

## 4. ANDURITE EHITUS

### 4.1. Asendi- ja siirdeandurid

Tööstusautomaatikas kasutatakse mitmeid eritüübilisi asendi- ja siirdeandureid sõltuvalt nõutavast täpsusest, tööpiirkonnast, toimekiirusest, mõõtmetest, hinnast ja muudest tehnilistest ning majanduslikest näitajatest. **Asendiandurid** on ettenähtud nn. absoluutse asendi mõõtmiseks masina paigalseisva detaili või ümbritseva ruumi suhtes. **Siirde- ehk nihkeandurid** mõõdavad asendi muutust ehk nn. suhtelist asendit mingi lähteasendiga võrreldes. Absoluutasendi mõõtmiseks tuleb siirdeandurit enne töö algust kalibreerida. Siirdeanduriteks on kõik impulssandurid, mille väljundimpulsside sagedus on võrdeline liikumiskiirusega, impulsside arv aga siirdega.

Asendiandurite liigitus tööpõhimõtte ja kasutatava tajuri järgi on antud tabelis 3.1. Asendiandurite peamiseks rakendusalaadeks on tööpingid, robotid, kraanad, tõstukid, konveierid vms. tööstusseadmed. Enamikel juhtumitel on nende kasutamine seotud positsioonjuhtimisajamitega. Seepärast on asendianduri valikul määravaks anduri mõõtepiirkond ning täpsus. Suure ulatusega ning väikese positsioonimistäpsusega ajamites kasutatakse mitmesuguseid piirlüliteid. Väikeste siirete mõõtmiseks sobivad nii potentsiomeetrilise kui ka induktiivtajuriga pidevatoimelised andurid.

Tabel 4.1.

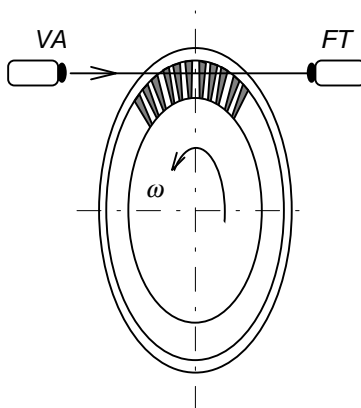
#### Asendiandurite liigitus

Pidevatoimelised andurid	Diskreetsed andurid		
	Impulssandurid	Koodandurid	Piirlülid
Potentsiomeetertajuriga	Kontakttajuriga	Kontakttajuriga	Kontakttajuriga
Induktiivtajuriga (ühe pooluspaariga)	Fototajuriga	Fototajuriga	Fototajuriga
Mahtuvustajuriga	Induktiivtajuriga		Induktiivtajuriga Mahtuvustajuriga
Mitmepooluselise elektrimasinadtajuriga 1. Pöördtrafod 2. Selsüünid 3. Redusüünid 4. Induktosüünid			

Suuremate siirete täpseks mõõtmiseks kasutatakse nii mitmepooluselisi mõõteotstarbelisi elektrimasinaid kui ka fototajuritega impulss ja koodandureid. Vedelike ja puistematerjalide asendi (nivoo) mõõtmiseks sobivad aga mahtuvustajuritega andurid.

Asendiandurite mitmekesisuse tõttu on siinkohal võimalik lähemalt kirjeldada vaid enamkasutatavate andurite tööpõhimõtet.

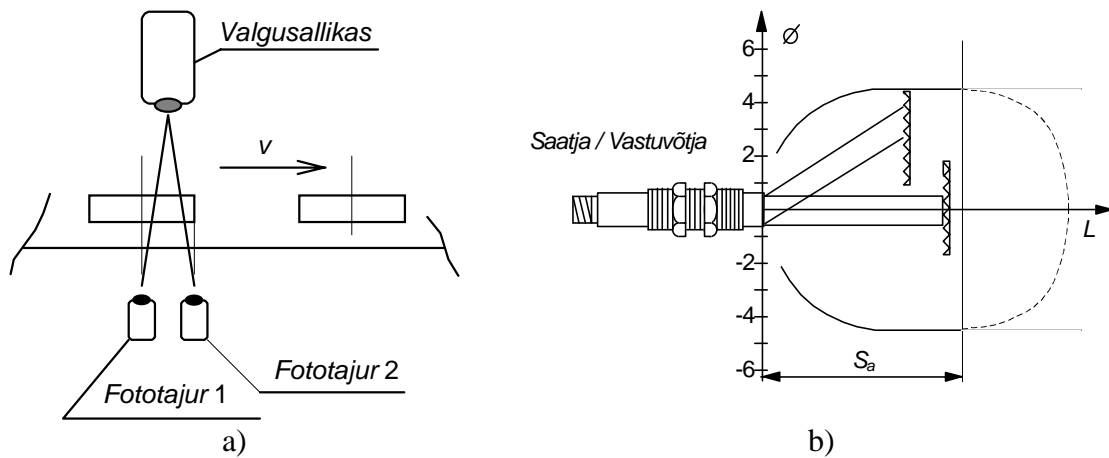
**Fototajuriga impulssandureid** kasutatakse siirdeanduritena ning koos kalibreerimislülitusega ka asendianduritena robotites, mitmesugustes tehnoloogiaseadmetes ja tööpinkides. Andur koosneb valgusvoo allikast, modulatsioonikettast ning fototajurist (joonis 4.1). Valgusvoo allikaks on harilikult valgusdiod. Modulatsiooniketas kujutab endast optiliselt läbipaistvate piludega ketast, mis pöörlemisel sulgeb perioodiliselt valgusvoo pääsu fototajurile (fotodiodile) ning tekitab viimases perioodiliselt muutuva voolu. Pulsatsiooni sagedus on võrdeline ketta pöörlemiskiirusega, vooluimpulsside arv aga ketta pöördenurgaga. Anduri täpsus sõltub impulsside arvust ühe pöörde kohta. Valgusvoo pulsatsioonisageduse suurendamiseks kasutatakse lisaks modulatsioonikettale mitmesuguse mustri- ja rasterplaaate, mille pilud on modulatsiooniketta piludega võrreldes kaldu. Sel juhul läbib valgusvoog nii modulatsiooniketta kui ka rasterplaadi ning ühe pilu möödumisel tekib fototajuril mitu voo maksimumi ja miinimumi. Täpsetelt fototajuriga impulssanduritelt saadakse  $10^3 \dots 10^4$  ja rohkemgi impulssi ketta ühe pöörde kohta.



