal input resistance		700 Ohms $\pm$ 10 Ohms
Terminal output resistance		700 Ohms $\pm$ 10 Ohms
Insulation resistance (Min.)		2000 MOhms at 50V DC
Excitation voltage		10V (Recommended), 15V(Max.)
Electrial connection	(50kg ~ 2t)	Ø5mmx3m(22AWG x 4Core Shielded)
	(3t ~20t)	Ø7mmx5m(22AWG x 4Core Shielded)
Protection class		meets IP 67
Safe overload		150% R.C
Ultimate overload		300% R.C

Attēlā 8.18 ir redzams modeļa apzīmējuma atšifrējums un sensora slēguma shēma. Spēka sensori parasti satur pilno tenzorezistoru mērtiltu, kura pieslēgšanai izmanto četru vai sešu vadu pieslēgumu.

ORDERING INFORMATION	
CBES - 10T	
MODEL CBES	CAPACITY 50, 100, 200, 500kg. 1, 2, 3, 5, 10, 20ton



8.18 att. CBES sensoru apzīmējuma atšifrējums un slēguma shēma

Rūpnieciski ražotie spēka sensori ir kalibrēti, un to jutība tiek norādīta sensora

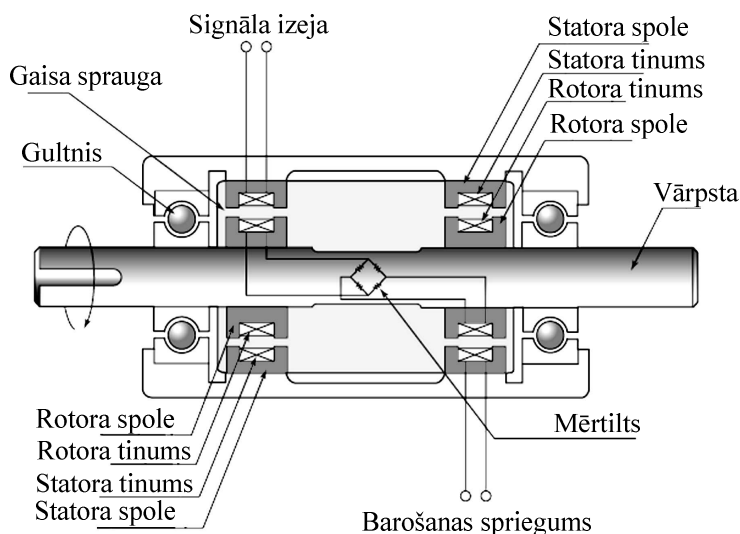
specifikācijā. Parasti to norāda mV uz vienu tilta barošanas sprieguma voltu. Sensoru izejas spriegums parasti nepārsniedz 30 mV, un tie ir jāpieslēdz instrumentālajiem pastiprinātājiem.

1.4. Griezes momenta mērīšana

Griezes momenta sensori parasti tiek veidoti, uzlīmējot kalibrētam apaļstienim vai caurulei tenzorezistorus galveno spriegumu virzienos (skat. 8.12 att.). Ja mērāmais objekts atrodas statiskā stāvoklī (nav rotācijas), tad vērpes momentu nosaka, ņemot vērā formulu 8.10 un pilnā tilta slēguma aprēķina vienādojumu (skat. 8.1 tabulu). Šajā gadījumā tenzorezistoru tiltu pieslēdz mērīšanas shēmai ar kabeli iepriekš aprakstītajā kārtībā (skat. A daļu).

Ja vārpsta atrodas rotācijas kustībā, rodas problēmas ar signāla pārvadīšanu uz mērīšanas shēmu. Ir izstrādāti vairāki paņēmieni signāla pārvadīšanai. Viens no pirmajiem un vienkāršākajiem paņēmieniem ir slīdkontaktu izmantošana signāla un barošanas sprieguma pieslēgšanai. Šim paņēmienam piemīt būtisks trūkums – kontaktu trokšņi un nodilums. Kā zinām, mērtilta izejas spriegums ir neliels, tāpēc slīdkontaktu radītie elektriskie trokšņi reizēm daudzkārt pārsniedz signāla līmeni. Trokšņus ievērojami samazina dzīvsudraba izmantošana sensora pieslēgumam. Patlaban šo metodi izmanto reti, jo dzīvsudrabs ir indīgs un arī kaitīgs apkārtējai videi.

Šobrīd, pateicoties mikroelektronikas iespējām, uz sensora rotējošās daļas ir iespējams novietot gan mērtiltu, gan signālu kondicionieri ar barošanas avotu. Izejas signāls tiek pārvadīts izmantojot slīdkontaktus. Šajā gadījumā signāla līmenis sasniedz 10V un kontaktu radītie traucējumi nav būtiski.



8.19 att. Griezes momenta sensors ar maiņstrāvas barošanu

Pēdējā laikā tiek izmantotas modernākas slēguma shēmas, izmantojot maiņsprieguma mērtiltu barošanu. Šī metode ir plašāk analizēta A-6 nodaļā. Maiņsprieguma izmantošana dod iespēju pievadīt mērtilta barošanas spriegumu, un aizvadīt tilta izejas spriegumu, izmantojot rotējošo transformatoru. Metodes izmantošana griezes momenta sensoros redzama 8.19 attēlā.

Pēdējā laikā arvien plašāk izmanto sensorus, kuros izejas signāls tiek pārveidots diskrētā veidā vai ciparu signālā. Visa nepieciešamā elektroniskā shēma un barošanas avots šajā gadījumā ir novietoti uz rotējošas vārpstas. Impulsveida izejas signāls tiek pārvadīts izmantojot indukcijas saiti. Atsevišķos gadījumos signālu modulē un pārraida ar miniatūru radioraidītāju. Parasti šajos gadījumos izmanto sinhrono demodulēšanu, kas nodrošina augstu traucējumu noturību un lineāru pārvades raksturlīkni.

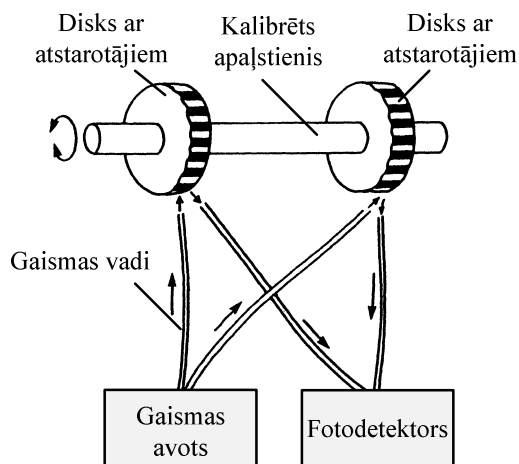
Griezes momenta mērīšanas sensorus piedāvā daudzi ražotāji. Attēlā 8. 20 redzami Lielbritānijas kompānijas *Datum electronics* griezes momenta sensori. Tiek piedāvāti sensori griezes momenta mērīšanai līdz 10 kNm.



8.20 att. **Kompānijas *Datum electronics* griezes momenta sensori**

Griezes momenta mērīšanai ir izstrādāta impulsu bezkontakta metode, kura nodrošina labu precizitāti un trokšņu noturību (8.21 att.). Jūtīgais elements šajā gadījumā ir kalibrēts elastīga materiāla apaļstienis vai apaļa caurule.

Posma galos ir novietoti diski ar atstarojošām joslām. Impulsveida signālu no atstarotājdiskiem nolasa ar optiskajiem sensoriem. Ja vārpsta rotē bez slodzes, tad gaismas impulsu fāze paliek konstanta. Slogojot sensoru ar griezes momentu, diski pagriežas viens attiecībā pret otru, un izejas signālu impulsu fāze izmainās proporcionāli griezes momentam. Iegūtie impulsu signāli nonāk fāzu detektorā, kur tiek iegūts analogais signāls proporcionāls griezes momentam.



8.21 att. **Impulsveida griezes momenta sensors**

Tā kā tiek mērīta impulsu fāzu nobīde, izejas signāls ir traucējumu noturīgs un ar augstu linearitāti.

2. Spiediena mērīšana

Spiediens ir spēks, ar kādu darba ķermenis iedarbojas uz virsmas laukuma vienību. Teknikā spiedienu pieņemts apzīmēt ar burtu p .

2.1. Spiediena veidi

SI sistēmā spiediena mērvienība ir Ņūtons uz kvadrātmētru, t.i., N/m^2 ko sauc par **paskālu** un apzīmē ar Pa. Tā kā spiediena vienība 1 Pa ir ļoti mazs lielums, plašāk lieto Megapaskālu (MPa), kas ir 10^6 Pa, un baru, kurš ir 10^5 Pa. Spiediena mērīšanai lieto arī tehnisko atmosfēru (atm), kuras lielums ir 1kgf/cm^2 , kā arī spiedienu līdzsvarojošā dzīvsudraba staba vai ūdens staba augstumu, ko izsaka mm vai m. Sakarības starp dažādām mērvienībām redzamas 2.1 tabulā.

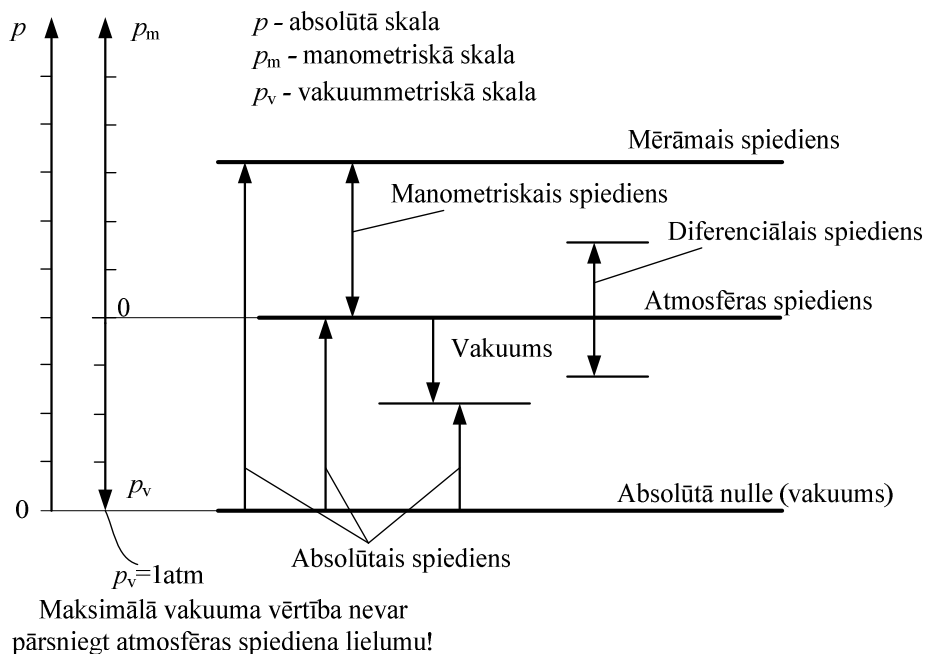
2.1 tabula. **Sakarības starp spiediena vienībām**

Spiediena mērvienību izmaiņas karte								
psi	atm	kG/cm^2	mm H ₂ O	mm Hg	bar	Pa	kPa	Mpa
1	0.0681	0.070	703.8	51.715	0.0689	6895	6.895	0.0069
14.70	1	1.033	10343.00	760	1.0130	101325.0	101.30	0.1013
14.22	0.968	1	10016.27	735.60	0.9810	98067.0	98.07	0.0981
0.001421	0.000097	0.00010	1	0.0735	0.000098	9.8	0.0098	0.00001
0.019340	0.001316	0.00136	13.610	1	0.001333	133.3	0.1333	0.000133
14.504	0.987	1.02	10210.00	750	1	100000	100.0	0.1
0.000145	0.00001	0.00001	0,102	0.0075	0.000010	1	0.0010	0.000001
0.145	0,00987	0.0102	102.070	7.5	0.0100	1000	1	0.001
145.04	9.8690	10.200	102074	7500	10.00	1000000	1000	1

Tabulas lietošana:

1. Atrodiet tabulas virsrakstā patreizējo spiediena mērvienību.
2. Virzieties pa patreizējās mērvienības kolonnu uz leju līdz skaitlim "1".
3. Virzieties no cipara "1" pa šo rindu līdz kolonnai, kuras virsrakstā ir jaunā spiediena mērvienība.
4. Ar skaitli, kas atrodas minētās rindas un jaunās mērvienības kolonnas krustpunktā pareiziniet patreizējo spiediena vērtību - iegūsiat jauno spiediena vērtību jaunajā mērvienībā.

Spiediena mērīšanā izmanto vairākas skalas (2.1 att.).



2.1 att. Spiediena skalas

Absolūtais spiediens p tiek mērīts par atskaites punktu pieņemot absolūto vakuumu. Parasti apkārtējā vidē darbojas **atmosfēras** jeb **barometriskais spiediens** p_a . Spiedienu starpību starp absolūto spiedienu trauka iekšpusē un ārējās vides spiedienu uz trauka sienām sauc par **pārspiedienu** jeb **manometrisko spiedienu** $p_m = p - p_a$.

Absolūtais spiediens

Absolūtā spiediena pārveidotājos par atskaites spiedienu pieņem vakuumu. Pārveidotāja diafragmas viena puse ir pievienota telpai ar absolūto vakuumu. Mērāmais spiediens tiek pievienots diafragmas otrai pusei. Absolūtais spiediens tiek mērīts paskālos (Pa) pēc absolūtās skalas.

Manometriskais spiediens

Manometriskā spiediena pārveidotājos par atskaites spiedienu tiek pieņemts atmosfēras spiediens. Mērpārveidotāja membrānas viena puse ir savienota ar atmosfēru, bet mērāmais spiediens tiek pievadīts tās otrai pusei. Manometrisko spiedienu mēra paskālos (Pa) pēc manometriskās skalas.

Izolētais manometriskais spiediens

Šī veida pārveidotājos references spiediens ir vienāds ar standarta atmosfēras spiediena vērtību. To nodrošina ar inertu gāzi (hēliju) pildīta izolēta kamera membrānas atskaites spiediena pusē. Mērāmais spiediens ir pielikts membrānas otrā

pusē. Šī veida pārveidotājus lieto gadījumos, kad rādījumus nedrīkst ietekmēt atmosfēras spiediena svārstības vai apkārtējā vide nedrīkst saskarties ar mēriekārtu. Izolētais manometriskais spiediens tiek mērīts paskālos (Pa) attiecībā pret atmosfēras spiedienu jūras līmenī.

Diferenciālais spiediens

Diferenciālā spiediena mērpārveidotājiem ir divas ieejas, kurām pievieno mērāmos spiedienus. Ierīces izmanto gadījumos, kad ar augstu precizitāti jānosaka mazas spiediena starpības līnijās ar augstu spiedienu. Ja izmanto membrānas veida pārveidotājus, mērāmos spiedienus pievada katrā membrānas pusē. Diferenciālo spiedienu mēra paskālos (Pa).

Statiskais virsspiediens

Statiskais virsspiediens raksturo pieļaujamo spiedienu, ko sensors var ilgstoši izturēt bez bojājumiem. To ierobežo sekojoši faktori:

- ✓ virsspiediens nedrīkst izjaukt pārveidotāja kalibrējumu,
- ✓ virsspiediens nedrīkst izsaukt pārveidotājā paliekošās deformācijas,
- ✓ virsspiediens nedrīkst sagraut pārveidotāja korpusu.

Dinamiskais virsspiediens

Dinamiskais virsspiediens ir īslaicīgi spiediena pieaugumi, kas var izsaukt iekārtas bojājumus. Pieļaujamā dinamiskā virsspiediena vērtības var atšķirties no pieļaujamā statiskā virsspiediena vērtības. Noteikta garuma un amplitūdas impulsveida spiediena pieaugumi var neietekmēt devēju, ja tā pašfrekvence ir zema.

2.2. Spiediena mērpārveidotāji

Spiediena mērpārveidotājs ir ierīce, kura uztver un pārveido šķidruma vai gāzes spiedienu proporcionālā elektriskajā signālā.

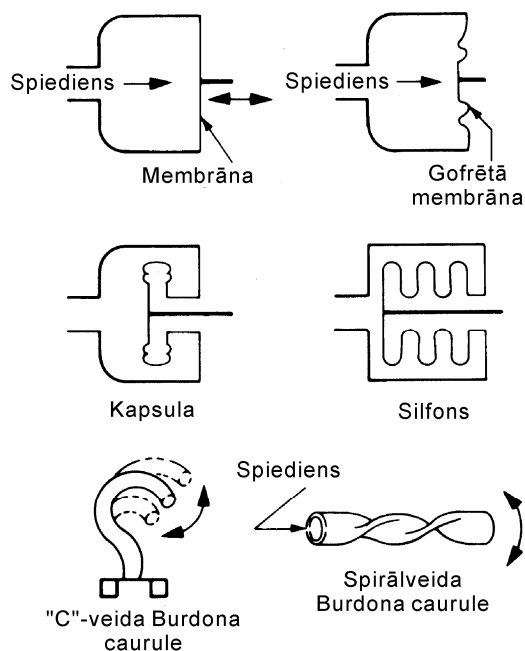
Pie spiediena mērpārveidotājiem pieder arī ierīces, kuras spiediena spēku vispirms pārveido mehāniskā pārvietojumā, un tad, izmantojot pārvietojuma mēriekārtas, iegūst elektrisku izejas signālu. Pārvietojuma noteikšanai var izmantot dažādus fizikālus principus. Konkrēta principa izmantošanu nosaka iegūtā pārvietojuma lielums.

Lielākajā daļā spiediena mērpārveidotāju izmanto sekojošus principus:

- ✓ Kapacitatīvo;
- ✓ Induktīvo;
- ✓ Pjezoelektrisko;
- ✓ Potenciometrisko;
- ✓ Tenzorezistīvo.

Praksē visplašāk spiediena mērīšanai izmanto tenzorezistoru pārveidotājus.

Attēlā 2.2 parādītas ierīces, kuras pārveido spiediena spēku atbilstošā mehāniskā pārvietojumā. Vienkāršā membrāna spiediena ietekmē izliecas un tās vidusdaļa pārvietojas nelielā attālumā. Gofrētā membrāna, kapsula un silfons ir jutīgāki pret spiediena iedarbi un pārvietojas lielākā attālumā salīdzinot ar vienkāršo membrānu.



2.2 att. Spiediena – pārvietojuma pārveidotāji

Pārveidotāja reakciju uz spiediena izmaiņām nosaka kustīgā elementa masa, elastība un pašsvārstību frekvence. Spiediena pārveidotāja ātrdarbība ir ļoti svarīga dinamiski mainīgu spiedienu mērījumos. Vienas brīvības pakāpes mehānisku svārstību sistēmas pašfrekvence ir aprēķināma pēc formulas (2.1):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2.1)$$

kur f_n – pašsvārstību frekvence, k – elastības koeficients, m – masa.

Ir pierādīts, ka mērpārveidotāja pašsvārstību frekvencei jābūt vismaz par kārtu (10 reizes) lielākai par mērāmā spiediena izmaiņas frekvenci.

Jāņem vērā arī elektronisko komponentu reakcija (jutības izmaiņa un rezonanse) uz vibrācijām un paātrinājumu.

Silfoni (arī kapsulas) reaģē uz spiedienu saraužoties vai izplešoties. Ja svira vai bīdstienis ir savienots ar silfona brīvo galu, tā pārvietojums ir proporcionāls pieliktajam spiedienam.

Burdona caurules reaģē uz spiediena iedarbību izmainot liekuma rādiusu (C

veida) vai savērpes lenķi (spirālveida).

Izvēloties spiediena mērpārveidotājus, vienlīdz svarīga ir gan mehāniskā sistēmas daļa, gan arī pārvietojuma pārveidotājs elektriskā signālā.

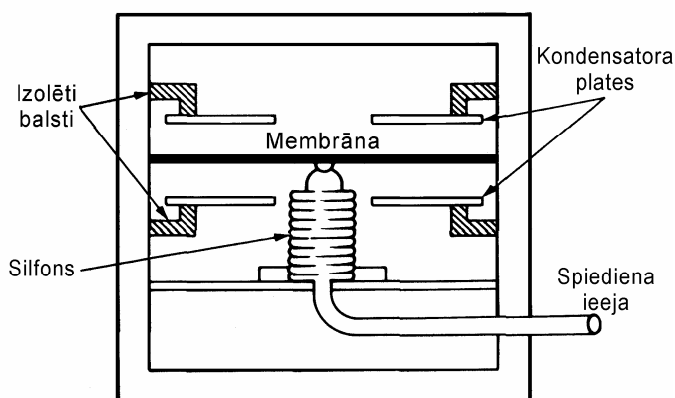
Tikai atbilstoša abu daļu kombinācija nodrošinās augstu mērījuma precizitāti un iegūto datu atkārtojamību.

Kapacitatīvie spiediena mērpārveidotāji

Kapacitatīvais spiediena mērpārveidotājs sastāv no divām metāla platēm, kuras ir nostiprinātas uz izolējoša materiāla balstiem (skat. 2.3 att.). Mērāmais spiediens tiek padots silfonā, kurš savienots ar membrānu.

Tā izgatavota no strāvu vadoša materiāla un kalpo kā viena no kondensatora platēm. Rezultātā izveidojas divi kondensatori. Mainoties spiedienam, silfons izplešas vai saraujas un pārvieto membrānu. Viena kondensatora kapacitāte palielinās, bet otra – samazinās. Dažās konstrukcijās ir izveidots tikai viens kondensators. Lai iegūtu izejas signālu, mērpārveidotājs tiek ieslēgts maiņstrāvas tīklā ar fāzu detektoru izejā.

Dažkārt kapacitātes izmaiņu izmanto ģenerators frekvences modulēšanai. Tādā gadījumā ģenerators frekvences izmaiņa raksturo mērāmo spiedienu. Jāatzīmē, ka mērpārveidotāji ar diviem kondensatoriem, dod augstāku linearitāti. Galvenā kapacitatīvo mērpārveidotāju priekšrocība ir nelielais membrānas pārvietojums, kas nodrošina lielu ātrdarbību. Tiem ir laba stabilitāte un izšķiršanas spēja, maza histerēze un augsta mērījumu atkārtojamība.



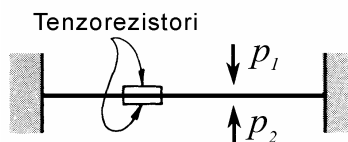
2.3 att. **Kapacitatīvais spiediena mērpārveidotājs**

Trūkumi – augsta izejas pretestība, kas nepieļauj garus vadus pārveidotāja pieslēgšanai un sarežģītas elektroniskās shēmas. Kapacitatīvie elementi ir ļoti jutīgi pret temperatūras izmaiņām.

Kapacitatīvos mērpārveidotājus lieto spiedieniem no vakuuma līdz vairākiem megapaskāļiem.

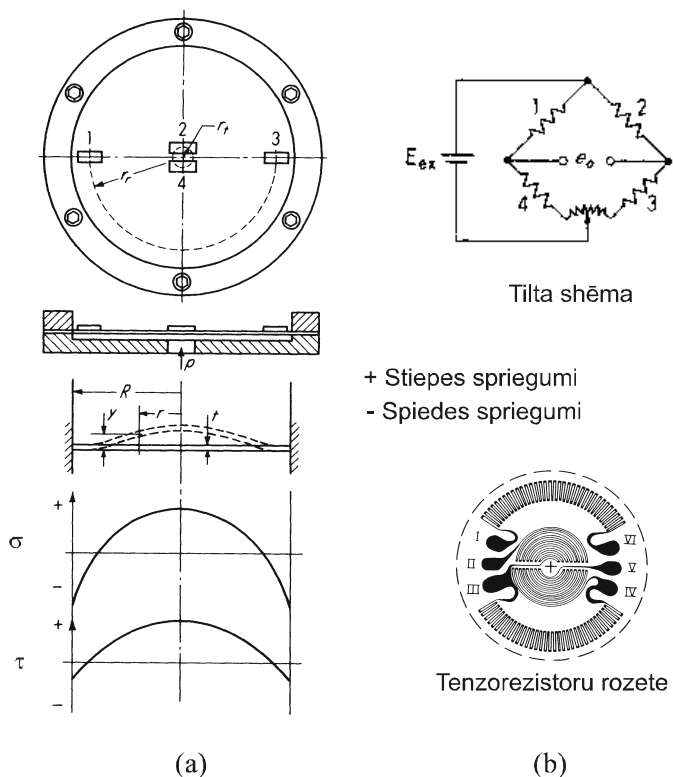
Spiediena mērpārveidotāji ar tenzorezistoriem

Tenzorezistorus uzlīmē membrānai kā tas parādīts 2.4 attēlā. Iegūtais izejas signāls ir membrānas vietējās deformācijas funkcija, kas atkarīga no spiedienu starpības membrānas abās pusēs. Praksē izmanto gan folijas, gan pusvadītāju tenzorezistorus. Praktiski iegūtā precizitāte ir $\pm 0.5\%$ no skalas pilnās vērtības. Membrānas izliekumu un spiediena starpību Δp saista lineāra sakarība, ja izliekums nepārsniedz vienu trešdaļu no membrānas biezuma.



2.4 att. Membrānas tipa pārveidotājs ar tenzorezistoriem

Ja pārveidotājos lieto folijas tenzorezistorus, tad tos uzlīmē tieši uz plakanās membrānas, vai, lietojot gofrēto membrānu, uz atsevišķas tenzometriskās sviras, kura mehāniski saistīta ar membrānu.



2.5 att. Membrānas veida pārveidotāja uzbūve

Plakanajām membrānām lielās deformācijās raksturīga nelinearitāte, ko izsauc malu iespīlējums. Spriegumu aina membrānas šķēlumos ir pateicīga mērīšanai, jo vienlaicīgi uz membrānas virsmas eksistē gan stiepes, gan spiedes spriegumi. Tas nozīmē, ka uz membrānas var uzlīmēt pilnu aktīvo tenzorezistoru tiltu, iegūstot lielu izejas spriegumu un labu temperatūras kompensāciju. Tenzorezistori 2 un 4 (2.5a att.) novietoti membrānas centrā un uztver stiepes spriegumus, bet 1 un 3 membrānas malā, kur darbojas spiedes spriegumi.

Lai vienkāršotu pārveidotāju izgatavošanu un pilnīgi izmantotu membrānas spriegumstāvokļa īpatnības, izmanto speciālas tenzorezistoru rozetes.

2.5b attēlā redzamā tenzorezistoru rozete izveidota tā, lai tās aktīvie elementi pilnībā uztvertu gan stiepes, gan spiedes spriegumus. Tenzorezistoru izvadi novietoti vismazāko spriegumu zonā, kas nodrošina kontaktu ilgzturību.

Izmantojot šāda veida tenzorezistoru rozetes, membrānas rādiusu R iespējams samazināt un to izveidot kopā ar pārveidotāja korpusu. Tas ļauj palielināt mērījumu precizitāti un samazināt histerēzi.

Ja mērpārveidotājs paredzēts dinamiski mainīgu spiedienu mērīšanai, svarīgi zināt tā brīvo jeb pašsvārstību frekvenci. Membrānām ir daudzas pašsvārstību frekvences, taču mūs interesē tikai zemākā no tām. Membrānām ar iespīlētām malām, kuras svārstās šķidrumā, zemākā pašsvārstību frekvence f (Hz) ir aprēķināma pēc formulas:

$$f = \frac{10.21}{a^2} \sqrt{\frac{E \cdot t^2}{12(1 - \mu^2) \rho}}, \quad (2.2)$$

kur ρ – membrānas materiāla blīvums, kg/m^3 ; t – diafragmas biezums, m; a – diafragmas rādiuss, m; E – elastības modulis, Pa; μ – Puasona koeficients.

Pusvadītāju spiediena pārveidotāji parasti sastāv no silīcija membrānas, kurā izveidots tenzorezistīvais tilts deformācijas noteikšanai (2.6 att.).

Pusvadītāju spiediena sensoriem ir vairākas priekšrocības:

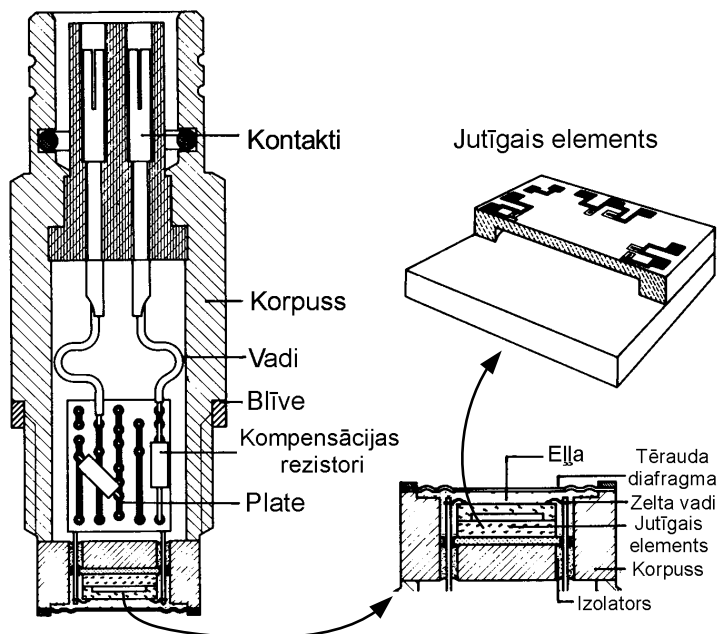
- ✓ membrāna tiek izgatavota kopā ar pusvadītāju tenzorezistoru tiltu, līdz ar to tiek panākta ļoti laba temperatūras kompensācija un augsta jutība,
- ✓ pusvadītāja kristālā ir iespējams integrēt signāla pastiprināšanas un kondicionēšanas ķēdes,
- ✓ sensora izgatavošanas proces ir tehnoloģisks un nodrošina identiskus sensoru parametrus.

Pusvadītāju spiediena sensoru trūkums ir membrānas zemāka mehāniskā izturība, salīdzinājumā ar metāla membrānām. Tas ierobežo maksimālo mērāmo spiediena diapazonu.

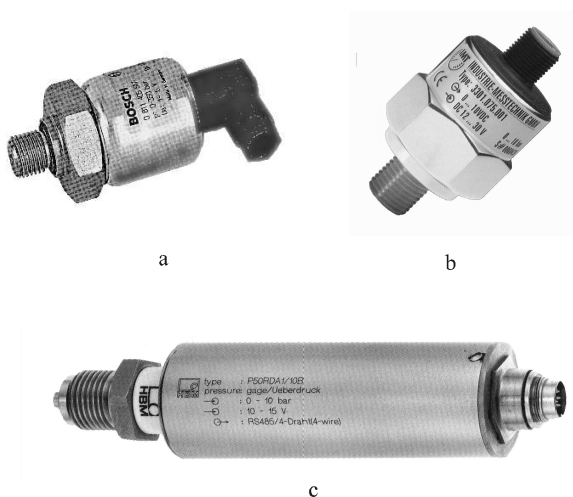
Rūpnieciski ražo spiediena mērpārveidotājus plašam mērāmo spiedienu

diapazonam. Daži no tiem ir parādīti 2.7 attēlā.

Parasti rūpnieciski ražotajos pārveidotājos ir iemontēti pastiprinātāji, kuri pastiprina tilta izejas spriegumu līdz standarta līmenim 0 – 5V, vai 0 – 10V. Ja izejas signāls jāpārvada lielos attālumos, jālieto sensori ar strāvas izeju.



2.6 att. Pusvadītāju spiediena sensora uzbūve



2.7 att. Rūpnieciski ražotie spiediena mērpārveidotāji

a, c – pārveidotāji ar nerūsējošā tērauda membrānu un tenzorezistoru tiltu, b – pusvadītāju spiediena mērpārveidotājs

Ļoti augstu spiedienu mērīšana

Tehnikā ir sastopami procesi, kuros nepieciešami spiedieni vairāki simti megapaskāli. Šādu spiedienu mērīšanai membrānu sensori nav piemēroti, jo nepieciešamas liela biezuma membrānas. Tas rada nelinearitātes kļūdas. Šādu spiedienu mērīšanai izmanto **manganīna** stieples tenzorezistorus. Manganīna stieple tiek ievietota šķidrumā un uz to iedarbojas mērāmais spiediens. Spiedienos virs 100Mpa manganīna pretestība pieaug proporcionāli spiedienam. Ieslēdzot šādu stieples pretestību mērshēmā, iegūst augsta spiediena mērpārveidotāju. Manganīna sensors nodrošina augstu temperatūras stabilitāti, jo manganīns nemaina pretestību temperatūras ietekmē.

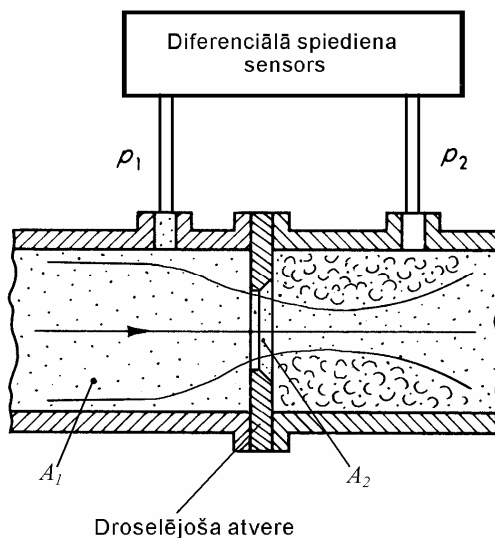
3. Plūsmas mērīšana

Šķidruma plūsmas mērīšana nepieciešama daudzos tehnoloģiskos procesos, piemēram, proporcionālās hidrauliskās piedziņas sistēmās. Šim nolūkam ir izstrādātas ierīces, kuras sauc par caurplūdes mērītājiem. Lielai daļai caurplūdes mērītāju precīzu mērījumu iegūšanai nepieciešams nodrošināt precīzus spiediena un temperatūras mērījumus.

3.1. Plūsmas mērītāji ar vietējām pretestībām

Minētajai kategorijai atbilst vairāki plūsmas mērītāju veidi. Tie atšķiras ar vietējās pretestības konstruktīvo izveidojumu, bet visiem mērītājiem kopīga pazīme ir tā, ka plūsmas lieluma mērs ir spiediena kritums uz vietējās pretestības cauruļvadā.

Asu malu drosele (3.1 att.) ir visplašāk izmantotais plūsmas mērīšanas elements. To nosaka konstrukcijas vienkāršība, zemā cena un plašais pētījumu rezultātu klāsts, kas ļauj precīzi noteikt parametrus un prognozēt iekārtas darbību.



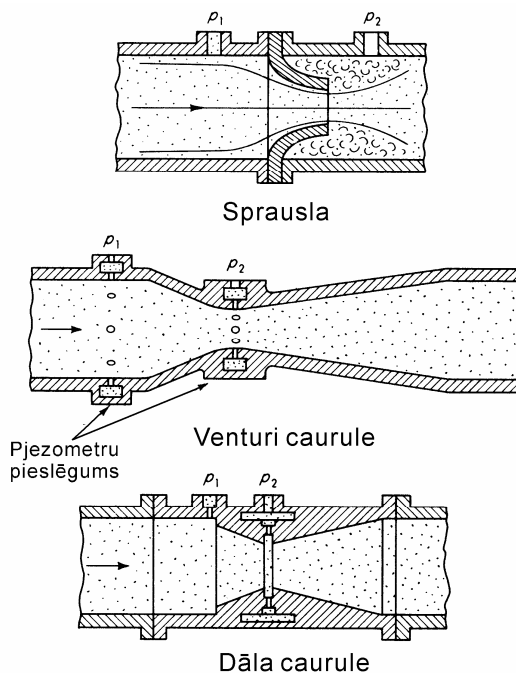
3.1 att. Droseles tipa plūsmas mērītājs

Mērītāja tilpumisko caurplūdi aprēķina pēc formulas:

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho} (p_1 - p_2)}, \quad (3.1)$$

kur Q – tilpumiskā caurplūde, m^3/s , A_1 – vada šķērssgriezuma laukums, m^2 , A_2 – droseles atveres laukums, m^2 , ρ – šķidruma blīvums, kg/m^3 , $p_1 - p_2$ – spiediena kritums, Pa.

Sprauslas, Venturi caurule un Dāla caurule (3.2 att.) darbojas pēc tāda paša principa, kā drosele; nozīmīgi atšķiras tikai parametru skaitliskās vērtības. Venturi caurules priekšrocības ir augstā precizitāte un mazi plūsmas spiediena zudumi, bet tā ir dārgāka nekā drosele. Lielāki spiediena zudumi ir gan sprauslai, gan droselei. Venturi caurules sākotnējo cenu kompensē mazākas ekspluatācijas izmaksas.



3.2 att. Spiediena krituma tipa plūsmas mērītāji

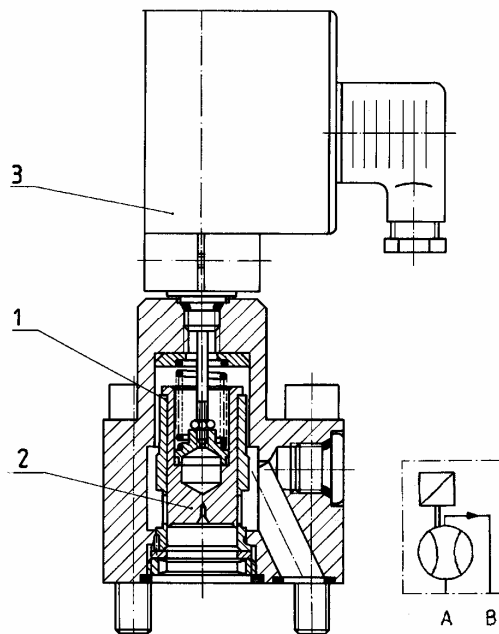
Dāla plūsmas caurule raksturīga ar neparedzamu spiediena starpības Δp izmaiņu (tāpat kā droselei) un maziem spiediena zudumiem (līdzīgi vai pat mazāki kā Venturi caurulei).

Mērītāja izvēli (starp droseli, Venturi cauruli, sprauslu un Dāla cauruli) nosaka arī vairāki citi parametri:

- ✓ precizitāte (kalibrēta Venturi caurule nodrošina visaugstāko precizitāti),
- ✓ aizsērēšanas intensitāte, darbā ar suspendētiem šķidrumus (Venturi ir vislabākā),
- ✓ precizitātes zudums izdiluma rezultātā (Venturi, sprauslas un Dāla caurule ir labākas par droseli),
- ✓ cena un mērītāja elementu nomaiņas iespējas un vienkāršība pārejot uz citu mērīšanas diapazonu.

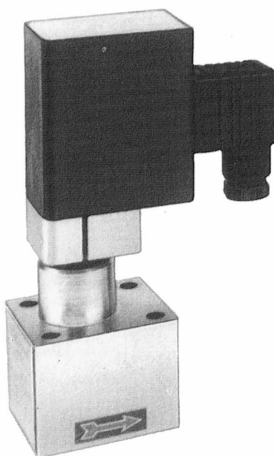
3.2. Rūpnieciski ražotie plūsmas mērītāji

Adaptīvas droseles plūsmas mērītāja darbības laikā droseles šķērsriezuma laukums mainās plūsmas dinamiskā spiediena iedarbības rezultātā (3.3 attēls).



3.3 att. **Adaptīvas droseles mērītāja uzbūve**
A - ieeja, B – izeja

Ienākošā plūsma iedarbojas uz cilindriskā plūsmdaļa 2 gala virsmu un, saspiežot atsperi, pārvieto to uz augšu atverot ceļu plūsmai caur ieliktni 1.



3.4 att. **Adaptīvas droseles plūsmas mērītājs**

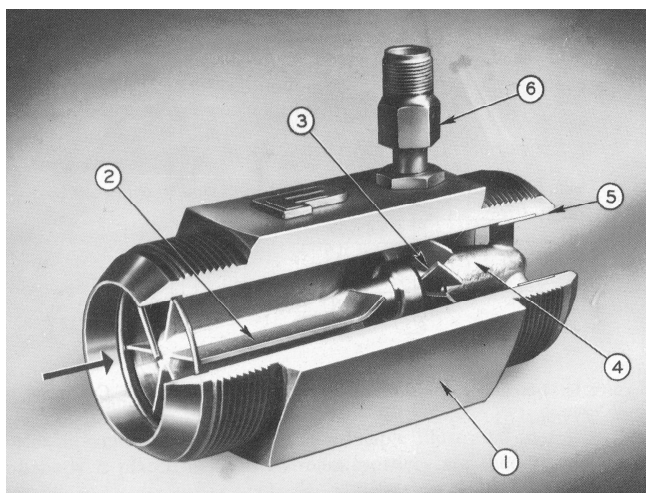
Līdzsvara gadījumā, kad spiediena krituma radītais spēks uz droseli ir vienāds ar atsperes pretpēku, plūsmdaļa pārvietojums ir tieši proporcionāls plūsmas tilpumiskajai vērtībai. Plūsmdaļis ir savienots ar pārvietoējuma mērpārveidotāju un signāla kondicionēšanas shēmu (bloks 3). Iekārtas izejā tiek nodrošināts elektrisks signāls, kurš ir tieši proporcionāls plūsmas lielumam. Pretēja virziena plūsmas gadījumā ierīce darbojas kā pretvārsts un noslēdz plūsmas ceļu.

Adaptīvās drosesles plūsmas mērītājus iesaka lietot sekojošos gadījumos:

- ✓ spēka hidroliko sistēmu darbības kontrolei, apkopei un remontam,
- ✓ automātiskās regulēšanas sistēmās hidrolikās piedziņas režīmu nodrošināšanai, proporcionālās un servohidraulikas iekārtās,
- ✓ laboratorijas mēriekārtās zinātnisko pētījumu nolūkos.