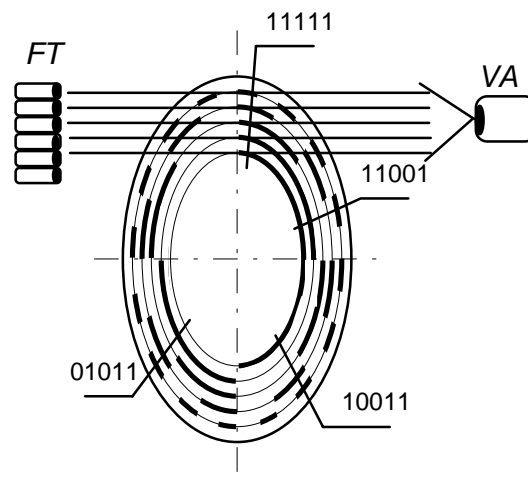
Joonis 4.1. Fototajuriga impulssanduri tööpõhimõte

Omaette probleemiks on impulssandurite korral liikumissuuna määramine (joonis 4.2). Selleks tehakse impulssandurid kahekanalilistena, nii et need annavad teineteise suhtes neljandikperioodi võrra nihutatud impulsse. Kahe impulssijada võrdlemisel määrab vastav loogikalülitus (joonis 4.2, b) liikumissuuna. Sageli kasutatakse veel kolmandat kanalit, millelt saadakse iga pöörde kohta üks indeksimpulss. Seda impulssi kasutatakse anduri kalibreerimiseks lähteasendi suhtes. Impulssanduri kasutamisel asendiandurina on selle kalibreerimine hädavajalik.

Koodandurid sarnanevad oma ehituselt impulssanduritele, kuid erinavalt viimastest saab neid kasutada nn. absoluutasendi määramiseks. Koodanduril on mitu optilist kanalit ning ta väljastab kahendkoodis signaali (joonis 4.3). Anduri modulatsiooniketas võib olla kodeeritud tavalises 8421 kahendkoodis või Gray koodis. Gray kood on samuti kahendkood, kuid erineb 8421 koodis selle poolest et kaks järjestikulist koodi ei erine rohkem kui ühe koha võrra (vt. tabel 3.2). Seepärast võib väita, et asendi sujuval muutumisel muutub ka kood "sujuvalt", s. t. ilma tavalisele kahendkoodile omaste "hüpeteta" kus kahe järjestikulise arvu koodis erinevad kõik kohad.

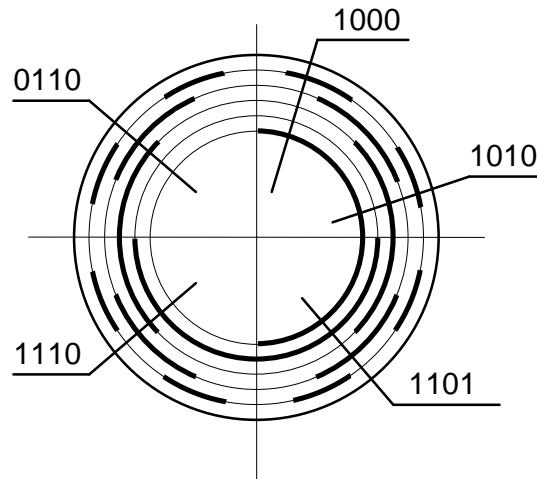


Joonis 4.2. Liikumissuuna määramine 1/4 perioodi võrra nihutatud fototajuritega



Joonis 4.3. Fototajuriga koodandur "harilikus" 8421 kahendkoodis modulatsiooniketta mustriga

Gray kood tagab tavalise kahendkoodiga võrreldes anduri ja juhtimissüsteemi suurema töökindluse, sest koodi muutumisest tingitud loogikalülituste ümberlülitumiste arv on sel juhul minimaalne. Et Gray koodi kasutamine juhtseadmetes on tülikas, kuulub anduri koosseisu ka koodimuundur, mis muundab Gray koodi tavaliseks kahendkoodiks.



Joonis 4.4. Gray koodis modulatsiooniketta muster

Tabel 4.2

**Kahendkood 8421 ja Gray kood**

Kümnend- arv	8421 kahendkood	Gray kood
0	00000	00000
1	00001	00001
2	00010	00011
3	00011	00010
4	00100	00110
5	00101	00111
6	00110	00101
7	00111	00100
8	01000	01100
9	01001	01101
10	01010	01111
11	01011	01110
12	01100	01010
13	01101	01011
14	01110	01001
15	01111	01000
16	10000	11000
17	10001	11001
18	10010	11011
19	10011	11010

Gray kood muundatakse tavaliseks 8421 kahendkoodiks vastavalt loogikavõrrandile

$$B_i = B_{i+1} \wedge \bar{A}_i \vee \bar{B}_{i+1} \wedge A_i \quad (4.1)$$

kus  $B_i$  ja  $B_{i+1}$  tähistavad väljundkoodi (8421 koodi)  $i$ -ndat ja  $i+1$  kohta,  $A_i$  aga Gray koodi  $i$ -ndat kohta. Vastavalt võrrandile on  $B_i = 1$  kui väljundkoodi  $B_{i+1}$  koht ei võrdu sisendkoodi  $A_i$  kohaga.

Sisuliselt tuleb koodi muundamiseks teha loogikatehe "VÄLISTAV VÕI" kõigi koodi kohtadega. Koodi muundamist alustatakse kõige vanemast kohast ning lõpetatakse kõige nooremaga, s. t.  $k$ -kohalise koodi muundamiseks tuleb loogikavõrrandit lahendada  $k$  korda. Vastava Gray koodi muunduri saab realiseerida nii aparatuurselt kui ka programmiliselt. Paljudes tööstuslikes koodandurites on Gray koodi muundur sisse ehitatud.

**Pöörtrafod ja trükitud mähistega paljupooluselised elektrimasinad - induktosüünid** sarnanevad oma tööpõhimõttelt hammasmodulaatoriga transformatorsele tajurile, kuid pooluste ühtlase jaotuse ja suure arvu tõttu anduri konstruktsioonilistest ebatäpsustest tingitud vead kompenseeruvad ning anduri töö on täpsem.

Induktosüüni kasutatakse diskreettalitluses impulssandurina, pidevtalitluses aga amplituudi või faasimuundurina. Induktosüün koosneb paigalseisvast staatorist ja pöörlevast rootorist. Masina mähised on valmistatud trükimeetodil ja kujutavad endast siksakilist vaskriba. Staatoril paikneb tavaliselt ergutusmähis, rootoril kaks mitmesse sektsiooni jaotatud mõõtemähist.

Põhimõtteliselt on induktosüün nagu iga teine elektrimasin pööratav, s. t. staatorile võib paigutada rootorimähise ja vastupidi. Kaks mõõtemähist on vajalikud liikumissuuna määramiseks ning need on teineteise suhtes  $1/4$  perioodi võrra nihutatud. Vastavalt sellele nimetatakse neid ka siinus- ja koosinismähisteks. Mähiste sobiva kuju ning lülitusega saab väljundi pöördenurgast sõltuva pinge, mis võib olla rootori pöördenurga perioodiline siinus-, koosinus või lineaarfunktsioon.

$$U = U_m \sin \alpha ,$$

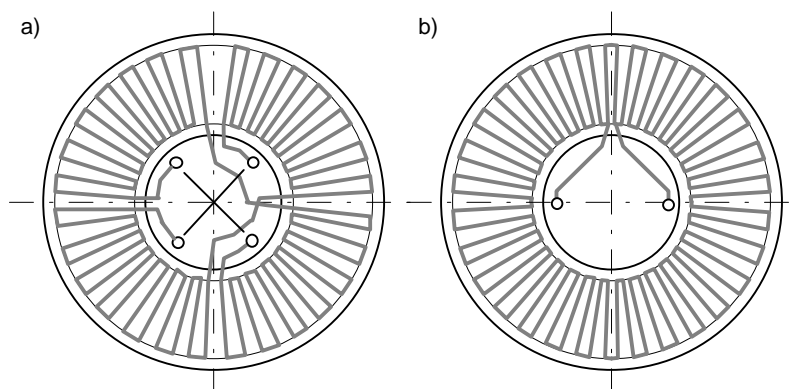
$$U = U_m \cos \alpha , \tag{4.2}$$

$$U = \text{sign}(\sin \alpha) \cdot k\alpha .$$

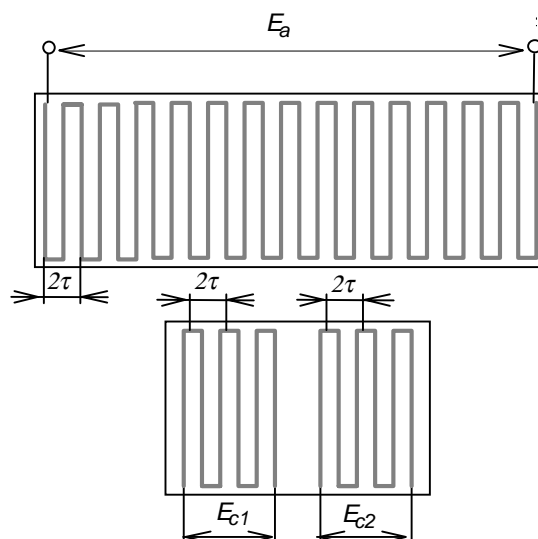
Liikumissuuna määramise loogika on sama kui fototajuriga impulssanduri korral. Valmistatakse nii lineaarseid kui ka pöördliikumiseiga induktosüüne. Kulgliikumise korral nimetatakse masina liikuvat osa liuguriks. Suure ulatusega kulgliikumise mõõtmiseks kasutatakse üksikutest lineaarsetest moodulitest koostatud induktosüüne, mille pikkus võib ulatuda mitme meetrini. Mooduli pikkus on nt. 250 mm ning mähise samm ehk poolusjaotus 2 mm. Liikumisel jääb staatori ja liuguri vahele 0,2 ... 0,3 mm õhupilu.

Trükitud juhtmete asetuse, kuju, laiuse ja poolusjaotuse õige valikuga saavutatakse staatori ja liuguri mähiste vastastikuse induktiivsuse ja järelikult ka indutseeritud emj. siinuseline muutumine sõltuvalt liuguri asendist. Induktosüüni ergutusmähist toidetakse kõrgsagedusliku (10...100 kHz) vahelduvpingega.

Mehaaniliste deformatsioonide vältimiseks ja täpsuse suurendamiseks paiknevad trükitud mähised massiivsel alusel, mis suurendab oluliselt anduri massi. Suure massi tõttu pole induktosüünide kasutamine kergetes ja kiiretes masinates, nt. robotites, otstarbekas.



Joonis 4.5. Pöördliikumisega induktosüün:  
a) staator; b) rootor



Joonis 4.6. Lineaarse induktosüüni moodul

## 4.2. Kiirusandurid

Elektrijamites kasutatakse kiiruse mõõtmiseks kõige enam tahhogeneeraatoreid. Viimased on väikese võimsusega mikroelektrimasinad, mille väljundist saadav pinge on võrdeline rootori nurkkiirusega. Tahhogeneaatorite nagu ka enamike elektromehaaniliste muundurite töö põhineb elektromagnetilisel induksioonil. Vastavalt sellele on magnetväljas liikuvast juhtmes indutseeritud elektromotoorjõud võrdeline juhtme pikkuse, tema kiiruse ning magnetilise induksiooni korrutisega. Kuna tahhogeneaatori pinge sõltub otseselt kiirusest võib seda kiiruse mõõtmise viisi nimetada ka vahetuks mõõtmiseks. Kiiruse kaudsel mõõtmisel leitakse kiirus läbitud teepikkuse ning selleks kulunud ajavahemiku suhtena. Sellel põhimõttel töötavad kõik kiiruse impulssandurid.

**Tahhgeneraatoritena** kasutatakse alalisvoolu-, sünkroon- ja asünkroonmasinaid. Kõiki tahhgeneraatoreid iseloomustavad:

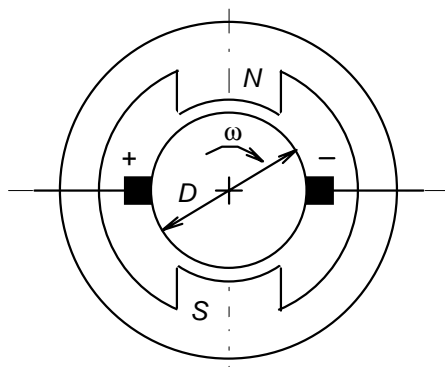
- väljundi tunnusjoon  $U_{tg} = f(\omega)$ , selle tõus ning lineaarsus,
- väljundpinge sümmeetrilisus,
- minimaalne jääkpinge seisva rootori korral,
- väljundvõimsus või koormatavus,
- väljundpinge pulsatsioon,
- rootori inertsimoment,
- parameetrite stabiilsus väliste mõjutuste suhtes,
- töökindlus.

**Alalisvoolutahhgeneraator** on väikese võimsusega alalisvoolugeneraator, kus magnetväli tekitatakse ergutusmähisega või püsिमagnetitega. Tahhgeneraatori väljundpinge

$$U_{tg} = E_{tg} - I_{tg}r_{tg} - \Delta U_h, \quad (4.3)$$

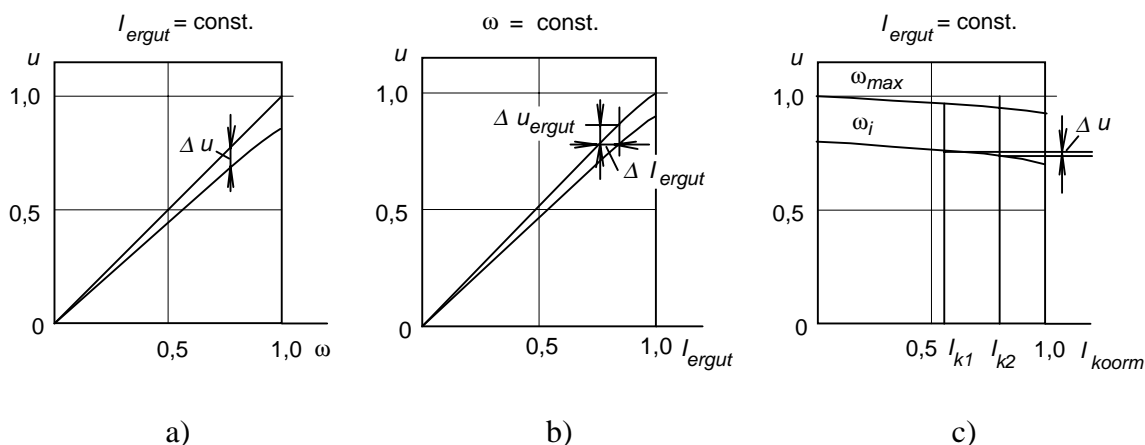
kus  $E_{tg}$  on nurkkiirusega  $\omega$  võrdeline ankru elektromotoorjõud  $E_{tg} = k\Phi\omega$ ,  $I_{tg}$  tahhgeneraatori vool,  $r_{tg}$  ankruahela takistus ning  $\Delta U_h$  pingelang harjadel. Tegur  $k\Phi$  sõltub tahhgeneraatori ehitusest ning magnetvoost. Järelikult, püsikoormusel on tahhgeneraatori väljundpinge võrdeline rootori nurkkiirusega