Turbīnas plūsmas mērītāji

Turbīna ir viena no populārākajām plūsmas mērīšanas ierīcēm (skat. 3.5 att.). Šķidruma plūsmai virzoties caur plūsmas mērītāju dinamiskā spēka ietekmē turbīnas rats sāk griezties. Kopā ar turbīnas ratu griežas arī tajā nostiprinātais pastāvīgais magnēts. Turbīnas augšdaļā ir nostiprināts magnētiskā lauka izmaiņas detektors, kas ģenerē elektrisko impulsu uz katru turbīnas rata apgriezienu. Impulsu skaits noteiktā laikā ir proporcionāls caurplūdušā šķidruma tilpumam. Rezultātu iegūst, saskaitot impulsus ar elektronisku impulsu skaitītāju. Impulsu frekvence ir proporcionāla plūsmas tilpumiskajai vērtībai.



3.5 att. Plūsmas mērīšanas turbīna

- 1 – korpuss, 2 – ieejošās plūsmas stabilizatori, 3 – turbīnas lāpstīņas,
4 – izejošās plūsmas izlīdzinātājs, 5 – caurules pievienošanas vītne,
6 – izejas signāla konektors

Turbīnas mērpārveidotāji dod labu precizitāti mainīgu plūsmu gadījumos. Caurplūdi Q aprēķina pēc formulas:

$$Q = \frac{f}{K_t}, \quad (3.2)$$

kur f pulsāciju frekvence, K_t – turbīnas parametrs.

Turbīnas parametrs ir atkarīgs no plūsmas lieluma un šķidruma kinemātiskās viskozitātes. Turbīnas mērpārveidotāju precizitāte ir $\pm 2.5\%$ vai $\pm 0.5\%$, ja lieto linearizācijas shēmas.

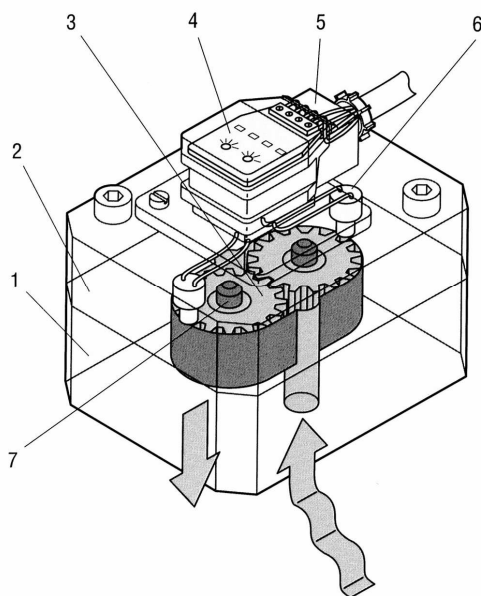
Mainīga tilpuma plūsmas mērītāji

Mainīga tilpuma plūsmas mērītājus galvenokārt lieto iekārtās, kur nepieciešama augsta stacionāras plūsmas mērīšanas precizitāte.

Plašāk izmanto šāda veida mainīga tilpuma plūsmas mērītājus:

- ✓ lāpstiņu mērītāji,
- ✓ rotācijas skaitītāji,
- ✓ zobratu mērītāji.

Eļļas plūsmu noteikšanai hidrauliskajās sistēmās parasti izmanto zobratu tipa mērītājus. Zobratu plūsmas mērītāju uzbūve un darbība ir līdzīga zobratu hidromotoru uzbūvei un darbībai (3.6 att.).



3.6 att. Tilpumiskais plūsmas mērītājs

1- korpuss, 2 - vāks, 3 - zobrats, 4 – priekšpastiprinātājs,
5 - konektors, 6 - sensors, 7 – gultnis

Mērītāja zobratus 3 piedzen caurplūstošā eļļas plūsma tāpat kā zobratu hidromotoros. Zobrati brīvi griežas mazas berzes lodīšu vai slīdgultņos 7 un nav kontaktā ar sensoru 6. Informācija par zobratu rotāciju magnētiskā ceļā tiek nodota sensoram 6. Sensoru no zobratu telpas atdala nemagnētiska materiāla spiedienizturīga plāksne. Zobratam pagriežoties par vienu zobu, tiek ģenerēts impulss, kas raksturo vienam zobam atbilstošo izplūstošo šķidruma tilpumu V_{gz} . Impulsu pastiprina ar priekšpastiprinātāju 4 un pārveido taisnstūra formā. Lai nodrošinātu augstāku precizitāti un plūsmas virziena indikāciju, izmanto divkanālu mērīšanu. Mērītāja izejas signāls tiek pārveidots atbilstošā formā izmantošanai skaitītājos vai automātiskās regulēšanas sistēmās.

Zobratu plūsmas mērītājiem ir sekojošas priekšrocības:

- ✓ augsts darba spiediens (63Mpa),
- ✓ augsta precizitāte ($\pm 0.3\%$ no reālās vērtības), pat mērīapazona sākumā un beigās,
- ✓ mazs spiediena kritums,
- ✓ rezultātus neietekmē darba un apkārtējās vides temperatūra.

Zobratu plūsmas mērītāju trūkums ir to augstā cena.

4. Temperatūras mērīšana

Temperatūras mērīšanai tiek piedāvāti daudz un dažādi mērpārveidotāji, kuros izmanto atšķirīgus fizikālos darbības principus. Kopumā temperatūras sensoriem tiek izvirzītas šādas prasības:

- ✓ izmantošanas iespējas lielā temperatūras diapazonā,
- ✓ lineāra raksturlīkne visā mērāmās temperatūras diapazonā,
- ✓ ātra reakcija uz mērāmo lielumu izmaiņām,
- ✓ reproducējamība, tas nozīmē, devēja raksturlīkne nedrīkst izmainīties ilgākā laika periodā, neraugoties uz to, ka temperatūra nemītīgi mainās (stabilitāte ilgtermiņā),
- ✓ iespējami mazāka histerēze, t.i., mērīšanas signālam jābūt neatkarīgam no virziena, kādā tuvojas mērāmais punkts,
- ✓ necīga termiskā masa, lai nevajadzīgi neietekmētu mērāmo temperatūru,
- ✓ nelielas novirzes no pielādes, lai būtu iespējams viegli apmainīt bojātus devējus bez mērierīces atkārtotas un darbietilpīgas salāgošanas.

Protams, ka ne visi šajā nodaļā aplūkotie devēji vienlīdz labi atbilst izvirzītajām prasībām. Temperatūras sensoros, ko reizēm sauc arī par mērtaustiem, tiek izmantota elektriskās pretestības atkarība no temperatūras izmaiņām, pie kam elektrovadītspēja mainās atkarībā no izmantotā materiāla. Izņēmums ir termopāri, kas ģenerē EDS proporcionālu temperatūras starpībai uz termopāra galiem.

Temperatūras sensorus iedala 6 lielās grupās:

- ✓ rezistīvie metāla sensori,
- ✓ termistori,
- ✓ silīcija temperatūras sensori,
- ✓ integrālie pusvadītāju sensori,
- ✓ infrasarkanā staru temperatūras mērierīkstas,
- ✓ termoelementi (termopāri).

4.1. Rezistīvie metāla sensori

Pirmie mērtausti, kas jau gadiem ilgi ir sevi pierādījuši temperatūras mērētnīkā, bija izveidoti no platīna vai vara stieples, kas uztīta uz turētāja. Vēlāk devēju materiāliem pievienojās arī niķelis. Pēdējos gados ražotāji aizvien vairāk piedāvā arī

pretestības mērtastus, kas izgatavoti pēc vismodernākajām mūsdienu pusvadītāju tehnoloģijām. Šajos sensoros izmanto nevis tievu metāla stiepli, bet plānu foliju, kura uznesta uz turētāja. Par devēja materiālu līdzās platīnam (Pt) un niķelim (Ni) pēdējā laikā tiek izmantots arī irīdijs (Ir). Irīdijs ir trausls materiāls un to nevar izveidot stieples formā, taču tas noder mērīšanai zemu temperatūru diapazonā: līdz $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Atšķirībā no platīna, irīdijam pat šādā temperatūrā neparādās vērā ņemams histerēzes efekts. Neatkarīgi no konstrukcijas veida, visos pretestības mērtastos tiek izmantota plašu temperatūras diapazonu aptveroša, gandrīz lineāra sakarība starp materiāla elektrisko pretestību un devēja temperatūru. Matemātiski šo sakarību tuvināti izsaka šādi:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (4.1)$$

kur R_t - pretestības vērtība omos (Ω) temperatūrā t , R_0 - pretestības vērtība omos (Ω), ja temperatūra ir $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ (atskaites lielums), α = temperatūras koeficients, kas apzīmē relatīvo pretestības izmaiņu atkarībā no temperatūras, ($1/\text{K}$), ΔT - temperatūras starpība Kelvinos (K).

4.2 tabula. Temperatūras sensoru parametri

Niķeļa temperatūras sensors (pieņemtais apzīmējums Ni-100)				
Nominālā pretestība ($t=0^{\circ}\text{C}$), Ω			100 Ω	
Temperatūras koeficients α robežās no 0°C līdz 100°C			$\alpha = 0,00618\text{ }1/\text{K}$	
Temperatūras diapazons			-60°C līdz $+150^{\circ}\text{C}$	
Parametri				
Mērtemperatūra	$-60\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$	
Pretestība	$69,5 \pm 1,0\text{ }\Omega$	$100,0 \pm 0,2\text{ }\Omega$	$161,8 \pm 0,8\text{ }\Omega$	
Platīna mērpārveidotājs (pieņemtais apzīmējums Pt-100)				
Nominālā pretestība ($t=0^{\circ}\text{C}$), Ω			100 Ω	
Temperatūras koeficients α robežās no 0°C līdz $100\text{ }^{\circ}\text{C}$			$\alpha = 0,00385\text{ }1/\text{K}$	
Temperatūras diapazons -200°C līdz 650°C (A klase), līdz 850°C (B klase)				
Parametri				
Mērtemperatūra	$-200\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$
Pretestība, Ω				
(A klase)	18.49 ± 0.24	100.0 ± 0.13	175.84 ± 0.20	247.04 ± 0.79
(B klase)	18.49 ± 0.56	100.0 ± 0.30	175.84 ± 0.48	247.04 ± 0.79

Visiem metāliem, kurus izmanto pretestības termosensoros, ir liela īpatnējā pretestība un augsts temperatūras koeficients α . Temperatūras koeficienta α atkarība no temperatūras ir niecīga.

Nominālās vērtības pretestības mēraustiem nosaka standarts IEC 751 (DIN 43760). Tabulā 4.1 ir apkopoti daži parametri un pieļaujamās novirzes precizitātes klasēm A un B.

Apzīmējumi izveidoti no jutīgā materiāla ķīmiskā elementa simbola un omiskās pretestības skaitliskās vērtības temperatūrā $t_0=0^\circ\text{C}$, piemēram, Pt-100 – platīna sensors ar nominālo pretestību $100\ \Omega$, ja $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Lai gan šī norma tika noteikta pretestības mēraustiem ar stieples tinumu, ražotāji atbilstoši tai izgatavo arī folijas mērpresetības.

Temperatūras sensoros ar stieples tinumu devēja materiāls, kura diametrs ir no 0.05 mm līdz 0.3 mm, tiek uztīts uz keramikas ķermeņa. Izšķir konstrukcijas ar lineāro un bifilāro tinumu (skat. 4.1 att.).



4.1 att. Lineārais un bifilārais tinums

Temperatūras sensoros izmantoto materiālu īpatnējā pretestība nav sevišķi liela, tāpēc, lai sasniegtu nominālo pretestību nepieciešams liels vijumu skaits. Sensori, kuri izveidoti ar lineāro tinumu, ir ar lielu induktivitāti. Tas palielina sensora laika konstanti un šādus sensorus izmanto lēni mainīgas temperatūras mērīšanai. Bifilārais tinums nodrošina bezinduktīva sensora veidošanu un lielāku tā ātrdarbību.

Folijas rezistīvos temperatūras sensorus izgatavo pēc dažādām pusvadītāju tehnoloģijā pazīstamām metodēm. Uz nesējķermeņa uzklāj 1 μm līdz 2 μm biezu jutīgā materiāla kārtiņu. Pēc tam sensors tiek kalibrēts, lai iegūtu nominālo vērtību. Pēc tam atkarībā no izmantošanas jomas, tas tiek ievietots vai nu korpusā vai pārklāts ar aizsargkārtiņu, kas ir izturīga pret apkārtējās vides iedarbību.

Rezistīvo temperatūras sensoru izmantošana

Mērot temperatūru ar pretestības sensoriem, tiek izmantota devēja omiskās pretestības izmaiņa. Lai pārvērstu pretestības izmaiņu atbilstošā sprieguma izmaiņā, termorezistorus parasti ieslēdz Vīstouna tiltā ceturtdaļtilta slēgumā. Šādā slēgumā iespējama divu papildus mērīšanas kļūdu rašanās. Kļūdas rodas sekojošu iemeslu dēļ:

- ✓ caur mērīšanas ķēdi plūstošā strāva izraisa devēja pašsasilšanu, kas izmaina sensora raksturlīkni,

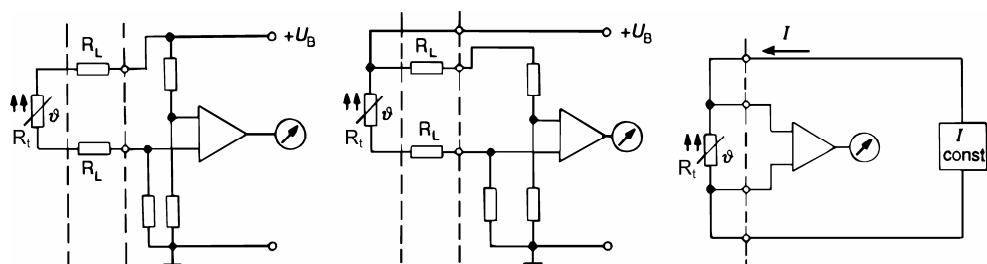
- ✓ strāvas pievadu pretestība ir pakļauta mainīgai ārējās vides iedarbībai, tās ietekmi uz mērīšanas rezultātu var novērst, izmantojot trīsvadu vai četrvadu slēgumu.

Rezistīvo temperatūras mērpārveidotāju konstruktīvais izpildījums redzams 4.2 attēlā.



4.2 att. Rezistīvo temperatūras sensoru konstruktīvā izpildījuma veidi

Galvenie mērpretestību slēgumu veidi redzami 4.3 attēlā.



a) divu izvadu shēma b) trīs izvadu shēma c) četru izvadu shēma

4.3 att. Rezistīvo temperatūras sensoru slēguma veidi

Divizvadu shēmas gadījumā mērījuma rezultātā iekļauta pievadu pretestība R_L un arī tās izmaiņa temperatūras iedarbībā. Ja sensora pievadi ir īsi un $R_t \gg R_L$, pievadu pretestības izmaiņu var neņemt vērā.

Divizvadu shēmai piemītošā kļūda trīsizvadu shēmā neparādās, jo pievadu pretestības atrodas simetriski abos tilta atzaros un līdz ar to savstarpēji izlīdzinās.

Visprecīzākos mērījuma rezultātus dod četrizvadu shēma. Tā darbojas pēc strāvas-spieguma metodes. Neatkarīgi no mērīšanas ķēdes kopīgās pretestības, caur devēju plūst konstanta strāva. Līdz ar to ar augstomīgu mēraparātu iespējams ļoti precīzi noteikt devēja pretestību neatkarīgi no pievadu garuma. Taču šīs shēmas trūkums ir tas, ka starp devēju un pastiprinātāju jābūt četriem izvadiem.

Visas trīs minētās shēmas var izmantot gan stieplu, gan arī folijas mērpretestībām. Shematiskais apzīmējums abiem mērpretestību konstrukciju veidiem ir vienāds.

Izvēloties temperatūras mērpretestības, noteicošais faktors ir mērāmās temperatūras diapazons un vide, kurā atradīsies jutīgais elements.

Mērāmās temperatūras diapazons ir atkarīgs no rezistora materiāla un nesējķermeņa materiāla. Minētājiem materiāliem ir šādi temperatūras diapazoni:

- ✓ platīnam – 250 °C + 1000 °C
- ✓ niķelim – 60 °C + 250 °C
- ✓ irīdijam – 200 °C + 600 °C

Sensora konstruktīvā izveidojuma izvēli nosaka arī temperatūras izmaiņas straujums un vides siltumietilpība, kā arī cena.

4.2. Termistori

Atkarībā no elektriskās vadītspējas izšķir NTC (*negative temperatur coefficient* - negatīvas temperatūras koeficienta) un PTC (*positive temperatur coefficient* - pozitīvas temperatūras koeficienta) termistorus (angļu val. *thermal sensitive resistor* - no temperatūras atkarīga pretestība).

Termistorus izgatavo no polikristālisku jauktu oksīdu keramikas materiāla. Šim nolūkam dažādu metālu oksīdus un stabilizatorus saturošu pulveri sajauc ar plastiskām saistvielām. Tad masa tiek sapresēta plāksnītēs, stienīšos vai lodītēs. Turpmākā kausēšanas procesā aptuveni 1000°C līdz 1400 °C temperatūrā termistori iegūst savas īpašās elektrovadītspējas īpašības. Atšķirīgu NTC un PTC termorezistoru reakciju uz temperatūras izmaiņām iegūst, pateicoties dažādiem izejmateriāliem un to maisījuma attiecībām, kā arī, izmantojot dažādus tehnoloģiskus sakausēšanas paņēmienus.

NTC termistoru pretestība palielinoties temperatūrai samazinās, bet PTC termistoru pretestība pieaug. Termistoru raksturlīknes plašākā temperatūru apgabalā ir ļoti nelineāras, tāpēc to izmantošana precīzos mērījumos ir ierobežota.

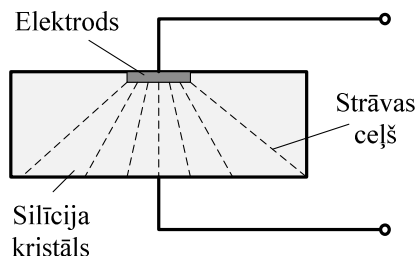
NTC termistorus plaši izmanto automātiskās regulēšanas sistēmās, kā arī kā kompensācijas termistorus pusvadītāju shēmu darba režīmu stabilizācijai un termopāru „aukstā” gala kompensācijai.

Palaišanas termistori galvenokārt paredzēti impulsveida strāvas ierobežošanai, kas rodas, ieslēdzot kvēllampas, mazus motorus, kondensatorus vai lampu kvēlķēdes.

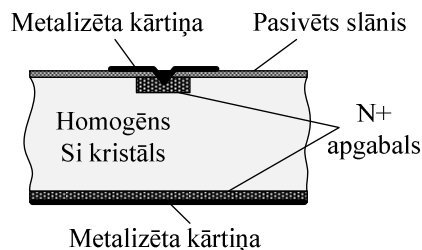
PTC termistorus izmanto kā jutīgus temperatūras devējus šaurā temperatūru diapazonā un kā aizsargierīces pret pārslodzēm, kā starterus luminiscences lampās, kā pašregulējošus termoelementus, releju enkura pievilkšanas un atlaišanas aizturei elektroniskajās shēmās.

4.3. Silīcija temperatūras sensori

Silīcija temperatūras sensori pieder pie jaunākajiem konstruktīvajiem risinājumiem sensoru tehnikā. Tie sastāv no silīcija plāksnītes, kuras abās pusēs atrodas ar metāla kārtiņu pārklātas virsmas, kas kalpo kā kontakti. Pie tam viena puse ir pilnībā pārklāta ar metāla kārtiņu, bet otrā pusē atrodas ievērojami mazāks, lielākoties apaļš elektrods. Pieliekot spriegumu, saskaņā ar *pretestības radiālās izplešanās* principu Si kristālā rodas konusveida strāvas sadale (4.4 att.)



4.4 att. **Pretestības radiālās izplešanās princips**



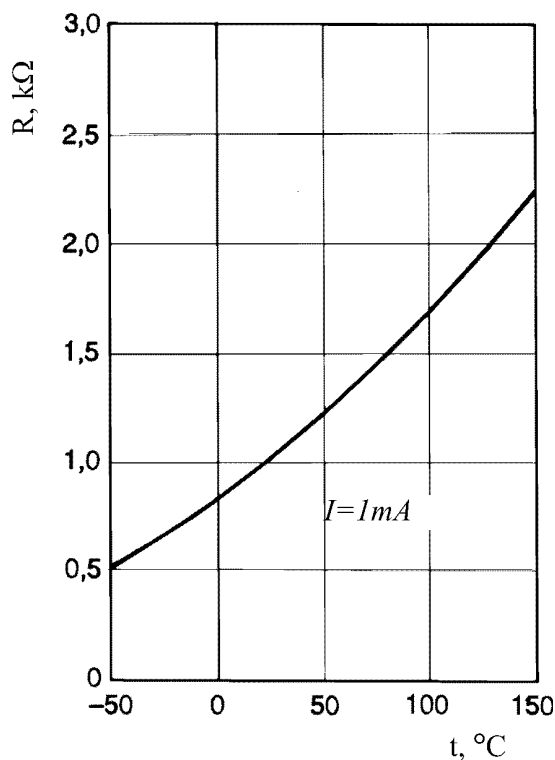
4.5 att. **Si temperatūras devēja jutīgā elementa principiālā uzbūve**

Si temperatūras devēja jutīgā elementa uzbūve ar izmēriem $0.50 \text{ mm} \times 0.50 \text{ mm} \times 0.24 \text{ mm}$ ir attēlota 4.5 attēlā. Apaļā elektroda diametrs ir aptuveni 0.02 mm . Robežapgabalā virzienā uz abiem elektrodiem homogēnajā Si kristālā difūzijas ceļā tiek radīti $n+$ apgabali. Sensora nominālo pretestību iespējams ietekmēt jau izgatavošanas procesā, izmainot kristāla izmērus un piejaukuma koncentrāciju. Attēlā redzamā jutīgā elementa omiskā pretestība ir atkarīga no pieliktā sprieguma virziena. To novērš, ieslēdzot divus šādus jutīgos elementus pretslēgumā (4.6 att.). Abus pretējās polaritātes jutīgos elementus saista metāliska virsma. Par pieslēgumu kalpo abi elementu apaļie kontakti.



4.6 att. **Simetriski veidota sensora uzbūve**

Silīcija temperatūras sensoriem, kas izveidoti no n -bagātinātā silīcija, līdz noteiktai robežtemperatūrai ir pozitīvs temperatūras koeficients. *Valvo* firmas KTY 81 tipa temperatūras devēja raksturlīknes apgabals ir attēlots 4.7 attēlā.



4.7 att. *Valvo* firmas KTY 81 tipa temperatūras sensora raksturlīkne

Silīcija temperatūras sensoru raksturlīkņu linearizācija

Praksē dažkārt nākas linearizēt silīcija temperatūras sensoru nedaudz ieliekto raksturlīkni. To var izdarīt, gan ieslēdzot papildus paralēlu rezistoru, gan arī virknes rezistoru.

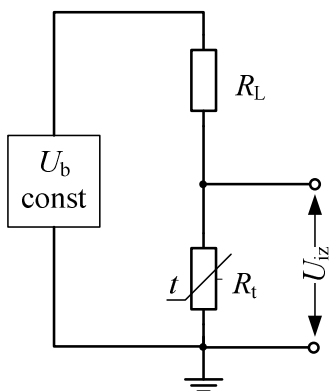
Linearizācijai ar virknes slēguma pretestību ir nepieciešams konstants barošanas spriegums, turpretī linearizācijai ar paralēli ieslēgtu pretestību vajadzīga konstanta barošanas strāva. Abas slēguma iespējas parādītas 4.8 attēlā.

Linearizācijas pretestību R_L var aprēķināt pēc šāda vienādojuma:

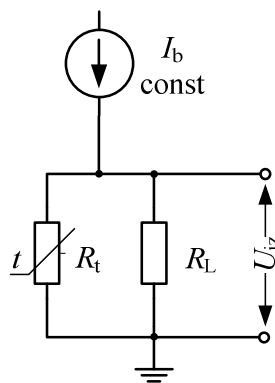
$$R_L = \frac{R_b(R_a + R_c) - 2R_a R_c}{R_a + R_c + 2R_b}, \quad (4.2)$$

kur R_L - linearizācijas pretestība, Ω ; R_a - temperatūras devēja pretestība vēlamā temperatūras apgabala zemākajā punktā t_{min} , Ω ; R_b - temperatūras devēja pretestība vēlamā temperatūras apgabala vidū, Ω ; R_c - temperatūras devēja pretestība vēlamā diapazona augstākajā temperatūrā t_{max} , Ω .

Šis vienādojums vienlīdz der linearizācijai kā ar paralēlo, tā ar virknē slēgtu pretestību.



a) ar virknes pretestību



b) ar paralēli slēgto pretestību

4.8 att. Silīcija temperatūras sensoru raksturlīkņu linearizācijas shēmas

4.4. Integrālie temperatūras sensori

Integrālajos temperatūras sensoros izmanto p - n pārejas temperatūras atkarību. Kopā ar p - n pāreju, kā temperatūras jutīgo elementu, ir signāla apstrādes shēma, kas, atkarībā no temperatūras sensora tipa, nodrošina temperatūrai proporcionālu izejas strāvu vai temperatūrai proporcionālu izejas spriegumu. Tāpēc integrālos temperatūras sensorus sauc arī par temperatūras atkarīgiem strāvas vai sprieguma avotiem.

Svarīgākie dati par trīs dažādiem integrāliem temperatūras sensoriem apkopoti 4.3 tabulā.

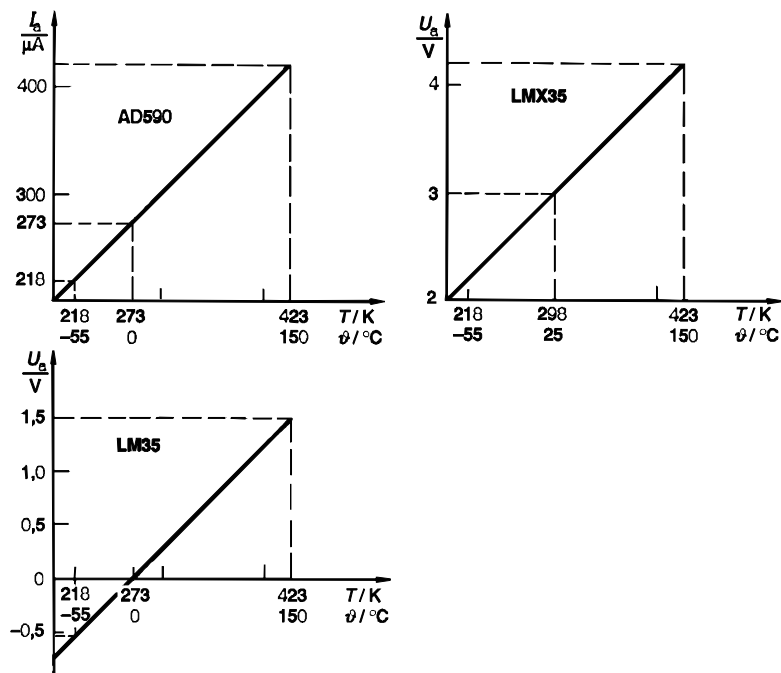
Sensors AD 590 (*Analog Devices*) ir izveidots kā temperatūras atkarīgs strāvas avots, un tāpēc tam ir liela izejas impedance (pilnā pretestība).

4.3 tabula **Integrālo temperatūras sensoru tehniskie dati**

Tips	Darba spriegums	Temperatūras diapazons	Jutība	Izejas impedance	Korpuss
AD 590	+4V...+30 V	-55°C...+150°C	1 μ A/K	10 M Ω	T 0-46 T 0-92
LMX 35	+4V...+30 V	-55°C...+150°C	10 mV/K	0,5 Ω	T 0-46 T 0-92
LM 35	+4V...+30 V	-55°C...+150°C	10mV/K	0,5 Ω	T 0-46 T 0-92

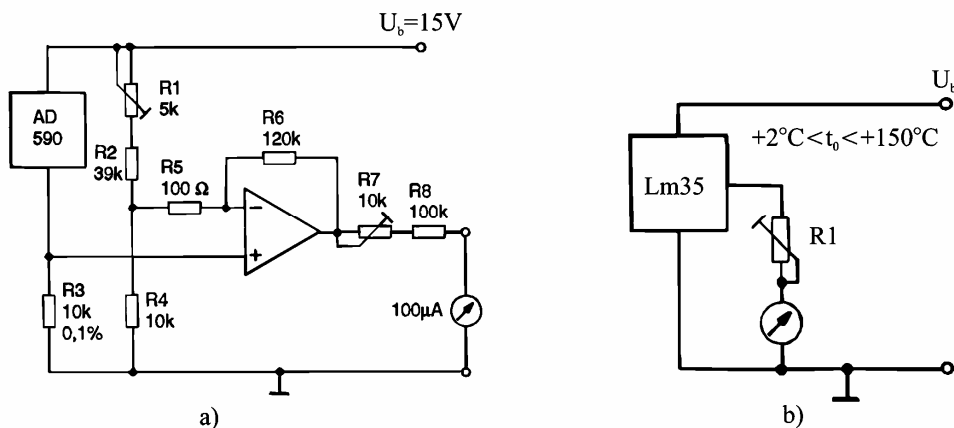
Ražotāji AD 590 sensoru ir salāgojuši tā, lai tā sākumstrāva mikroampēros (μ A) atbilstu absolūtajai temperatūrai Kelvīnos (K). Tas savā pieļaujamajā temperatūras diapazonā nodrošina izejas strāvu robežās no 218 μ A līdz 423 μ A. Lai izvairītos no mērīšanas kļūdām, kuras izraisa temperatūras sensora pašsasilšana, darbspriegumu

jāizvēlas tik mazu, cik vien iespējams. Integrālie temperatūras sensori LMX35 un LM35 (*National Semiconductors*) pieskaitāmi temperatūras atkarīgajiem sprieguma avotiem, tādēļ tiem ir ļoti zema izejas impedances.



4.9 att. Integrālo temperatūras sensoru raksturlīknes

Trīs integrālo temperatūras sensoru (skat. tabulu) raksturlīknes ir grafiski attēlotas 4.9 attēlā, savukārt 4.10 attēlā ir parādītas divas shēmas termometriem ar analogo izeju.



4.10 att. Divas termometru shēmas ar analogo indikāciju

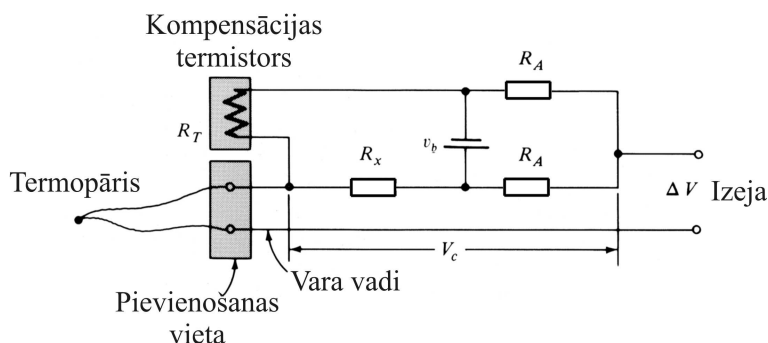
Kā redzams shēmā 4.10a attēlā AD 590 un rezistora R3 virknes slēgums veido tilta slēguma atzaru. Ar rezistoru R1 temperatūrā $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ tilta spriegumu var ieregulēt līdz $U=0\text{V}$. Tad tilta spriegums ir diferenciālā slēguma operācijpastiprinātāja ieejā. Operācijpastiprinātāja izejas spriegumu uzrāda mērinstruments ar lineāru Celsija grādos graduētu skalu. Mērinstrumentu kalibrē ar potenciometru R7.

LM 35 pieder pie *pašregulējošiem* temperatūras sensoriem. Tas ir izveidots tā, ka, arī neieslēdzot tilta slēgumā, - un tāpēc arī bez papildus ieregulēšanas iespējas - temperatūrā $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dod izejas spriegumu $U_A = 0\text{ V}$. Šāda termometra uzbūve ir vienkārša. Arī šajā gadījumā lineāro skalu var graduēt $^{\circ}\text{C}$ (4.10b att.).

4.5. Termopāri

Termopāri pieder pie aktīvo sensoru grupas, kuri temperatūras starpības ietekmē uz termopāra galiem ģenerē spriegumu proporcionālu temperatūras starpībai (skat. *termoelektriskais efekts*).

Pēdējā laikā termopārus aizvien plašāk izmanto temperatūras mērīšanas ierīcēs un sensoros. Tas izskaidrojams ar to, ka modernās tehnoloģijas ļauj efektīvi kompensēt termopāra „aukstā” gala temperatūras izmaiņas izmantojot termistorus (4.11 att.).



4.11 att. Termopāra kompensācijas shēma izmantojot termistoru

Termopāriem ir vairākas priekšrocības, kas padara to lietošanu efektīvu:

- ✓ vienkārša konstrukcija,
- ✓ plašs mērāmo temperatūru diapazons,
- ✓ maza termiskā masa, kas ļauj veikt dinamiskus temperatūras mērījumus,
- ✓ nelielas novirzes no pielaides, kas atvieglo sensora nomaiņu,
- ✓ laba linearitāte un maza histerēze,
- ✓ salīdzinoši neliela cena.

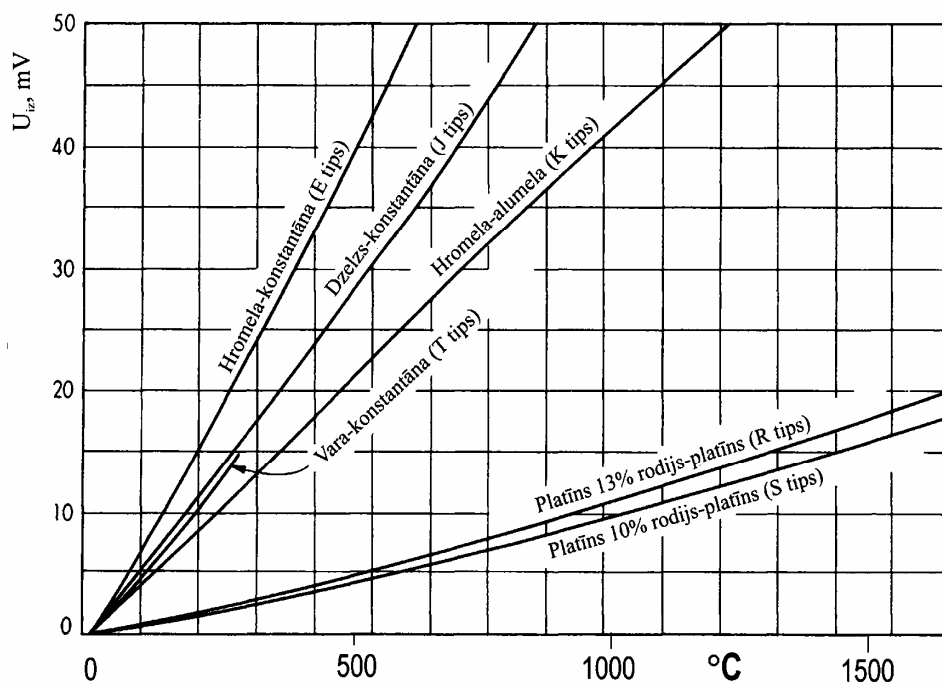
Termopāriem piemīt arī vairāki trūkumi:

- ✓ mazs izejas signāls,
- ✓ termopāra vadu pagarināšanai nepieciešami dārgi speciāli kabeļi,
- ✓ nepieciešama „aukstā” gala temperatūras izmaiņas kompensācija.

Praktiski termopāri var izveidot sametinot jebkuru divu dažādu metālu stieples kopā vienā galā. Atlikušie brīvie gali kalpos kā termopāra izeja. Taču vēsturiski ir atlasīti metālu sakausējumi, kuri noteiktā temperatūru apgabalā dod vislabākos rezultātus (skat. 4.12 att.).

Termopāra izejas spriegums, atkarībā no termopāra tipa un mērīšanas diapazona sasniedz 60mV. Rūpnieciski tiek ražoti speciāli termopāra signāla kondicionieri.

Atkarībā no mērāmās temperatūras diapazona izvēlas noteikta tipa termopāri. Temperatūru diapazonā no 0°C līdz 600°C izmanto K vai J tipa termopārus. Tie ir plašāk lietojamie termopāri. Zemām temperatūrām no -300°C līdz +200°C izmanto vara-konstantāna (T tips) termopārus. Augstām temperatūrām līdz 1500°C rekomendē R vai S tipa termopārus.



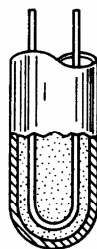
4.12 att. Termopāru raksturlieknes



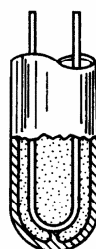
Gluds atklāts
savienojums



Atklāts savienojums
ar lodīti



Slēgts savienojums



Slēgts iezemēts
savienojums

4.13 att. Termopāru konstruktīvais izveidojums

Konstruktīvi termopāri var būt bezkorpusa vai ievietoti dažāda veida korposos (4.13 att.). Termopāra konstruktīvais izveidojums jāizvēlas atkarībā no vides, kurā nepieciešams mērīt temperatūru.

C daļa

TUVINĀJUMA SENSORI

1. Tuvinājuma sensori un to slēgumi

Sensorus, kas reaģē uz ķermeņa “diskrētu stāvokli” (pozīciju), t.i., pārslēdzas, kad objekts atrodas noteiktā pozīcijā, sauc par **tuvinājuma** vai pozīcijas sensoriem. Tuvinājuma sensori izmaina izejas signālu no “0” uz “1” atkarībā no tā, vai objekts ir vai nav noteiktajā pozīcijā. Tā kā šiem sensoriem ir tikai divi izejas signāla līmeņi, tos sauc arī par **binārajiem sensoriem**, retāk arī par slēdžiem.

Sarežģītu uzdevumu veikšanai nepietiek tikai ar atsevišķiem sensoriem. Tiek veidotas **sensoru sistēmas**, kuras sastāv no vairākiem mērīšanas un novērtēšanas elementiem, parasti nozīmīgākajiem signāla apstrādes procesā. To komponenti bieži ir izveidoti atsevišķu moduļu veidā un ir savstarpēji apmaināmi. Signālu kondicionēšanai tiek izmantoti arī signālu procesori, mikrodatori un datu interfeisi.

Piemēri:

- ✓ attēlu apstrādes un analizēšanas sistēma ar CCD sensoriem;
- ✓ lāzera mērsistēmas un identifikatori.

Multi-sensoru sistēmas veido sensoru sistēmas ar vienādiem vai dažādiem sensoru tipiem.

Piemēri:

- ✓ temperatūras un mitruma vai temperatūras un spiediena sensori veido daļu no kādas iekārtas,
- ✓ dažādu gāzu ķīmiskā sastāva sensoru kombinācija, kuru darbības lauki pārsedzas, kopā ar jaudīgām novērtēšanas programmām ļauj iegūt daudz plašāku un vispusīgāku informāciju salīdzinājumā ar atsevišķiem sensoriem.

Daudzās ražotnēs tiek izmantoti mehāniskie pozīcijas slēdži kustības pārtraukšanai gala stāvokļos. Tos sauc arī par mikroslēdžiem vai galaslēdžiem. Tā kā objekta pozīcija tiek noteikta mehāniska kontakta ceļā, nepieciešama precīza sensora konstrukcija. Jāņem vērā, ka sensora detaļas pakļautas izdilumam. Pretstatā mehāniskajiem sensoriem, elektroniskie strādā bezkontakta režīmā.

Bezkontakta pozīcijas sensoru priekšrocības:

- ✓ automātiska un precīza ģeometriskā tuvinājuma noteikšana;
- ✓ objektu un procesu bezkontakta jutība: nav nepieciešams mehānisks kontakts starp sensoru un objektu;
- ✓ liela ātrdarbība: tā kā izejas signāls tiek ģenerēts elektriski, izejā neparādās sprieguma lēcieni un impulsveida traucējumi;
- ✓ beznodiluma darbība: elektroniskajos sensoros nav kustīgu daļu, kas varētu izdilt;

- ✓ neierobežots ieslēgšanās ciklu skaits;
- ✓ pieejamas sensoru konstrukcijas darbam bīstamās vidēs (piem., sprādzienbīstamās vidēs).

Iepriekšminēto priekšrocību dēļ bezkontakta pozīcijas sensori šobrīd tiek plaši lietoti dažādu tehnoloģisko procesu automatizācijai un procesa parametru kontrolei. Tos lieto gan tehnoloģiskā procesa secības nodrošināšanai, gan drošības kontrolei. Traucējumu un kļūdu konstatēšanai tehnoloģiskajā procesā sensorus lieto jau sen. Vēl viena sensoru izmantošanas sfēra ir mašīnu bojājumu novēršana un cilvēku drošības garantēšana ražošanā. Pateicoties sensoru spējai ātri atklāt kļūmes un bojājumus, tiek ievērojami samazināta ražotnes dīkstāve.

Tuvinājuma sensoru izmantošanas jomas

Tuvinājuma sensorus parasti izmanto sekojošās jomās:

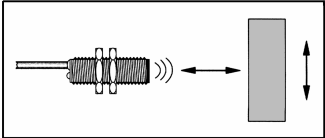
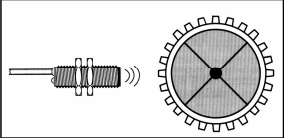
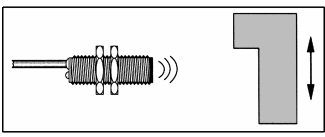
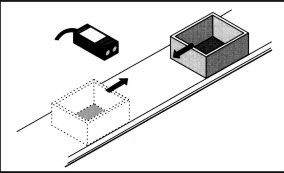
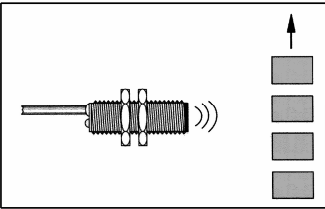
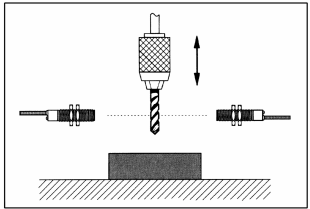
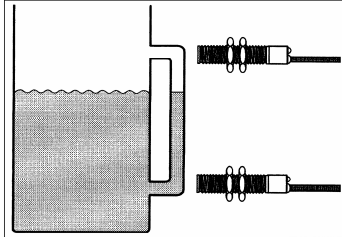
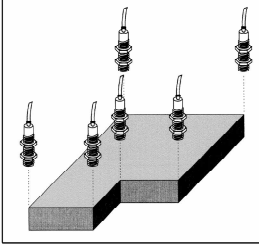
- ✓ automobiļu rūpniecībā,
- ✓ metālapstrādē,
- ✓ pakošanas uzņēmumos,
- ✓ kokapstrādē,
- ✓ papīrrūpniecībā,
- ✓ pārtikas rūpniecībā,
- ✓ keramikas un būvmateriālu rūpniecībā.

Tuvinājuma sensoru izmantošana rūpniecisko procesu automatizācijā ir tik plaša, ka nav iespējams aprakstīt visus iespējamos sensoru izmantošanas variantus. Šajā grāmatā aprakstīti tikai tipiskākie tuvinājuma sensoru piemēri.

Tuvinājuma sensoru izmantošanas piemēri

Tuvinājuma sensorus izmanto ļoti daudzos procesos, kur nepieciešams noteikt objekta atrašanos noteiktā vietā vai stāvoklī, piemēram, pneimopiedziņas un elektropiedziņas vadībā, kontrolējot iekrāvējus, durvju automatizācijā un citur.

Sensorus izmanto objekta pozicionēšanai noteiktā stāvoklī, piemēram, automātiskajā centrēšanā. Programmējamajos darbagaldos sensori seko instrumentu (urbju, frēžu) pozīcijai un bojājumiem. Sensori var sekot šķidruma un beramu vielu līmenim tvertnēs, objektu formai, atšķirt caurspīdīgus objektus un veikt daudzas citas funkcijas. Ir izveidoti dažādi tuvinājuma sensori, lai nodrošinātu plašu izmantošanas spektru rūpniecisko procesu automatizācijā. Izvēloties konkrētus sensorus jāņem vērā gan sensora uzdevums, gan apkārtējās vides apstākļi, kuri var radīt traucējumus sensoru darbībai.

 Kustības bezkontakta kontrole	 Rotācijas ātruma noteikšana
 Objekta pozicionēšanai	 Kustības virziena noteikšana
 Objektu skaitītājs	 Griezējinstrumentu darbības kontrole
 Minimālā un maksimālā līmeņa sensori	 Objekta ģeometriskās formas noteikšana

1.1 att. Tuvinājuma sensoru izmantošanas piemēri

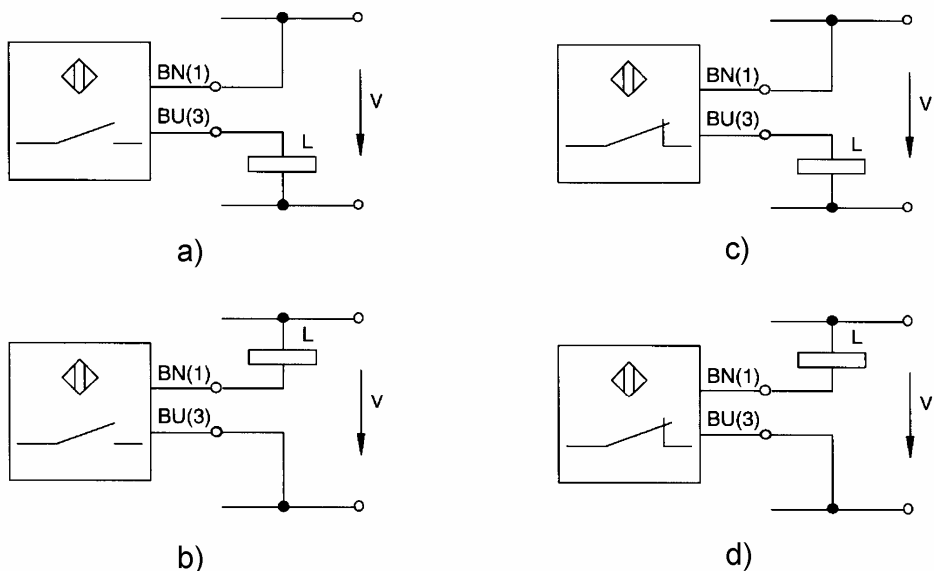
1.1. Sensoru pieslēguma shēmas

Tuvinājuma sensoru pieslēgšanai izmanto vairākus slēgumu veidus. Parasti tuvinājuma sensorus pieslēdz izpildreļiem, vārstu vadības elektromagnētiem vai programmējamajiem loģiskajiem kontrolleriem.

Divvadu līdzstrāvas un maiņstrāvas slēguma sistēma

Divvadu sistēmas tuvinājuma sensoriem ir tikai divi savienojšie vadi. Sensori ir pieslēgti virknē ar slodzi tā, lai to ieslēgtu un sensori saņemtu barošanas spriegumu caur šo slodzi. Šāds slēgums rada efektu, kad caur slodzi nepārtraukti plūst noteikta

paliekošā strāvas daļa, ja sensors ir izslēgtā stāvoklī, bet, ja sensors ir ieslēgtā stāvoklī, uz tuvinājuma sensora izejas spailēm paliek sprieguma kritums.



1.2 att. Divvadu sensoru pieslēgumi

V – darba spriegums; L – slodze (vārsta solenoīds, releja spole)

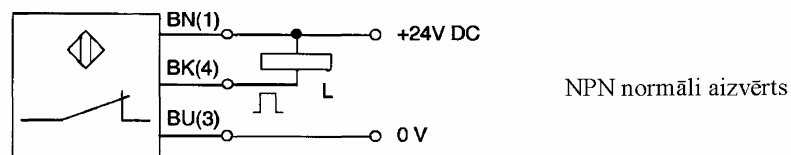
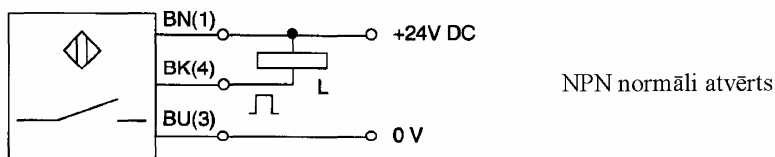
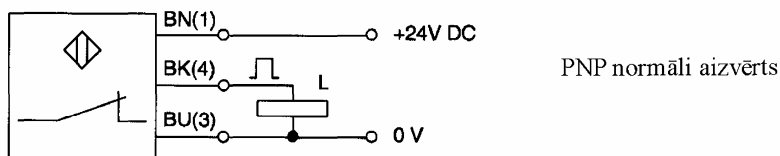
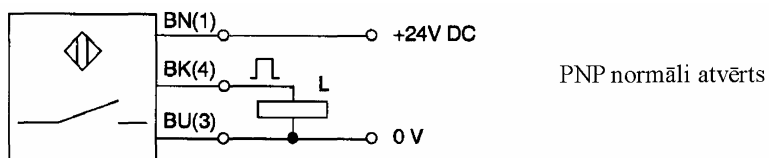
Šāds slēgums tiek lietots gan līdzstrāvas, gan maiņstrāvas barošanas gadījumā. Barošanas spriegums: 15V÷250V (līdzstrāva); 20V÷250V (maiņstrāva). Tuvinājuma sensori ir konstruēti abos veidos, t.i., ar “normāli slēgtiem” kontaktiem (N/C) un “normāli atvērtiem” kontaktiem (N/O). Pieejamas arī konstrukcijas, kurās vienlaicīgi ir ietvertas abas šīs funkcijas.

Sprieguma potenciāla aizsardzības zemējuma vads parasti ir zaļi dzeltenā krāsā. Maiņstrāvas vai maiņstrāvas/līdzstrāvas (universālajā) izpildījumā pieslēguma vadi var būt apzīmēti citās krāsās, bet ne zaļi dzeltenā. Tāpat kā līdzstrāvas konstrukcijās, arī šeit galvenokārt tiek izmantoti brūnās un zilās krāsas vadi.

Divvadu sensora neieslēgtā stāvoklī paliekošā strāva plūdis tā, lai nodrošinātu barošanas strāvu tuvinājuma sensoram. Paliekošā strāva plūdis arī caur slodzi. Ieslēgtā sensora stāvoklī minimāla slodzes strāva plūdis, nodrošinot drošu tuvinājuma sensora darbību.

Trīsvadu līdzstrāvas slēguma sistēma

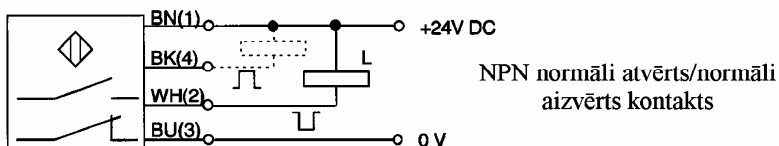
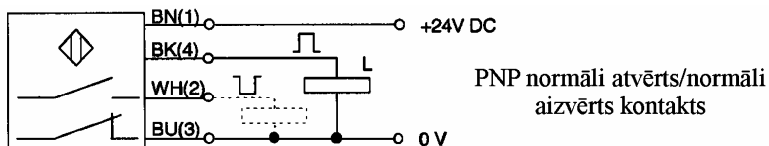
Trīsvadu sistēmas tuvinājuma sensoru slēgumam ir trīs savienošanas vadi. Savienojošo vadu krāsa atbilst Eiropas standartam EN 50 044. Divi vadi ir barošanas avota pieslēgšanai (brūns – (+), zils – (-)). Trešais vads (melns) ir tuvinājuma sensora izejas signāla vads.



1.3 att. Trīsvadu sensoru slēguma shēmas (L – slodze)

Četrvadu sensoru līdzstrāvas slēguma sistēma

Četrvadu tuvinājuma sensorus turpmāk iedalīsim tuvinājuma sensoros ar PNP izejām (pozitīvo ķēdi slēdzošajos) un NPN izejām (negatīvo ķēdi slēdzošajos). Četrvadu tuvinājuma sensori ir nodrošināti arī ar antivalentu (atslēdzošu) funkciju, t.i., tiem ir abas – normāli atvērta un normāli slēgta – izejas.



1.4 att. Četrvadu sistēmas pieslēgšanas shēma līdzstrāvai (L – slodze)

Izvalu apzīmējumi ir saskaņā ar Eiropas standartu EN 50044. Krāsu apzīmējumu saīsinātais kods atbilst starptautiskajam standartam IEC 757.

1.1 tabula. **Izvalu apzīmējumi**

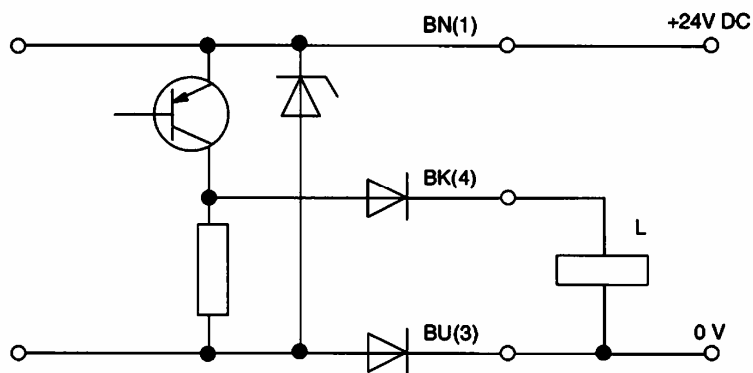
Funkcija	Krāsa	Apzīmējums
Barošanas pozitīvais spriegums (+)	brūna	BN
Barošanas negatīvais spriegums (-)	zila	BU
Ieslēdzošā izeja	melna	BK
Atslēdzošā izeja	balta	WH

Pozitīvās un negatīvās slēdža izejas

Tuvinājuma sensorus pēc konstrukcijas parasti iedala PNP (pozitīvo ķēdi slēdzošajos) un NPN (negatīvo ķēdi slēdzošajos) sensoros. Cits apzīmējums ir P-slēdzošais (pozitīvo ķēdi slēdzošais), kā arī N-slēdzošais (negatīvo ķēdi slēdzošais). Pozitīvo ķēdi slēdzošajam tuvinājuma sensoram parasti izejas pakāpē ir PNP tranzistors, kaut gan pozitīvo ķēdi slēdzošajiem sensoriem izejā var būt arī NPN tranzistors. Neskatoties uz to, apzīmējumi PNP izeja un NPN izeja tiek plaši izmantoti.

PNP izeja

Līdzstrāvas PNP izejas tuvinājuma sensoram, ja tas ir ieslēgtā stāvoklī, izeja ir pieslēgta pozitīvajam potenciālam. Tas nozīmē, ka, ja slodze (displeju, releju, u.c.) ir ieslēgta, vienam izvadam ir jābūt pieslēgtam pie tuvinājuma sensora izejas, bet otram – pie 0 V.



1.5 att. **PNP sensora izeja**

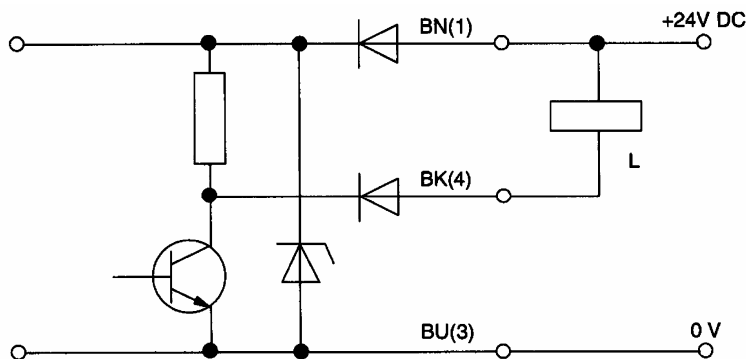
Diodes ir pieslēgtas sensora izejā, lai pasargātu sensoru no nepareizas polaritātes barošanas pieslēguma. Stabilizators aizsargā sensoru no pārspriegumiem.

PNP tuvinājuma sensori var būt ar “normāli slēgtu” izeju un “normāli atvērtu” izeju (skat. 1.3 att.).

NPN izeja

Līdzstrāvas NPN izejas tuvinājuma sensoram, ja tas ir ieslēgtā stāvoklī, izeja ir pieslēgta negatīvajam potenciālam. Tas nozīmē, ka, pieslēdzot slodzi (displeju, releju, u.c.), vienam izvadam ir jābūt pieslēgtam pie tuvinājuma sensora izejas, bet otram – pie pozitīvā potenciāla. Diožu un stabilitrona nozīme ir tāda pati kā P-N-P slēgumā.

Arī NPN tuvinājuma sensori tiek izgatavoti “normāli slēgti” un “normāli atvērti” (skat. 1.3 att.).



1.6 att. NPN tuvinājuma sensora izeja

Darba spriegumi

Eiropas valstīs tuvinājuma sensori galvenokārt tiek izgatavoti darbināšanai nominālajā režīmā ar 24V līdzstrāvu. Parasti iespējami divi darba spriegumu diapazoni: 10-30 V līdzstrāva vai 30-55V līdzstrāva.

Dienviņdaustumāzijā, Ziemeļ- un Dienvidamerikā, kā arī Austrālijā un Dienvidāfrikā apmēram 30% no induktīvajiem un optiskajiem sensoriem paredzēti darbināšanai ar maiņstrāvu.

Induktīvie, kapacitatīvie un optiskie binārie sensori bieži vien ir paredzēti darbināšanai ne tikai ar līdzstrāvu, bet arī ar maiņstrāvu, to darba spriegumi var būt 24V, 110V, 120V vai 220V. Izgatavo arī sensorus, kurus var darbināt ar abiem spriegumiem - līdzspriegumu un maiņspriegumu. Iespējamo darba spriegumu robežas maiņstrāvai ir no 12 līdz 240V, līdzstrāvai – no 24 līdz 240V.

Tuvinājuma sensoru barošanai jāizmanto strāvas avoti, kuri ieslēgšanas un izslēgšanas brīdī nerada pārsprieguma impulsus, kas var sabojāt sensoru. Barošanas avoti ar vienkāršu elektronisko vadību ieslēgšanas laikā var veidot sprieguma pīkus. Šo pīku spriegums var pārsniegt pieļaujamo sensoru barošanas spriegumu, kas, atkarībā no laika konstantes, samazinās relatīvi lēni. Gadījumā, ja izmanto nezināmus barošanas avotus, jāpārbauda avota ieslēgšanās pārejas process ar osciloskopu.

Atkarībā no specifikācijā dotajiem tuvinājuma sensoru datiem, barošanas avota sprieguma pulsācijas nedrīkst pārsniegt noteiktu robežlielumu.

1.2. Sensoru paralēlie un virknes slēgumi

Parasti loģiskās operācijas ar tuvinājuma sensoriem tiek realizētas ar kontrolleriem. Atsevišķus sensorus slēdzot virknes un paralēlajos slēgumos, iespējams iegūt sensoru loģisku darbību.

Saslēdzot sensorus paralēlā slēgumā, iegūst loģisko VAI funkciju, bet virknes slēgumā – loģisko UN funkciju.

Šādu slēgumu priekšrocības:

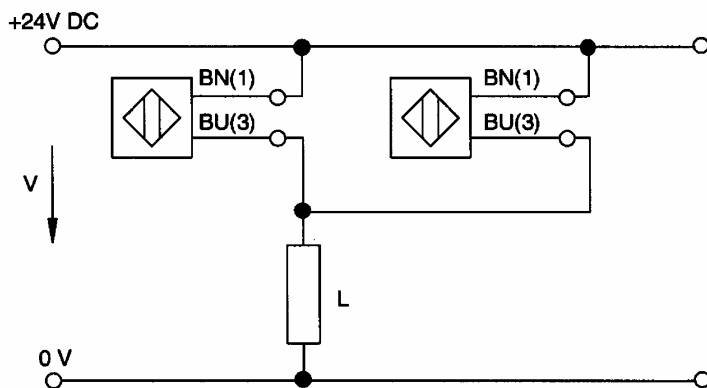
- ✓ Loģiskās operācijas var veikt, neizmantojot elektrisko kontrolleri,
- ✓ Lietojot elektrisko kontrolleri, loģiskās funkcijas var būt realizētas momentāni uz vietas, tādā veidā vienīgi loģiskās darbības rezultējošais signāls var būt padots uz kontrolleri.

Trūkumi:

- ✓ Lai projektētu un konstruētu iekārtu ar loģiskajām funkcijām, nepieciešams izprast, kā tuvinājuma sensori savstarpēji iedarbojas, kā palielinās ieslēgšanās un izslēgšanās laiks. Jāaprēķina maksimālais kopā saslēgto tuvinājuma sensoru skaits.
- ✓ Apkalpošana ir ievērojami sarežģītāka.

Elektriskā kontrollera izmantošana signāla apstrādē atvieglo visu loģisko funkciju izpildīšanu.

Divvadu sistēmas tuvinājuma sensoru paralēlais slēgums



1.7 att. Paralēlais slēgums divvadu sistēmas sensoriem

Sensoru paralēlajā slēgumā (1.7 att.) ir svarīgi ievērot sekojošas īpatnības:

- ✓ tā kā izslēgtā stāvoklī visu paralēli slēgto tuvinājuma sensoru miera strāvu summa plūst caur slodzi, jāpārlicinās, vai tas nerada funkcionālus traucējumus kontrollerim,

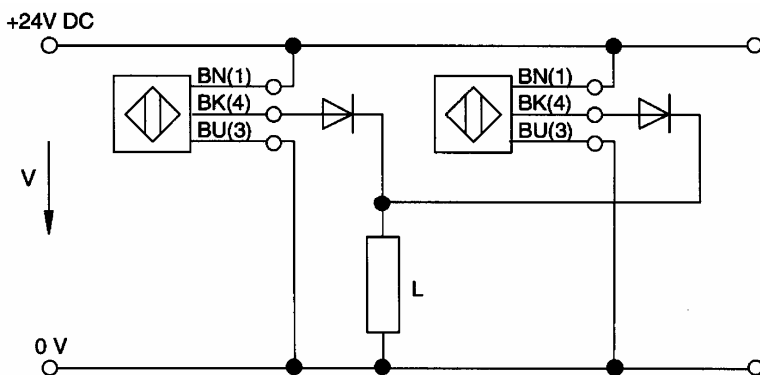
- ✓ ja tuvinājuma sensors ir ieslēgts tieši, tas “nosēdinās” barošanas spriegumu otram paralēli slēgtajam tuvinājuma sensoram, rezultātā ieslēgtais sensors nevarēs indicēt savu ieslēgto stāvokli. Savukārt otrais aktivētais sensors varēs korekti indicēt savu slēgšanās stāvokli tikai tad, ja pirmais tuvinājuma sensors atgriezīsies izslēgtā stāvoklī, kas notiks pēc laika kavējuma, kuru rada pirmais, iepriekš iedarbinātais tuvinājuma sensors.
- ✓ NAMUR sistēmai sensoru paralēlais slēgums nav iespējams (NAMUR – vācu kompānija, kas ražo tuvinājuma sensorus ar strāvas izeju).

Lai izmantotu šo slēgumu, jāņem vērā iepriekš minētās īpatnības un jālemj par to, vai slēgums dos kādas priekšrocības salīdzinājumā ar mikrokontrollera izmantošanu. Divvadu sensoru paralēlais slēgums rekomendējams tikai vienkāršās sistēmās, kur nepieciešams realizēt tikai dažas loģiskās operācijas.

Trīsvadu sistēmas tuvinājuma sensoru paralēlais slēgums

Trīsvadu sistēmas tuvināšanas sensoru paralēlais slēgums nerada iepriekš minētās problēmas. Šeit ir svarīgi sekojoši nosacījumi:

- ✓ izslēgtā stāvoklī mazās atliku strāvas paralēli slēgtajiem tuvinājuma sensoriem summēsies (iespējama vienlaicīga mehānisko kontaktu un tuvinājuma sensora izmantošana).
- ✓ ja izmanto tuvināšanas sensorus, kuru izejas pakāpe ir veidota kā atvērta kolektora ķēde, tad nav savstarpējās iedarbības efekta. Gadījumā, ja tuvināšanas sensori ir ar dažādām izejas pakāpēm, jāizmanto atsaistošās diodes (skat. 1.8 att.). Diodes parasti ir integrētas sensoros, lai tos pasargātu no pieslēgšanas pretējas polaritātes spriegumam.



1.8 att. Paralēlais slēgums trīsvadu sistēmai

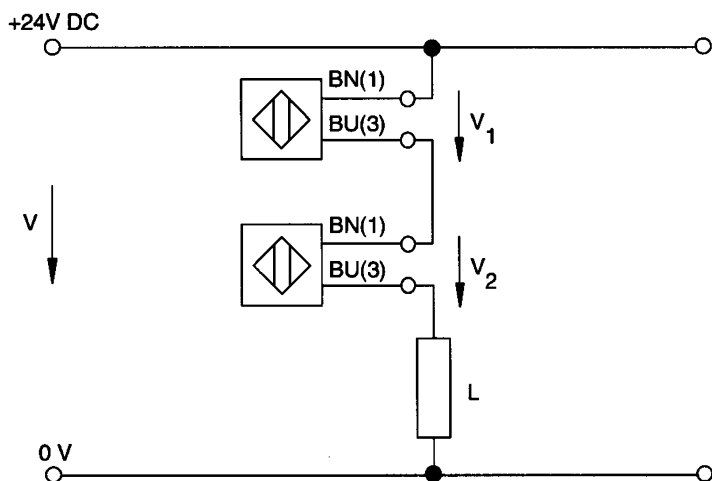
Līdzstrāvas trīsvadu tuvinājuma sensorus var saslēgt paralēli lielā skaitā (līdz 30), ja signāla izejas atliku strāva neieslēgtā stāvoklī ir pietiekoši maza. Ir iespējama arī slēguma kombinācija, paralēli slēdzot tuvinājuma sensorus un mehāniskos slēdzus.

Atsaistošās diodes novērš aktivēto sensoru izejas slogošanu ar pārējo paralēli slēgto sensoru izejas pretestību. Turklāt, tiek novērsta visu gaismas diožu ieslēgšanās gadījumā, ja sensori ir ar gaismas diodes indikāciju. Ja atsaistošās diodes sensoru shēmā ir integrētas, tad ārējā ķēdē papildus diodes pieslēgt nav nepieciešams.

Mainstrāvas sensoriem nav ieteicams izmantot paralēlo slēgumu, jo ir iespējami ģenerators palaišanas traucējumi.

Divvadu sistēmas sensoru virknes slēgums

Divvadu sistēmas sensoru virknes slēguma shēma redzama 1.9 attēlā. Ieteicams izvairīties no divvadu sistēmas tuvinājuma sensoru virknes slēguma.



1.9 att. Divvadu sistēmas sensoru virknes slēgums

Ja tas nav iespējams, jāievēro sekojoši nosacījumi:

- ✓ barošanas spriegums sadalās uz katru virknē slēgto sensoru. Ja izmantoti identiski tuvinājuma sensori, spriegumu uz katra tuvinājuma sensora (aktivētā stāvoklī) varam noteikt pēc sakarības:

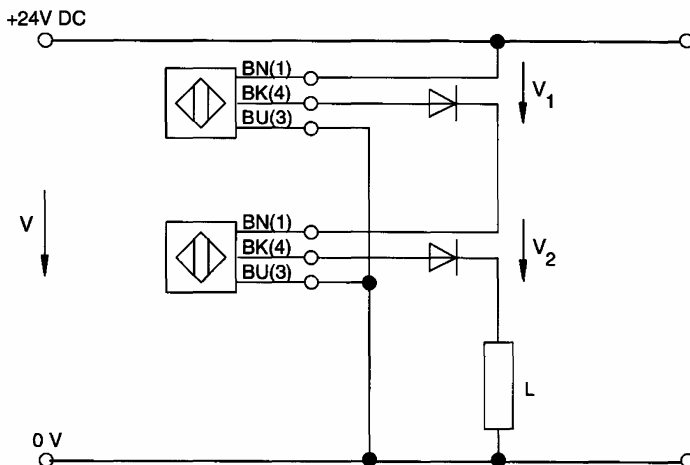
$$V_{1,2} = \frac{V}{n}, \quad (1.1)$$

kur n - sensoru skaits, V – barošanas spriegums,

- ✓ ieslēgtā stāvoklī sprieguma kritums uz katru tuvinājuma sensoru būs aptuveni 0.7...2.5V, kas jāņem vērā, aprēķinot slodzi, jo barošanas spriegums uz slodzi būs mazāks par sprieguma kritumu, kuru rada virknē slēgto tuvinājuma sensoru spriegumu kritumu summa (1.9 att.).

Trīsvadu sistēmas sensoru virknes slēgums

Trīsvadu sistēmas tuvinājuma sensoru virknes slēgums parādīts 1.10 attēlā.



1.10 att. Sensoru virknes slēgums trīsvadu sistēmai

Šajā slēgumā jāievēro sekojošas īpatnības:

- ✓ individuālā virknes slēgumā tuvinājuma sensoru izejas tiek papildus slogotas ar strāvu, kuru patērē katrs virknē slēgtais sensors,
- ✓ ieslēgtā stāvoklī sprieguma kritums katram tuvinājuma sensoram ir ap 0.7...2.5V, kā rezultātā spriegums, kas pieejams slodzei, būs mazāks par sensoru kopējo spriegumu kritumu summu,
- ✓ gadījumā, ja trīsvadu sistēmas tuvinājuma sensoru virknes slēgumā nākošajam sensoram tiek ieslēgts barošanas spriegums, jāņem vērā faktiskā laika nobīde pirms sensors sāk strādāt. Ja tuvinājuma sensoriem ir darbības statusa indikators (iebūvēta gaismas diode), korekta darbības indikācija netiek garantēta,
- ✓ ja sensoros ir iebūvēti barošanas filtru kondensatori un ja sensoriem ir īsslēguma aizsardzība, virknes slēgums var radīt sekojošas problēmas: ja virknē slēgtais iepriekšējais sensors ieslēgsies, šī sensora īsslēguma aizsardzība nostrādās no lielās dinamiskās slodzes izejā, ko rada nākošā virknē slēgtā sensora barošanas filtra kondensators. Tā rezultātā iepriekšējais sensors nebūs spējīgs barot virknē slēgto nākošo sensoru, un tas nefunkcionēs. Ja nepieciešams, sensoru izejas ķēdēs ieslēdz atsaistošās diodes.

Tuvinājuma sensoru pieslēgšana

Neatkarīgi no tā, cik tālu atrodas savienojumi, tuvinājuma sensoru kabeļi jāinstalē atsevišķi no motoru, vārstu u.c. barošanas vadiem. Ja tuvinājuma sensoru savienošanas kabeļi ir gari un atrodas kabeļu kopnēs vai šaftās kopā ar kabeļiem,

kuros plūst maiņstrāva vai spēcīgi strāvas impulsi, sensoru darbībā var rasties traucējumi.

Ja tuvinājuma sensorus lieto vietās ar spēcīgiem traucējumiem (motori, metināšanas iekārtas, magnētiskie sajūgi, u.c.), jāveic sekojoši pasākumi:

- ✓ tuvinājuma sensoru savienošanas kabeļiem jābūt iespējami īsākiem;
- ✓ sensoru savienošanas kabeļi jāekranē,
- ✓ ja iespējams, traucējošie signāli jāierobežo to izcelsmes vietā,
- ✓ sprieguma avotā jāuzstāda traucējumu filtri.

Ja tuvinājuma sensora izeja tiek slogota ar tai pieslēgtām ierīcēm, jāievēro sekojoši nosacījumi:

- ✓ pieslēgtās slodzes patērētā strāva nedrīkst pārsniegt tuvinājuma sensora pieļaujamo slodzes strāvu. Nominālā slodzes strāva tuvinājuma sensoriem ir no 50 līdz 500 mA,
- ✓ lai nodrošinātu tuvinājuma sensora stabilu darbību ieslēgtā stāvoklī, slodzes pretestības maksimālajai vērtībai jānodrošina minimāli pieļaujamā slodzes strāva,
- ✓ ieslēdzot vai izslēdzot barošanas spriegumu, tuvinājuma sensori var radīt neregulārus slēgšanās signālus. Šie traucējumu impulsi var novest pie nepareizas kontrolera darbības. To var novērst, izmantojot papildus ierīces vai arī programmējot kontrolleri,
- ✓ izmantojot lampas kā indikācijas elementus, jāievēro, ka lampai ar aukstu kvēldiegu ieslēgšanās strāva ir būtiski lielāka nekā nominālā strāva. Lampas ieslēgšanās strāvu var samazināt, izmantojot priekšsildīšanu, t.i., lietojot rezistoru, kas pieslēgts paralēli tuvinājuma sensoram,
- ✓ ja tuvinājuma sensori (vārsta solenoīds u.c.) tiek darbināti ar induktīvu slodzi, jāpārbauda vai ir iebūvēta aizsardzība pret pārsprieguma impulsiem. Ja tādas nav, tad papildus aizsardzībai jāpieslēdz diodes.

2. Elektromehāniskie pozīcijas slēdži

Mehāniskie pozīcijas slēdži reaģē uz mehānisku iedarbi, un tās rezultātā izmaina izejas signāla līmeni. Parasti slēdža izejā notiek kontaktu saslēgšanās un atslēgšanās. Otrā mehānisko slēdžu grupa ir mehāniski-pneimatiskie pozīcijas slēdži, kuru izejas signāls ir gaisa spiediena izmaiņa.

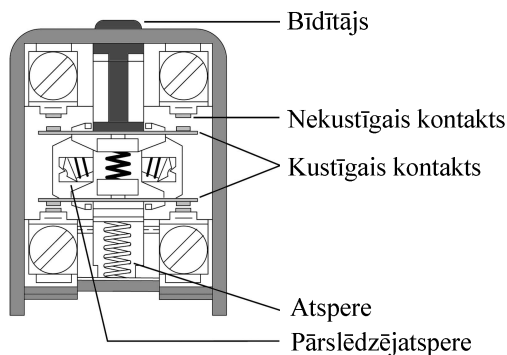
2.1. Mehāniskie pozīcijas slēdži

Mehāniskajos galaslēdžos elektriskā kontakta saslēgšanās notiek ārējā spēka iedarbībā. Slēdža kontaktu darba mūžs sasniedz aptuveni 10 miljonus darba ciklu. Atkarībā no konstrukcijas, slēdži var komutēt relatīvi lielus spriegumus un strāvas. Mehāniskos galaslēdžus raksturo attālums starp kontaktiem atslēgtā stāvoklī, ko sauc par kontaktu atstarpi. Mehānisko mikro-galaslēdžu pārslēgšanās laiks ir no 1 līdz 15 ms. Izmantojot mehāniskos slēdžus objektu skaitītājos, jāņem vērā kontaktu drebēšana, kas var radīt ievērojamas mērījuma kļūdas.

Tehniskais raksturojums

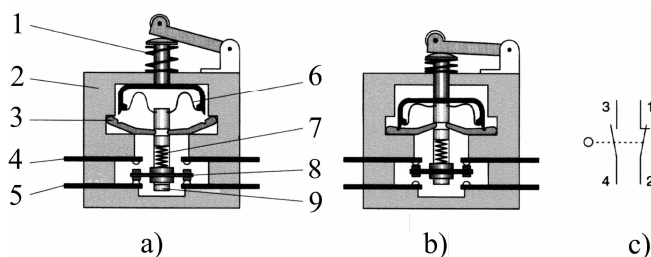
Ir sastopami sekojoši pozīcijas elektromehānisko slēdžu veidi:

- ✓ mazgabarīta pozīcijas slēdži, mikroslēdži;
- ✓ galaslēdži un vadības slēdži;
- ✓ bloķēšanas un bremzēšanas slēdži;
- ✓ bezkorpusa slēdži;
- ✓ pozīcijas slēdži plastikāta korpusā;
- ✓ pozīcijas slēdži metāla korpusā;
- ✓ drošības slēdži;
- ✓ precīzijas pozīcijas slēdži.



2.1 att. Mehāniskā slēdža uzbūve

Mehāniskā mikroslēdža galvenie elementi ir kontakti (2.1 att.). Kontakti visbiežāk tiek izgatavoti no sekojošiem materiāliem: zelta-niķeļa, tīra zelta, sudraba, sudraba-kadmija oksīda, sudraba-pallādijs un sudraba-niķeļa. Izvēloties mikroslēdžus ar dotajiem apstākļiem piemērotu kontaktu materiālu, var nodrošināt kvalitatīvu slēdža darbību jebkuros ekspluatācijas apstākļos.



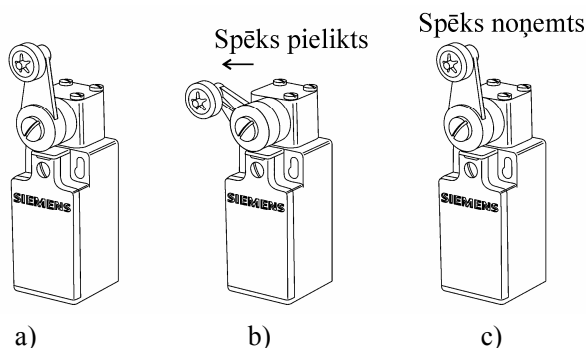
2.2 att. Galaslēdzis

a) – slēdzis atslēgts, b) – ieslēgts, c) – apzīmējums shēmās

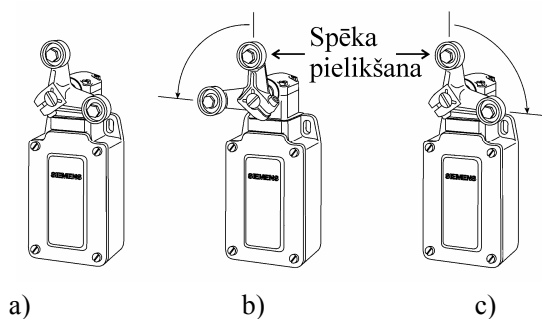
- 1 – atspere; 2 – korpuss; 3 – pārslēdzējsvira; 4 – normāli atvērts kontakts;
5 – normāli aizvērts kontakts; 6 – lokveida atspere; 7 – kontaktu
piespiedējatspere; 8 – kustīgais kontakts; 9 – bīdītājs

Pievienojot mikroslēdžiem dažādas vadības sviras, var nodrošināt slēdžu izmantošanu dažādās jomās. Attēlā 2.3 redzami kompānijas *Siemens* ražotie vienkāršas darbības galaslēdži. Slēdzi atslēgtā stāvoklī notur atspere (2.3a att.). Iedarbojoties uz sviru ar spēku, tas tiek ieslēgts (2.3b att.), bet, pēc spēka noņemšanas, tas atslēdzas.

Dubultas darbības (pārslēdzošais) galaslēdzis redzams 2.4 attēlā. Spēka pielikšanas rezultātā slēdzis ieslēdzas, un, pēc spēka noņemšanas, tas paliek ieslēgts (2.4b att.). Lai slēdzi izslēgtu, jāpieliek spēks pretējā virzienā (2.4c att.). Slēdžu pārslēgšanas sviru konstrukcijas ir ļoti dažādas, tās var būt pielāgotas katram gadījumam atsevišķi.



2.3 att. Vienkāršas darbības galaslēdzis (*Siemens*)



2.3 att. Dubultas darbības galaslēdzis (Siemens)

2.1 tabula. Galaslēdžu tehniskie dati

Komutējamā jauda (rezistīvā slodzē)	24 V, 6 A – līdzstrāva 250 V, 6 A – maiņstrāva
Pārslēgšanās punkta precizitāte	no 0.01 līdz 0.1 mm (precīzijas slēdžiem 0.001 mm)
Pārslēgšanās frekvence	aptuveni no 60 līdz 400 min ⁻¹
Darba mūžs	10 miljoni ciklu
Aizsardzības klase (IEC 529, DIN40050)	IP00 līdz IP67

Pozīcijas slēdžu uzstādīšana

Ņemot vērā to, ka galaslēdži ir paaugstinātas precizitātes mehāniskās ierīces, to uzstādīšanā pastiprināta uzmanība jāpievērš:

- ✓ montāžas precizitātei (attālums starp slēdža vadības sviru un objektu),
- ✓ stiprinājuma stabilitātei (slēdzis jānostiprina nekustīgi),
- ✓ slēdža pieejamībai.

Īpaša vērība jāpievērš elektrisko savienojumu nodrošināšanai. Ja vadu pievienošana notiek ar skrūvēm vai kontaktpailēm, tās rūpīgi jāizolē. Ja vadus pievieno lodējot, nedrīkst pārkarsēt slēdža elementus. Slēdža korpusa deformācijas var izraisīt darbības nestabilitāti. Pievienošanas vadiem jābūt brīviem, tos nedrīkst nostiept.

Ja objekts iedarbojas tieši uz galaslēdzi, jānodrošina objekta apstāšanās pirms saskares ar slēdža korpusu (galaslēdzis nedrīkst kalpot par mehānisko atduri).

Daudzos gadījumos mehānisko galaslēdžu trūkumi (mehāniskais kontakts, kontaktu drebēšana un nodilums) ekspluatācijā nav būtiski. Tādos gadījumos iespējams izmantot galaslēdžu nelielās cenas priekšrocības.

Galaslēdžu priekšrocības ir būtiskas tehnoloģiskajos procesos, kuros ir lieli elektromagnētiskie traucējumi, piemēram, metināšanas iekārtās. Šajās vietās

elektronisko slēdžu normāla darbība var tikt traucēta.

Ir pieejami precīzijas galaslēdži, kuru precizitāte sasniedz 0.001 mm. Tie ir izmantojami ļoti precīzu stāvokļu nodrošināšanai.

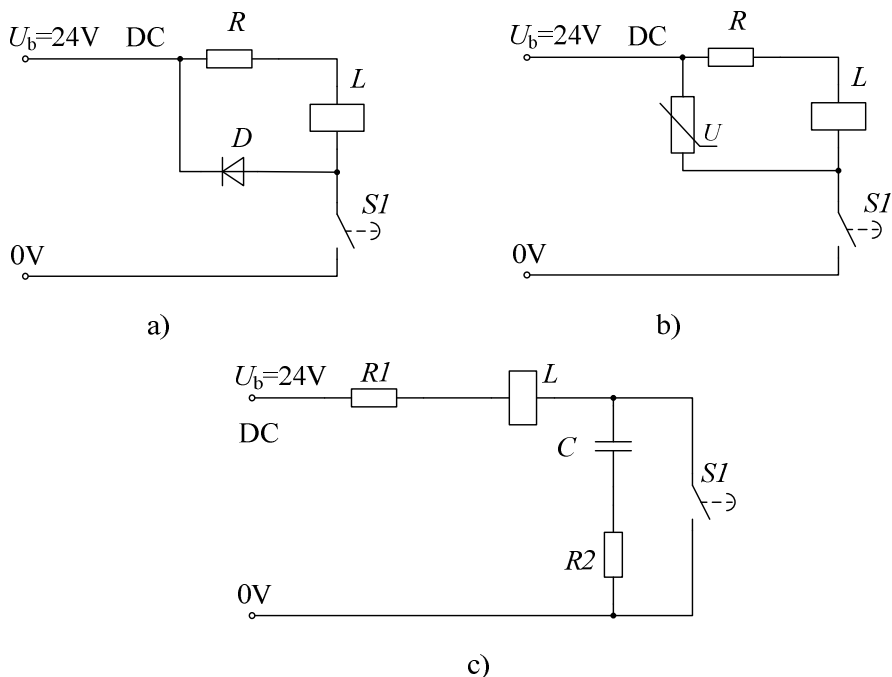
Lai izvairītos no galaslēdža kontaktu apdegšanas un kalpošanas laika samazināšanās, jāierobežo maksimālā komutējamā strāva (impulsā) līdz dotajam slēdzim pieļaujamam lielumam. To panāk, ieslēdzot virknē strāvu ierobežojošu rezistoru R (2.4 att.).