$$U_{tg} = \frac{k\Phi}{1 + \frac{r_{tg}}{R_k}} \omega = k\omega. \quad (4.4)$$



Joonis 4.7. Alalisvoolu tahhgeneraator

Tahhgeneraatori tööd iseloomustavad mitmed tunnusjooned (joonis 4.8). Tahhgeneraatori ergutusvoolu (magnetvoo), koormusvoolu või masina parameetrite muutumisel tekib mõõteviga  $\Delta u$ .



Joonis 4.8. Tahhgeneraatori tunnusjooni:

a) sisend-väljnd tunnusjoon; b) ergutusvoolu-väljndi tunnusjoon; c) koormusvoolu-väljndi tunnusjoon

**Sünkroontahhgeneraator** on oma ehituselt sarnane ühefaasilise sünkroongeneraatoriga. Tema rootoriks on püsomagnetitest koostatud tähekujuline väljepoolustega magnetahel. Püsomagnetite rakendamine võimaldab loobuda ergutusmähisest ja kontaktrõngastest ning suurendada sellega masina töökindlust. Tahhgeneraatori pöörlemisel indutseeritakse tema staatorimähises elektromotoorjõud, mille amplituud ja sagedus on võrdelised rootori pöörlemissagedusega. Kuna sageduse muutumisel muutuvad ka kõik ahelasse lülitatud reaktiivtakistused, tekib kiiruse suure diapasooni korral märgatav viga. Mõnikord saab kiirust mõõta indutseeritud elektromotoorjõu sageduse kaudu. Vigade vähendamiseks on tahhgeneraatorid kasulik ehitada suure pooluste arvuga. Selle tulemusena väheneb väljundpinge pulsatsioon neil juhtudel, kui tahhgeneraatori väljundpinget alaldatakse.

**Asünkroontahhgeneraator** kujutab endast kahefaasilist lühisrootoriga asünkroonmasinat. Staatoril paikneb kaks teineteise suhtes  $90^\circ$  võrra nihutatud mähist, millest ühte, ergutusmähist, toidetakse konstantse sageduse ja amplituudiga vahelduvpingeallikast. Teisest, generaatorimähisest, saadakse aga rootori pöörlemissagedusega võrdeline pingsignaali. Asünkroontahhgeneraatoritel on mittelineaarne väljundtunnusjoon ja suur jääkpinge nullkiirusel. Puuduseks on ka nende suured mõõtmed ja mass.

### 4.3. Kiirendusandurid

Kiirendus- ja vibratsioonandurid (*accelerometers*) on elektromehaanilised muundurid, mis genereerivad elektromotoorjõudu objekti raputamisel või vibratsiooni korral.

**Piesoelektriliste kiirendusandurite** väljundsignaal sõltub kiirendusest lineaarselt laias dünaamilises ja sagedusvahemikus. Nende mass on mõnest kümnendikust grammist kuni mõnesaja grammi. Andurite tundlikkuseks loetakse väljndi elektromotoorjõu ja kiirenduse suhet. Eri andurite tundlikkus on vahemikus  $0,1 \dots 1000 \text{ mV/ms}^{-2}$ , kusjuures suurema massiga anduritel on tavaliselt ka suurem tundlikkus. Kiirendus- ja



vibratsiooniandureid kasutatakse mitmetel elualadel alates seismilistest uuringutest kuni tööstus- ja energeetikaettevõteteni, nt pöörlevate masinate või pneumaatiliste tööriistade vibratsiooni mõõtmiseks. Kiirendusandurid on laialt kasutusel ka laboratoorses uuringutes mitmesuguste seadmete mehaanilise vastupidavuse määramisel. Kiirendus- ja vibratsiooniandurite sagedusdiapasoon on 1...100 kHz.

Kiirendusanduri või akseleromeetri ehitus on näidatud joonisel 4.9. Anduri tajuriks on kettakujulised piesoelemendid, mille vastas on kalibreeritud raskus (mõõtemass). Mass on surutud jäiga vedru abil vastu piesoelemente ning kiirenduse või vibratsiooni ajal toimib piesoelementidele massi poolt tekitatud inertsijõud. Piesoelement genereerib kiirendusega võrdelise elektromotoorjõu.

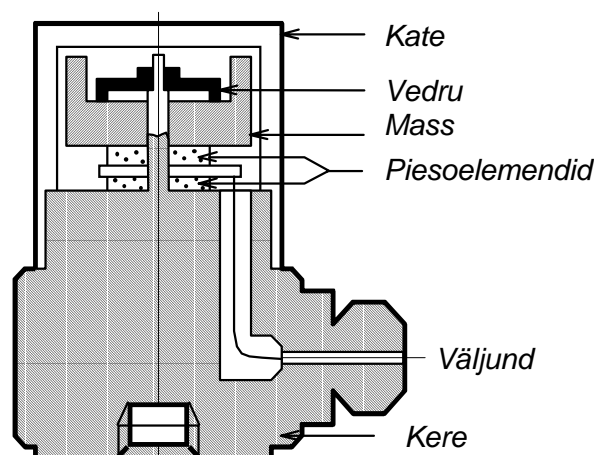
Täpse mõõtetulemi saamiseks tuleb kiirendusandur paigutada siledale pinnale ning kinnitada jäigalt uuritava objektiga. Mehaaniliselt moodustab kiirendusandur kahemassilise elastse sidemega süsteemi. Anduri piesoelemendiga seotud mõõtemass (*seismic mass*)  $m_s$  on tavaliselt palju väiksem anduri kere ning sellega seotud mõõdetava objekti massist  $m_a$ . Vedru jäikust iseloomustab tegur  $k$ . Kiirendusanduri resonantssagedus

$$f_0 = f_s \sqrt{1 + \frac{m_s}{m_a}}, \quad (4.5)$$

kus  $f_s$  on anduri mõõtemassi omavõnkesagedus

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_s}}. \quad (4.6)$$

Valemitest järeldeb, et anduri sagedusliku mõõtediapasooni suurendamiseks on otstarbekas vähendada mõõtemassi suurust ja järelikult ka anduri mõõtmeid. Kahjuks väheneb sel juhul ka väljundsignaal.



Joonis 4.9. Piesoelektrilise kiirendusanduri ehitus

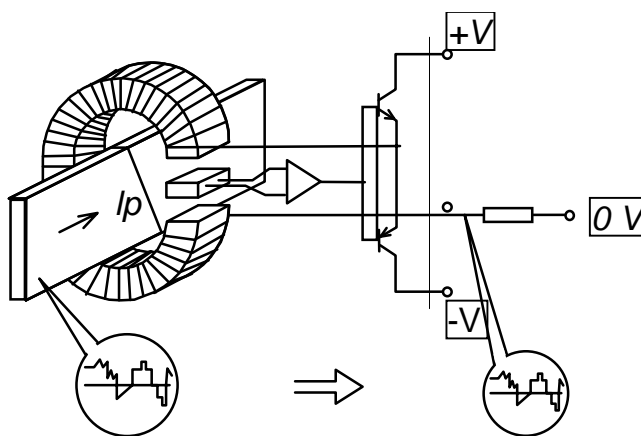
## 4.4. Vooluandurid

Vooluanduritena kasutatakse vooluahelasse lülitatud kalibreeritud takisteid ( unte), vahelduvvoolu ja alalisvoolu voolutrafosid, ning Halli tajuritega vooluandureid. Kalibreeritud takistite pingelangu mõõtmise korral on põhiprobleemiks jõu- ja mõõteahelate galvaanilise ühenduse olemasolu. Mõõteahelate galvaaniliseks eraldamiseks kasutatakse optilise eraldusega mõõtevõimendeid. Voolutrafood tagavad samuti ahelate galvaanilise eraldatuse, kuid nende puuduseks on inertsus, mille tõttu pole võimalik mõõta mittesiinuselise voolu hetkväärtust. Trafode peamiseks eeliseks on nende lihtsus. Viimastel aastatel on vooluanduritena üha enam kasutusele võetud Halli tajuril põhinevaid vooluandureid (joonis 4.10). Andur koosneb õhupiluga suletud magnetahelast, mida läbib vooluga juhe või lattu. Vooluga juhti ümbritseb magnetväli, mille tugevus on võrdeline vooluga ning mille magnetvoo suund määratakse krovireeglga. Magnetväli sulgub läbi magnetahela südamikule ning õhupilu. Õhupilus asub Halli tajur, mille väljundis genereeritakse magnetväljaga võrdeline elektromotoorjõud. Halli elektromotoorjõud võimendatakse operatsioonivõimendi ning selle väljundisse lülitatud kahepoolaarse võimsusvõimendusastmega. Võimendi väljundiga on ühendamata magnetahela südamikule keritud tagasisidemähis ning sellega jadamisi väljundisse lülitatud koormustakisti.

Negatiivne tagasiside tekitab mähises voolu ning see omakorda magnetvoo, mis on suunatud mõõdetava voolu poolt tekitatud magnetvoole vastu. Seega toimib anduris negatiivne tagasiside magnetvoo järgi ning südamikku läbib nullile lähedane magnetvoog. Seega, primaarvoolu  $I_p$  iseloomustab koormustakistit  $R_k$  läbiv tagasisidevool  $I_s$ .

$$I_s = I_p \cdot w, \quad (4.7)$$

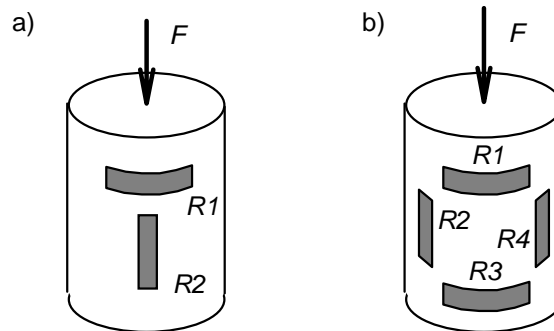
kus  $w$  on tagasisidemähise keerdude arv. Sekundaarvool  $I_s$  tekitab koormustakistil  $R_k$  pingelangu, mis on võrdeline mõõdetava vooluga. Tänu negatiivsele tagasisidele suurenevad anduri häirekindlus ning toimekiirus.



Joonis 4.10. Halli tajuriga vooluanduri tööpõhimõte

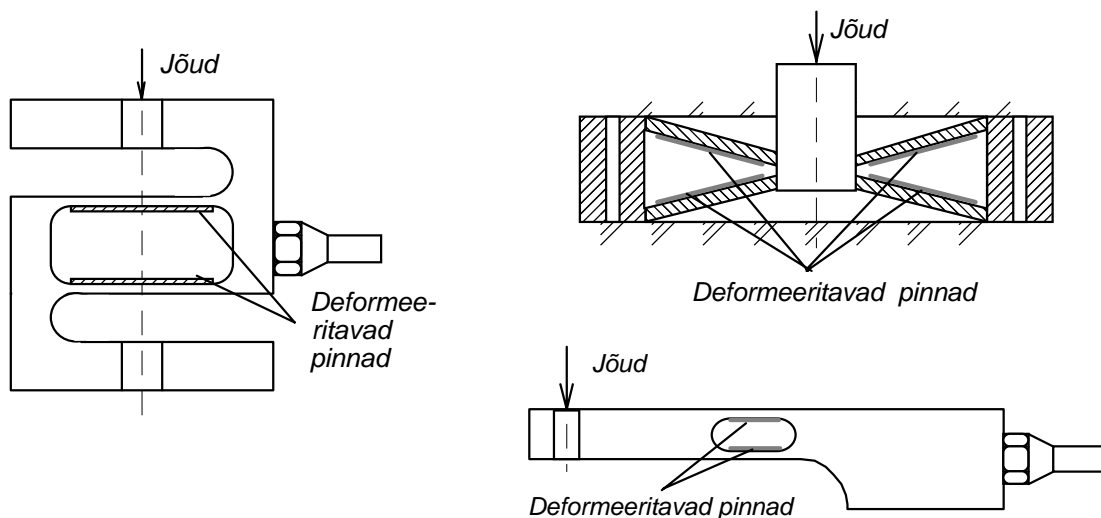
## 4.5. Jõuandurid

Jõudude mõõtmiseks kasutatakse kalibreeritud elastseid mehaanilisi muundureid koos deformatsioonianduritega. Väikeste deformatsioonide mõõtmiseks sobivad mitmesugused tajurid, s. h. ka tensotajurid. Joonisel 4.11 on näidatud tensotajurite asetus elastse silindri pinnal. Jõu toimel silindri pikkus väheneb ja läbimõõt suureneb. Vastavalt sellele paigutatakse osa tensotajureid silindri telje suunas, osa aga sellega risti. Tensotajurid lülitatakse mõõtesilda nii, et silla väljundsignaal oleks maksimaalne.