Ja izmanto releju vai magnētisko palaidēju, jānodrošina slēdža un releja tehnisko parametru atbilstība un pieejamība.

Releja vai kontaktora ieslēgšanās strāva ir 8-10 reizes lielāka par atslēgšanās strāvu. Tāpēc izvēloties slēdzi, jāņem vērā tieši ieslēgšanās strāva.

Induktīvu slodžu atslēgšanas momentā rodas augstsprieguma impulss. Slēdža aizsardzībai jālieto impulsa dzēšanas shēma.

Impulsa dzēšanai izmanto parastu RC ķēdi, diodi atbilstošā slēgumā vai varistoru (skat. 2.4. att.). Shēmas elementu parametrus izvēlas atkarībā no komutējamās slodzes jaudas. Jāatzīmē, ka efektīvāka ir impulsa dzēšana ar diodi vai varistoru. Izmantojot RC ķēdi, tās parametri jāizvēlas atkarībā no slodzes induktivitātes L . Diodi izmanto tikai līdzstrāvas barošanas gadījumā.



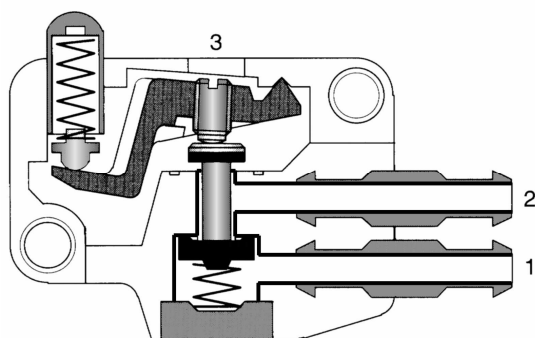
2.4 att. Impulsa dzēšanas shēmas

L – slodzes induktivitāte (releja spole), SI – galaslēdzis

Mehāniskos slēdžus automātikā izmanto ļoti plaši. Tas saistīts galvenokārt ar slēdžu zemo cenu un vienkāršo instalāciju. Ja slēdzis tiek pieslēgts elektroniskai loģiskajai shēmai vai mikrokontrollerim, jāņem vērā kontaktu „drebēšanas” efekts, kura rezultātā slēdža izejā parādās augstas frekvences impulsu rinda. Elektroniskā shēma reaģē uz šīm svārstībām un rodas kļūdas. Šajā gadījumā lieto speciālas shēmas „drebēšanas” novēršanai. Mikrokontrolleros šīs shēmas jau ir iebūvētas.

2.2. Pneimomehāniskie slēdži

Šī tipa tuvinājuma sensoros objekta mehāniskās iedarbības rezultātā tieši tiek pārtraukta vai ieslēgta gaisa padeve pneimosistēmā. Piemēram, bīdītājs tieši pārslēdz pneimovārstu. Pneimomehānisko sensoru darbības principi ir ļoti līdzīgi iepriekš aprakstīto elektromehānisko slēdžu darbības principiem (skat. 2.5 att.). Tā kā pneimomehāniskajiem slēdžiem nav elektrisko kontaktu, nerodas darbības traucējumi kontaktu apdegšanas dēļ.



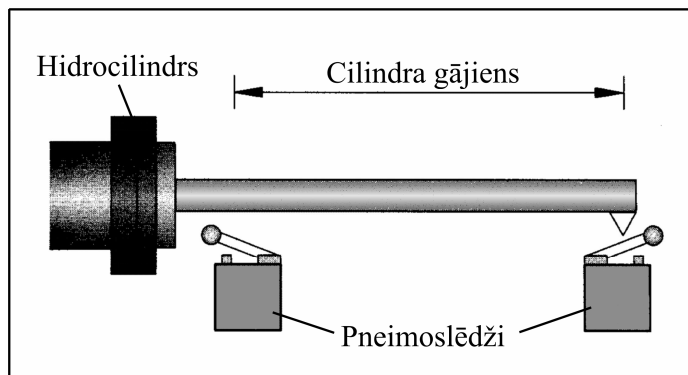
2.5 att. Pneimatiskais pozīcijas sensors

1 (P) – spiediena līnija, 2 (A) – darba spiediena (izejas) līnija,
3 (R) – gaisa izplūde

2.2 tabula. Pneimomehānisko pozīcijas sensoru tehniskais raksturojums.

Darba spiediens	-0.95 ÷ +8.00 bar
Darba temperatūru diapazons	-10°C ÷ +60°C
Ieslēgšanas spēks pie 6 bar darba spiediena	6 ÷ 10 N
Ieslēgšanas punkta precizitāte	atkarīga no spiediena; spiedienu diapazonā no 0 ÷ 8 bar, max. 0.8 mm

Pneimatiskos sensorus izdevīgi lietot iekārtās, kurās jau tiek izmantoti pneimatiskie elementi. Šādos gadījumos jau ir saspiesta gaisa līnija un nav nepieciešams pārveidot izejas signālu elektriskā signālā.



2.6 att. **Pneimocilindra gājiena ierobežošana**

Attēlā 2.6 redzams pneimocilindra gājiena ierobežošanas princips, izmantojot pneimoslēdžus. Šādā veidā var iegūt cilindra kāta turp-atpakaļ kustību.

3. Magnētiskie tuvinājuma sensori

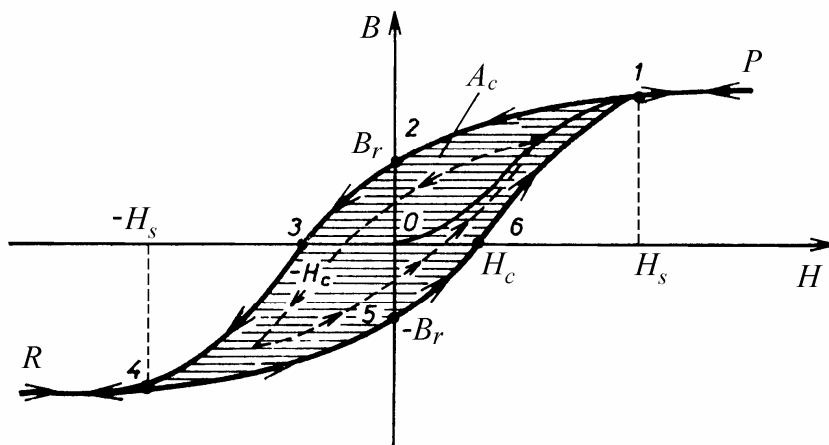
Magnētiskie tuvinājuma sensori reaģē uz pastāvīgo magnētu vai elektromagnētu radītajiem magnētiskajiem laukiem.

3.1. Magnētisms

Magnēts ir ķermenis, kas ir spējīgs radīt ap sevi magnētisko lauku. Magnētu izgatavo no īpašām vielām - feromagnētiķiem, kas novietoti citu magnētu darbības laukā, paši pārvēršas par magnētiem (magnetizējas). Tādas vielas ir elementi Fe (dzelzs), Co (kobalts) un Ni (niķelis), kā arī daudzi sakausējumi. Ne visi magnēti ir vienādi pēc to īpašībām un uzbūves. Dabiski (vai dabas) magnēti ir sastopami dabā magnētu rūdu iegulumu veidā. Feromagnētiķu svarīgākās īpašības ir magnētiskā caurlaidība μ un magnētiskā uzņēmība γ_m , kā arī **histerēze** (pēcdarbība).

Izdarot primāro magnetizēšanu (3.1 attēlā līknes posms 0-1-P), var sasniegt piesātinājumu ($H \geq H_s$). Ja pēc tam pakāpeniski samazina intensitāti H , tad sākumā

(posmā P-1) katrai intensitātes H vērtībai atbilst tās pašas indukcijas B vērtības, kuras atzīmētas magnetizēšanas gaitā. Taču tālāk ($H < H_s$) jaunās B vērtības posmā 1-2 ir lielākas nekā uz magnetizācijas pamatlīknes 0-1, parādās histerēze.

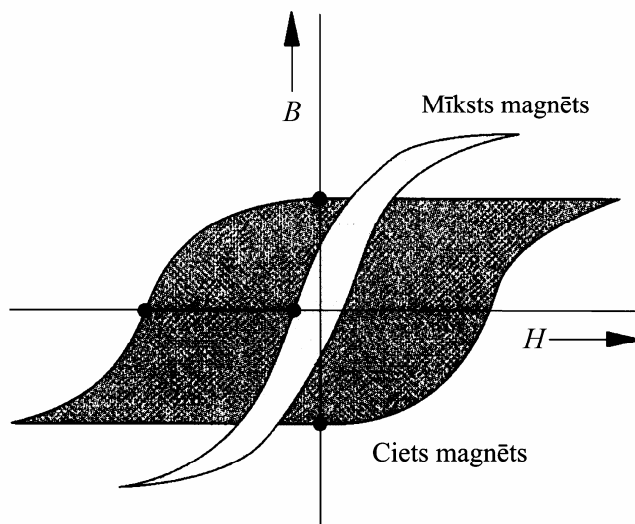


3.1 att. Magnetizēšanas līkne

Kad sasniegta intensitātes vērtība $H=0$, feromagnētiskā saglabājas **paliekošā indukcija** B_r un **paliekošā magnetizētība** J_r . Lai paraugu pilnīgi atmagnetizētu, jāradā pretēji vērsts ārējais lauks, kura intensitāte ir H_c . Lielumu H_c sauc par **koercitīvo spēku**. Tālāk, kad sasniegta ārējā lauka intensitāte - H_s , iestājas pretēja virziena magnetizācijas piesātinājums (posms 4-R). Mainot intensitāti no vērtības $-H_s$ atkal līdz $+H_s$, iegūst līknes posmu 4-5-6-1. Noslēgto līkni 1-2-3-4-5-6-1 sauc par **maksimālo histerēzes cilpu**. Ja cikliska ārējā lauka intensitātes maiņa neietver abas piesātinājuma vērtības, tad izveidojas mazāka histerēzes cilpa, kas atrodas maksimālās cilpas iekšpusē.

Paraugu magnetizējot, jāpadara darbs. Ja tiek veikts pilns magnetizācijas cikls, tad padarīto darbu A_c raksturo histerēzes cilpas ietvertais laukums. Ciklam noslēdzoties (piemēram, 1-2-3-4-5-6-1), paraugs atgriežas izejas stāvoklī un atgūst sākotnējo magnētisko enerģiju. Makrostrāvu enerģija, kas vienāda ar darbu A_c , izdalās siltuma veidā - feromagnētiķa serde sasilst. Jo lielāks ir koercitīvais spēks H_c , jo plašāka ir histerēzes cilpa un lielāks ir feromagnētiķa pārmagnetizēšanas darbs.

Mainstrāvas elektrotehnikā ierīcēs (transformatoros, ģeneratoros), lai samazinātu enerģijas zudumus histerēzes dēļ, lieto feromagnētiķus ar mazu koercitīvo spēku (šauru histerēzes cilpu). Tādus materiālus sauc par **magnētiski mīksti feromagnētiķiem** (3.2 att.). Pastāvīgo magnētu izgatavošanai turpretī lieto **magnētiski cietus feromagnētiķus**, kuriem ir liels koercitīvais spēks un paliekošā indukcija. Dažu feromagnētiķu parametri norādīti 3.1 tabulā.



3.2 att. Magnētiski „mīksti” un „cieti” materiāli

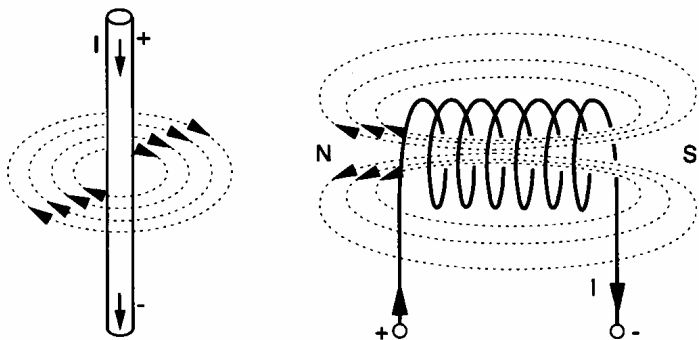
Eksistē divu dažādu veidu mākslīgie magnēti - pastāvīgie un elektromagnēti.

Pastāvīgie magnēti ir neelektrizēti ķermeņi, kas izgatavoti no magnētiski cietiem materiāliem un šo magnētu īpašības nav saistītas ar ārējo avotu vai strāvas izmantošanu.

3.1 tabula. **Feromagnētisko materiālu parametri**

Feromagnētiķi	H_c , A/m	μ_{maks}	B_s , T	B_r , T
<i>Magnētiski mīksti</i>				
Mazoglekļa tērauds (0,1% C)	80	5 000	2.15	0.8
Transformatoru silīcija dzelzs (3,3%Si)	16	10 000	2.0	0.5
Permalojis (78% Ni)	4.0	100 000	1.0	0.5
Superpermalojis (79%Ni, 5% Mo)	0.32	800 000	0.80	0,64
<i>Magnētiski cieti</i>				
Oglekļa tērauds (1% C)	4 000	-	-	1.0
Volframa tērauds (6% W, 1% C)	6 600	-	-	1.15
Magniko sakausējums (13,5%Ni, 9%Al, 24% Co)	56 000	-	-	1.3

Elektromagnēti izmanto elektriskās strāvas veidoto magnētisko lauku, ko koncentrē feromagnētiskā serdē.

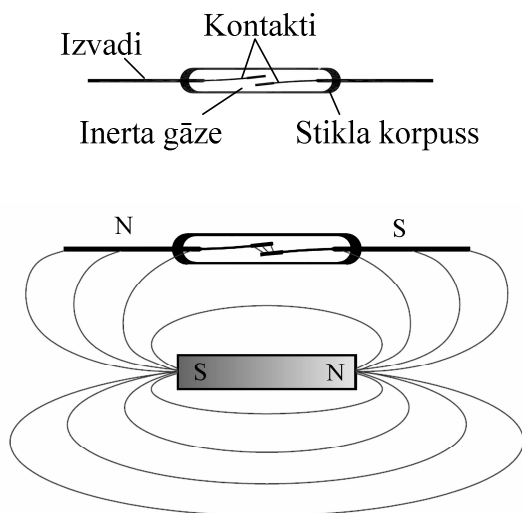


3.3 att. **Magnētiskā lauka līniju shēma vadam un spolei**

Vidē ap strāvu vadošiem vadiem vienmēr pastāv magnētiskais lauks. Magnētiskā lauka līnijas ap taisnu vadītāju veido koncentriskus apļus (skat. 3.2 att.). Magnētiskā lauka līniju virzienu ap strāvu vadošo vadītāju nosaka pēc labās skrūves likuma. Lai pastiprinātu magnētisko lauku, lieto izolēta vara vada spoles ar magnētiski mīksta materiāla serdi.

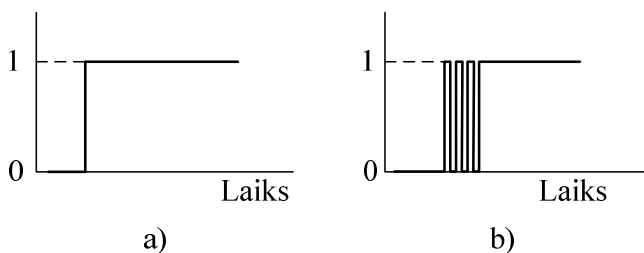
3.2. Herkonu tuvinājuma sensori

Visvienkāršākā un parasti izmantotā magnētiskā lauka uztveršanas metode ir herkonu izmantošana (3.4 att.). Divas magnētiski mīksta metāla plāksnītes ārējā magnētiskā lauka iedarbē noliecas un veido elektrisko kontaktu.



3.4 att. Herkona uzbūve un darbības princips

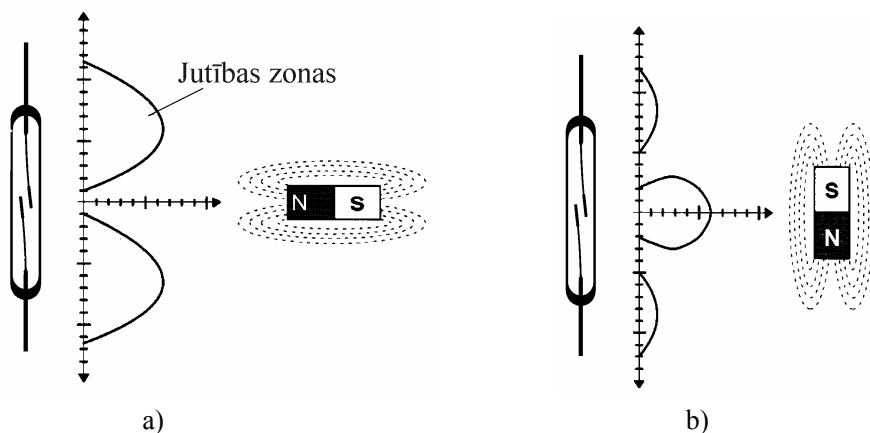
Kontakta saslēgšanās brīdī notiek kontakta vibrācija, kas rada izejas signāla svārstības. Kontakta drebēšana slēgšanās laikā parādīta 3.5 attēlā.



3.5 att. Herkona pārslēgšanās

a) – ideāla saslēgšanās, b) – saslēgšanās ar svārstībām

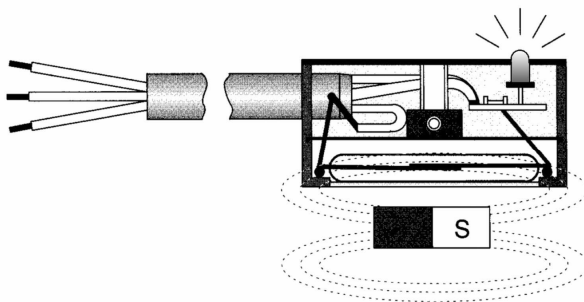
Herkoniem ir divas vai trīs slēgšanās zonas, kas atkarīgas no magnētisko polu asu virziena. Ja polu ass virziens ir perpendikulāri herkonu kontaktiem, tad veidojas divas slēgšanās zonas (3.6a att.). Tas ir atkarīgs tieši no magnētiskās plūsmas līniju izvietojuma. Kad magnēts iet garām, magnētiskā lauka intensitāte, kura ir nepieciešama slēdža saslēgšanai tiek iegūta divreiz.



3.6 att. **Hermētisko kontaktu nostrādes zonas atkarībā no magnētisko polu orientācijas**

Ja polu ass ir paralēla herkona slēdža kontaktiem, tad slēgšanās zonas veidojas pie maza slēgšanās attāluma, viena galvenā slēgšanās zona un divas mazākas zonas. Mazākās slēgšanās zonas rodas no herkona kontaktu magnētiskā reversa efekta (3.6b att.).

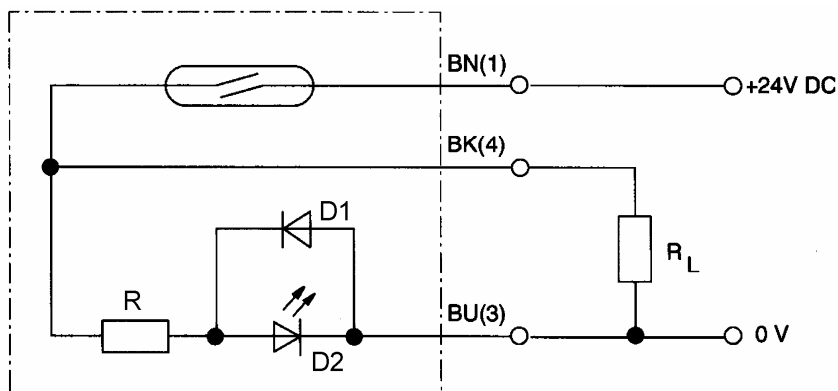
Izgatavojot herkonu tuvinājuma sensorus, herkonu ievieto korpusā un pievieno pieslēgšanas kabeli (3.7 att.).



3.7 att. **Herkona tipa tuvinājuma sensora uzbūve**

Bieži herkonu tuvinājuma sensoros iemontē gaismas diodes, kas indicē slēdža ieslēgšanos. 3.8 attēlā redzama herkona sensora slēguma shēma. Gaismas diode $D2$ kopā ar rezistoru R kalpo sensora ieslēgšanās indikācijai, bet diode $D1$ un rezistors R veido aizsardzības shēmu induktīvajām slodzēm.

Herkonu kontaktu aizsardzībai pret dzirksteļošanu induktīvo slodžu gadījumā, lieto iepriekšējā nodaļā aprakstītās metodes.



3.8 att. **Herkona tuvinājuma sensora slēguma shēma:**

R_L - slodzes pretestība, D1- kontaktu dzirksteļošanas aizsardzības diode, D2 - gaismas diode, R - strāvas ierobežošanas rezistors

Herkonu tuvinājuma sensori nodrošina augstu pārslēgšanās frekvenci (skat. 3.1 tabulu). Tas ļauj tos izmantot shēmās, kur nepieciešama augsta ātrdarbība.

3.1. tabula. **Herkonu tuvinājuma sensoru tehniskais raksturojums**

Komutējamais spriegums	12V – 27V līdzstrāva vai maiņstrāva
Pārslēgšanās precizitāte	± 0.1 mm
Maksimālā komutējamā jauda	40 W
Maksimālā lauka intensitāte	0.16 mT
Maksimālā komutācijas strāva	2 A
Maksimālā pārslēgšanas frekvence	500 Hz
Pārslēgšanās laiks	≤ 2 ms
Kontaktu pretestība	0.1 Ω
Kontaktu darba mūžs (ar aizsardzības shēmu)	5×10^6 pārslēgšanās cikli
Aizsardzības klase IEC529, DIN40 050	IP66
Apkārtējās vides temperatūra	$-20^{\circ}\text{C} \div 60^{\circ}\text{C}$

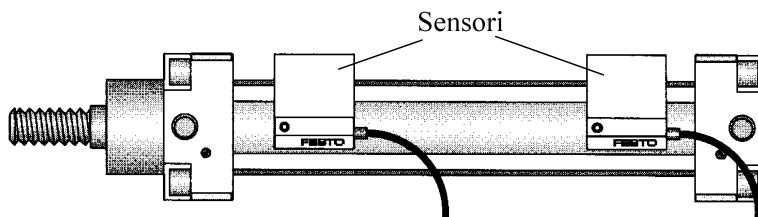
Izmantošanas piemēri

Nostiprinot pastāvīgo magnētu uz detektējamā objekta, herkonus var izmantot sekojošos veidos:

- ✓ jebkura materiāla detaļu rotācijas ātruma noteikšanai,
- ✓ atsevišķu objektu konstatēšanai vienādu objektu sērijā,
- ✓ soļu pārvietojuma dekodēšanas sistēmās,
- ✓ skaitītājos,
- ✓ durvju slēdžos,

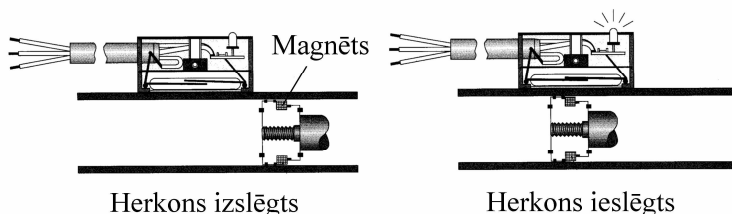
✓ objektu pozicionēšanā.

Viens no plašākiem herkonu izmantošanas veidiem ir pneimatisko cilindru gājiena ierobežošana (skat. 3.9 att.).



3.9 att. Pneimatiskais cilindrs ar magnētiskajiem sensoriem (Festo)

Pneimocilindri parasti tiek izgatavoti no alumīnija, un tas nekavē magnētiskā lauka izplatīšanos. Cilindra virzulī ir iestrādāts spēcīgs gredzenveida magnēts, kurš pārslēdz herkonus (3.10 att.).



3.10 att. Virzuļa tuvinājuma noteikšana ar herkonu sensoru

Herkonu tuvinājuma sensoru montāža

Uzstādot herkonu pozīcijas sensorus, jāņem vērā ārējo magnētisko lauku ietekme. Ja ārējā magnētiskā lauka intensitāte pārsniedz 0.16mT , jānodrošina herkona ekranēšana no traucējošā magnētiskā lauka.

Ja herkonu sensori tiek lietoti vairāku blakusesošu pneimocilindru gājiena kontrolei, starp tiem jānodrošina atstatums ne mazāks par 60 mm. Pretējā gadījumā var parādīties ieslēgšanās punkta nobīde.

Ieslēdzot herkonu sensorus elektriskajā ķēdē, jānodrošina maksimālās strāvas ierobežošana. Lieli strāvas impulsi var radīt elektriskā loka izlādi starp herkona kontaktiem un kontaktu apdegšanu. Strāvas ierobežošanu var panākt, ieslēdzot rezistoru virknē ar herkona kontaktiem. Tas novērš kontaktu apdegšanu un ievērojami palielina sensora kalpošanas laiku.

Induktīvas slodzes gadījumā, atslēgšanas brīdī rodas liels sprieguma pieaugums. Lai to novērstu, jālieto aizsardzības slēguma shēmas, ja tās nav iebūvētas jau pašā sensorā.

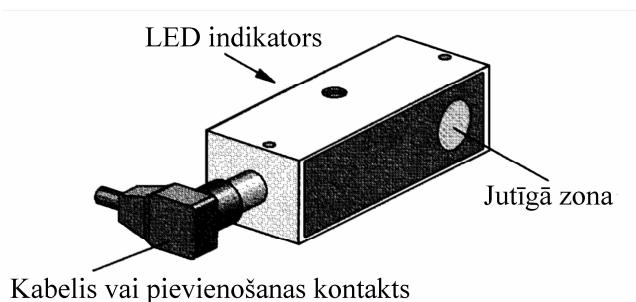
Aizsardzībai pret pārspriegumu var izmantot piemērotu RC ķēdi, diodi, vai varistoru. Elementu elektriskie parametri ir atkarīgi no komutējamās slodzes lieluma (releja, kontaktora pretestības un induktivitātes). Izmantojot relejus vai kontaktorus, jāsaprot to tehniskie parametri ar sensora parametriem.

Jāņem vērā, ka releja vai kontaktora ieslēgšanās strāva ir 8-10 reizes lielāka par atslēgšanās strāvu. Tādēļ, izvēloties sensoru, jāņem vērā ieslēgšanās strāvas vērtība vai jāveido shēmas, kas paātrina releja ieslēgšanos.

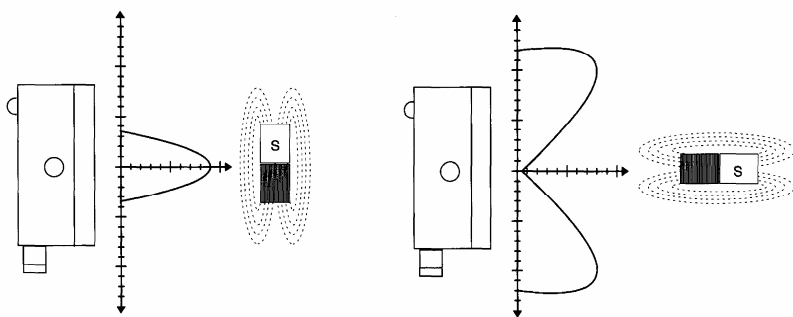
Magnētiskie tuvinājuma sensori, kuri veidoti uz herkonu bāzes ir vieni no lētākajiem un ekspluatācijā vienkāršākiem sensoriem. Taču tiem piemīt visiem kontaktiem piemītošie trūkumi: kontaktu dilšana un dzirksteļošana. Mehāniskās nolietojšanās rezultātā sensoriem ir ierobežots pārslēgšanās ciklu skaits. Šie trūkumi ir novērsti induktīvi-magnētiskajos tuvinājuma sensoros.

3.3. Induktīvi-magnētiskie sensori

Induktīvi-magnētisko sensoru uzbūve ir līdzīga induktīvo sensoru uzbūvei. Tā pamatā ir LC ģenerators, kura svārstības tiek pārtrauktas magnētiskā lauka iedarbībā. Sensorā ir iebūvēts LC svārstību kontūrs, kura spole ir uztīta uz magnētiska materiāla serdes. Atšķirībā no induktīvajiem sensoriem, kuru serdes magnētiskā ķēde ir atvērta, induktīvi-magnētisko sensoru spole ir uztīta uz noslēgtas ferīta serdes. Pastāvīgā magnēta laukam iedarbojoties uz šo serdi, tā piesātinās un izsauc sensora ģenerators strāvas izmaiņu. Strāvas izmaiņa pārslēdz trigeri un sensora izejas signāls izmainās. Šo sensoru pārslēgšanās ir atkarīga no magnētiskā lauka orientācijas (skat. 3.12 att.). Induktīvi-magnētiskie sensori reaģē tikai uz magnētisko lauku, bet nereaģē uz metāliskiem priekšmetiem. Kompānijas *Festo* induktīvi – magnētiskā sensora ārējais izskats redzams 3.11 attēlā.



3.11 att. Induktīvi-magnētiskais tuvinājuma sensors (*Festo*)



3.12 att. **Induktīvi-magnētiskā sensora jutīguma zonas**

Bezkontakta magnētisko sensoru izveidošanai izmanto arī Holla efektu, magnetorezistīvo efektu un Vīganda efektu. Šo jutīgo elementu darbības principi aprakstīti šīs grāmatas A daļas 4. nodaļā.

Lai izslēgtu kļūdainu sensoru darbību, montējot induktīvi-magnētiskos sensorus, jāņem vērā to darbības īpatnības. Izmantojot induktīvi-magnētiskos sensorus, novērojama pārslēgšanās asimetrija. Tas jāpārbauda dotajos sensora ekspluatācijas apstākļos. Sensora tuvumā esošie ferromagnētiskie materiāli vai stipri ārējie magnētiskie lauki (piemēram, metināšanas iekārtas vai alumīnija kausēšanas krāsnis) var radīt magnētiskā lauka interferenci un novest pie nepareizas sensora darbības.

3.2 tabula. **Induktīvi-magnētisko tuvinājuma sensoru tehniskie dati**

Darba spriegums	10 ÷ 30 V
Maksimālā komutējamā strāva	200 mA
Minimālā ieslēgšanās magnētiskā lauka intensitāte	2 ÷ 35 mT
Maksimālā traucējošā lauka intensitāte	1 mT
Nejutības zona (atkarīga no magnētiskā lauka stipruma un cilindra konstrukcijas)	7 ÷ 17 mm
Histerēze	0.1 ÷ 1.5 mm
Ieslēgšanās punkta precizitāte	± 0.1 mm
Sprieguma kritums (pie maksimālās strāvas)	3 V
Strāvas patēriņš (tukšgaitā)	6.5 mA max
Darba temperatūra	-20°C ÷ 70°C
Pārslēgšanās frekvence	1000 Hz
Aizsardzības klase IEC 529, DIN 40 050	IP 67
Induktīvās slodzes aizsardzība	Integrēta

Ja vairāki pneimocilindri ir aprīkoti ar magnētiskajiem pozīcijas sensoriem, jānodrošina vismaz 60 mm liels attālums starp sensoru un tuvāko blakusesošā cilindra sienu.

Lielākai daļai induktīvi-magnētisko sensoru ir iebūvētas pārsprieguma impulsu aizsardzības shēmas. Ārējas aizsardzības ķēdes šeit nav nepieciešamas.

Salīdzinājumā ar herkoniem, induktīvi-magnētiskajiem sensoriem ir šādas priekšrocības:

- ✓ nav kontaktu vibrācijas,
- ✓ nav nodiluma, jo nav kustīgo daļu,
- ✓ pareizi orientētā magnētiskā laukā veidojas tikai viena ieslēgšanās zona (skat. 3.12 att.).

Bezkontakta magnētiskie pozīcijas sensori līdzīgi herkoniem visplašāk tiek lietoti pneimocilindru pozicionēšanai (skat. 3.9 att.). Līdzīgi herkoniem, tos var izmantot arī citām vajadzībām.

Induktīvi – magnētisko sensoru cena ir salīdzināma ar herkonu sensoru cenu, un tāpēc šie sensori tiek plaši izmantoti.

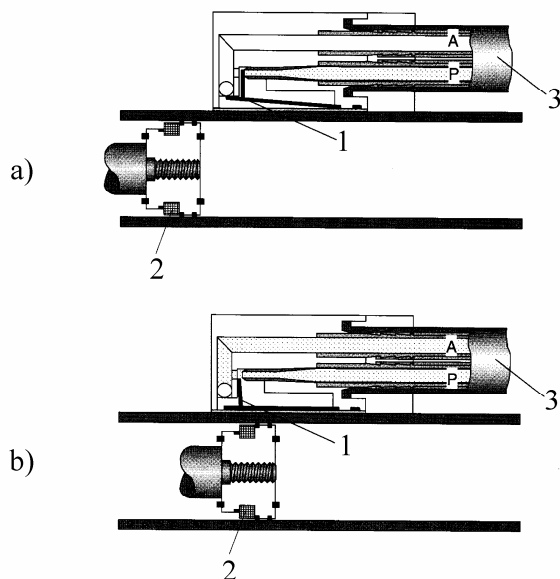
3.4. Magnētiski-pneimatiskie sensori

Pneimatisko cilindru gājiena ierobežošanai vai regulēšanai daudzos gadījumos nav nepieciešams izmantot elektriskas darbības sensorus. Šādos gadījumos cilindru vadībai izmanto pneimo-magnētiskos sensorus. Sensora galvenā sastāvdaļa ir magnētiski vadāms pneimatiskais vārsts.

Pneimatiskais vārsts tiek pārslēgts ar pastāvīgā magnēta magnētisko lauku. Rezultātā parādās pneimatiskais izejas signāls (3.13 att.).

3.3. tabula. **Magnētiski-pneimatisko sensoru tehniskais raksturojums**

Darba spiediens	4 ... 6 bari
Signāla spiediens	No 40 mbar līdz 125 mbar, atkarībā no līnijas spiediena
Ieslēgšanās precizitāte	± 0.2 mm
Maksimālā traucējošā magnētiskā lauka intensitāte	0,2 mT
Ieslēgšanās frekvence	ap 50 Hz
Apkārtējās vides temperatūra	-20°C ÷ +60°C



3.13 att. **Magnētiski-pneimatiskā sensora izmantošana pneimocilindra virzuļa pozīcijas noteikšanai:**

1 – jutīgais elements; 2 – pastāvīgais magnēts; 3 – gaisa pievads;

a) tuvinājuma sensors neaktīvā stāvoklī: jutīgais elements noslēdz gaisa plūsmu no spiedvada; b) jutīgais elements magnētiskā lauka ietekmē maina savu stāvokli un atver gaisa plūsmu no spiedvada P uz līniju A

Šo tuvinājuma sensoru darbības princips ir līdzīgs gaisa barjerai, kurā pārslēdzošais elements pārtrauc gaisa plūsmu. Magnētiskajam laukam (piemēram, no virzulī iebūvētā magnēta) iedarbojoties uz jutīgo elementu, tas izliecas un atver gaisa plūsmai ceļu no līnijas P uz A. Dažos sensoros ir iebūvēts spiediena pastiprinātājs.

Montāžas norādījumi

Atstatumam starp diviem magnētiski-pneimatiskajiem sensoriem jābūt vismaz 50 mm. Jāpārbauda, vai magnētiskā lauka intensitāte ir pietiekoša sensora pārslēgšanai.

Ja ir paredzēts pārveidot sensora zemo izejas spiedienu, vēlams izvēlēties sensorus ar iebūvētu spiediena pastiprinātāju.

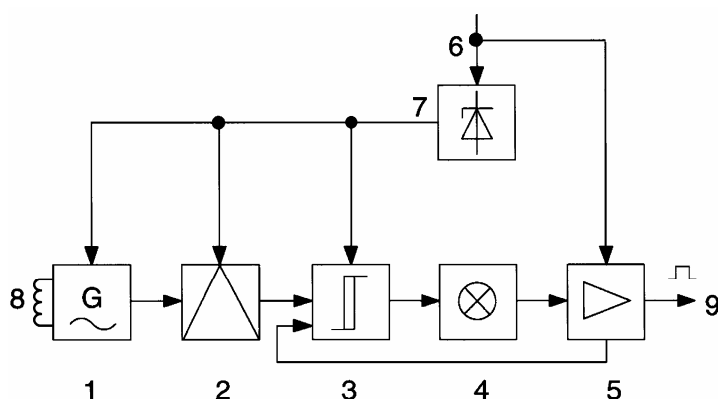
Magnētiski-pneimatiskie pozīcijas sensori galvenokārt tiek izmantoti pneimocilindru pozicionēšanai. Tie īpaši piemēroti tīri pneimatiskiem risinājumiem, t.i., gadījumos, kad vienīgais ārējās enerģijas avots ir pneimosistēma.

4. Induktīvie tuvinājuma sensori

Induktīvie tuvinājuma sensori reaģē uz metāliskiem objektiem, kas pietuvojas sensoram noteiktā attālumā. Sensora jutība pret feromagnētiskiem materiāliem ir augstāka nekā pret diamagnētiķiem (alumīniju, varu)

4.1. Induktīvo sensoru darbības princips

Induktīvo tuvinājuma sensoru darbības pamatā ir elektrisko svārstību ģeneratora darbības pārtraukšana metāliska priekšmeta klātbūtnē.



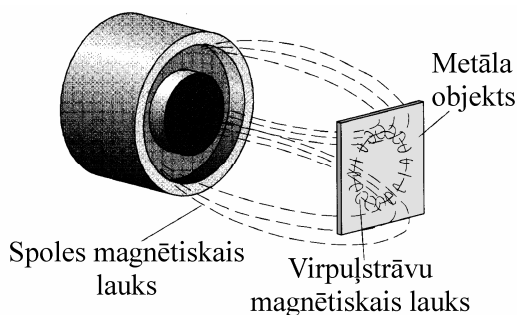
4.1 att. Induktīvā sensora funkcionālā shēma

1 – ģenerators; 2 – demodulators; 3 – komparators; 4 – ieslēgšanās indikators; 5 – izejas pakāpe ar aizsardzības ķēdi; 6 – barošanas sprieguma avots; 7 – sprieguma stabilizators; 8 – jutības zona (spole); 9 – izejas signāls

Induktīvo tuvinājuma sensoru galvenās sastāvdaļas ir ģenerators 1 (rezonances ķēde), demodulators 2 (detektors), komparators 3 un izejas pastiprinātājs ar aizsardzības ķēdi 5. Sensora barošanu nodrošina iebūvēts sprieguma stabilizators 7.

Svārstību ģenerēšanai izmanto LC ģeneratorus, kvarca ģeneratorus un RC ģeneratorus. LC ģenerators spole ir ievietota atvērta vienpusējā čaulveida magnētiskajā serdē. Šis ģenerators parasti ģenerē svārstības frekvenču diapazonā no 100 līdz 1000 kHz. Sensora ģenerators pusatvērta ferīta serde rada uz ārpusi virzītu magnētisko lauku (skat. 4.2. att.). Magnētiskā lauka izplatīšanās zona pret sensora aktīvo virsmu tiek saukta par jutības zonu.

Ir zināms, ka, ja strāvu vadošu materiālu pārvieto konstantā magnētiskajā laukā, tajā inducējas virpuļstrāvas. Tas pats notiek, ja uz nekustīgu metāla daļu iedarbojas ar mainīgu magnētisko lauku.



4.2 att. **Magnētisko lauku mijiedarbības shēma**

Objektam tuvojoties sensoram, tajā veidojas virpuļstrāvu zudumi - tiek patērēta enerģija un tiek slogots ģenerators. Tā rezultātā svārstību amplitūda samazinās, un izmainās sensora patērētā strāva. Demodulators pārveido ģenerators svārstības proporcionālas amplitūdas līdzspriegumā, un padod uz komparatoru, kurš pārveido analogo signālu diskrētā, loģiskajā „0” vai „1”. Signāls tiek pastiprināts jaudas pastiprinātājā un padots sensora izejā.

Izejas pastiprinātājs un komparatori ir aptverti ar atgriezeniskās saites ķēdi, kura rada nelielu histerēzi, t.i. atšķirīgus sensora ieslēgšanās un izslēgšanās līmeņus. Tas ir nepieciešams, lai novērstu sensora nestabilu ieslēgšanos un izslēgšanos, objektam virzoties gar sensoru.

Aktīvās zonas attālums, kurā notiek sensora pārslēgšanās, tiek saukts par **pārslēgšanas distanci**. Svarīgs induktīvo sensoru parametrs ir tā ģenerators spoles lielums. Jo lielāka spole, jo lielāku pārslēgšanās distanci tas nodrošina. Rūpnieciski ražotie induktīvie sensori nodrošina pārslēgšanās distances līdz 250 mm.

Slēgšanās attālums un vadītspēja

Sensora nostrādes attālums ir atkarīgs no tuvinātā objekta metāla vadītspējas. Tabulā 4.1 ir apkopoti dažādu metālu un to sakausējumu elektriskās vadītspējas rādītāji. Tabulas trešajā kolonnā ir uzrādīts induktīvo tuvinājuma sensoru slēgšanās attāluma vājinājuma koeficients. Šie parametri nav lietojami feromagnētiskiem metāliem un to sakausējumiem.