Joonis 4.11. Jõu mõõtmine tensotajuritega  
a) kahe tensotajuriga; b) nelja tensotajuriga

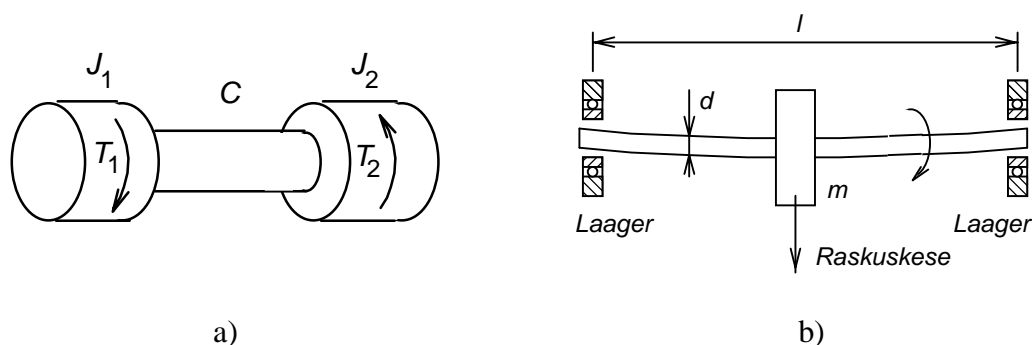
Jõuandurite ehitus sõltub kasutusotstarbest ning mõõdetava jõu suurusel. Joonisel 4.12 on näidatud mõne jõuanduri konstruktsioon. Kõigis neis mõõdetakse elastse mõõdetekha deformatsiooni, kusjuures anduris on deformeeritavaid pindu, mis jõu toimel kokku surutakse ning ka pindu, mis sama jõu toimel välja venitatakse. Tensandurid kinnitatakse kindlalt deformeeritavatele pindadele ning ühendatakse elektriliselt mõõtesilla õlgadesse.



Joonis 4.12. Jõuandurite konstruktsioone

## 4.6. Momendiandurid

Masinate pöördemomendiandurite töö põhineb kalibreeritud elastsusega mõõtevõlli väändenurga mõõtmisel. Mõõtevõll ühendatakse momendi ülekandeahelasse, nt. mootori ja töomasina võllide vahele. Raskete töötingimuste tõttu (suur pöörlemiskiirus, vibratsioon, mootori lähedusest tingitud elektromagnetilised häired vms.) tuleb momendianduri valmistamisel ning paigaldamisel erilist tähelepanu pöörata täpsusele ning töökindlusele. Igasugune ebatäpsus põhjustab lisahäiringuid ning järelkult vähendab mõõtetäpsust. Momendianduri elastne mõõtevõll (torsioonvõll) koos tema sisendis ja väljundis pöörlevate massidega moodustavad väände- ja paindevõnkumisi põhjustava mehaanilise süsteemi (joonis 4.13). Tuleb kanda hoolt selle eest, et masinate töötamisel ei tekiks mõõtevõlli omavõnkumisi, mis põhjustavad mõõtetulemi vääramise ning piirjuhtumil isegi võlli purunemise.



Joonis 4.13. Momendianduri elastse võlli deformatsioonid:  
a) väändedeformatsioon, b) paindedeformatsioon

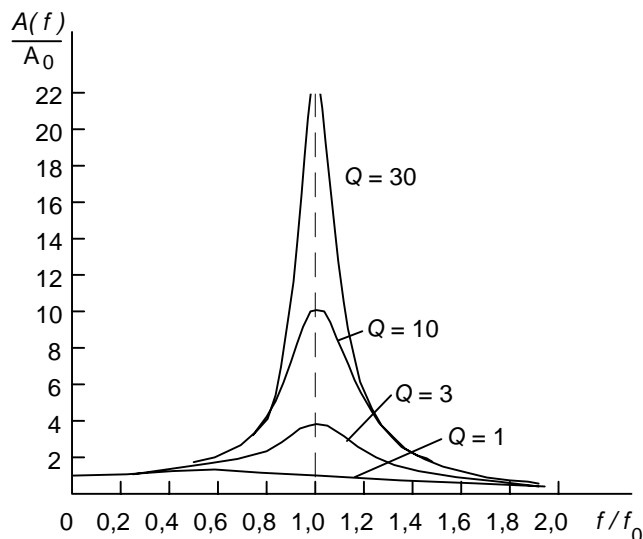
Võlli väändevõnkumiste omasagedus

$$f_{ve} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{J_1} + \frac{C}{J_2}} \quad (4.10)$$

ja sellele vastav kriitiline pöörlemissagedus

$$n_{kr} = \frac{f_{ve}}{60}, \quad \omega_{kr} = \frac{f_{ve}}{2\pi}. \quad (4.11)$$

Väändevõnkumiste amplituud resonantssageduse lähedal sõltub süsteemi sumbuvasusest või hüvetegurist  $Q$  (joonis 4.14). Praktikas valitakse piirkiirus nii, et sellest tingitud sundvõnkumiste sagedus oleks väiksem kui  $0,5 f_0$ .



Joonis 4.14. Väändevõnkumiste amplituud resonantssageduse lähedal

Paindevõnkumiste omasagedus

$$f_{pe} \approx 35 \sqrt{\frac{EI_Y}{l^3 m}}, \quad (4.12)$$

kus  $E$  on elastsusmoodul (terase korral  $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$ ),  $l$  - laagrite vaheline kaugus (mm), mõõtevõlli ja sidurite mass [kg],  $I_Y$  - võlli pinnamoment (ümarristolõike korral  $I_Y = \pi d^4/64$ ),  $Y$  - võlli läbipaine.

Vibratsiooni kiirendus

$$a = 4\pi^2 n^2 x \quad (4.13)$$

ja kiirus

$$v = 2\pi n x, \quad (4.14)$$

kus  $x$  on radiaalsuunaline võnkumiste amplituud [m] ja  $n$  pöörlemissagedus [Hz]. Vibratsiooni võnkumiste amplituudi, kiirenduse ja kiiruse lubatud piirväärtused antakse anduri tehnilistes andmetes.

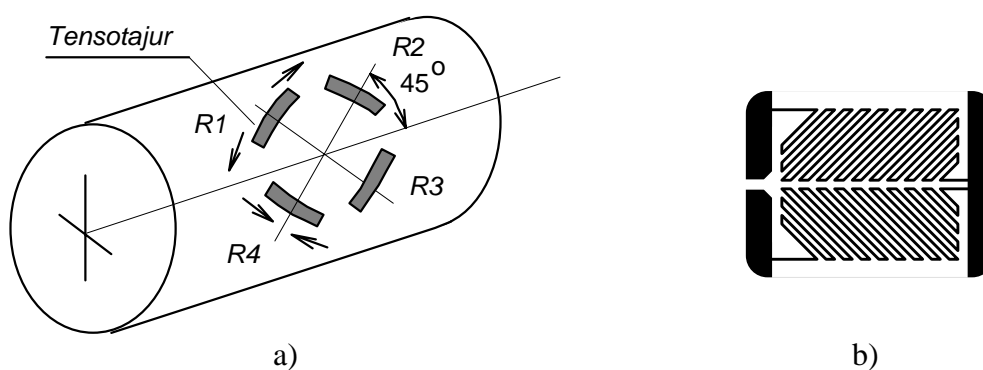
Võnkumised tekitatakse tasakaalustamata jääkmasside poolt. Kriitilisel kiirusel, mis vastab mehaanilisele resonantssagedusele, need võnkumised võimenduvad ning muutuvad mõõtesüsteemile ohtlikuks. Momendianduri mõõtevõlli valikul tuleb seepärast arvestada, talitlusel tekkivaid võimalikke staatilisi ja dünaamilisi ülekoormusi. Soovitatakse, et tegelikult mõõdetav moment moodustaks momendianduri mõõtepiirkonnast alla 70 %.