4.1. tabula. **Dažādu materiālu vadītspēja un redukcijas koeficients**

Materiāls	Vadītspēja, $m/\Omega mm^2$	Korekcijas koeficients
Varš	56.0	0.25 – 0.40
Alumīnijs	33.0	0.35 – 0.50
Bronza	15.0	0.35 – 0.50
Hroma-niķeļa sakausējums	1.0	0.70 – 0.90
Mazoglekļa tērauds	-	1.0

Salīdzinājumā ar neferomagnētiskiem materiāliem, feromagnētiskiem materiāliem no virpuļstrāvām rodas ievērojami lielāki zudumi. Sensora pārslēgšanās distanci precīzi aprēķināt nevar, tāpēc izmanto kalibrēšanas metodi.

Tiek izmantotas standartizētas kalibrēšanas plāksnes no dažādiem materiāliem. Standartizēta kalibrēšanas plāksne ir izgatavota no mīksta mazoglekļa tērauda (Fe 360 saskaņā ar 25. un 27. Eiro standartu vai ISO 630). Tā ir kvadrātveida plāksnīte, 1 mm bieza, ar malu izmēriem, kas vienādi ar sensora aktīvās virsmas diametru (ekranētiem sensoriem). Neekranētiem sensoriem testa plāksnītes malu izmēri ir vienādi ar sensora aktīvās virsmas diametru vai trīskāršu pārslēgšanās distanci (izvēlas lielāko no tiem).

Lielāka izmēra kalibrēšanas plāksņu izmantošana būtiski neietekmē mērāmās pārslēgšanās distances lielumu. Ja tiek lietotas mazāka izmēra kalibrēšanas plates, tiek iegūta mazāka pārslēgšanās distances vērtība.

Lietojot atšķirīga materiāla objektus, samazinās pārslēgšanās distance. Korekcijas koeficienti dažādiem materiāliem doti 4.1. tabulā.

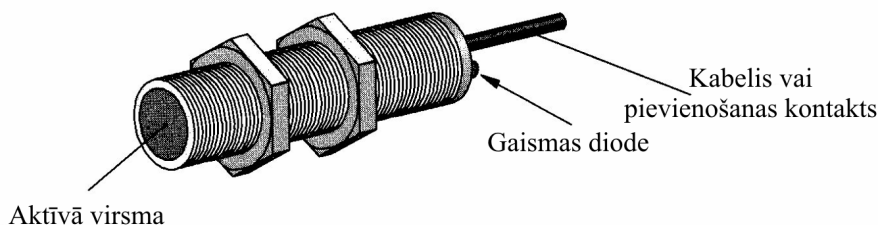
Tabulā redzams, ka lielāku pārslēgšanās distanci iespējams iegūt ar magnētiskiem materiāliem. Nemagnētiskiem materiāliem (bronzai, varam, alumīnijam) pārslēgšanās distances ir ievērojami mazākas.

Induktīvo sensoru pieslēguma shēmas ir standartizētas un detalizēti tās aprakstītas C-1 nodaļā.

Induktīvo sensoru aizsardzībai pret sprieguma impulsiem induktīvu slodžu gadījumos jālieto iepriekš aprakstītie shematiskie risinājumi.

4.2. Induktīvo sensoru izmantošana

Rūpnieciski ražotus induktīvos sensoru piedāvā daudzas kompānijas, piemēram, *Festo*, *Siemens* un citas.



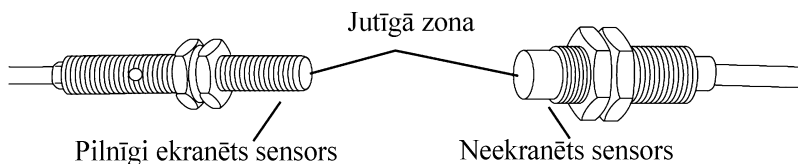
4.3 att. Induktīvais stāvokļa sensors ar vītņotu virsmu

4.2 tabulā doti galvenie induktīvo tuvinājuma sensoru tehniskie dati. Tabulā dotie skaitļi ir tikai raksturīgākie piemēri un dod vispārēju ieskatu. Praksē jāvadās no katra sensora pasē norādītajiem lielumiem.

4.2 tabula. **Līdzstrāvas induktīvo sensoru tehniskie dati**

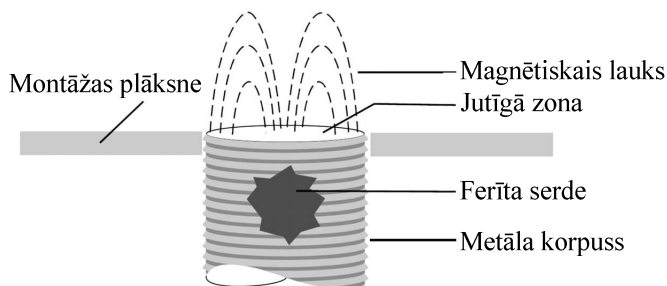
Detektējamā objekta materiāls	Metāls
Darba spriegums	parasti 10 V ÷ 30 V
Nominālās pārslēgšanās distance	parasti 0.8 ÷ 10 mm; max. 250 mm
Maksimālā ieslēgšanās strāva	75 mA ÷ 400 mA
Apkārtējās vides temperatūra	-250°C ÷ +70°C
Vibrācijas	10 ÷ 50 Hz, 1 mm amplitūda
Jutība pret netīrumiem	nejūtīgs
Kalpošanas laiks	ļoti liels
Pārslēgšanās frekvence	parasti 10 ÷ 5000 Hz, max. 20 kHz
Konstrukcija	cilindriski, blokveida
Izmēri (piemēri)	M8x1, M12x1, M18x1, M30x1; 25mm x 40mm x 80 mm
Aizsardzības klase IEC 529, DIN 40 050	līdz IP 67

Apaļa šķērs griezuma induktīvā sensora ārējais izskats redzams 4.3 attēlā. Sensori tiek izgatavoti divos veidos, ekranētā un neekranētā (4.4 att.).

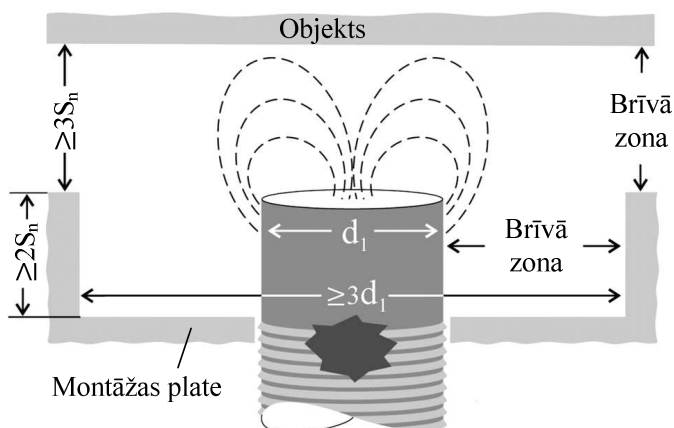


4.4 att. **Induktīvo sensoru veidi**

Ekranēto sensoru korpuss ir izgatavots no metāla līdz galam, kur atrodas sensora jutīgā zona. Tas sašaurina magnētiskās lauka izplatīšanās leņķi, līdz ar to samazinās sensora jutība (4.5 att.). Šie sensori ir mazāk jutīgi pret traucējumiem un blakus esošo sensoru iedarbību.



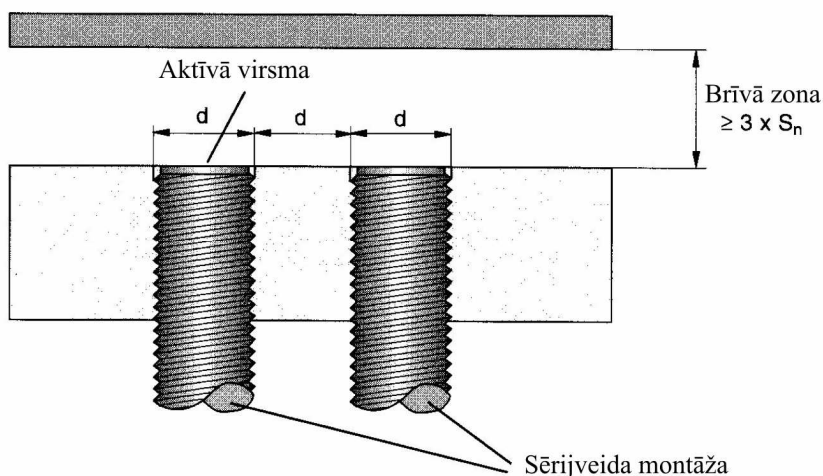
4.5 att. **Ekranētā sensora magnētiskais lauks**



4.6 att. Neekranētā sensora montāža

Neekranētajiem sensoriem jutīgā zona neatrodas metāla ekrānā un magnētiskais lauks izplatās plašāk (4.6 att.). Šiem sensoriem ir lielāka jutība un mazāka traucējumu noturība. Sensoriem ar daļēju ekranējumu jānodrošina pietiekami liela brīva josla ap aktīvo virsmu. Daļēji ekranētos sensorus iemontējot vietās, kas var izmainīt to īpašības (metāla korpusā), jānodrošina pietiekoši lielu brīvo zonu apkārt sensora neekranētajai daļai. Šos sensorus var montēt nemetāliskos materiālos (plastikāti, koks vai stikls), kuri neizmaina sensora īpašības. Parasti šos sensorus no pārējiem var atšķirt pēc izvirzītās ģeneratora spolītes.

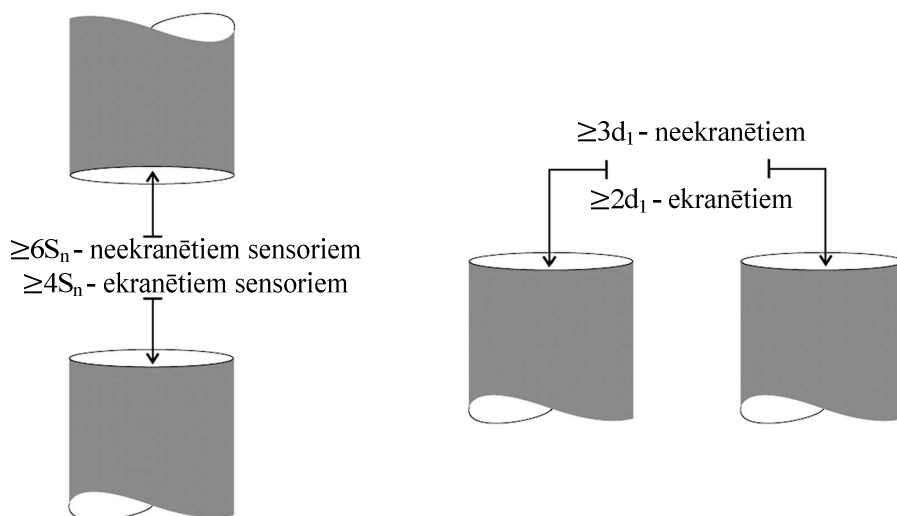
Montējot induktīvos sensorus metāla stiprinājumos, jāraugās, lai sensora īpašības netiktu izmainītas. Sensori ar pilnīgi ekranētu sānvirsmu paredzēti montēšanai vienā līmenī ar stiprinājumu (vienlīmeņa sensori, skat. 4.5 att.).



4.7 att. Pilnīgi ekranēto induktīvo sensoru montāža

Vietās, kur sensori pilnībā iemontēti metāla elementos, jānodrošina, lai magnētiskais lauks būtu virzīts prom no aktīvās virsmas. Vairāku sensoru gadījumā starp tiem jāatstāj attālums ne mazāks par sensora šķērsizmēru. Tādā veidā tiks izslēgta to savstarpējā iedarbība. Aktīvās zonas priekšā jābūt brīvam attālumam – ne mazākam par trīs nominālajām ieslēgšanās distancēm S_n . Brīvā zona ir attālums starp sensoru un objektiem fonā.

Vienā līmenī montējamo (pilnībā ekranēto) sensoru priekšrocība ir to vieglāka uzstādīšana un vietas ekonomija. Trūkumi, salīdzinājumā ar daļēji ekranētiem sensoriem, ir to vienāda diametrs visā garumā un mazāka pārslēgšanās distance.



4.8 att. **Montāžas attālumi vairākiem sensoriem**

Ja tehnoloģiskā procesa nodrošināšanai nepieciešams izvietot vairākus sensorus nelielā attālumā vienu no otra, jāievēro minimālie attālumi starp sensoru aktīvajām daļām (4.8 att.). Ja sensori jānovieto viens otram pretim, tad minimālais attālums nedrīkst būt mazāks par $4 \cdot S_n$ (ekranētiem sensoriem) un $6 \cdot S_n$ (neekranētiem sensoriem). Minimālais attālums starp blakus esošiem sensoriem ir attiecīgi $2d_1$ (ekranētiem) un $3d_1$ (neekranētiem).

Induktīvajiem sensoriem norāda vairākas jutības zonas jeb ieslēgšanās distances.

Nominālā jutības zona

Nominālā jutības zona S_n ir teorētisks lielums, kuru norāda sensora tehniskajā specifikācijā. Tā neņem vērā izgatavošanas pielaides, temperatūras ietekmi un barošanas sprieguma izmaiņas.

Efektīvā jutības zona

Efektīvā jutības zona S_e tiek noteikta, darbinot sensoru ar nominālo barošanas spriegumu $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ temperatūrā. Tiek ņemta vērā izgatavošanas pielāde. Efektīvā jutības zona tiek definēta $\pm 10\%$ no nominālās jutības zonas. Tas nozīmē, ka objekts tiek detektēts attālumā $(0 - 90\%)S_n$. Atsevišķos gadījumos tas var tikt detektēts arī attālumā $110\% S_n$.

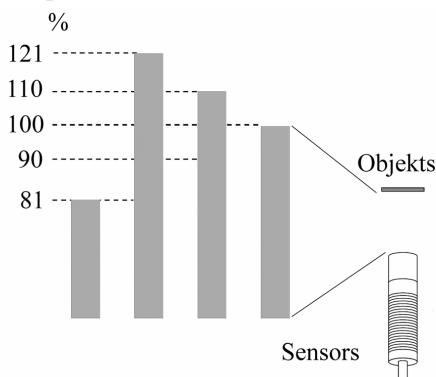
Izmantojamā jutības zona

Izmantojamā jutības zona S_i tiek noteikta īpašos apstākļos (temperatūra un barošanas spriegums) un tā var svārstīties $\pm 10\%$ no efektīvās jutības zonas S_e .

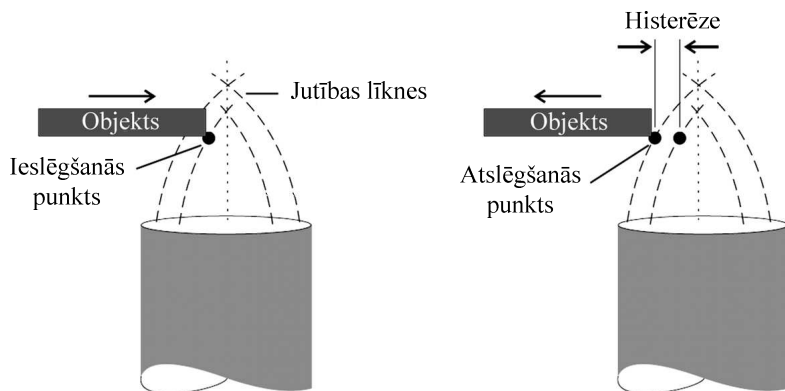
Garantētā jutības (pārslēgšanās) zona

Garantētā jutības (pārslēgšanās) zona S_g ir attālums, kurā sensora pārslēgšanās tiek garantēta jebkuros apstākļos. Garantētā jutības (pārslēgšanās) zona ir no 0 līdz 81% no nominālās jutības zonas.

Grafiski jutības zonas parādītas 4.9 attēlā.



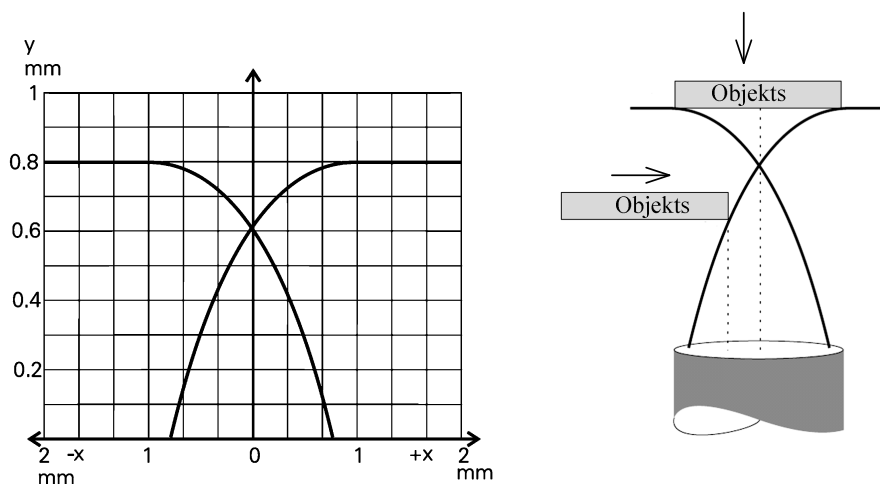
4.9 att. Sensora jutības zonas



4.10 att. Sensora histerēze

Objektam virzoties garām sensoram, veidojas histerēzes zona (4.10 att.), jo ieslēgšanās punkts nesakrīt ar izslēgšanās punktu. Histerēze jāņem vērā, ja sensori tiek izmantoti objekta pozicionēšanai.

Sensora jutības raksturlīkne ir atkarīga no daudziem faktoriem. Induktīvā sensora raksturlīknes piemērs redzams 4.11 attēlā.



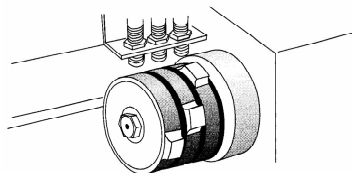
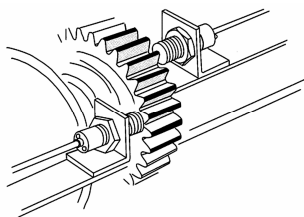
4.11 att. **Induktīvā sensora raksturlīkne**

Sensora raksturlīkne ir simetriska attiecībā pret sensora simetrijas asi. Ja detektējamais objekts sensoram tuvojas centrālās ass virzienā, tas ieslēgsies, objektam šķērsojot kādu no raksturlīknes zariem.

Ja objekts sensoram tuvojas no sāniem, tad, lai notiktu pārslēgšanās, tam jāatrodas tuvāk par maksimālo ieslēgšanās attālumu.

Induktīvo sensoru izmantošanas piemēri

Induktīvos sensorus var izmantot tur, kur nepieciešams noteikt metāliska objekta stāvokli.



a) rotācijas ātruma un virziena noteikšana

b) izcilņu kontrollera stāvokļa noteikšana

4.12 att. **Induktīvo sensoru izmantošanas piemēri**

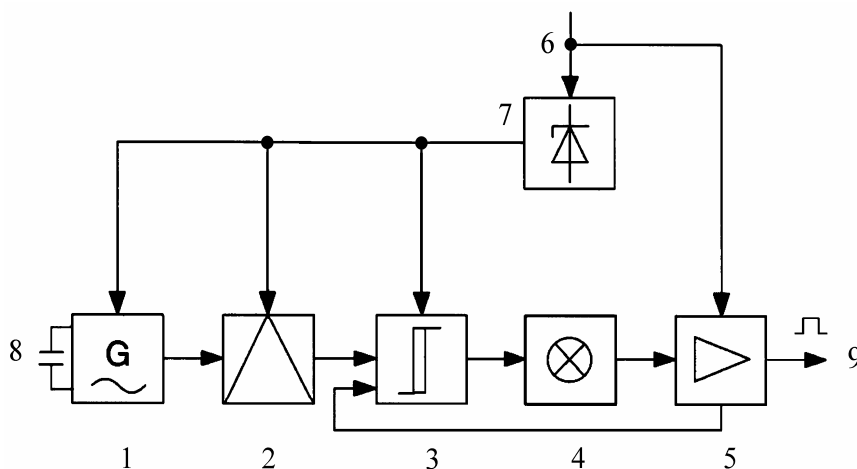
5. Kapacitatīvie sensori

Kapacitatīvie tuvinājuma sensori reaģē uz metāliskiem un nemetāliskiem objektiem, kuri izmaina sensora kapacitāti.

5.1. Darbības princips

Kapacitatīvo sensoru darbības pamatā ir kondensatora kapacitātes izmaiņas, ja tam tuvojās kāds objekts. Kapacitātes izmaiņu mēra, izmantojot RC ķēdes īpašības.

Kapacitatīvā sensora elektriskais lauks veidojas starp “aktīvo” elektrodu un iezemēto elektrodu. Parasti lieto arī trešo elektrodu, kas kompensē apkārtējās vides parametru (mitruma) izmaiņas.



5.1 att. Kapacitatīvā tuvinājuma sensora blokhēma:

1 – svārstību ģenerators, 2 – demodulators, 3 – komparators, 4 – indikators, 5 – izejas pakāpe ar aizsardzības ķēdi, 6 – barošanas spriegums, 7 – integrēts sprieguma stabilizators, 8 – aktīvā zona (kondensators), 9 – izejas signāls

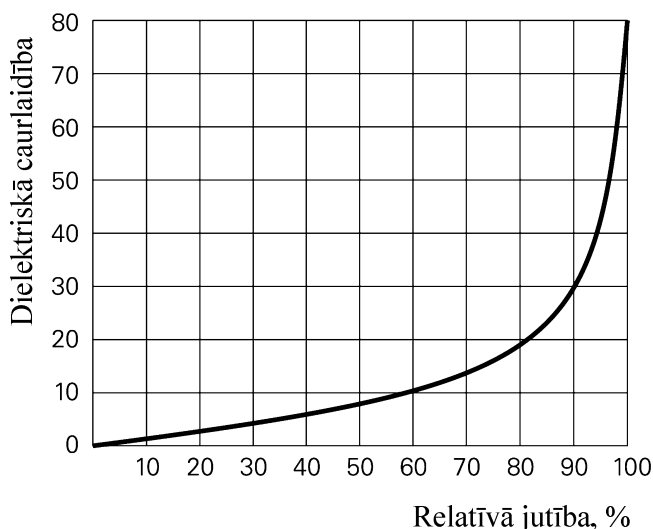
Ja kāds objekts vai vide (metāls, plastikāts, stikls, koks, ūdens) nonāk aktīvajā zonā starp elektrodziem, RC ķēdes kapacitāte izmainās un līdz ar to izmainās arī šīs ķēdes rezonanses frekvence.

Kapacitātes izmaiņas lielums ir atkarīgs no:

- ✓ objekta attāluma līdz aktīvajai virsmai;
- ✓ objekta izmēriem;
- ✓ objekta vai vides dielektriskās caurlaidības.

Kapacitatīvā sensora jutības sliekšni (ieslēgšanās distanci) vairumā gadījumu var iestatīt ar potenciometru. Šādā veidā var izslēgt noteikta materiāla objektu vai vides detektēšanu. Piemēram, caur trauka sienām iespējams noteikt ūdeni saturoša šķidrums līmeni tvertnē.

Kapacitatīvā tuvinājuma sensora ieslēgšanas distanci nosaka testējot sensoru ar iezemēta metāla plāksni. Šajā gadījumā ieslēgšanās distance ir vislielākā. Sensora jutība ir atkarīga no objekta materiāla dielektriskās caurlaidības (5.2 att.).



5.2 att. Kapacitatīvā sensora jutība atkarībā no objekta dielektriskās caurlaidības

Pieaugot dielektriskajai caurlaidībai, sensora jutība palielinās. Vislielākā dielektriskā caurlaidība ir ūdenim (skat. A-4 nodaļu).

Kapacitatīvo tuvinājuma sensoru ieslēgšanas distance ir funkcija no materiāla veida, šķērsizmēra un biezuma. Daudziem materiāliem ar līdzīgu dielektrisko caurlaidību raksturlieknes ir praktiski vienādas. 5.1. tabulā redzama ieslēgšanās distances izmaiņa atkarībā no materiāla biezuma kartona sloksnei ar platumu 30 mm. Industriālo kapacitatīvo sensoru maksimālā ieslēgšanās distance sasniedz aptuveni 60 mm.

Redzam, ka sensors sāk ieslēgties tikai pie noteikta materiāla biezuma. Piemēram, kartona biezumam jābūt vismaz 3mm (5.1 tabula). Šis skaitlis nav vienāds visiem kapacitatīvajiem sensoriem. Tas ir atkarīgs no sensora izpildījuma un tā maksimālās jutības. Parasti sensora jutību var iestatīt ar šim nolūkam paredzētu potenciometru.

5.1. tabula. Ieslēgšanās distances izmaiņa atkarībā no materiāla biezuma kartona sloksnei.

Materiāla biezums, mm	Ieslēgšanās distance, mm
1.5	-
3.0	0.2
4.5	1.0
6.0	2.0
7.5	2.3
9.0	2.5
10.5	2.5

5.2. tabula. Redukcijas koeficienta orientējošās vērtības

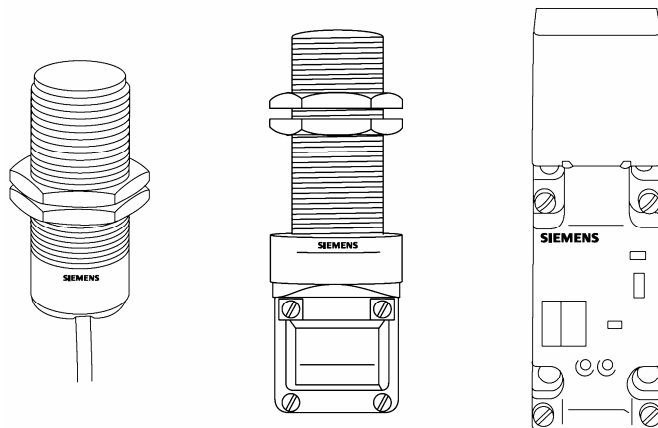
Materiāls	Redukcijas koeficients
Visi metāli	1.0
Ūdens	1.0
Stikls	0.3 ÷ 0.5
Plastmasa	0.3 ÷ 0.6
Kartons	0.3 ÷ 0.5
Koks (atkarībā no mitruma)	0.2 ÷ 0.7
Nafta	0.1 ÷ 0.3

Iepriekš tika minēts, ka kapacitatīvo sensoru testē ar metāla testa objekti. dažreiz sensora jutības un pārslēgšanās distances noteikšanai izmanto arī ūdeni. Šādos gadījumos tiek iegūta maksimālā pārslēgšanās distance. Lai noteiktu sensora pārslēgšanās distanci cita materiāla objektiem, jāņem vērā redukcijas koeficients. Dažādu materiālu redukcijas koeficientu vērtības redzamas 5.2 tabulā.

5.2. Kapacitatīvo sensoru izmantošana

Rūpnieciski ražotie sensori, līdzīgi kā induktīvie, var būt ekranētā un neekranētā izpildījumā. Tas jāņem vērā uzstādot sensorus tehnoloģiskajās iekārtās. Sensori var būt dažāda izmēra un formas. Plašāk sastopami sekojoši sensoru korpusa veidi: apaļie ar diametru 12mm, 18mm, 30mm un 40mm, kvadrātveida ar malas izmēru 40x40mm un 20x20mm un citi.

Barošanas spriegums – līdzstrāva, 10 – 30V vai maiņstrāva, 20 – 250V.
Kompānijas *Siemens* ražotie kapacitatīvie tuvinājuma sensori redzami 5.3 attēlā.



5.3 att. Kompānijas *Siemens* kapacitatīvie sensori

Kapacitatīvos tuvinājuma sensorus ražo ļoti daudzas kompānijas, piemēram, *Pepperl+Fuchs*, *Festo*, *Turck* un citi.

Kapacitatīvo tuvinājuma sensoru izejas slēgumi ir identiski induktīvajiem sensoriem. Izmanto divvadu, trīsvadu un četrvadu pieslēguma shēmas. Sensori var būt ar sprieguma izeju un strāvas izeju (Namur tipa).

Kapacitatīvo sensoru tehnisko datu piemērs redzams 5.3 tabulā.

5.3 tabula. Kapacitatīvo tuvinājuma sensoru tehniskie dati

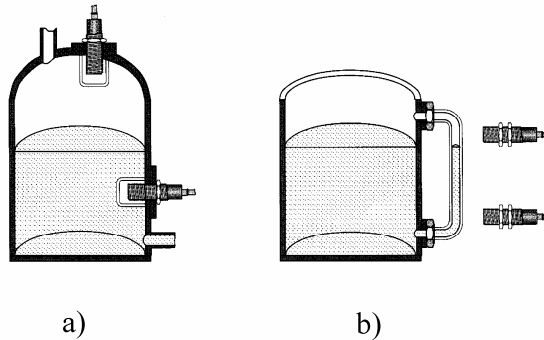
Darba spriegums	nominālais – $10 \div 30$ V līdzstrāva vai $20 \div 250$ V maiņstrāva
Nominālā ieslēgšanās distance	parasti – $5 \div 20$ mm, max. 60 mm (parasti mainīga, regulējama ar potenciometru)
Objekta materiāls	visi materiāli ar dielektrisko caurlaidību >1
Ieslēgšanās strāva	max. 500 mA, līdzstrāva
Apkārtejas vides temperatūra	$-25^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$
Jūtība pret netīrumiem	jūtīgs
Kalpošanas laiks	ļoti liels
Ieslēgšanās frekvence	līdz 300 Hz
Uzbūve	cilindriska: M12, M18x1, M30x1, līdz Ø30 mm, blokveida
Aizsardzības klase atbilstoši IEC 529, DIN 40 050	līdz IP 67

Kapacitatīvo sensoru izmantošana

Kapacitatīvo sensoru izmantošana ir līdzīga induktīvajiem sensoriem, bet jāņem vērā dažas kapacitatīvo sensoru īpatnības. Tā kā kapacitatīvie sensori ir jutīgi pret dažādiem materiāliem, tos var izmantot daudz plašāk par induktīvajiem sensoriem.

Izmantošanas apsvērumi:

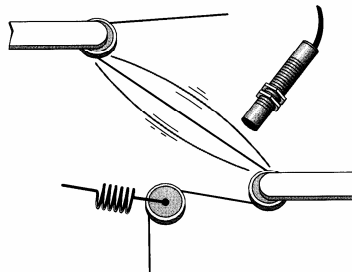
- ✓ induktīvo sensoru izmantošana kapacitatīvo sensoru vietā metālisku objektu detektēšanai ir izdevīgāka to zemās cenas dēļ,
- ✓ kapacitatīvie sensori izmantojami materiāla noteikšanai traukā ar nemetāliska materiāla sienu,
- ✓ kapacitatīvie sensori izmantojami šķidruma līmeņa un beramu vielu līmeņa noteikšanai tvertnē (5.4 att.),



5.4 att. Šķidruma līmeņa noteikšana tērauda rezervuāros:

- a) kapacitatīvais sensors ievietots plastmasas vai kvarca stikla korpusā,
- b) šķidruma līmeņa noteikšana stikla vai plastmasas caurulītē.

- ✓ kapacitatīvie sensori reaģē uz maza diametra metāla stieples esamību, salīdzinājumā ar induktīvajiem vai optiskajiem sensoriem, tāpēc tos labi var izmantot vadu vai kabeļu pārrāvuma kontrolei (5.5 att.),



5.5 att. Kabeļa pārrāvuma kontrole ar kapacitatīvajiem sensoriem

- ✓ nemetālisku, tumšas krāsas objektu detektēšanai, kapacitatīvie sensori ir efektīvāki par optiskajiem sensoriem un ievērojami lētāki par ultraskaņas sensoriem.

Kapacitatīvo sensoru cena ir ievērojami mazāka par optisko un ultraskaņas sensoru cenu. Eksploatācijā tie ir drošāki par ultraskaņas sensoriem.

Izmantojot kapacitatīvos sensorus, jāievēro sekojošas īpatnības:

- ✓ tie reaģē uz metāliskiem un nemetāliskiem priekšmetiem, tāpēc tuvumā esoši ķermeņi var radīt pārslēgšanās kļūdas,
- ✓ kapacitatīvie sensori ir jutīgi pret netīru vidi un netīrumiem uz sensora,
- ✓ tie ir jutīgi pret mitrumu, mitra vide un sensora norasošana var izsaukt nepareizu tā pārslēgšanos,
- ✓ kapacitatīvie sensori nereaģē uz ļoti plānu nemetālisku materiālu (5.1 tabula).

6. Optiskie tuvinājuma sensori

Optiskie tuvinājuma sensori nosaka objekta atrašanās vietu, izmantojot optiskos un elektroniskos principus. Šim nolūkam izmanto sarkano vai infrasarkanā starojuma spektra daļu. Pusvadītāju gaismas diodes ir piemērots sarkanās vai infrasarkanās gaismas avots. Tās ir mazas un izturīgas ar lielu kalpošanas laiku un viegli modulējamu starojumu. Gaismas starojuma uztveršanai parasti lieto foto diodes vai fototranzistorus. Veicot optisko stāvokļa sensoru regulēšanu, sarkanās gaismas priekšrocības pret infrasarkanā ir tās redzamība. Turklāt optiskie gaismas vadi nodrošina labu sarkanās gaismas pārvadīšanu ar maziem zudumiem.

Infrasarkano (neredzamo) gaismu lieto gadījumos, kad nepieciešama spēcīgāka starojuma intensitāte objektu noteikšanai lielākos attālumos. Turklāt infrasarkanais starojums ir noturīgāks pret interferenci ar apkārtējo gaismu.

Abos optisko sensoru veidos papildus apkārtējās gaismas ietekmes samazināšanu panāk, modulējot optisko signālu. Uztvērējs ir noskaņots uz raidītāja svārstību uztveršanu (izņemot optiskās barjeras sensorus). Optiskās barjeras sensoros uztvērējā lieto elektriskos joslu filtrus. Infrasarkanās gaismas sensoros redzamās gaismas filtri ļoti spēcīgi palielina noturību pret apkārtējo gaismu.

6.1. Gaismas laušana un optiskie kabeļi

Optisko sensoru darbības pamatā ir redzamās vai neredzamās (infrasarkanās) gaismas izplatīšanās un atstarošanās fizikālie principi. Gaisma izplatās taisnā līnijā. Tas nosaka ēnas veidošanos. Punktveida gaismas avots rada kontrastainu ēnu ar izteiktām kontūrām. Ja ir iegarens gaismas avots vai vairāki punktveida avoti kopā, tad veidojas pustoņiem bagāta ēna.

Gaismas staru kūlis, kas tiek izstarots no viena punkta, izklienējas (stara šķērsriezuma laukums palielinās). Ja staru kūlis tiek fokusēts, tā šķērsriezuma laukums samazinās. Starojums, kura izstarošanas punkts vai virziens nav noteikts, tiek saukts par difūzo jeb izklienēto gaismu.

Gaismas ātrums vakuumā ir aptuveni $300000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Caurspīdīgi materiāli ar lielu

blīvumu ievērojami samazina gaismas ātrumu. Zemāk redzamajā tabulā 6.1 doti

gaismas izplatīšanās ātrumi un refrakcijas koeficienti dažādiem materiāliem.

6.1 tabula. **Gaismas ātrums un refrakcijas koeficients**

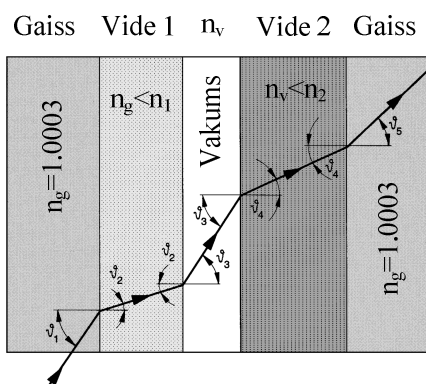
Vide	v , km·s ⁻¹	Refrakcijas koeficients
Vakuums	300 000	1
Gaiss	300 000	1.0003
Ūdens	225 000	1.33
Stikls (atkarībā no veida)	198 000	1.51
Kvarca stikls (atkarībā no veida)	186 000	1.61
Dimants	124 000	2.42
Polimetilakrilāts (PMMA)	200 000	1.49

Gaismas laušana (refrakcija)

Divu caurspīdīgu materiālu saskares vietā daļa gaismas staru atstarojas, bet daļa izmaina kustības virzienu un turpina ceļu. Šo parādību sauc par gaismas refrakciju.

Vidi, kurā gaismas ātrums ir mazāks, sauc par **optiski blīvāku**, bet vidi, kurā gaismas ātrums ir lielāks – par **optiski caurspīdīgāku**. Gaismai pārejot no optiski caurspīdīgākas vides optiski blīvākā, gaismas refrakcijas leņķis ir mazāks par gaismas krišanas leņķi, gaismas stars tiek noliekts tālāk no saskares virsmas ($v_1 > v_2$, 6.1 att.).

Pārejot no optiski blīvākas vides uz optiski caurspīdīgāku, gaismas refrakcijas leņķis ir lielāks par krišanas leņķi, gaismas stars tiek noliekts tuvāk saskares plaknei ($v_2 < v_3$, 6.1 att.).



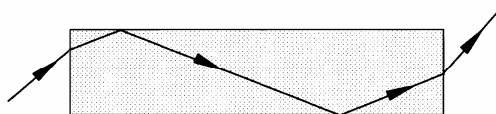
6.1 att. **Gaismas refrakcija dažāda blīvuma optiskajās vidēs**

Gaismai nonākot cita optiskā blīvuma vidē notiek gaismas atstarošanās. No fizikas ir zināms, ka gaismas krišanas leņķis ir vienāds ar atstarošanas leņķi. Ja gaisma

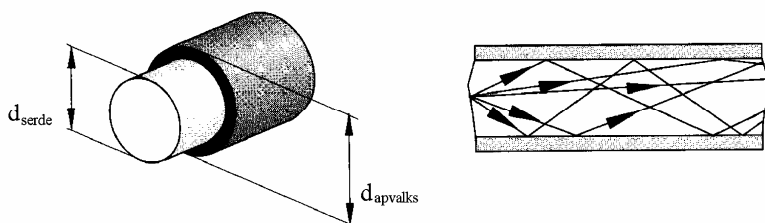
pāriet no optiski blīvākas vides uz optiski caurspīdīgāku vidi, tad eksistē noteikts gaismas krišanas leņķis, pie kura visa gaismas enerģija tiek atstarota atpakaļ optiski blīvākajā vidē. To sauc par **absolūto atstarošanos**.

Šo īpašību izmanto optiskās šķiedras kabeļos (gaismas vados). Optiskās šķiedras kabeļus (stikla vai plastikāta šķiedras) sensoru tehnoloģijās izmanto gaismas novadīšanai grūti pieejamās vietās vai iekārtās, kur nepietiek vietas sensora novietošanai. Tos var sekmīgi izmantot darbam sarežģītos apkārtējās vides apstākļos.

Optiskās šķiedras kabeļa darbības pamatā ir absolūtās atstarošanās princips (iekšējā atstarošanās šķiedrā). Lai nodrošinātu absolūto atstarošanos, materiāls ar augstu laušanas koeficientu tiek pārklāts ar materiālu, kam ir zems laušanas koeficients. Gaismas vadi var būt izveidoti no vienas optiskās šķiedras vai no optisko šķiedru kūļa. Optiskā šķiedra ir ievietota plastikāta vai lokana metāla ārējā apvalkā (6.2 un 6.3 att.).



6.2 att. Absolūtā atstarošanās optiskā materiāla šķiedrā



6.3 att. Optiskās šķiedras kabeļa darbības princips

Ir trīs optiskās šķiedras veidi:

- ✓ kāpes indeksa daudzstaru (multimodas) šķiedra,
- ✓ kāpes indeksa vienstara (monomodas) šķiedra,
- ✓ gradienta indeksa daudzstaru (multimodas) šķiedra.

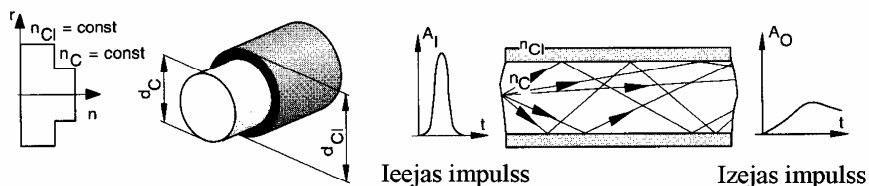
Moda raksturo uz gaismas stara kustības virzienu optiskajā šķiedrā.

Kāpes indeksa optiskā šķiedra

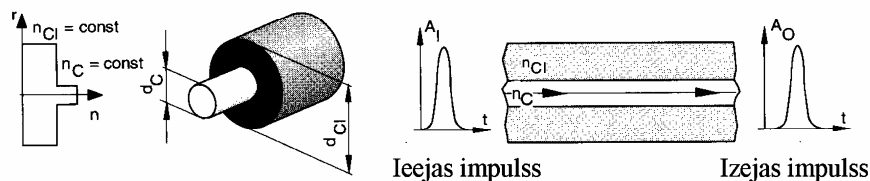
Kāpes indeksa optiskajām šķiedrām ir izteikta robeža starp pašas šķiedras un tās atstarojošā apvalka gaismas laušanas koeficientiem. Multimodas kabeļos gaismas staru kūlis var izplatīties caur šķiedru pa dažādiem ceļiem. Īss ieejas signāla impulss, izejot caur šķiedru, ievērojami paplašinās, jo gaismas stari tiek pārvadīti ar dažādiem atstarošanās leņķiem. Tas rada dažādus gaismas ceļa garumus (6.4 att.).