Momendi ülekandeahela mehaaniliste pingete vähendamiseks ühendatakse momendiandur sidurite vahele kas ujuvasendis või jalale kinnitatuna.

Pöördemomendi andurites kasutatakse mõõtevõlli väändenurga määramiseks

- tensotajureid,
- induktiivtajureid,
- transformatoorseid tajureid,
- optotajureid.

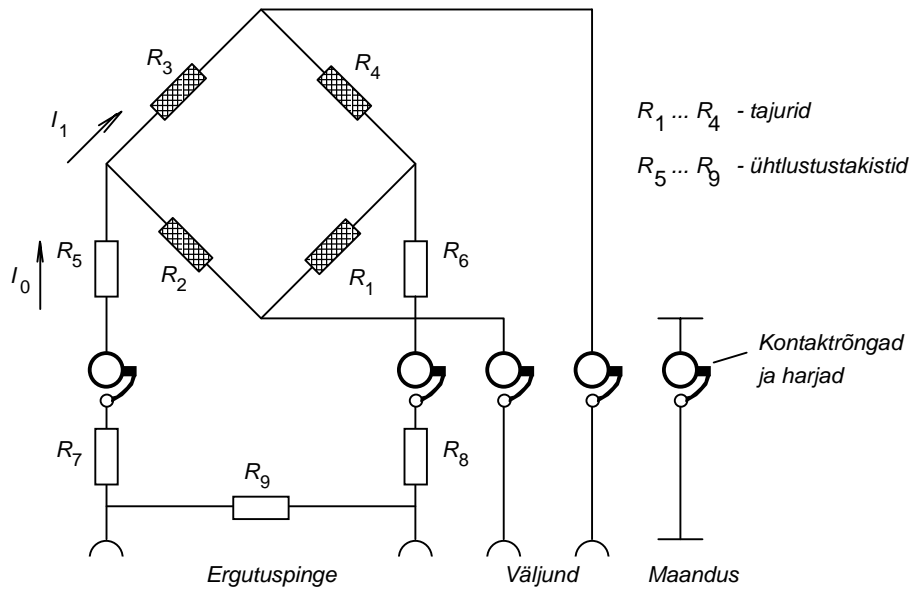
**Tensotajuritega** momendianduris paigutatakse tajurid võlli telje suhtes kaldu  $45^\circ$  nurga alla (joonis 4.15). Võlli väände korral venitatakse tajureid R1 ja R3 ning surutakse kokku tajureid R2 ja R4. Elektriliselt lülitatakse tajurid mõõtesilda (joonis 4.16) Lisaks harilikele tensotajuritele saab momendiandurites kasutada spetsiaalseid tensotajureid, kus tensotundlik juht asetseb tajuri telje suhtes  $45^\circ$  nurga all (joonis 4.15, b). Tensotajuritega momendiandurite korral on põhiprobleemiks signaali ülekandmine pöörlevalt võllilt seisvale mõõteaparatuurile. Harilikult kasutatakse selleks otstarbeks kontaktrõngaid ning harju. Kuna tensotajurite väljundsignaal on suhteliselt väike, siis on oht, et libiseval kontaktil tekkinud pingelang ning häired takistavad kasuliku signaali mõõtmist. Seepärast on tensotajuritega momendiandurites kasutusel tehniline lahendus, kus mõõtesilla toiteahelad (pingestabilisaator) ning sageli ka signaali võimendi paigutatakse pöörlevale võllile. Kontaktrõngaste ja harjade kaudu kantakse sel juhul üle suhteliselt suur alalispingsesignaal (10...24 V). Kontaktrõngaste ja harjade asemel saab signaalide ülekandmiseks kasutada ka pöörlevaid transformaatoreid. Sel juhul kantakse läbi trafo kõrgsageduslik (3...10 kHz) vahelduvvoolusignaal. Mõõtesilla toiteahelad ning väljundsignaali võimendi asuvad samuti pöörleva võllil.



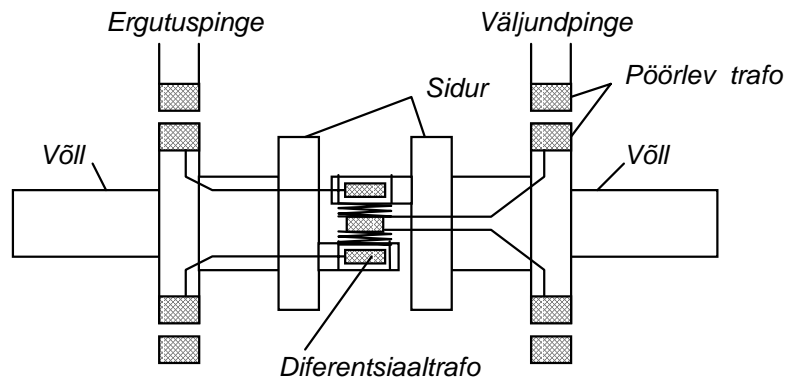
Joonis 4.15. Tensotajurite kinnitamine pöördemomendi mõõtevõllile:  
a) harilike tensotajurite kasutamine; b) spetsiaalne pöördemomendi tensotajur

**Diferentsiaaltrafoga momendianduri** mõõtesüsteem on näidatud joonisel 4.17. Trafo mõõtemähise asend ergutusmähise suhtes sõltub pöördemomendi märgist ja suurusest. Diferentsiaaltrafo pöörleb koos võlliga ning tema ergutusmähised on ühendatud momenti ülekandva siduri ühe (vedava) poolega, mõõtemähis aga siduri teise (veetava) poolega. Diferentsiaaltrafo ergutusmähist toidetakse läbi pöörleva trafo Tr 1. Ergutusmähis koosneb kahest osast, mis on lülitatud teineteisele vastu.

Pöördemomendi puudumisel, kui mõõtemähis asub kahe ergutusmähise keskel, on selles indutseeritud pinge ligikaudu null. Pöördemomendi tõttu nihkuvad omavahel elastselt ühendatud siduri primaar ja sekundaarpool võrdeliselt momendi suurusega. Koos sellega nihkub ka diferentsiaaltrafo mõõtemähis, kus indutseeritakse nihkega võrdeline pinge. Väljundsignaal kantakse läbi pöörleva trafo Tr 2 seisvale mõõteaparatuurile.