Monomodas šķiedrās iespējams tikai viens gaismas ceļš, tāpēc izejas signāla forma precīzi sakrīt ar ieejas signāla formu.

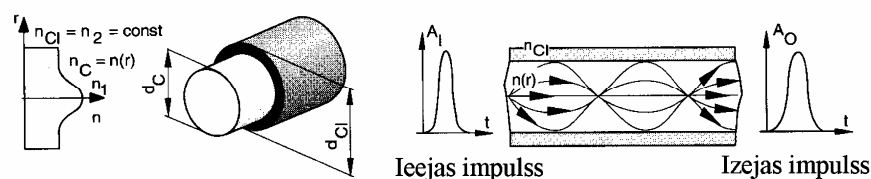
Kāpes indeksa daudzstaru (multimodas) šķiedras šķērss griezumums



Kāpes indeksa vienzaru (monomodas) šķiedras šķērss griezumums



Gradianta indeksa daudzstaru (multimodas) šķiedras šķērss griezumums



6.4 att. Optisko šķiedru veidi

Gradianta indeksa optiskā šķiedra

Gradianta indeksa optiskās šķiedras ir izveidotas tā, lai staru laušanas koeficients mainītos pakāpeniski. Izejas signāla platums ievērojami nepalielinās salīdzinājumā ar ieejas signāla platumu.

Polimēru un stikla optiskās šķiedras kabeļi

Polimēru šķiedras kabeļus izmanto galvenokārt sarkanās gaismas (660 nm) pārvadīšanai, bet stikla šķiedras – infrasarkanās gaismas pārvadīšanai. Stikla šķiedras gaismas vadi infrasarkanās gaismas viļņus absorbē ievērojami mazāk nekā polimēru šķiedras vadi. Savukārt polimēru optiskie gaismas vadi ir lokanāki un tos var nogriezt vajadzīgajā garumā.

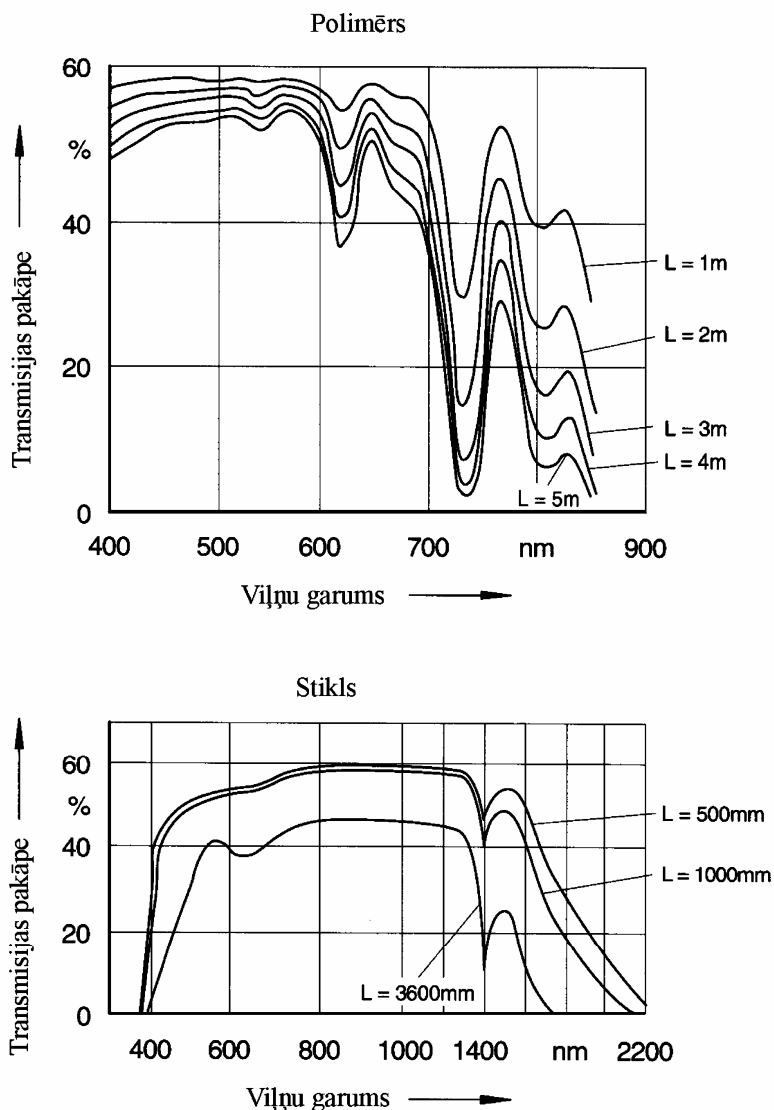
Gaismai pārvietojoties optiskajā šķiedrā, rodas enerģijas zudumi, kuri ir atkarīgi no gaismas viļņa garuma. Attēlā 6.5 redzam gaismas enerģijas zudumus atkarībā no gaismas viļņa garuma gan stikla, gan polimēru gaismas vados. Ja signāls jāpārvada

lielos attāļumos, tad nepieciešami optiskie pastiprinātāji.

Gaismas vadu izgatavošanai izmanto dažāda sastāva stikla un polimēru materiālus. Gaismas pārvadīšanai var izmantot arī šķidrumu.

Iespējamie šķiedru materiāla veidi:

- ✓ daudzkomponentu stikls ar silīcija dioksīda saturu aptuveni 70%,
- ✓ stikls ar silīcija dioksīda saturu gandrīz 100%,
- ✓ polimēru materiāli,
- ✓ šķidrumi.



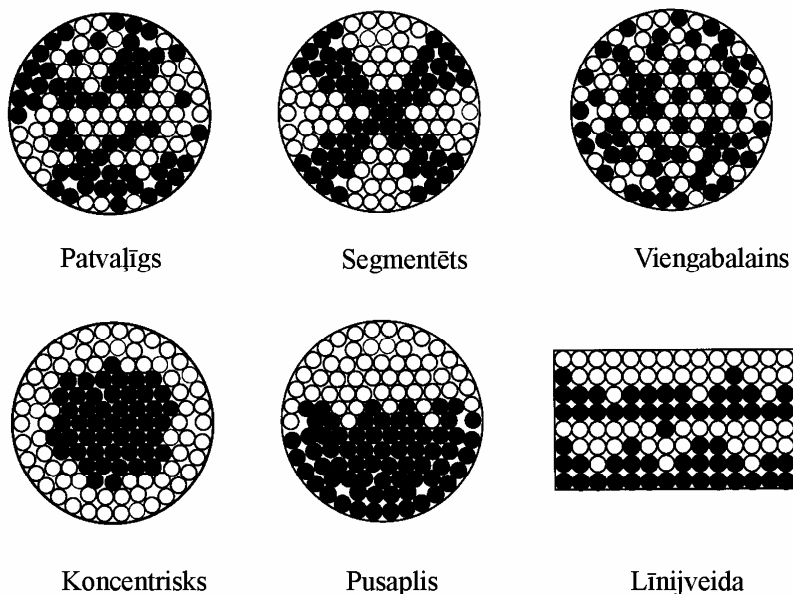
6.5 att. Gaismas transmisijas pakāpe polimēru un stikla šķiedras kabeļos atkarībā no viļņu garuma

Stikla šķiedras optiskos kabeļus izmanto, ja jāpārvada infrasarkanā gaisma, jo tad ir mazāki enerģijas zudumi (6.5 att.). Savukārt polimēru gaismas vadus izmanto redzamās gaismas pārvadīšanai.

Ar tuvinājuma sensoru parasti tiek savienoti divi optiskās šķiedras kabeļi. Viens gaismas plūsmu novada no avota uz izstarotāju, bet otrs uztverto gaismu pārvada sensoram.

Ar optiskajiem gaismas vadiem var izmantot gan difūzās, gan caurstarotās gaismas sensorus. Lai palielinātu relatīvi mazo difūzās gaismas sensoru jutības zonu, tos var izmantot kopā ar reflektoriem, veidojot atpakaļstara sensorus.

Gaismas uztveršanai un izstarošanai paredzētos gaismas vadus kūlīšos var novietot dažādos veidos. Izvēle ir atkarīga no izmantošanas veida īpatnībām (6.6 att.).



6.6 att. Šķiedru izvietojums optiskajos kabeļos

6.2. Optisko sensoru darbības princips

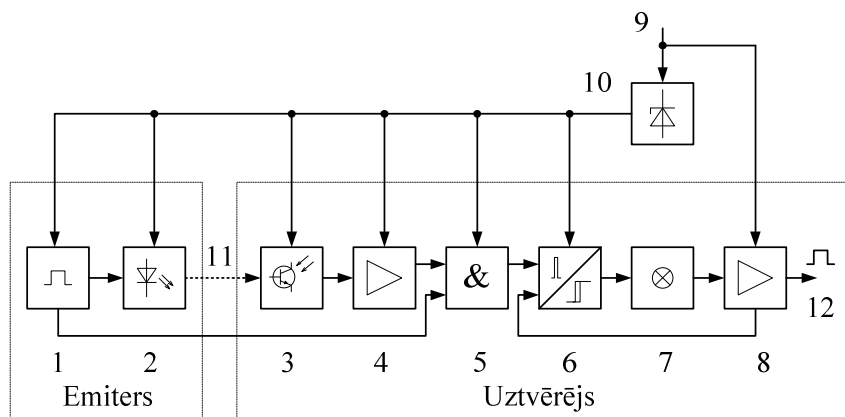
Optisko sensoru darbības pamatā ir modulētas gaismas atstarošana. Sensora izstarotā gaisma tiek modulēta ar frekvenci no 5kHz līdz 30kHz. Sensora gaismu uztverošajā daļā notiek atstarotās gaismas sinhronā detektēšana. Tas dod iespēju ievērojami samazināt apkārtējās gaismas ietekmi.

Optiskie sensori sastāv no divām galvenajām daļām: gaismas izstarotāja (emitera) un gaismas uztvērēja. Atkarībā no sensora veida, uztvērējs un emitters var būt apvienoti vienā korpusā vai atsevišķos korpusos.

Gaismas emitēšanai izmanto gallija – arsenīda gaismas diodes, kuras emitē sarkanu gaismu ar viļņa garumu 660 nm, vai infrasarkanu ar viļņa garumu 880 nm.

Gaismas uztveršanai izmanto silīcija fototranzistorus vai fotodiodes. Ja sensors strādā infrasarkanā spektrā, tad uztvērējā izmanto filtrus, kuri aiztur redzamo gaismu.

Optiskā tuvinājuma sensora darbības blokshēma redzama 6.7 attēlā.



6.7 att. Optiskā stāvokļa sensora blokshēma

(emitters un uztvērējs ir samontēti vienā korpusā):

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 – ģenerators, | 7 – ieslēgšanās indikators, |
| 2 – fotoelektrisks emitters, | 8 – izejas pakāpe ar aizsardzību, |
| 3 – fotoelektrisks uztvērējs, | 9 – barošanas spriegums, |
| 4 – priekšpastiprinātājs, | 10 – sprieguma stabilizators, |
| 5 – loģiskais elements UN, | 11 – optiski kontrolējamais attālums, |
| 6 – impulsu detektors-komparators, | 12 – sensora izeja. |

Impulsu ģenerators 1, kura izejai pieslēgta gaismas diode 2, rada gaismas impulsus, kuri tiek izstaroti telpā. Fotodiode 3 uztver atstarotos gaismas impulsus un iegūtais signāls tiek pastiprināts priekšpastiprinātājā 4. Loģiskais elements 5 ar funkciju UN summē atstarotās gaismas un izstarotās gaismas impulsus. Rezultātā tiek iegūts impulsveida signāls, kura impulsa parametri ir atkarīgi no pienākošās gaismas ceļa garuma. Impulsa signāls tiek detektēts un pārveidots ar komparatoru. Iegūtais signāls tiek pastiprināts izejas pakāpē un padots slodzes darbināšanai.

Sensora izejas pakāpē parasti ir iebūvētas aizsardzības ierīces pret:

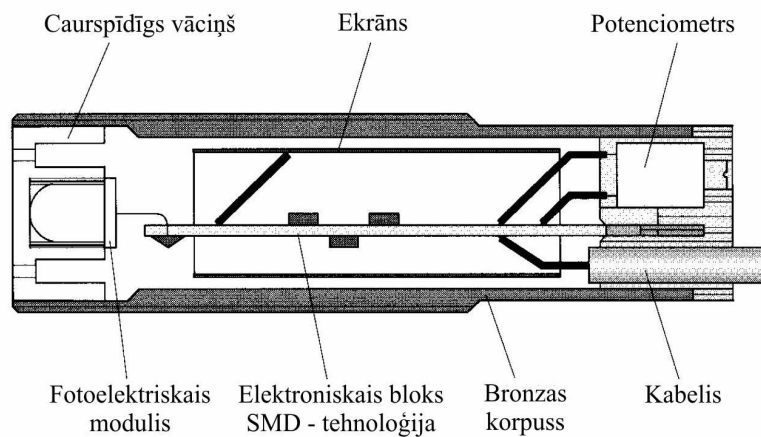
- ✓ nepareizu barošanas sprieguma polaritāti,
- ✓ izejas ķēdes īsslēgumu,
- ✓ pārsprieguma impulsus.

Optiskie stāvokļa sensori parasti sastāv no divām galvenajām daļām: gaismas

emitera (izstarotāja) un gaismas uztvērēja. Atkarībā no izmantošanas veida, ir nepieciešami reflektori vai optiskie gaismas vadi.

Emiteri un uztvērēji var būt novietoti vienā korpusā (difūzās gaismas un atstarotās gaismas sensoros) vai atsevišķos korpusos (gaismas barjeras sensoros).

Emiteris satur sarkanās vai infrasarkanās gaismas avotu, kas, saskaņā ar optikas likumiem, izplatās pa taisnu līniju un var tikt novirzīts, fokusēts, pārtraukts, atstarots un vadīts. Tas jāuztver uztvērējam, jāekranē no apkārtējās gaismas un jānovērtē elektriski.



6.8 att. Cilindriska optiskā stāvokļa sensora uzbūves shēma

Tuvinājuma sensors ir aprīkots ar iekšējo ekrānu, kas ir izolēts no korpusa. Elektroniskie komponenti ir iekapsulēti un sensora izejas galā jutīguma regulēšanai ir uzstādīts potenciometrs.

Parasti tuvinājuma sensori satur gaismas izstarošanas diodi (LED), kas iedegas, kad tiek pārraidīts izejas signāls. Gaismas diodes indikators kalpo par regulēšanas un darbības pārbaudes līdzekli.

Optisko tuvinājuma sensoru darbības zona

Darba gaitā optiskie tuvinājuma sensori var tikt pakļauti dažādiem piesārņojumiem, piemēram, putekļiem, šķembām vai smērvielām. Piesārņojums var izraisīt traucējumus tuvinājuma sensoros. Piesārņojums lēcā, kas sastāda daļu no tuvinājuma sensora optikas, var izraisīt kļūmi sensora darbībā. Piesārņojums atstarotājā var izraisīt kļūmi atpakaļatstarojošā sensora darbībā. Savukārt piesārņojums uz paša detektējamā objekta var izraisīt kļūmi difūzā sensora izmantošanas gadījumā.

Caurstarojošo un atpakaļatstarojošo sensoru gadījumā liels piesārņojums gaismas kūļa izstarošanas ierīcē var izraisīt gaismas kūļa pārtraukšanos. Tas pakāpeniski izraisa kļūdainu objekta detektēšanu. Difūzo sensoru gadījumā stiprs piesārņojums lēcas

sistēmā var tikt novērtēts kā detektēts objekts, ja lēcas piesārņošanās rezultātā gaismas kūlis tiek atstarots atpakaļ uz uztvērēju. Ja pats objekts ir ļoti netīrs, piesārņojuma dēļ gaisma no tā var atstaroties, kas savukārt var novest pie kļūdaina slēdziena, ka objekts nav detektēts.

Lai sasniegtu sensora uzticamu darbību, jāveic sekojoši pasākumi:

- ✓ optiskajam tuvinājuma sensoram jāstrādā ar pietiekamu darbības rezervi;
- ✓ jāveic pirmsekspluatācijas izmēģinājumi;
- ✓ jāizvēlas piemērots tuvinājuma sensors ar pietiekamu darbības rezervi;
- ✓ jāizmanto tuvinājuma sensori ar iestatīšanas palīg līdzekļiem, piemēram, mirgojoša gaismas diodes funkcija robežzonās;
- ✓ jāizmanto tuvinājuma sensori ar automātisko piesārņojuma brīdinājuma signālu.

Optiskajiem tuvinājuma sensoriem ir noteikta darba rezerve (zināma arī kā funkcionālā rezerve) β , kas ir patiesā optiskā signāla stipruma P_R uz uztvērēja ieejas signāla dalījums ar detektējamo optiskā signāla stiprumu P_T pie pārslēgšanas jutības sliekšņa:

$$\beta = \frac{P_R}{P_T} . \quad (6.1)$$

Ja uztvertais gaismas kūlis ir tādā pašā līmenī kā kūļa stiprums pie pārslēgšanas jutības sliekšņa, tad $\beta=1$, t.i., nav darbības rezerves. Ja dalījums ir $\beta=1.5$, tad darbības rezerve ir 50%.

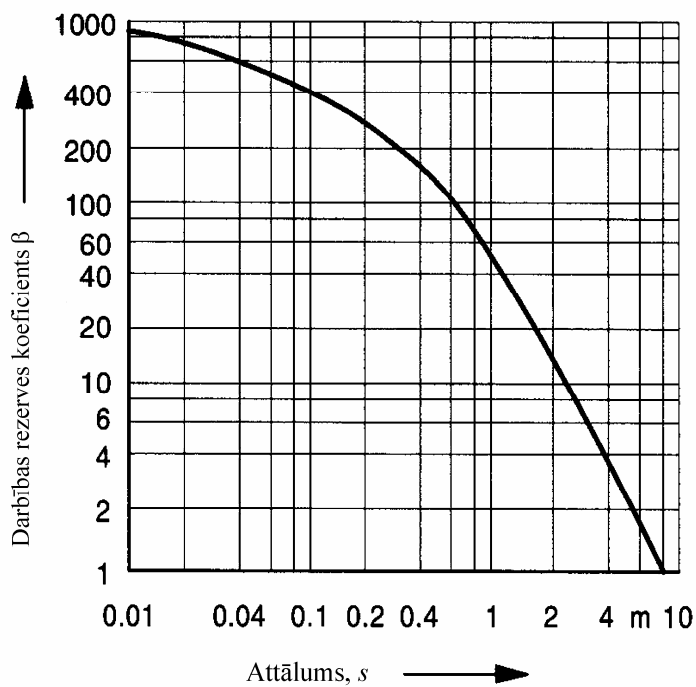
Rezerves koeficients β ir atkarīgs no:

- ✓ attāluma starp izstarotāju un uztvērēju caurstarojošā sensora gadījumā,
- ✓ starp izstarotāju un atstarotāju atpakaļatstarojošā sensora gadījumā,
- ✓ starp tuvinājuma sensoru un objektu difūzā sensora gadījumā.

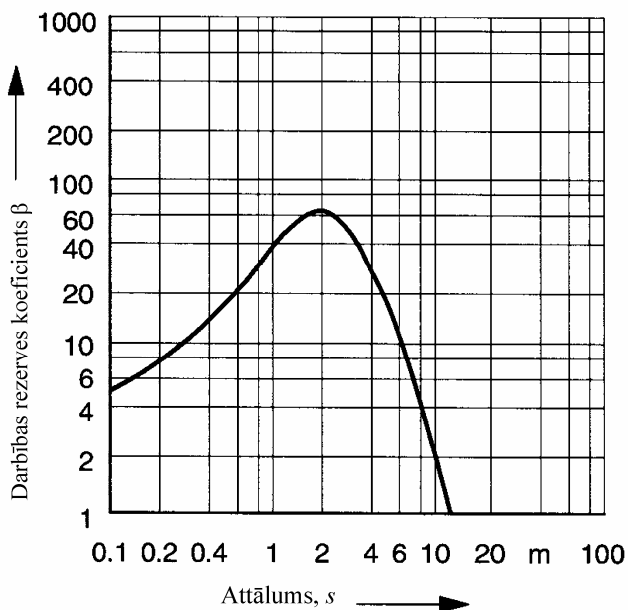
To ietekmē arī attālums līdz objektam. Attēlos 6.9 - 6.11 redzami rezerves koeficienta izmaiņas likņu piemēri dažādiem sensoriem.

Jo lielāks piesārņojuma risks, jo lielākam jābūt darbības rezerves koeficientam. Ja ražotājs ir uzdevis darbības rezerves līknes, tad tuvinājuma sensora salāgošanas brīdī var uzdot specifisku vērtību. Paredzamo piesārņojumu var noteikt, aplūkojot pārraides koeficientu τ . Ja pieņem, ka pārraide bez piesārņojuma $\tau=1$, tad, ja $\tau=0.1$, uztvērēju sasniedz tikai 1/10 no sākotnējā optiskā signāla stipruma. Šajā gadījumā nepieciešams darbības rezerves koeficients $\beta>10$.

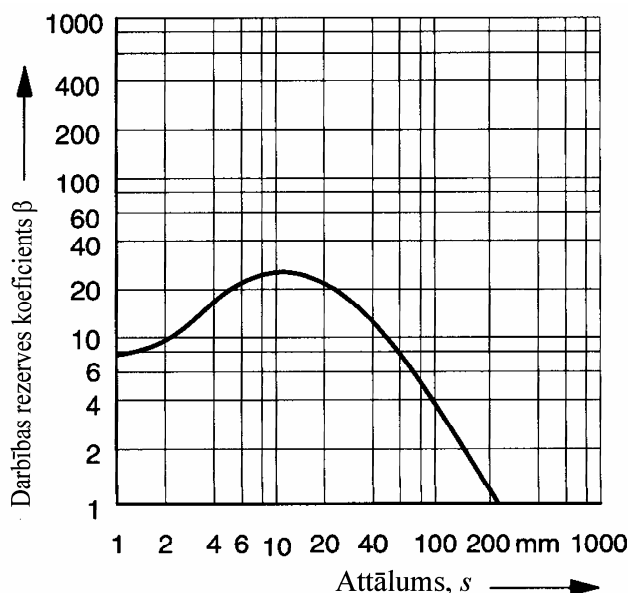
Ja nav pieejami ražotāja norādījumi, darbības rezervi var pārbaudīt, simulējot piesārņojuma apstākļus. Darbības rezerves pārbaudīšanai noder mirgojošais indikators uz tuvinājuma sensora. Tas tiek aktivizēts, ja sensora darbības rezerve ir mazāka par minimāli pieļaujamo. Ir pieejami modeļi, kuros indikators sāk mirgot, kad tiek sasniegts darbības rezerves koeficients $\beta=1.5$, tādējādi signalizējot, ka vēl atlikuši 50% no darbības rezerves.



6.9 att. Darbības rezerves koeficienta līkne, izmantojot caurstarojošo sensoru



9.10 att. Darbības rezerves koeficienta līkne atpakaļatstarojošajam sensoram



6.11 att. **Rezerves koeficienta līkne difūzās atstarošanas sensoram**

Mirgojošo indikatoru var izmantot arī par iestatīšanas palīg līdzekli optiskā tuvinājuma sensora montāžas un izvietojuma pielāgošanas laikā, taču tas kalpo arī par piesārņojuma rādītāju turpmākajā darba procesā, ja darbības rezerve pakāpeniski samazinās.

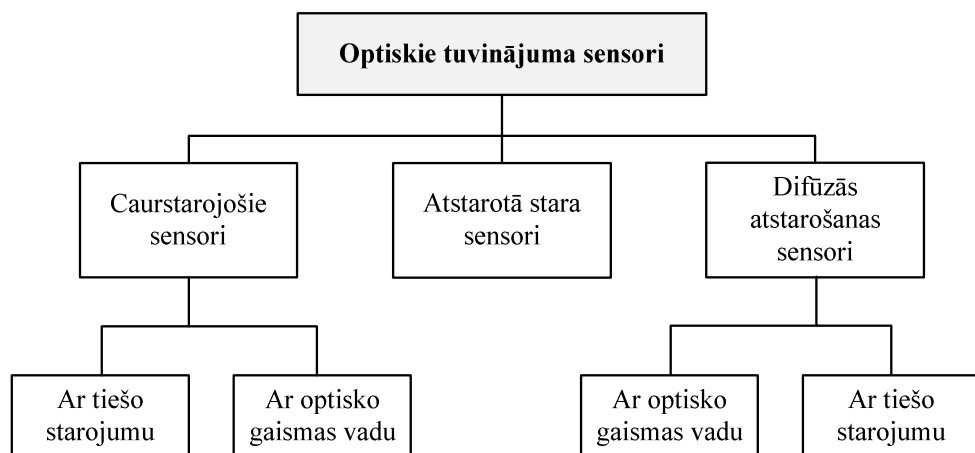
Ir vēl cita veida piesārņojuma indikators, kas darbojas dinamiski, pārbaudot katru tuvinājuma devēja aktivizēšanos vai pārbaudot optiskā signāla līmeni pārslēgšanās brīdī un nosakot tā līmeņa rezervi. Ja ir nepietiekama darbības rezerve, iedegas gaismas diode vai pa papildus izeju tiek izdots elektriskais signāls.

Citi iemesli, neskaitot piesārņošanas, kuru dēļ darbības rezerve samazinās zem minimuma:

- ✓ drošās jutības diapazona pārsniegšana,
- ✓ izmaiņas detektēto objektu materiāla virsmā,
- ✓ nepareiza montāža (slikta regulācija),
- ✓ izstarotājdiodes novecošana,
- ✓ plīsums optisko šķiedru kabelī.

Optisko tuvinājuma sensoru veidi

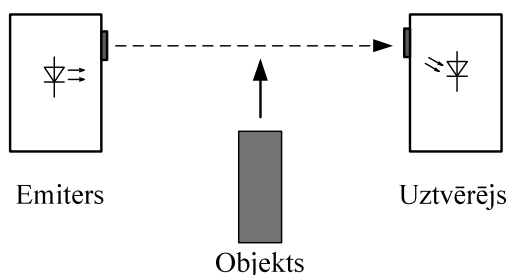
Optiskie tuvinājuma sensori tiek klasificēti pēc gaismas stara uztveršanas veida (6.12 att.). Tas nosaka sensora īpašības un izmantošanas principus.



6.12 att. Optisko tuvinājuma sensoru klasifikācija

6.3. Caurstarojošie sensori

Caurstarojošie sensori sastāv no atsevišķa gaismas izstarotāja un uztvērēja. Lai sensors detektētu objektu, tam jāpārtrauc gaismas iedarbība uz uztvērēju, bet atstarot tas drīkst jebkādu gaismas daudzumu. Tas nozīmē, ka šādi var noteikt necaurspīdīgu objektu stāvokli. Izstarotāja kļūme tiek novērtēta kā “objekts detektēts”. Šie sensori nodrošina lielus darbības attālumus (6.13 att.). Reizēm šos sensorus sauc arī par **gaismas barjerām**.



6.13 att. Caurstarojošā sensora darbības princips

Caurstarojošā sensora priekšrocības:

- ✓ paaugstināts drošums, jo laikā, kad devējs nedarbojas, tas tiek nodrošināts ar nepārtrauktu apgaismojumu,
- ✓ plašs darba diapazons,
- ✓ mazus objektus var detektēt pat no liela attāluma,
- ✓ piemērots agresīvas vides apstākļos,
- ✓ objekti var būt difūzi atstarojoši, atspoguļojoši vai ar zemu caurspīdību,
- ✓ laba pozicionēšanas precizitāte.

Caurstarojošo sensoru trūkumi:

- ✓ nepieciešami divi atsevišķi tuvinājuma devēja moduļi (izstarotājs un uztvērējs) un elektriskie savienojumi,
- ✓ nevar izmantot pilnīgi caurspīdīgiem objektiem.

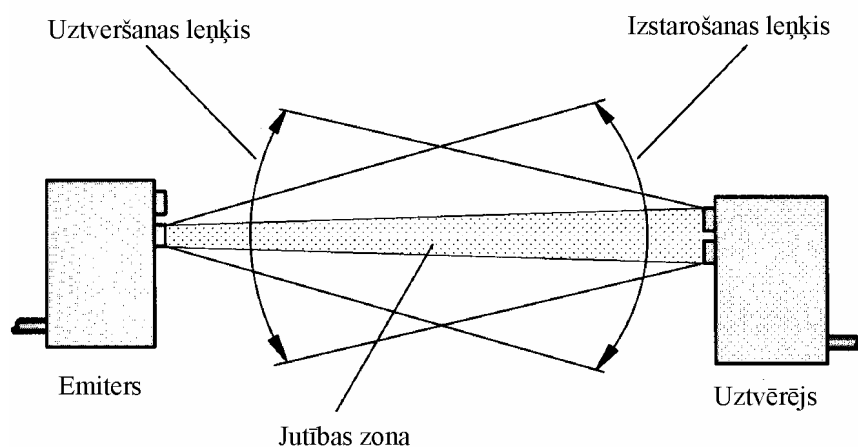
Caurstarojošo sensoru tehnisko datu piemērs redzams 6.2 tabulā.

6.2 tabula. **Caurstarojošo sensoru tehniskie dati**

Darba spriegums	parasti 10...30 V līdzstrāva vai 20...250 V maiņstrāva
Darba diapazons	max. 1 m līdz 100 m (parasti regulējams)
Objekta materiāls	jebkurš; problēmas ar ļoti caurspīdīgiem objektiem
Pārslēgšanas strāva (tranzistora izeja)	max. 100 ... 500 mA līdzstrāva
Apkārtējās vides temperatūra	0°C ... 60°C vai -25°C ... 80°C
Jutība pret putekļiem	jūtīgs
Kalpošanas ilgums	ilgs (apmēram 100 000 stundas)
Pārslēgšanas frekvence	20 ... 10 000 Hz
Konstrukcija	parasti blokveida, bet ir arī cilindriski modeļi
Aizsardzība klase IEC 529, DIN 40 050	līdz IP 67

Uztvērējiem izejās ir PNP vai NPN tranzistori, bet dažiem – arī releji.

Caurstarojošo sensoru jutības zonu nosaka gaismas izstarošanas un uztveršanas leņķis (6.14 att.).

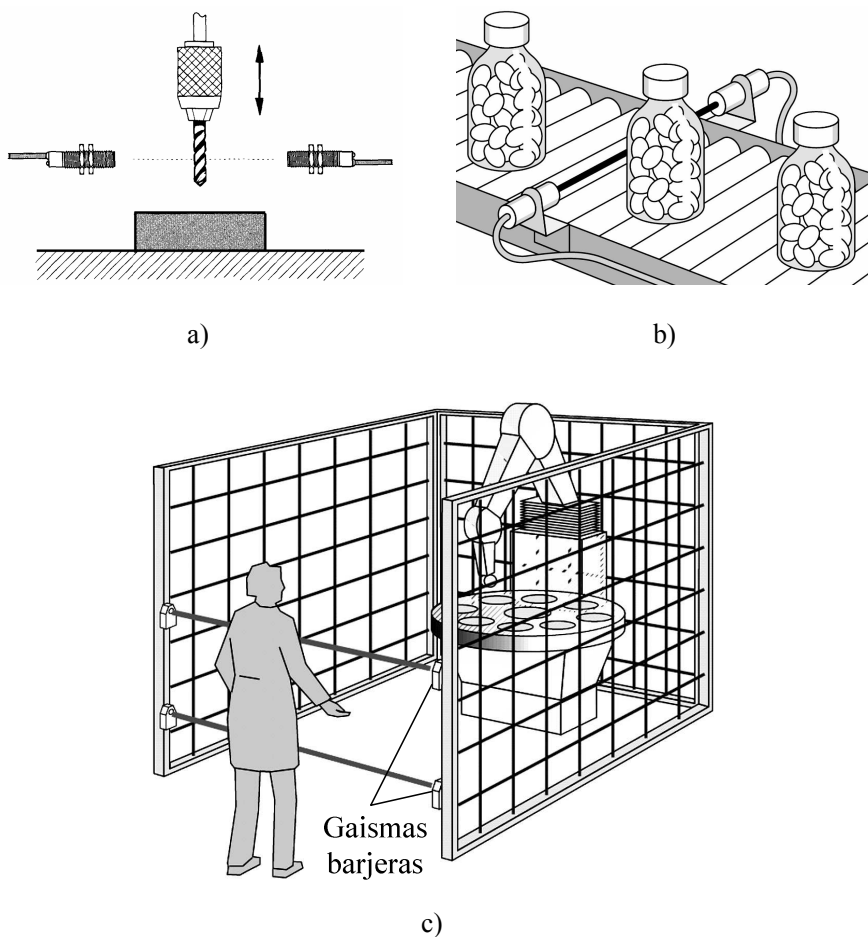


6.14 att. **Caurstarojošo sensoru jutības zona**

Svarīgi!

- ✓ Caurspīdīgu objektu gadījumā ar iebūvētā potenciometra palīdzību ir iespējams samazināt izstarotāja jaudu līdz tādām līmenim, lai uztvērējs tiktu deaktivēts, objektam nokļūstot gaismas kūlī.
- ✓ Izstarotāja kļūme tiek novērtēta kā “objekts detektēts”, tas ir svarīgi negadījumu novēršanas iekārtās, jo kļūmes gadījumā tiek bloķēta iekārtas darbība.

Caurstarojošo sensoru izmantošanas piemēri



6.15 att. Caurstarojošo optisko sensoru izmantošana

- a) urbju pārbaude, izmantojot caurstarojošo sensoru, b) piepildīto trauku skaitīšana, c) negadījumu novēršana darbā ar automātiskajiem darbgaldiem (gaismas barjeras)

Drošības barjerām jāatbilst darba devēja atbildības apdrošināšanas kompāniju negadījumu novēršanas noteikumiem. Aprīkojumam jābūt nepārtraukti kontrolējamam un tehniskās kontroles komisijai jāpārbauda, vai tas atbilst konstruktīvajiem

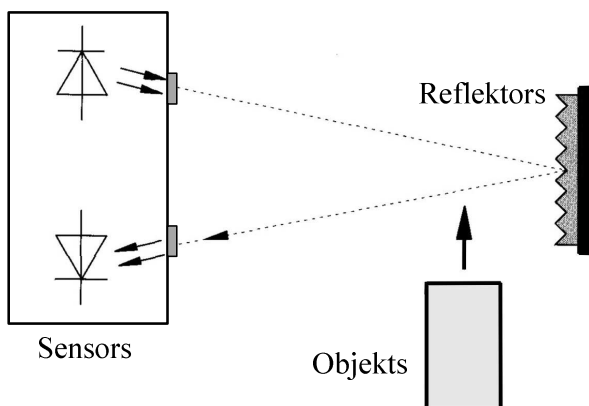
noteikumiem. Pieeja presēm un griezējmašīnām ir īpaši jānovēro, jo tām ir augsta negadījumu riska iespēja. Šim nolūkam tiek ražoti speciāli gaismas sensori, ko sauc par gaismas barjerām.

6.4. Atstarotā stara sensori

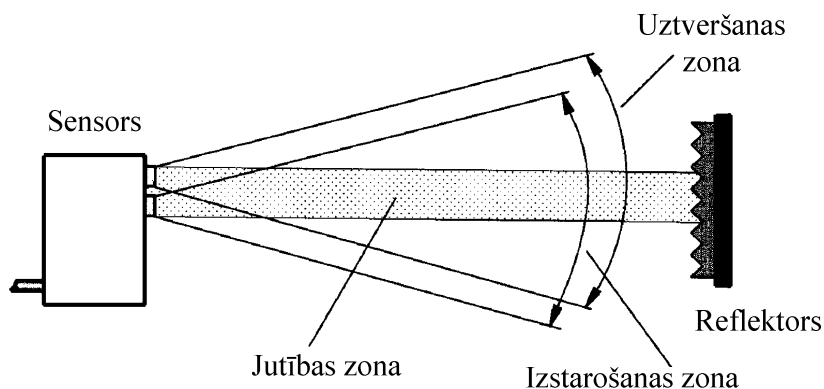
Atstarotā stara sensoros gaismas avots un uztvērējs atrodas vienā korpusā. Gaismas atstarošanai nepieciešams papildus reflektors. Sensors reaģē uz gaismas stara pārtraukšanos.

Gaismas pārtraukšanu nav nepieciešams kompensēt ar tiešu vai difūzu atstarošanu no objekta. Caurspīdīgi, gaiši vai spīdoši objekti dažreiz var palikt nenoteikti. Atstarojoši objekti jāpozicionē tā, lai atstarotā gaisma nenonāktu uztvērējā.

Salīdzinot ar difūzās gaismas sensoriem, atstarošanas sensori nodrošina lielāku darbības attālumu.

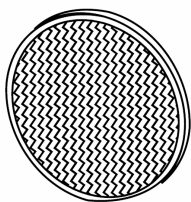


6.16 att. Atstarotā stara sensora darbība



6.17 att. Atstarotā stara sensora jutības zona

Sensora jutības zona atrodas starp līnijām, kas veido gaismas avota/uztvērēja un atstarotāja zonas robežu. Parasti jutības zona atstarotāja tuvumā ir mazāka nekā atstarotāja šķērsgriezums (6.17 att.).



6.18 att. **Atstarotājs**

Lai sensors varētu darboties, nepieciešams īpašs atstarotājs (reflektors). Atstarotājus ražotāji piegādā atsevišķi. Tie ir dažādu izmēru un formas. Parasti ir apaļas un taisnstūra formas reflektori. Sensora darbības attālums ir atkarīgs no reflektora izmēriem un tipa. Tiek ražoti arī lentveidīgi atstarotāji. Tie nedarbojas ar polarizētās gaismas sensoriem.

Atstarojošo sensoru tehnisko datu piemērs redzams 6.2 tabulā.

6.3 tabula. **Atstarojošo sensoru tehniskie dati**

Darba spriegums	parasti 10 ... 30 V līdzstrāva vai 20 ... 250 V maiņstrāva
Darbības attālums (atkarībā no atstarotāja)	līdz 10 m (parasti regulējams).
Objekta materiāls	jebkāds, tomēr ar atstarojošiem objektiem var rasties problēmas
Pārslēgšanas strāva (tranzistora izeja)	100 ÷ 500 mA līdzstrāva
Apkārtējās vides temperatūra	0 °C ... 60 °C vai -25 °C ... 80 °C
Jutība pret netīrumiem	jūtīgs
Kalpošanas ilgums	ilgs (apmēram 100 000 stundas)
Pārslēgšanās frekvence	10 ... 1000 Hz
Konstrukcija	cilindriska, blokveidīga
Aizsardzības klase IEC 529, DIN 40 050	atbilst IP 67

Atstarojošo sensoru priekšrocības:

- ✓ paaugstināts drošums, pateicoties nepārtrauktam apgaismojumam sensora dīkstāves laikā,
- ✓ vienkārši instalējams un pielāgojams,
- ✓ sajūt difūzi atstarojošus, atstarojošus vai caurspīdīgus objektus, ja vien tie absorbē pietiekami augstu izstarotās gaismas procentu,
- ✓ parasti tiem ir lielāks darba attālums nekā difūzajiem sensoriem.

Atstarojošo sensoru trūkumi:

- ✓ caurspīdīgi, ļoti gaiši vai spīdoši objekti var netikt uztverti.

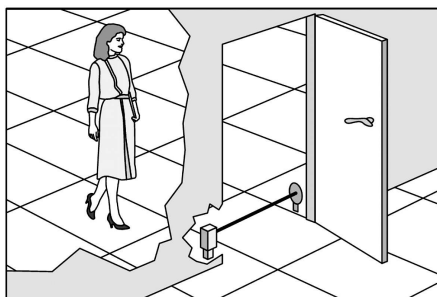
Izmantojot atstarotā stara sensorus, jāņem vērā sekojošais:

- ✓ caurspīdīgu objektu gadījumā gaismas kūlis objektu šķērso divreiz un tā rezultātā tiek vājināts. Caurspīdīgus objektus iespējams uztvert, pareizi iestatot

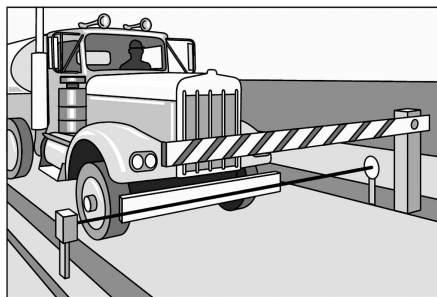
potenciometru,

- ✓ atstarojošos objektus jāpozicionē tā, lai atstarotais gaismas kūlis neskartu uztvērēju,
- ✓ īpaši mazu objektu uztveršanu var uzlabot, ja gaismas kūļa iekšpusē ir caurums, t.i., gaismas kūlis veido cauruli, kuras sienu vietā ir gaismas stari,
- ✓ gaismas avota kļūme tiek novērtēta kā uztverts objekts,
- ✓ novecošanas un netīrumu darbības rezultātā atstarotāji var noliekties; pie temperatūras, kas augstāka par 80°C, plastmasa var tikt neatgriezeniski bojāta, nepiemēroti atstarotāji var ievērojami ierobežot darbības attālumu un efektivitāti.

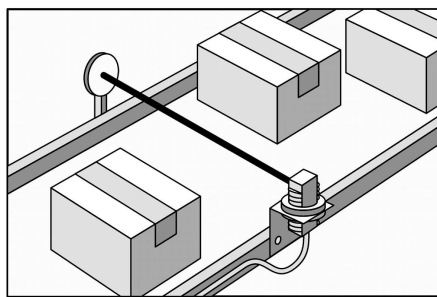
Izmantošanas piemēri



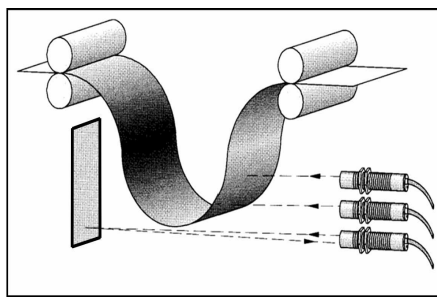
a) ieejas durvju signalizācija



b) vārtu atvēršanas kontrole



c) objektu skaitīšana uz konveijera



d) lentes nostiepuma kontrole

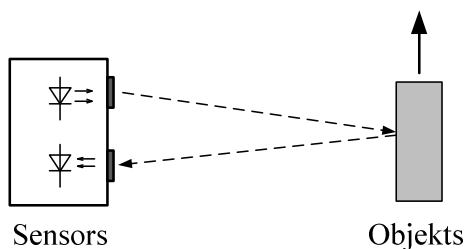
6.19 att. Atstarotā stara sensoru izmantošana

Atstarotāja tipa sensorus var izmantot līdzīgos gadījumos, kā caurstarojošos sensorus. Šajā gadījumā ir viena priekšrocība – vienā pusē nepieciešams tikai pasīvais atstarotājs, kam nav nepieciešami elektriskie kabeļi. Taču jāpārdomā ar to, ka darbības zona šajos gadījumos būs nedaudz mazāka par caurstarojošā tipa sensoru darbības zonu.

Lietojot atstarotā stara sensorus gadījumos, kur jānosaka spīdīga objekta atrašanās vieta, jānodrošina no objekta atstarotās gaismas novirzīšana no uztvērēja. Spīdīgi objekti var radīt kļūdainus sensora izejas signālus.

6.5. Difūzās gaismas sensori

Difūzās gaismas sensoros gaismas avots un uztvērējs atrodas vienā korpusā. Objekts difūzi atstaro daļu no gaismas kūļa, tādējādi aktivizējot uztvērēju. Atkarībā no uztvērēja konstrukcijas, izeja ir normāli atvērtā vai normāli aizvērtā stāvoklī. Pārslēgšanas attālums lielā mērā ir atkarīgs no objekta atstarošanas spējas. Objekta izmērs, virsma, forma, blīvums un krāsa, kā arī leņķis, kādā gaismas kūlis nonāk uz objekta, nosaka atstarotās gaismas stiprumu, tādēļ iespējams noskanēt objektus tikai nelielā attālumā (daži decimetri). Fonam jāabsorbē vai jānovirza gaismas kūlis, t.i., kad netiek uztverts neviens objekts, atstarotajam gaismas stiprumam jābūt zem uztvērēja jutības sliekšņa.



6.20 att. Difūzās atstarošanas sensoru darbības princips

Difūzās atstarošanas sensora priekšrocības:

- ✓ tā kā atstarošana no objekta aktivizē uztvērēju, nav nepieciešams papildus atstarotājs;
- ✓ objekts var būt difūzi atstarojošs, atstarojošs vai caurspīdīgs, vai puscaurspīdīgs, ja vien tiek atstarota pietiekami liela daļa no gaismas kūļa;
- ✓ caurstarojošo sensoru izmantošanas gadījumā var tikt uztverti tikai objekti, kas novietoti sāniski attiecībā pret gaismas kūli, savukārt difūzie sensori atļauj objektu frontālo uztveršanu, t.i., gaismas kūļa virzienā;
- ✓ atkarībā no difūzā sensora novietojuma, objektus izvēles kārtā var detektēt fona priekšā.

Difūzās atstarošanas sensora trūkumi:

- ✓ jutības līknes saskaņā ar 6.21 attēlu nav pilnīgi taisnas. Tādēļ gadījumā, ja būtiska ir precīza sānu jutība, difūzie sensori nav tik piemēroti kā caurstarojošie sensori.

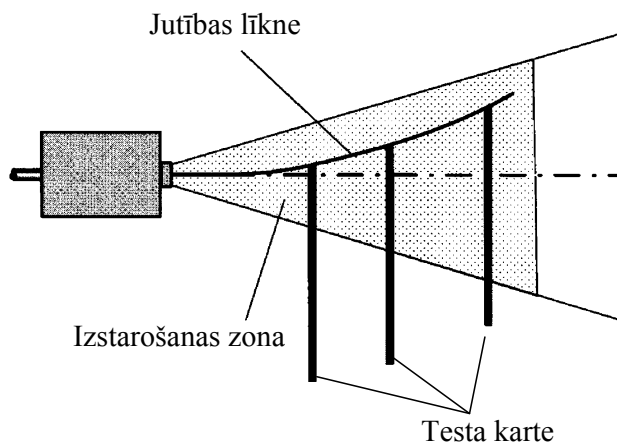
Piezīmes:

- ✓ objekta izmērs, virsma, forma un krāsa nosaka difūzā gaismas kūļa intensitāti un tādējādi arī reālo jutības zonu. Nominālā jutības zona, kas ir dota datu tabulās, tiek izmērīta, izmantojot standarta “Kodak” pārbaudes kartona balto pusi. Fonam

ir jāabsorbē vai jānovirza gaismas kūlis, t.i., tad, kad netiek uztverts objekts, atstarotajam gaismas kūlim jāatrodas ievērojami zemāk par uztvērēja strāvas jutības sliekšni.

- ✓ gaismas avota kļūme tiek novērtēta kā “nav uztverts objekts”. Šī iemesla dēļ difūzās gaismas sensorus nav ieteicams lietot drošības sistēmās.

Difūzās gaismas sensora jutības līknes nav taisnas, tās robežas mainās atkarībā no objekta atrašanās attāluma līdz sensoram 96.20 att.).



6.20 att. Difūzās gaismas sensora jutības līkne

Ja objekts tuvojas sensoram nelielā attālumā, tad drošai darbībai nepieciešama maza atstarojošā virsma. Ja objekts tuvojas sensoram lielā attālumā, tad tā noteikšanai nepieciešama liela atstarojošā virsma.

Difūzās gaismas sensora jutība ir atkarīga arī no objekta virsmas atstarošanas pakāpes. Lai noteiktu sensora pārslēgšanās attālumu dažādām virsmām, lieto korekcijas koeficientu (6.4 tabula).

6.4 tabula. Korekcijas koeficienti difūzās atstarošanas sensoriem

Materiāls	Koeficients
Kartons, balts*	1.0
Putu polistirols	1.0 ... 1.2
Metāls, spīdošs	1.2 ... 2.0
Koksne, rupja	0.4 ... 0.8
Kokvilnas materiāls, balts	0.5 ... 0.8
Kartons, melns, matēts	0.1
Kartons, balts, spīdošs	0.3
Polivinilhlorīds, pelēks	0.4 ... 0.8

* “Kodak” pelēkā kartona CAT 152 7795 aizmugurējā, baltā, matētā puse

Ja sensora pārslēgšanās attālums ir noteikts ar balto karti ("Kodak" pelēkā kartona CAT 152 7795 aizmugurējā, baltā, matētā puse), tad citiem materiāliem pārslēgšanās attālums jāreizina ar korekcijas koeficientu.

6.5 tabula. **Difūzo sensoru tehniskie dati**

Darba spriegums	10 ... 30 V līdzstrāva vai 20 ... 250 V maiņstrāva
Jutības zona	max. 50 mm uz 2 m (parasti regulējama)
Objekta materiāls	jebkurš
Pārslēgšanas strāva (tranzistoru izeja)	100 ... 500 mA līdzstrāva
Apkārtējās vides temperatūra	0°C ... 60°C vai -25°C ... 80°C
Jutīgums pret netīrumiem	jūtīgs
Kalpošanas ilgums	ilgs (apmēram 100 000 stundas)
Pārslēgšanas frekvence	10 ... 2000 Hz
Konstrukcija	cilindriska, blokveidīga
Aizsardzība pret IEC 529, DIN 40 050	līdz IP 67

Jutības zonas platums, kas norādīts datu tabulās, attiecas uz baltu kartonu. Parasti lieto "Kodak" pelēkā kartona CAT 152 7795 balto, aizmugurējo pusi. Šī pārbaudes kartona baltajai pusei ir nemainīgs atstarošanas koeficients – 90%, ar spektrālo diapazonu apmēram no 450 nm līdz 700 nm. Pelēkā puse atstaro 18% gaismas.

Fona maskēšana, izmantojot difūzos sensorus

Uzstādot difūzās gaismas sensorus, jāņem vērā fona attālums un tā atstarošanas pakāpe. Ja iekārtu izkārtojums ir tāds, ka sensora jutības zonā atrodas labi atstarojošs fons, lai novērstu kļūdas, jāveic šī fona maskēšana. To izdara uznesot fona daļai tumšu pārklājumu. Pārklātajam laukumam jābūt ne mazākam par sensora apstaroto laukumu.

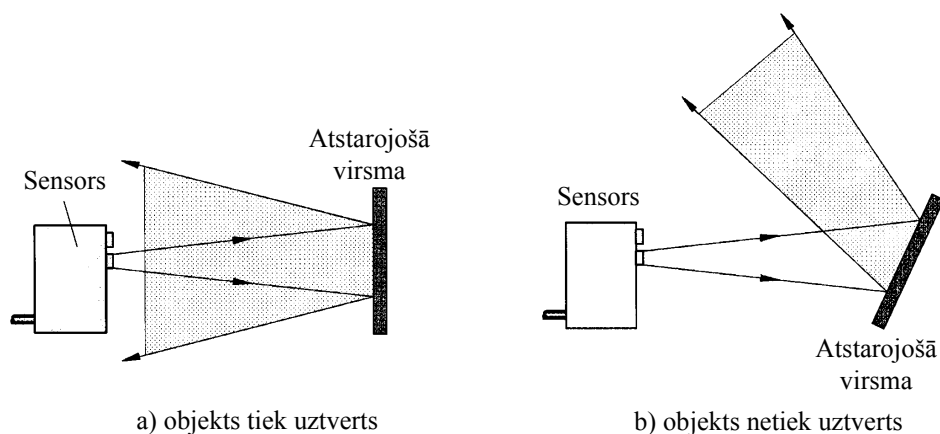
Difūzā sensora darbības efekts ir atkarīgs no atšķirības starp objekta atstarošanas spēju un fona atstarošanas spēju. Lai objekts, kura atstarošanas spēja tikai nedaudz atšķiras no fona atstarošanas spējas, tiktu droši uztverts pat sarežģītos apstākļos, izmantojot jutības regulatoru (viena apgriezienu vai vairākapgriezienu potenciometru), kas atrodas uz tuvinājuma sensora, var izvēlēties reaģēšanas sliekšni.

Tomēr tādu faktoru dēļ kā novecošana, sprieguma un temperatūras svārstības un netīrumi, jāņem vērā arī rezerves zona. Tādēļ regulēšanas laikā jāievēro, ka nedrīkst pilnībā aizņemt iestatāmo zonu.

Kad notiek difūzā sensora rūpīga regulēšana ar potenciometru, jāveido noteikta tolerances zona, lai ņemtu vērā izmaiņas objekta stāvoklī, tuvinājuma sensora aizsērēšanu, putekļus atmosfērā u.t.t. Pārāk tuva noregulēšana (tuvu galējai robežai) var izraisīt problēmas.

Lai atvieglotu nekļūdīgu iestatīšanu, dažiem difūzajiem sensoriem ir iebūvēta gaismas diode. Tā iemirgojas, ja sajūtamais objekts netiek pietiekami labi uztverts. Tuvinājuma sensors ar normāli atvērtu izeju jāieregulē tā, lai gaismas diode atrastos aktīvajā stāvoklī bez mirgošanas.

Uzstādot difūzās gaismas sensorus, jāņem vērā objekta atstarojošās virsmas leņķis attiecībā pret gaismas starojuma virzienu. Ja objekta atstarojošā virsma atrodas slīpi attiecībā pret gaismu, tad atstarotās gaismas stari var nenonākt sensora uztvērējā un objekts netiks noteikts (skat. 6.21b att.).



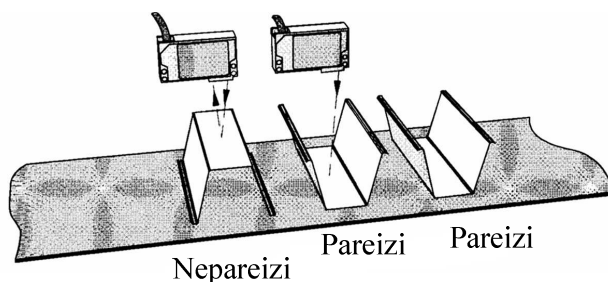
6.21 att. Difūzā sensora reakcija atstarojoša objekta gadījumā

Caurspīdīgu un tumšu objektu uztveršana

Caurspīdīgiem objektiem (gaišam stiklam, gaišam organiskajam stiklam, caurspīdīgai pieguļošai plēvei un citiem) parasti ir gludas, atstarojošas virsmas, tādēļ to noteikšanai var izmantot difūzo sensoru. Lai nodrošinātu nekļūdīgu sensora darbību, objekta virsmai jāatrodas perpendikulāri gaismas kūļa virzienam. Ja nepieciešams, sensora jutība ir jāpieregulē.

Objektus ar samazinātu atstarošanas spēju (matētu melnu plastmasu, melnu gumiju, tumšus materiālus ar rupju virsmu, tumšus audumus, pulētu tēraudu un citus) difūzie sensori parasti nenasaka, vai arī konstatē tikai ļoti mazos attālumos. Šādu objektu noteikšanai jāizmanto citi optiskie vai kapacitatīvie sensori.

Izmantošanas piemēri

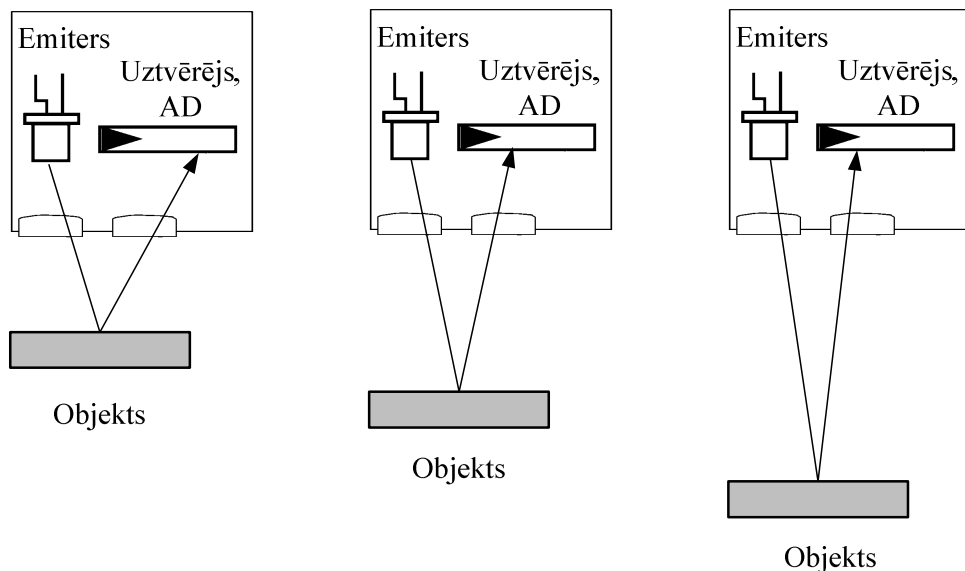


6.22 att. Detaļas pozīcijas kontrole, izmantojot difūzo sensoru

Šajā gadījumā precīzi ar potenciometru jāieregulē sensora jutīgums, ņemot vērā jutības izmaiņu atkarībā no materiāla, piesārņojuma, u.t.t.

Difūzās gaismas sensori ar attāluma kompensāciju

Šie sensori ir izveidoti objektu detektēšanai noteiktā attālumā. Sensora gaismas uztvērējā ir iestrādāts attāluma mērītājs, kas nosaka objekta attālumu līdz sensoram (6.23 att.).



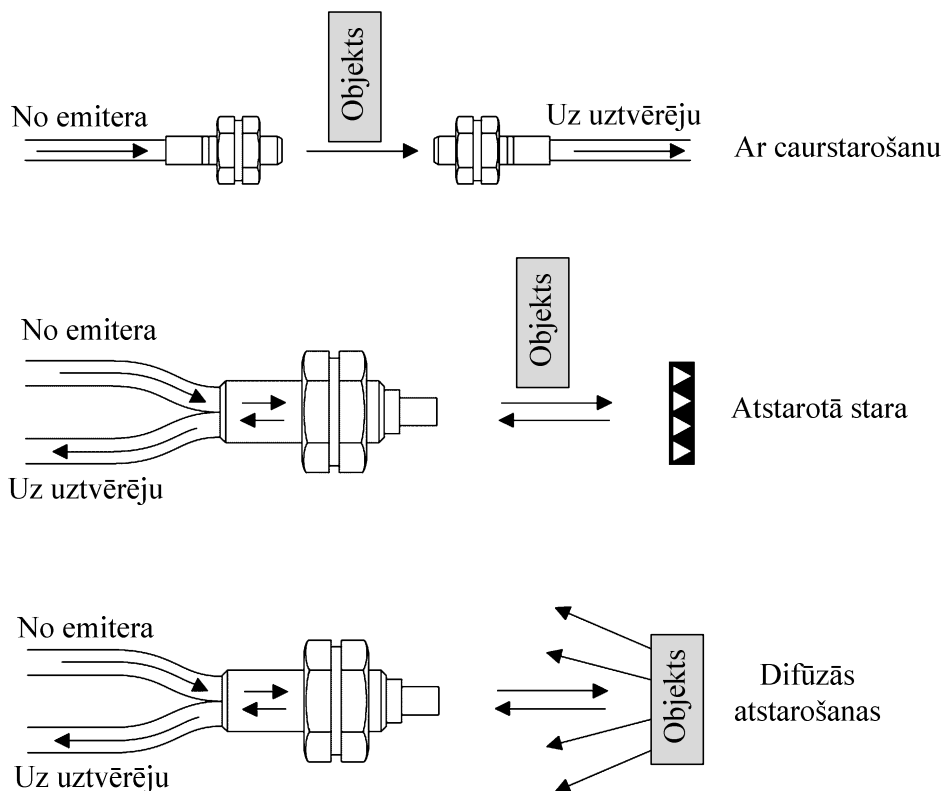
6.23 att. Difūzās gaismas sensora ar attāluma kompensāciju darbības princips
(AD – attāluma detektors)

Redzam, ka dažādos attālumos esošie objekti atstaro gaismu dažādos leņķos. Atstarotā gaisma tiek fokusēta uz uztvērēja jutīgā elementa dažādās vietās un tādā veidā nodrošina attāluma noteikšanu. Tas dot iespēju iestatīt sensoru tikai noteiktā

attālumā esošu objektu noteikšanai. Tādā veidā var izslēgt fona ietekmi uz sensora pārslēgšanos.

6.6. Optiskie sensori ar gaismas vadiem

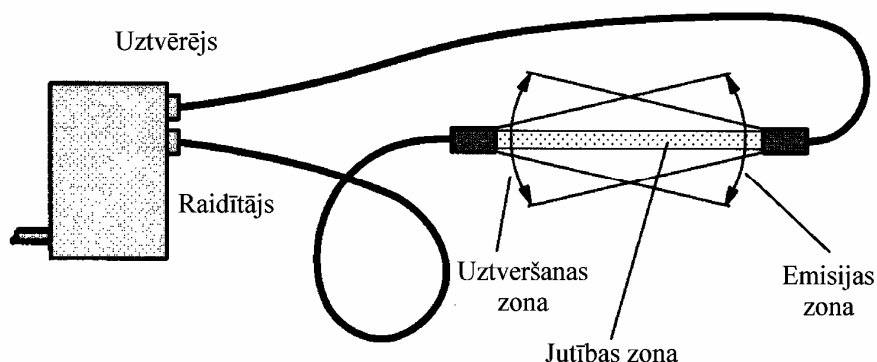
Visu veidu optiskie sensori var tikt aprīkoti ar optiskajiem kabeļiem gaismas precīzai novirzīšanai objekta atrašanās vietā (6.24 att.). Optiskos tuvinājuma sensorus ar optisko šķiedru kabeļiem izmanto gadījumā, ja parastie sensori aizņem pārāk daudz vietas. Izdevīgi izmantot optisko šķiedru kabeļus sprādzienbīstamās vietās. Izmantojot optisko šķiedru kabeļus, mazu objektu pozīciju var noteikt ar lielu precizitāti.



6.24 att. Optiskie sensori ar gaismas vadiem

Izmantojot divus atsevišķus optisko šķiedru kabeļus, iespējams konstruēt caurstarojošo sensoru. Pateicoties gaismas vadu elastībai, gaismas staru var novirzīt objekta tuvumā. Reaģēšanas zonu precīzi nosaka apertūras lielums optisko šķiedru kabeļa galos. Tas ļauj veikt precīzu sānu uztveršanu pat maziem objektiem (6.25 att.). Optisko tuvinājuma sensoru, kas adaptēti izmantošanai ar gaismas vadiem, priekšrocības:

- ✓ objektu uztveršana vietās ar minimālu pieeju, piemēram, caur atverēm;
- ✓ iespēja attālināti instalēt tuvinājuma sensora korpusu (piemēram, bīstamas vides apstākļos: karstums, ūdens, radiācija),
- ✓ precīza mazu objektu noteikšana,
- ✓ uztverošie elementi var tikt pārvietoti.



6.25 att. Caurstarojošo sensoru ar optisko šķiedru kabeļiem jutības zona

Polimēru optisko šķiedru kabeļu priekšrocības:

- ✓ mehāniski stiprāki nekā stikla šķiedras kabeļi,
- ✓ garumu var viegli samazināt, nogriežot galus ar asu nazi,
- ✓ ekonomiski.

Stikla optisko šķiedru kabeļu priekšrocības:

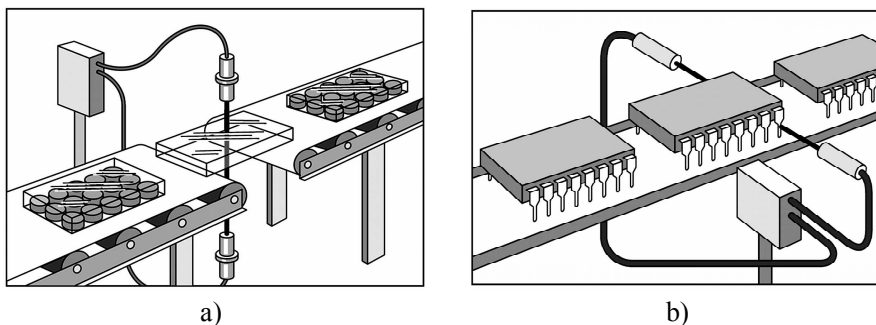
- ✓ piemēroti augstākām temperatūrām,
- ✓ mazāki gaismas zudumi lielos attālumos, kā arī infrasarkanā diapazona tuvumā,
- ✓ ilgāks kalpošanas laiks.

Optisko sensoru ar gaismas vadiem izmantošanas piemēri

Daudzos gadījumos optiskie sensori tiek ražoti korpusos, kas ļauj tiem pievienot gaismas vadus.

Galvenais nosacījumi šādu sensoru izvēlei ir:

- ✓ iespēja noteikt mazus objektus ar augstu precizitāti,
- ✓ iespēja noteikt objektus grūti pieejamās vietās, kur sensora atbilstoša uzstādīšana ir apgrūtināta,
- ✓ objektu noteikšana sprādzienbīstamās vidēs, kur nav pieļaujama elektrisko savienojumu lietošana.

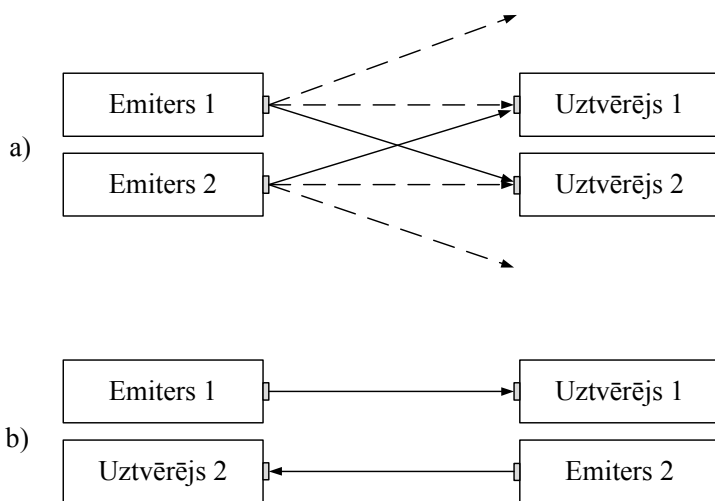


6.26 att. **Optisko sensoru ar gaismas vadiem izmantošana**
a) objektu noteikšana caurspīdīgās kārbās, b) mikroshēmu izvadu skaitīšana

6.7. Traucējumi optisko sensoru darbībā

Optiskie sensori ir noturīgi pret elektromagnētisko lauku iedarbību. Tos ietekmē apkārtējās vides piesārņojums ar putekļiem, tvaikiem un citām vielām, kas izkliedē gaismu. Putekļi uzkrājas arī uz sensoru optiskajām daļām un izkropļo gaismas plūsmu. Minētos trūkumus novērš, nodrošinot atbilstošus apkārtējās vides apstākļus.

Optiskos sensorus var ietekmēt arī apkārtējie gaismas avoti. Iepriekš tika minēts, ka sensora emitera izstarotā gaismas plūsma ir modulēta un uztvērējā notiek sinhronā demodulācija, kas padara sistēmu traucējumu noturīgu, taču atsevišķos gadījumos spēcīgi gaismas avoti var traucēt tā normālu darbību.



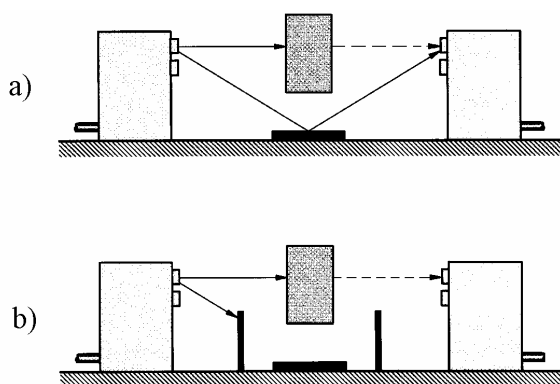
6.27 att. **Izvairšanās no savstarpējiem traucējumiem:**
a) – blakus novietoti gaismas avoti un uztvērēji rada savstarpējus traucējumus;
b) – traucējumus novērš, blakus novietojot atsevišķo sensoru gaismas avotu un uztvērēju

Dažos gadījumos tehnoloģiskā procesa nodrošināšanai, nepieciešams blakus uzstādīt vairākus optiskos sensorus. Šādos gadījumos sensori var traucēt viens otram. Ja gaismas avots un uztvērējs atrodas atsevišķos korpusos, tad traucējumus novērš, novietojot emiteru un uztvērēju pretējās pusēs (6.27 att.).

Lai gan optiskie tuvinājuma sensori zināmā mērā ir pasargāti no ārējās gaismas iedarbības, pārmērīga ārējā gaisma (piemēram, filmēšanas gaismas, zibspuldzes, stipra saules gaisma) var izraisīt traucējumus.

Risinājums: pagriezt uztvērēja optisko asi prom no ārējā gaismas avota vai arī samazināt uztvērēja jutības leņķi, ierīkojot diafragmu.

Atstarojoša virsma dažu veidu optisko sensoru tuvumā var izraisīt traucējumus. 6.28 attēlā redzams, kā perifērais gaismas stars no gaismas avota sasniedz uztvērēju caur atstarojošu virsmu. Ja tiek izmantoti difūzie sensori, atstarojošs fons var radīt problēmas (piemēram, anodētas alumīnija daļas).



6.28 att. Izvairīšanās no atstarošanas traucējumiem

a) atstarojoša virsma sensora tuvumā rada traucējumus,

b) traucējumus novērš uzstādot ekrānus

Atstaroto virsmu radītos traucējumus novērš aizsedzot atstarojošās virsmas vai atstaroto gaismas kūli. Ja iespējams var ieregulēt sensora optisko asi tādā leņķī, lai novirzītu traucējošo atstarojumu, kā arī samazināt uztvērēja jutību.

Optisko tuvinājuma sensoru lēcas jāaizsargā pret netīrumiem, tās nosedzot vai regulāri tīrot (piemēram, ar saspiesta gaisa strūklu). Ja netīrumi rada traucējumus, jāapsver, vai nevajadzētu izmantot kādu citu tuvinājuma sensora veidu, kas ir mazāk jutīgs pret netīrumiem.

6.8. Speciālas nozīmes sensori

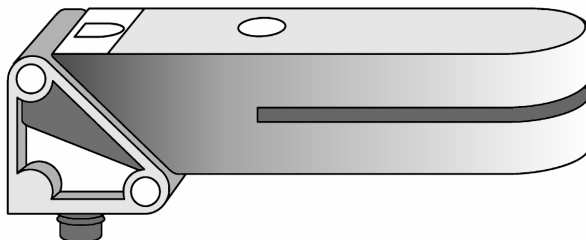
Rūpnieciskajos procesos ir nepieciešams plašs sensoru klāsts ar specifiskām īpašībām. Ražotāji piedāvā sekojošus speciālas nozīmes sensorus:

- ✓ spraugveida barjeras sensori,
- ✓ rāmjveida sensori,
- ✓ lāzera sensori,
- ✓ atstarojošie sensori ar polarizācijas filtru,
- ✓ drukāto atzīmju sensori,
- ✓ luminiscences sensori,
- ✓ slīpi vērstās gaismas barjeras sensori,
- ✓ negadījumu novēršanas sensori,
- ✓ dinamiskie sensori,
- ✓ krāsu atšķiršanas sensori,
- ✓ sensori ar iebūvētu piesārņojuma kontroli,
- ✓ gaismas režģa sensors (izmanto vairākus caurstarojošos sensorus),
- ✓ gaismas aizkara sensori ar stikla optiskajām šķiedrām,
- ✓ platā kūļa difūzais sensors pieguļošo plēvju vai stikla konstatēšanai,
- ✓ speciālie sensori urbju lūzumu kontrolei (sākot ar 1.5 mm diametru),
- ✓ sensori datu pārraidei,
- ✓ difūzie sensori svītrkoda nolasīšanai,
- ✓ sprādziendrošas konstrukcijas, NAMUR versijas,
- ✓ konstrukcijas 2 vai 3 optisko šķiedru adapteru savienošanai ar sensora moduli.

Turpmākā izklāstā apskatīsim dažus no īpašo sensoru veidiem.

Spraugveida gaismas barjeras sensori

Spraugveida gaismas barjeras sensori ir caurstarojoši sensori, kuros izstarotājs un uztvērējs ir iemontēti viens otram pretim vienā U-veida korpusā. Tie ir izgatavoti plastmasas korpusos, un to cena ir zema (6.29 att.).



6.29 att. Spraugveida gaismas barjera (Siemens)

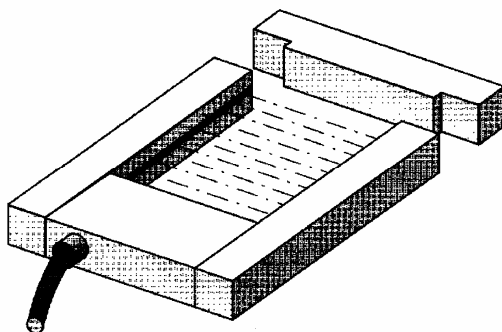
Gaismas kūļa pārtraukšanās dakšas iekšpusē tiek novērtēta kā pārslēgšanās signāls. Spraugveida gaismas barjeras sensori ir pieejami ar spraugas platumu no 3 mm līdz 50 mm. Šos sensorus var izmantot, piemēram, rotācijas vai lineārās kustības parametru mērīšanai. Kustības noteikšanai izmanto rotējošu disku ar spraugām vai caurumotu lineāru elementu. Šādā veidā iespējams iegūt ciparu potenciometru bez slīdošā kontakta. Ir iespējamas relatīvi augstas pārslēgšanās frekvences, piemēram, līdz 1 MHz. Ir pieejami arī gaismas barjeras sensori, kas var noteikt objekta kustības virzienu.

Rāmjveida barjeras sensori

Rāmjveida barjeras sensori darbojas pēc gaismas aizkara principa. Uz divām rāmja pretējām pusēm ciešā rindā atrodas liels skaits izstarotāju un uztvērēju, kas pilnībā nosedz rāmja iekšpusi ar gaismas aizkaru.

Rāmja sensori parasti tiek izmantoti mazu caur rāmi krītošu detaļu sajušanai, piemēram, štancēto vai presēto detaļu izmešanas kontrolei. Tā kā tos pielieto dinamiskos procesos, rāmja sensoriem parasti ir tikai dinamiskās pārslēgšanās darbības īpatnība. Pastāvīgās detaļas, tādas kā caurspīdīgā konveijera carule, kas var piesārņoties ar netīrumiem un eļļu, netiek detektētas. Rāmja sensoru reakcijas ātrums var būt 150 μs un tie var izšķirt detaļas pat līdz 2 mm diametrā.

Rāmjveida barjeras sensora uzbūve redzama 6.30 attēlā.



6.30 att. Rāmja gaismas barjera

Lāzera barjeras sensori

Optiskajiem sensoriem kā gaismas avotu galvenokārt izmanto gaismas izstarošanas diodes (LED). Tomēr, izmantojot lāzera diodes, iespējams konstruēt lāzera sensorus, kuriem ir šādas priekšrocības:

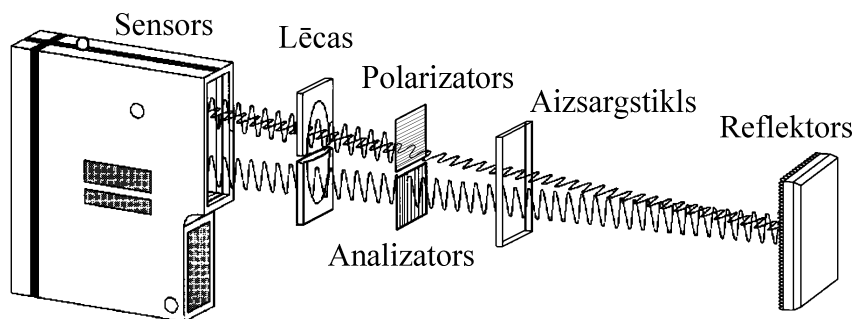
- ✓ pateicoties lāzera stara koncentrēšanai, tiek sasniegts ārkārtīgi liels uztveršanas tālums;
- ✓ ļoti šaura un precīza jutības zona pat lielos attālumos.

Ar lāzera stariem iespējams sajūst objektus ar izmēru 18mm x 10mm, vairāk nekā 200 m lielā attālumā. Mazākos attālumos, piemēram, 2m, ir iespējams sajūst objektu, kura diametrs ir tikai 0,1 mm. Šādas ārkārtīgi mazas jutības zonas ir īpaši noderīgas precīzai instrumentu un detaļu izmēru iestatīšanai.

Polarizētie atstarojošie sensori

Kad atstarotā stara sensori tiek izmantoti ļoti spožu objektu uztveršanai, tuvinājuma sensors nav spējīgs atšķirt, no kurienes nāk atstarotā gaisma – no atstarotāja vai no objekta, t.i., tas neatpazīst objektu. Viens risinājums šai problēmai ir polarizācijas filtru izmantošana.

Polarizācijas filtri izstarotājam un uztvērējam ir iebūvēti starp tuvinājuma sensora lēcu un papildus stikla vāciņu tuvinājuma sensora priekšdaļā. Polarizācijas filtra īpatnība ir tāda, ka tas laiž cauri tikai tos gaismas viļņus, kuru svārstību plakne atrodas noteiktā leņķī (polarizācija plaknē). Optiskā sensora radītā gaisma (piemēram, LED sarkanā gaisma) svārstās vairākās polarizācijas plaknēs. Izstarotāja polarizācijas filtrs laiž cauri tikai to gaismas daļu, kas svārstās noteiktā polarizācijas plaknē. Šādā veidā polarizētās gaismas kūlis sasniedz atstarotāju (apkārtējās vides gaismas līmenis nav jāņem vērā, jo tas tiek absorbēts uztvērējā). Trīskāršā spoguļa formas reflektors pagriež polarizācijas plakni par 90° . Lai trīskāršā spoguļa atstaroto gaismas kūli varētu uztvert ar uztvērēju, filtra polarizācijas plakne tiek apgriezta par 90° pretēji izstarotāja polarizācijas plaknei (6.31 att.).



6.31 att. **Polarizētā sensora darbības princips**

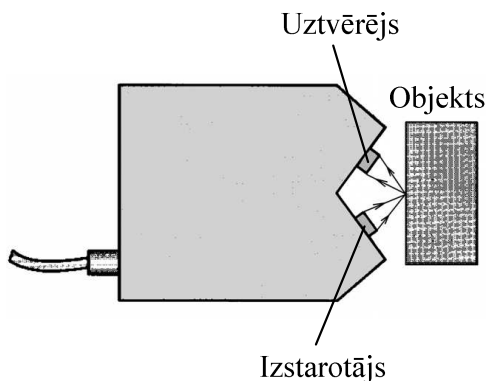
Ja polarizētās gaismas ceļā nonāk detektējama objekta, atstarotās gaismas polarizācijas plakne netiek pagriezta par 90° , un, nonākot uztvērēja polarizācijas filtrā, tiek absorbēta. Rezultātā sensors konstatē objekta esamību.

Polarizētās gaismas sensori ir noturīgāki pret ārējās gaismas iedarbību, jo reaģē tikai uz noteiktā plaknē polarizētu gaismu.

Slīpās gaismas barjeras sensori

Slīpās gaismas barjeras sensors ir caurstarojošais sensors, kurā izstarotājs un uztvērējs novietoti vienā korpusā (skat. 6.32 att.). Optiskais izstarotājs un uztvērējs ir fokusēti uz kopēju punktu. Ja šajā fokusa punktā parādās objekts, uztvērējs saņem objekta atstaroto gaismu un ģenerē pārslēgšanās signālu.

Slīpās gaismas barjeras sensori tiek izmantoti objektu precīzai detektēšanai mazos attālumos. Salīdzinājumā ar atstarojošajiem sensoriem, pārslēgšanās attālums nav atkarīgs no atstarošanas leņķa.



6.32 att. Slīpās gaismas barjeras sensors

Negadījumu novēršanas sensori

Sensorus negadījumu novēršanai izmanto, lai aizsargātu pieeju bīstamām zonām, kur tiek izmantotas spēka iekārtas, piemēram, preses, automātiskie metāla griešanas un formas veidošanas instrumenti, nogriezēji, locīšanas, liešanas mašīnas, roboti, veltņi un maisītāji. Sensoriem, ko izmanto negadījumu novēršanai, jāatbilst vietējiem valsts likumdošanas iestāžu noteiktiem drošības noteikumiem.

Saskaņā ar šiem noteikumiem sensori negadījumu novēršanai pieder bezkontakta aizsargiekārtu kategorijai, kurā ietilpst arī caurstarojošie sensori vai ar tiem saistītas sistēmas – gaismas aizkari vai gaismas režģi. Aizsargiekārtām jādod pārslēgšanās komanda, ja kāda cilvēka ķermeņa daļa šķērso aizsargāto zonu. Pārslēgšanās komandas nolūks ir novērst vai pārtraukt potenciāli bīstamu kustību.

Rūpnieciski ražotajiem negadījumu novēršanas sensoriem ir sekojošas konstruktīvas īpatnības salīdzinājumā ar parastajiem sensoriem:

- ✓ vairāki gaismas indikatori operatīvās vadības un funkciju indikācijai, piemēram, “izstarotājs ieslēgts”, “gaismas ceļš brīvs”, “gaismas uztveršana laba”, “gaismas uztveršana vāja”,
- ✓ sensoriem ar releju izeju ir divi releju kontakti savienošanai ar abām mašīnas

kontroles izejām,

- ✓ priekšējās lēcas apsilde, lēcas piesārņojuma rādītājs,
- ✓ laba noturība pret optiskajiem un elektriskajiem traucējumiem.

Negadījumu novēršanas režģa sensori sastāv no paralēli darbojošos sensoru sistēmas, kas no paralēlām infrasarkanām izstarošanas zonām rada blīvu režģi. Režģa atsevišķie sensori viens pēc otra ātri tiek aktivizēti saskaņā ar daudzkārtīgo (multiplex) metodi. Gaismas kūlis no uztvērēja uz izstarotāju ir paredzēts sinhronizācijai. Piemēram, starp paralēlajiem gaismas kūļiem izšķirtspēja ir atstarpe 35 mm (minimālais šķēršļa izmērs). Ir pieejamas konstrukcijas ar dažādiem augstumiem, piemēram, no 400 mm līdz 1000 mm.

Dinamiskie sensori

Standarta sensori reaģē uz statisku šķērslī gaismas kūlī. Pārslēgšanās signāls darbojas tik ilgi, kamēr šķērslis atrodas gaismas kūlī.

Dinamiskie sensori darbojas gluži pretēji – tie reaģē uz straujām izmaiņām uztvertajā gaismas kūlī. Lēnas izmaiņas, kā, piemēram, pakāpeniska piesārņošanās vai lēni kustīgi objekti netiek reģistrētas, jo pārslēgšanās sliekšnis uztvērējā tiek pastāvīgi pieregulēts.

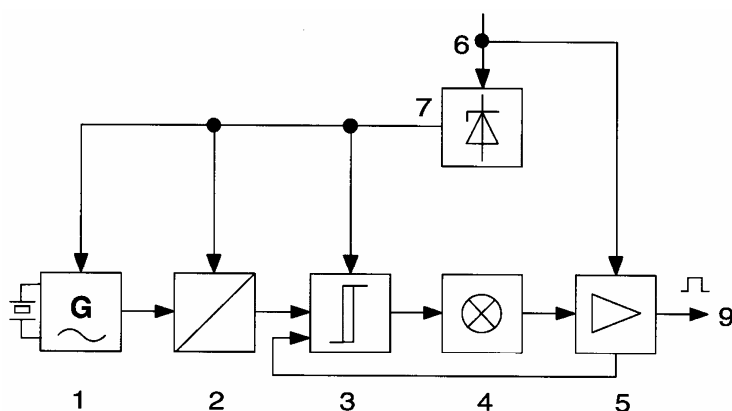
Dinamiskie sensori bieži tiek izmantoti tekstilrūpniecībā kā diega pārtrūkšanas kontrolierīces. Diegs iziet cauri sensoram. Ja diegs pārtrūkst, padotajā gaismā rodas neliela, īsa izmaiņa un pārtrūkušais diegs tiek detektēts. Ar šo sensoru var noteikt pat smalku diegu (piemēram, līdz 0,05 mm) pārtrūkšanu. Minimālo gaismas spilgtuma izmaiņu, pie kuras pārslēdzas sensors, var ieregulēt.

7. Ultraskaņas sensori

Ultraskaņas tuvinājuma sensori reaģē uz jebkuru materiālu, kurš atstaro ultraskaņas viļņus. Šie sensori ir mazjutīgi pret apkārtējās vides piesārņojumu.

7.1. Darbības princips un parametri

Ultraskaņas tuvinājuma sensoru darbības princips balstās uz akustisko viļņu atstarošanas principiem. Viļņus izstaro akustisko svārstību ģenerators, bet atstarotos viļņus “sajūt” uztvērējs. Vide, kurā izplatās šie viļņi, parasti ir gaiss. Iekārtā tiek izmērīts un novērtēts skaņas viļņu izplatīšanās laiks.



7.1 att. Ultraskaņas tuvinājuma sensora blokhēma:

- 1 – ultraskaņas ģenerators; 2 – detektors-pārveidotājs; 3 – komparators;
 4 – ieslēgšanās indikators; 5 – izejas pakāpe ar aizsardzības ķēdi;
 6 – barošanas bloks; 7 – sprieguma stabilizators; 8 – jutīgais elements (ultraskaņas mērpārveidotājs); 9 – izejas signāls

Var pieņemt, ka tuvinājuma sensori sastāv no trim galvenajiem blokiem: ultraskaņas mērpārveidotāja (jutīgā elementa), signāla apstrādes moduļa un izejas pakāpes. Par ultraskaņas mērpārveidotājiem (jutīgajiem elementiem) parasti izmanto pjezoelementus, kas veidoti no keramiska materiāla, kuram piemīt pjezoefekts. Ultraskaņas sensoru darbības fizikālie principi detalizēti aplūkoti A-4 nodaļā.

Ultraskaņas tuvinājuma sensoru nostrādāšanas ātrumu ierobežo maksimālā impulsu atkārtošanās frekvence, kas ir atkarīga no sensora uzbūves. Parasti tā ir robežās no 1 līdz 125 Hz.

Galvenā ultraskaņas sensoru priekšrocība ir tā, ka tie var detektēt dažādu

materiālu objektus. Objektu “sajušana” nav atkarīga no to formas, krāsas un materiāla. Tie var būt cieti, šķidri vai pulverveida. Sensoru darbību neietekmē apkārtējā vidē esošie putekļi, tvaiks vai dūmi.

Galvenokārt tiek izgatavoti difūzās atstarošanas ultraskaņas sensori, kuros raidītājs un uztvērējs atrodas vienā korpusā. Ir iespējami arī barjeras veida sensori, kur raidītājs un uztvērējs ir izvietoti atsevišķos korposos.

Ultraskaņas tuvinājuma sensoru galvenās izmantošanas vietas:

- ✓ noliktavu aprīkojums,
- ✓ transporta sistēmas,
- ✓ pārtikas rūpniecība,
- ✓ metāla, stikla un plastmasu apstrāde,
- ✓ beramu materiālu monitorings.

7.1 tabula. Ultraskaņas sensoru tehniskie dati

Darba spriegums	parasti 24 V līdzstrāva
Nominālā ieslēgšanās distance	parasti no 100 mm līdz 1 m; max. līdz 10 m
Objekta materiāls	jebkurš, izņemot skaņu absorbējošus materiālus
Izejas strāva (tranzistoru izeja)	100 – 400 mA līdzstrāva
Apkārtējās vides temperatūra	0°C – 70°C, daļēji līdz -10°C
Jūtība pret piesārņojumu	vidēja
Kalpošanas laiks	liels
Ultraskaņas frekvence	no 30 kHz līdz 300 kHz
Konstrukcija	cilindriskas formas
Aizsardzības klase IEC 529, DIN 40 050	no IP 65 līdz IP 67

Ultraskaņas sensoru priekšrocības:

- ✓ relatīvi liela darbības zona (līdz dažiem metriem),
- ✓ objektu noteikšanu neietekmē krāsa un materiāls,
- ✓ stabili nosaka caurspīdīgus objektus (piemēram, stikla pudeles),
- ✓ relatīvi mazjūtīgi pret vides putekļainību un piesārņojumu,
- ✓ iespējams izmantot ārpus telpām,
- ✓ iespējami bezkontakta sensori ar izmaināmu ieslēgšanās attālumu; jutības lauku iespējams sadalīt zonās; iespējamās programmējamās versijas.

Ultraskaņas sensoru trūkumi:

- ✓ lietojot ultraskaņas sensorus slīpu virsmu noteikšanai, skaņa tiek novirzīta. Tāpēc ir svarīgi, lai objekta virsma atrastos pareizā leņķī pret skaņas izplatīšanās

virzienu. Pretējā gadījumā jāizmanto barjeras tipa ultraskaņas sensori;

- ✓ ultraskaņas sensori ir samērā lēndarbīgi, to pārslēgšanās frekvence ir robežās no 1 līdz 125 Hz;
- ✓ ultraskaņas sensori parasti ir dārgāki par optiskajiem sensoriem.

Parasti ultraskaņas sensori ir apgādāti ar gaismas diodi stāvokļa indikācijai un ļoti bieži ar jutības regulēšanas potenciometru. Ir sastopami arī sensori ar diviem zonu iestatīšanas potenciometriem, kā arī programmējami sensori, kuriem darbības zonu iestata ar speciālu interfeisu.

Daži ultraskaņas tuvinājuma sensori ir apgādāti ar sinhronizējamām ieejām, kas nodrošina nekļūdīgu sensoru darbību un neatkarīgu vadību vairākiem blakus esošiem sensoriem.

7.2. Ultraskaņas sensoru izmantošana

Uzstādot ultraskaņas sensorus, jānodrošina pietiekami liels attālums starp blakus esošajiem sensoriem (līdzīgi kā induktīvajiem sensoriem).

Uzstādot ultraskaņas sensorus bez sinhronizācijas, jāaugās, lai nenotiktu to savstarpējā mijiedarbība. Šajā nolūkā, atkarībā no sensora tipa, jānodrošina minimālie attālumi starp tiem. Šie attālumi jāievēro tajos gadījumos, kad testējamais objekts tuvojas sensoram no priekšas vai vertikāli no augšas. Minimālie uzstādīšanas attālumi ir norādīti sensoru specifikācijās. Ja sensori ir uzstādīti viens otram pretī, specifikācijā dotie lielumi jāprecizē eksperimentāli.

Orientējošie minimālie uzstādīšanas attālumi norādīti 7.2 tabulā. Tie ir atkarīgi no sensora mērīšanas diapazona.

Gadījumos, kad ultraskaņas sensoram blakus ir siena vai cita atstarojoša virsma, jāievēro minimālais atstatums starp sensoru un sienu (7.2 tabula):

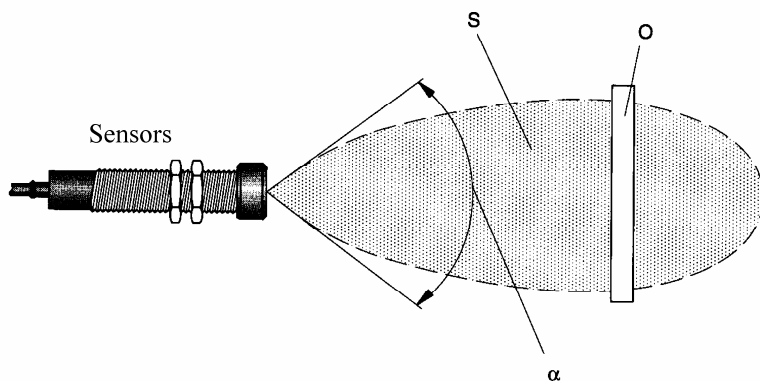
7.2. tabula. **Minimālie uzstādīšanas attālumi starp sensoriem**

Mērīšanas diapazons, cm	Tipiskais minimālais atstatums, cm		
	Paralēli blakus uzstādītiem	Opozīti uzstādītiem	Blakus esošu atstarojošu sienu
6 ... 30	> 15	> 120	> 3
20 ... 100	> 60	> 400	> 15
80 ... 600	> 250	> 2500	> 40

Nepieciešamais minimālais objekta izmērs

Nepieciešamo objekta šķērsizmēru nosaka izstarotā ultraskaņas kūļa leņķis α . Mazam objektam ultraskaņas viļņi virzās garām un var interferēt ar blakus esošiem

objektiem vai fonu. Ņemot vērā to, ka ražotāji bieži nenodrošina pietiekošu informāciju par visiem sensora parametriem, jāveic iepriekšēji eksperimenti ar pārbaudes plāksni, tuvinot to detektējamajam objektam līdz tiek sasniegts ieslēgšanās attālums.



7.2 att. Ultraskaņas sensora jutības lauks:

O – objekts, S – skaņas lauks, α – ultraskaņas izstarošanas leņķis

Objektu veidi

Der cieti, šķidri un pulverveida vai granulētie materiāli. Ultraskaņas sensori nedarbojas ar materiāliem, kas absorbē ultraskaņu, piemēram, rupjvilnas audumu, kokvilnu, frotē audumu, porolonu, akmens vati. Šos objektus var detektēt, izmantojot barjeras veida ultraskaņas sensorus.

Tāpat iespējams detektēt arī caurspīdīgus, atstarojošus vai piķa melnus objektus, kur optiskie sensori var dot kļūdainus rezultātus.

Ar ultraskaņas tuvinājuma sensoriem tieši var detektēt pat caurspīdīgu 0.01 mm biezu plēvi.

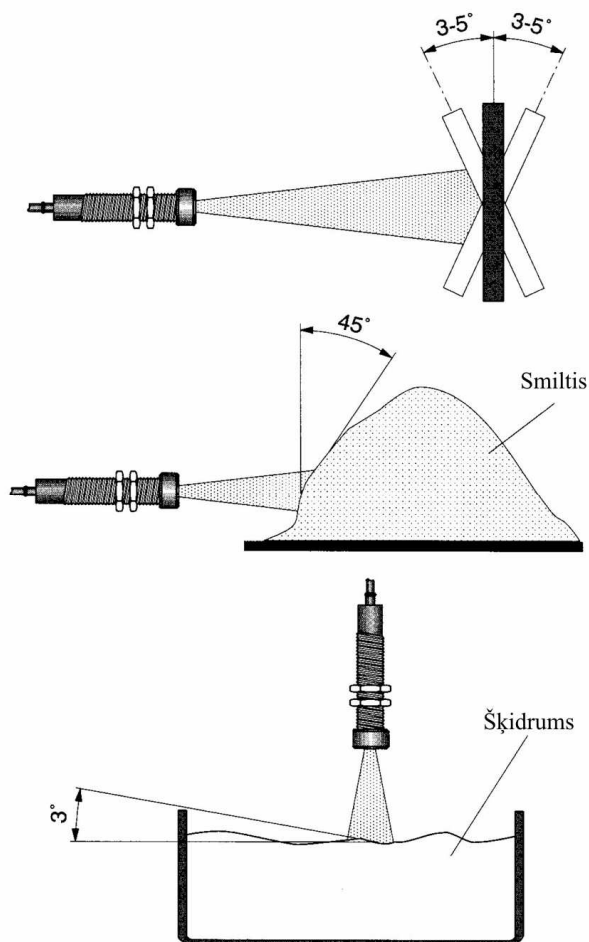
Minimāli pieļaujamie objekta attālumi

Tā kā ultraskaņas sensoram nepieciešams noteikts laiks atstarotā impulsa saņemšanai, tas nevar detektēt īslaicīgi pazibošus objektus. Tuvās distancēs ultraskaņas kūļa sekundārais starojums mērījumos var izraisīt kļūdas. Sensoru konstrukcijās ar vienu ultraskaņas mērpārveidotāju ģenerētajam ultraskaņas impulsam jānorimst pirms pienācis atstarotais signāls.

Objekta stāvoklis

Līdzīgi gaismai ultraskaņa atstarojas no plakanām virsmām. Ja plakanā virsma nav perpendikulāra ultraskaņas ķīļa asij, atstarotais signāls nenonāks uztvērējā un netiks detektēts (7.3 att.). Objektam ar spožu, gludu virsmu pieļaujamā novirze no

perpendikularitātes nedrīkst pārsniegt $\pm 3 \div \pm 5^\circ$. Objektam ar negludu vai neregulāru virsmu ir pieļaujams lielāks novirzes leņķis. Jāņem vērā, ka ultraskaņas viļņa garums un objekta attālums arī ir svarīgi stabilas darbības faktori.



7.3 att. Objektu virsmas novietojuma pieļaujamās novirzes

Apkārtējās vides temperatūras, mitruma un gaisa spiediena ietekme

Ultraskaņas ātruma izmaiņa atkarībā no gaisa temperatūras ir apmēram 1.8% uz grādu. Ņemot vērā to, ka ultraskaņas sensori tiek izgatavoti bez temperatūras kompensācijas ķēdēm, iespējama neliela ieslēgšanās punkta izmaiņa temperatūras ietekmē. Temperatūrās zem 40°C , izmainoties gaisa relatīvajam mitrumam no 0% līdz 100%, ultraskaņas ātruma izmaiņa nepārsniedz 1.4%. Atmosfēras spiediena maiņa neizsauc nozīmīgu ultraskaņas ātruma izmaiņu. Ultraskaņas ātrums nedaudz samazinās tikai lielā augstumā.

Ultraskaņas viļņa novirze

Ar gludām vai viegli ieliektām virsmām ultraskaņas vilnis var tikt novirzīts, tāpēc iespējams objektus detektēt “ap stūri”.

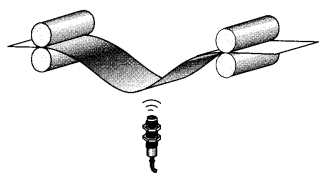
Objektu temperatūras ietekme

Ļoti karsti objekti, piemēram, karstas sāļu vannas vai sarkankvēlē esoši metāli, izraisa spēcīgas gaisa strāvas un var radīt ultraskaņas interferenci. Pirms sensoru uzstādīšanas šādās vietās, nepieciešams eksperimentāli pārbaudīt par to stabilu darbību.

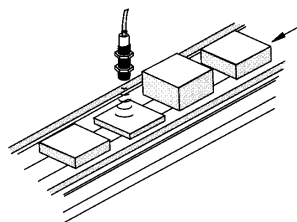
Apkārtējās vides trokšņu ietekme

Ņemot vērā to, ka ultraskaņas frekvence ir no 30 kHz līdz 300 kHz, kā arī uztvērēja selektivitāti, apkārtējā trokšņa ietekme uz sensoru parasti ir niecīga. Atsevišķos gadījumos tie var reaģēt uz spēcīgu, noteiktas frekvenču joslas troksni.

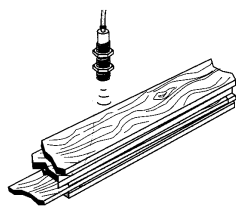
Ultraskaņas sensoru izmantošana piemēri



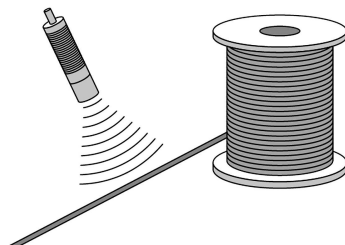
a) lentas nostiepuma kontrole
starp piedziņas rulljiem



b) objektu šķirošana
pēc augstuma



c) paketes biezuma
kontrole



d) kabeļa vai vada
pārraušanas kontrole

7.4 att. Ultraskaņas tuvinājuma sensoru izmantošanas piemēri

Ultraskaņas sensori ir izmantojami ļoti daudzos gadījumos gan tehnoloģisko procesu automātiskās vadības sistēmās, gan drošības sistēmās. Salīdzinājumā ar citiem sensoru veidiem, ultraskaņas sensori ir salīdzinoši dārgi.

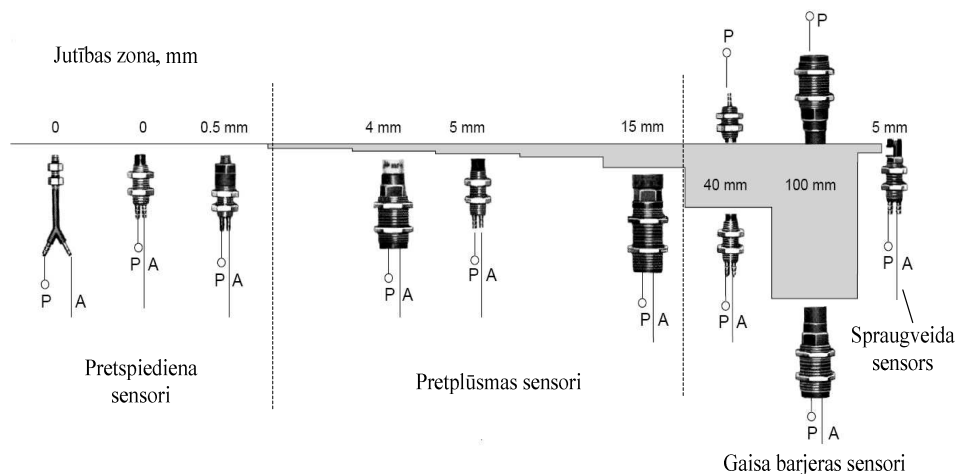
8. Pneimatiskie tuvinājuma sensori

Pneimatiskie tuvinājuma sensori objekta klātbūtni nosaka ar gaisa plūsmas parametru izmaiņu. Gaisa plūsmai atduroties pret objektu, rodas spiediena izmaiņa, kas tālāk tiek izmantota procesa kontrolei un vadībai.

Pneimatisko tuvinājuma sensoru priekšrocības:

- ✓ darbības drošība putekļainā vidē;
- ✓ darbības drošums augstas temperatūras vidē;
- ✓ izmantojami eksplozīvā vidē;
- ✓ nejutīgi pret magnētisko lauku un skaņas iedarbību;
- ✓ izmantojami ekstremālos apgaismojuma apstākļos, kā arī caurspīdīgu objektu noteikšanai, kur optiskie sensori nav piemēroti.

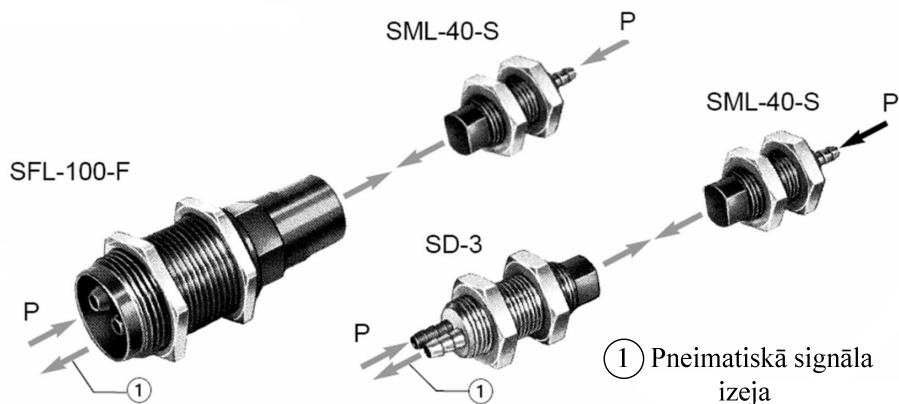
Pneimatiskos tuvinājuma sensorus iedala trijos veidos: pretspiediena, atstarotās plūsmas un gaisa barjeras. Jutības zona, atkarībā no sensora veida, ir no 0 līdz 100mm. Vismazākā jutības zona ir pretspiediena sensoriem. Atkarībā no modeļa tā var sasniegt 0.5mm (skat. 8.1 att.).



8.1 att. **Pneimatisko sensoru jutības zonas (Festo)**

P – darba spiediens, A – izejas spiediens

Vislielākā darbības zona ir gaisa barjeras sensoriem, līdz 100mm. Kompānija *Festo* piedāvā dažādas gaisa barjeras pneimatisko sensoru kombinācijas, kuras ļauj nodrošināt nepieciešamo jutības zonas attālumu (8.2 att.). Kā pretplūsmas uztvērēju var izmantot arī pretspiediena sensoru SD-3.



8.2 att. **Kompānijas *Festo* gaisa barjeras sensoru izveides komplekti**

Visu veidu pneimatisko sensoru darbībai nepieciešams pazemināts gaisa spiediens. To panāk ar spiediena regulatoriem. Gaisam jābūt labi filtrētam un bez eļļas piemaisījumiem.

Tā kā sensora izejas spiediens parasti ir par zemu tā tālākai izmantošanai, tas jāpastiprina ar pneimopastiprinātājiem. Pneimatiskie tuvinājuma sensori var būt ar bināru elektrisku izejas signālu. Tos sauc arī par spiediena slēdžiem.

Lai nodrošinātu sistēmu pret bojājumiem vārsta aizsērēšanas gadījumā, pneimopastiprinātāji jāizvēlas darbam ar paaugstinātu spiedienu.

Nomainot pneimatiskos sensorus, jāpieaugulē pastiprinātāja darba režīms, lai izslēgtu kļūdas sensoru parametru pielaižu dēļ.

Pneimatisko sensoru darba spiediens parasti ir robežās no 0 līdz 8 bar. Izejas spiediens (signāls) ir atkarīgs no darba spiediena un sensora attāluma līdz objektam.

Tālāk apskatīsim pneimatisko sensoru galvenos veidus un to izmantošanas īpatnības.

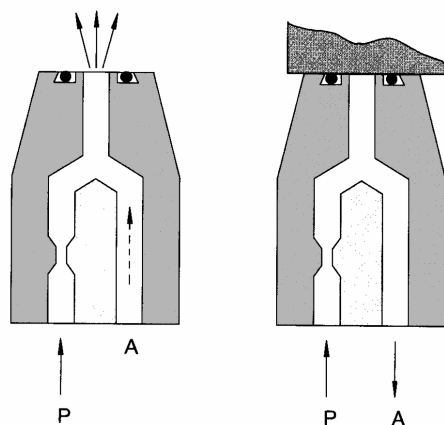
Pretspiediena sensori

Sprauslas nosprostošana ar objektu rada spiediena pieaugumu sensora izejā. Šos sensorus sauc arī par pretspiediena vārstiem (8.3 att.).

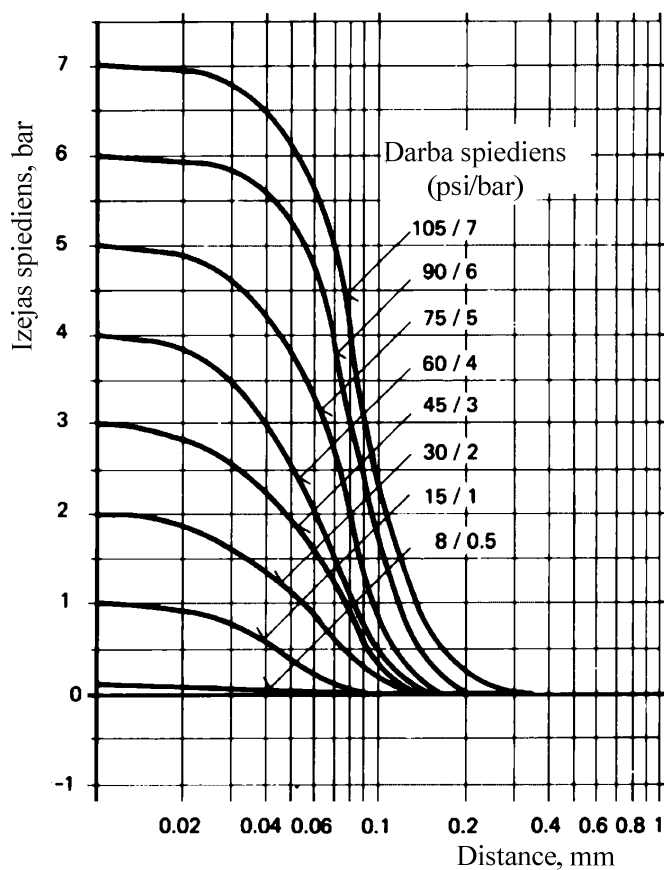
Ja sensora tuvumā objekta nav, gaiss brīvi izplūst caur sprauslu un sensora izejā spiediens ir zems.

Ja sensoram pietuvojas objekts, gaisa plūsma caur sprauslu tiek bremsēta, un sensora izejā *A* spiediens palielinās līdz vērtībai, kas izsauc pneimatiskā pastiprinātāja pārslēgšanos.

Pretspiediena sensori nodrošina visaugstāko izejas signāla spiedienu (līdz vairākiem bariem) un vismazāko gaisa patēriņu. Pretspiediena sensora SD-3 (*Festo*) raksturlīkne parādīta 8.4 attēlā.



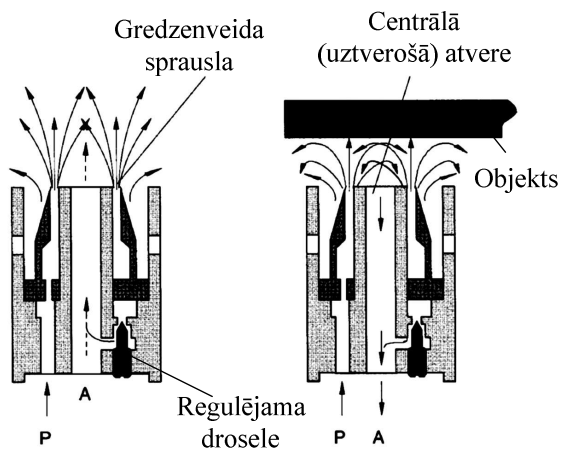
8.3 att. Pretspiediena sensora darbības princips



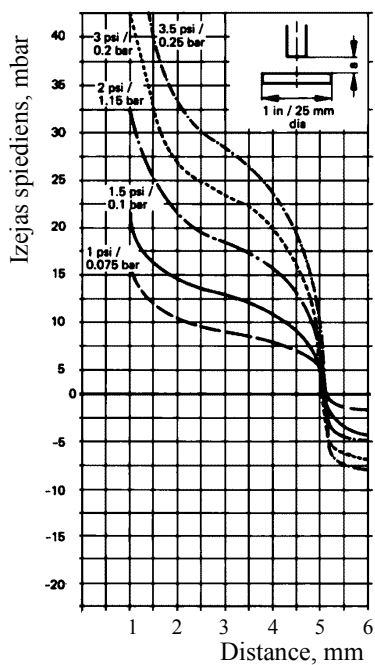
8.4 att. Pretspiediena sensora SD-3 (*Festo*) raksturlienes

Atstarotās plūsmas sensori

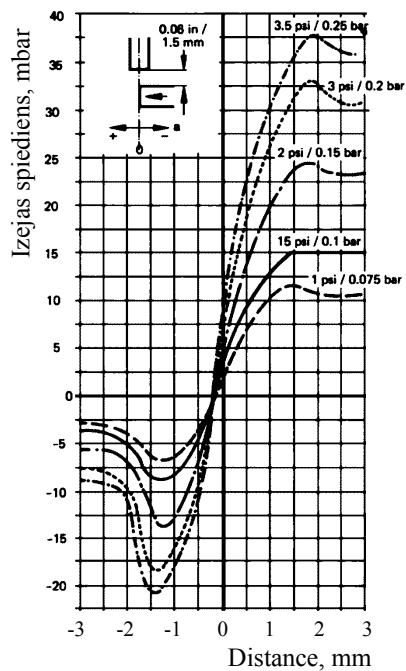
Atstarotās plūsmas sensori sastāv no gredzenveida sprauslas un centrālās uztvertā signāla atveres.



8.5 att. Atstarotās strūklas tuvinājuma sensoru darbības princips



a)



b)

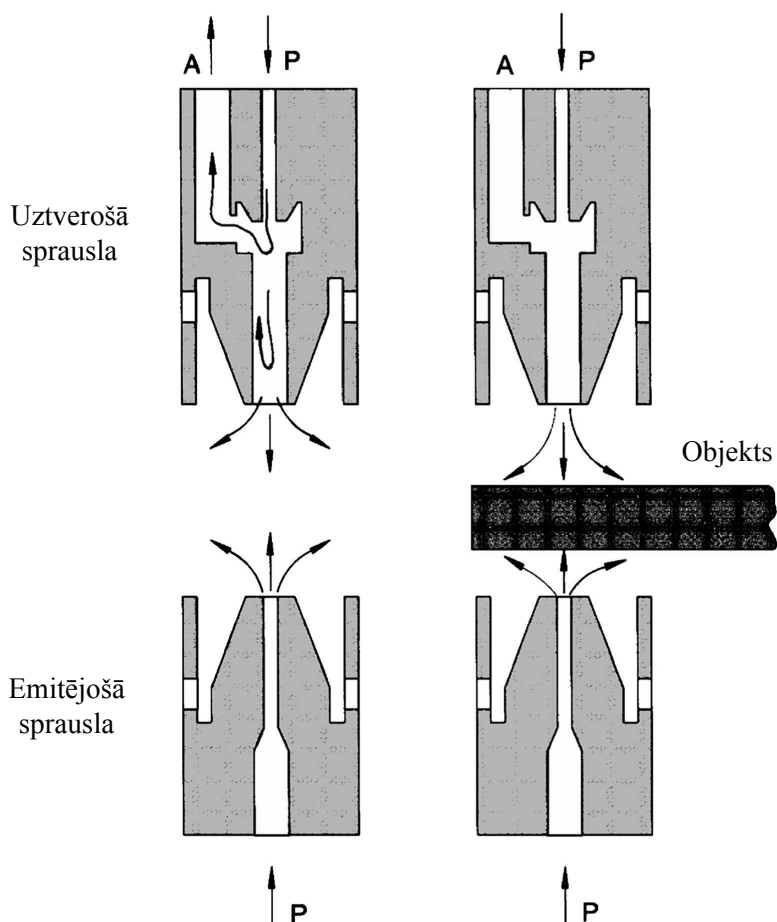
8.6 att. Atstarotās strūklas tuvinājuma sensora RML-4.8-S (*Festo*) raksturīgnes

Objektam sasniedzot gaisa strūklu, kas izplūst no gredzenveida sprauslas, strūkļa tiek bremsēta un daļēji atstarota atpakaļ. Atstarotā strūkļa daļa nonāk centrālajā atverē un sensora izejā rodas paaugstināts spiediens. Sensora darbības shematiskais attēls parādīts 8.5 attēlā.

Gredzenveida sprauslā tiek nodrošināta konstanta gaisa plūsma. Parasti sensors ir aprīkots ar regulējamu droseli, ar kuru ieregulē sensora jutību.

Sensora izejas signāls ir atkarīgs no darba spiediena, sensora attāluma līdz objektam un objekta tuvošanās virziena (8.6 att.). Objektam tuvojoties sensoram no priekšas (8.6a att.) sensors sāk reaģēt, ja objekts ir ~5mm attālumā. Ja objekts tuvojas no sāniem (8.6b att.), izejas signāls kļūst negatīvs un pārslēgšanās notiek ~3mm distancē. Izejas signāls sasniedz 40 – 60 mbar.

Gaisa barjeras



8.4 att. Gaisa barjeras darbības princips

Novietojot plūsmu uztverošo sprauslu tieši pretī gaisa padeves sprauslai, iegūstam sensoru veidu, ko sauc par gaisa barjeru (8.4 att.). Objektam nonākot starp sprauslām, gaisa plūsma tiek pārtraukta, un uztverošajā sprauslā spiediens samazinās. Šo sensoru jutības zona sasniedz 100 mm.

Teorētiski pietiek gaisu padot tikai vienā – emitējošajā sprauslā. Šādas vienkāršās gaisa barjeras, kur gaisa plūsmu emitē tikai viena sprausla, nav drošas ekspluatācijā, jo pastāv lielāks piesārņojuma risks. Gaisa plūsma nes sev līdzi putekļus un citas daļiņas, kas var traucēt vai pilnīgi bloķēt uztverošo sprauslu.

Lielākā daļa rūpnieciski ražoto gaisa barjeru darbojas pēc pretgaisa principa, kur gaisa plūsma tiek padota abās sprauslās, t.i., abās pusēs barjerai (objektam). Uztverošās sprauslas darbība ir līdzīga pretspiediena sensora darbībai. Šādā veidā ievērojami samazinās piesārņojuma risks.

Izmantošanas piemēri

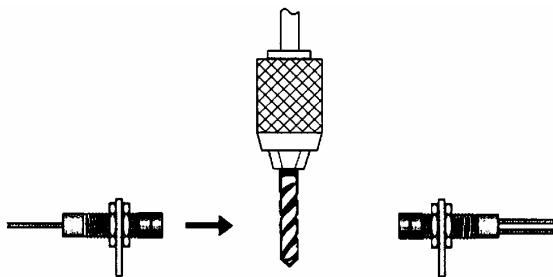
Ņemot vērā to, ka pneimatisko tuvinājuma sensoru (sprauslu un pastiprinātāju) cenas ir ievērojami augstākas par standarta induktīvajiem, kapacitatīvajiem un pat optiskajiem sensoriem, pneimatiskos sensorus ieteicams lietot speciālām vajadzībām, kur citi sensoru veidi nav piemēroti.

Pneimatiskie tuvinājuma sensori ir piemēroti šādos gadījumos:

- ✓ sprādziennedrošas vides,
- ✓ metināšanas procesu automatizēšanai, kur ir lieli līdzstrāvas un maiņstrāvas magnētiskie lauki,
- ✓ mitrās, netīrās un putekļainās vidēs,
- ✓ vidē ar augstu temperatūru,
- ✓ putojošu šķidrumu līmeņa kontrolei.

Izmantojot gaisa barjeru, iespējams kontrolēt urbja atrašanos vajadzīgajā pozīcijā tieši pirms urbšanas procesa.

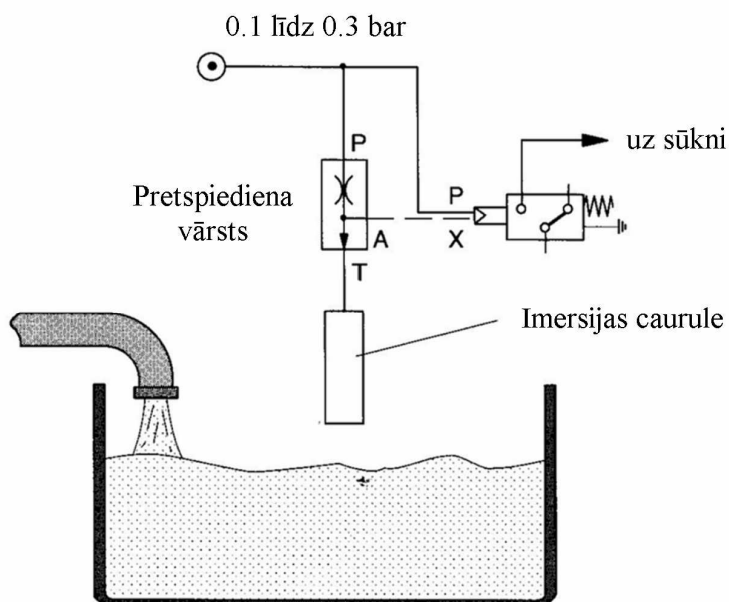
Ja urbis ir nolūzis, gaisa plūsma sasniedz uztverošo sprauslu un sensora izejā rodas spiediena pieaugums. Ar gaisa barjeru izejas signāls parādās tikai tad, ja objekts neaizsedz gaisa plūsmu (8.7 att.).



8.7 att. Gaisa barjeras izmantošana urbja kontrolei

Šī risinājuma galvenā priekšrocība ir tā, ka apkārtējās vides piesārņojums (piemēram, ar urbšanas šķidrumu) neatstāj ietekmi uz sensora darbību kā tas ir optiskajiem sensoriem.

Pneimatiskos sensorus ļoti labi var izmantot šķidruma līmeņa kontrolei, it sevišķi putojošiem šķidrumiem (8.8 att.).



8.8 att. Šķidruma līmeņa kontrole ar pretspiediena sensoru

Pretspiediena sensora sprauslai tiek pievienota imersijas caurule. Kad šķidruma līmenis sasniedz noteiktu augstumu imersijas caurulē, sensora izejā rodas spiediens, kas pēc pastiprināšanas un pārveidošanas atslēdz šķidruma sūkni. Izejas spiediens ir proporcionāls šķidruma līmenim. Maksimālā izejas spiediena vērtība X sasniedz darba spiediena vērtību.

Šis risinājums pirmkārt ir piemērots putojošiem šķidrumiem, jo spiediena sensors reaģē tikai uz šķidrumu nevis uz putām.

Izmantotā literatūra

1. Beķeris E. Signālu teorijas elementi. I – daļa. RTU, Lunda, Zviedrija, 1997. – 189 lpp.
2. Brāzma N., Augstākās matemātikas speckurss. 1. Daļa. „Zvaigzne”, Rīga, 1969. – 448 lpp.
3. Greivulis J., Raņķis I. Iekārtu vadības elektroniskie elementi un mezgli. –R., Avots, 2003.- 288 lpp.
4. Fizika, A. Valtera redakcijā, „Zvaigzne”, Rīga, 1992. – 733 lpp.
5. Lavendelis E., Materiālu pretestība.”Zvaigzne”, Rīga, 1986. – 340 lpp.
6. Loginovs V., Mehānisko lielumu elektriskā mērīšana. „Liesma”, Rīga, 1972. – 78 lpp.
7. Mikroelektronikas komponentes un pamatshēmas. Manfred Frohn un citi, VPIC izdevniecība, 2003. -512 lpp.
8. Proporcionālā hidropiedziņa lauksaimniecības tehnikā, A. Kaķītis, A. Kirka, A. Galiņš, Ē. Kronbergs, R. Purnas, 2001., Festo Didactic, Kauņa, 121 lpp.
9. Sensori manipulatoriem un automatizācijai. Tuvinājuma sensori. Ebel F. Nestel S. Festo Didactic, Rīga, 2003. – 335 lpp.
10. Starptautisko metroloģijas terminu vārdnīca. Identisks tulkojums no „International Vocabulary of Basic and General terms in metrology”. Rīga, 1998. – 48 lpp.
11. Tomariņš K., Zablovskis E. Radioelektronika. „Zvaigzne”, Rīga, 1985. – 246 lpp.
12. Alan S Morris, Measurement and Instrumentation Principles, Butterworth-Heinemann, 2001, 475 p.
13. Doebelin E. O., Measurement systems, application and design, fourth edition, 1990, McGraw-Hill international editions, USA, 960 p.
14. DOE Fundamentals handbook. Instrumentation and Control. Volume 2. U.S. Department of Energy, Washington, 1992 – 168 p.
15. “Electronic Devices and Circuits - Third Edition”, - Theodore F. Bogart, Jr., University of Southern Mississippi, Merrill, An Imprint of Macmillan Publishing Company New York, 1993.
16. Elgar Peter, Sensors for Measurements and Control. Pearson Education Limited, TecQuipment Limited, – 1998, 159 p.
17. Holman J. P., Experimental methods for engineers, sixth edition, 1996., McGraw-Hill, USA, 616 p.

18. Kester W. Analog-Digital Conversion. – 2004 Analog Devices, Inc.
19. Kitchin C., Counts L. A Designer's guide to instrumentation amplifiers. 3rd edition, Analog Devices, USA 2006 – 109 p.
20. Practical hints for the installation of strain gauge, Karl Hoffman, HBM, Germany. 4th edition, 1996 – 55 p.
21. Schule R., Waiblinger P. Sensors for handling and processing technology. Sensors for force and pressure. Festo Didactic, Esslingen, 1993 – 275 p.
22. Sensor technology handbook. Edited by Jon Wilson. Elsevier, Burlington, USA, 2005 – 702 p.
23. Seippel, Robert G., Transducers, sensors&detectors. A Prentice-Hall Company, Reston, Virginia, 1983, 299 p.
24. Левшина Е, Новицкий П. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). – Энергоатомиздат, Ленинград, 1983. – 320 с.
25. Шило В.Л. Популярныe цифровыe микросхемы. М.- «Радио и связь», 1988, 352 с.
26. Тимошенко С., Янг Д., Уивер У. Колебания в инженерном деле/Пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; Под ред. Э. И. Григолюка. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
27. Interneta resurss, skatīts 05.2008: <http://www.termini.lv/>
28. Interneta resurss, skatīts 05.2008: <http://www.allaboutcircuits.com>
29. Interneta resurss, skatīts 03.2008: <http://www.analog.com/>
30. Interneta resurss, skatīts 07.2008: <http://www.eeci.com/>
31. Interneta resurss, skatīts 05.2008:
<http://www.omega.com/Literature/Transactions/volume3/strain.html>
32. Interneta resurss, skatīts 05.2008:
<http://www.omega.com/Literature/Transactions/volume3/strain2.html>
33. Spēka mērīšanas sensori un tenzorezistori [Elektroniskais resurss]. – Tiesšaistes pakalpojums. – Pieejas veids „tīmeklis” WWW.URL: <http://www.hbm.com> – Resurss apskatīts 2008.gada maijā.