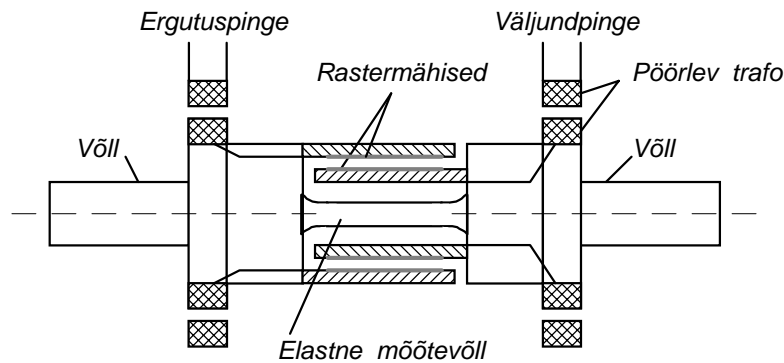
Joonis 4.16. Võllil paiknevate tajuritega momendianduri skeem



Joonis 4.17. Diferentsiaaltrafoga momendiandur

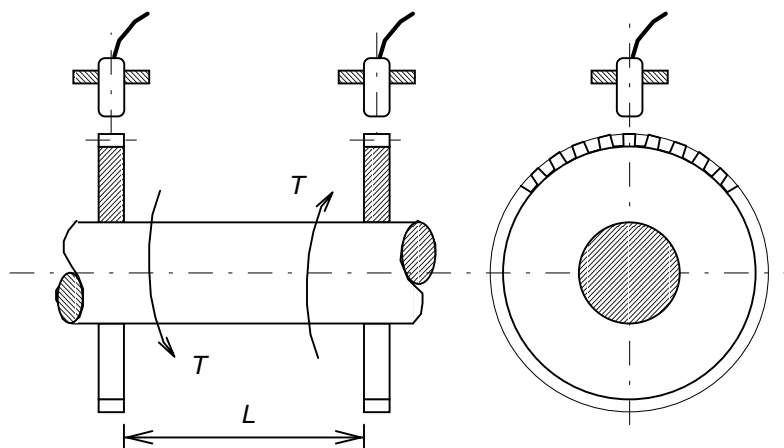
**Rastermähistega momendianduri** ehitus on näidatud joonisel 4.18. Rastermähiseid nimetatakse mõnikord ka meandermähisteks. Nimetus meander tähendab täisnurksetest murdjoontest ornamenti ning on tuletatud tasandikul lookleva Kreeka jõe Meanderese nime järgi. Rastermähised asuvad kahel teineteise lähedal oleval pinnal, mis nihkuvad sõltuvalt elastse mõõtevõlli deformatsioonist. Mähised koosnevad paljudest eri suunas mähitud poolidest, kusjuures üks mähis on ergutusmähis, teine mõõtemähis.

Pöördemomendi puudumisel on mõõtemähises indutseeritud pinge ligikaudu null. Momendi olemasolu korral deformeerub elastne mõõtevõll, rastermähised nihkuvad teineteise suhtes ning mõõtemähises indutseeritakse momendist sõltuv pinge. Väljundpinge faasinurga järgi määratakse momendi märk.



Joonis 4.18. Rastermähistega momendiandur

Võlli väändenurka saab mõõta ka **paigalseisvate tajuritega**, mis asuvad pöörleva võlli lähedal. **Hammasmoodulaatoriga momendianduri** tööd selgitab joonis 4.19. Mõõtevõlli mõlemasse otsa kinnitatakse jäigalt hammasrattad. Võlli väändumisel nihkuvad hammasrattaste hambad teineteise suhtes ning põhjustavad tajurite väljundsignaalides faasinihke. Pingete faasinihet loetakse võrdeliseks mõõtevõlli väändenurgaga ning selle tuvastamiseks kasutatakse vastavat elektronlülitust. Hammasrattad etendavad aga väändenurgast sõltuva signaali modulaatori osa. Niisuguse konstruktsiooni korral saab kasutada eri põhimõttel töötavaid induktiivseid ja transformatoorseid tajureid. Optopartaajurite korral kasutatakse valgusvoo modulaatorina pilukettaid ja rastreid.

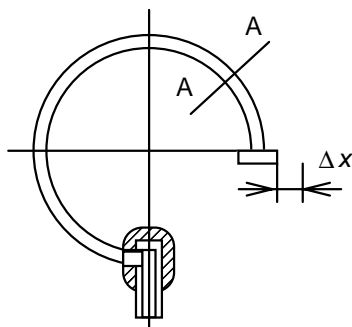


Joonis 4.19. Hammasmoodulaatoriga momendianduri ehitus

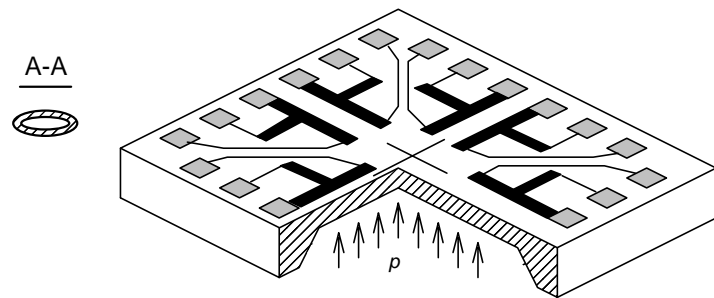


## 4.7. Rõhuandurid

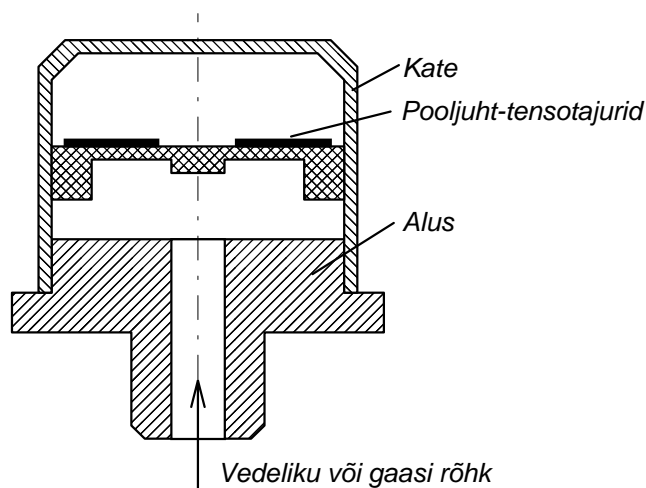
Rõhuandurite töö põhineb nagu ka jõu ja momendiandurite puhul, elastsete deformatsioonide mõõtmisel. Vedelike ja gaaside rõhu mõõtmiseks kasutatakse mitmesuguse kuju ja ehitusega manomeetrilisi vedrusid (joonis 4.20). Vedru jäikus ning järelikut ka deformatsiooni suurus valitakse vastavalt mõõdetavale rõhule ning kasutatava tajuri tüübile. Suuremate deformatsioonide mõõtmiseks sobivad induktiivtajurid. Väikeste deformatsioonide puhul on sobivad tensotajurid. Viimasel ajal kasutatakse üha enam ränikristallil pooljuht-tensotajureid (joonis 4.21). Ühele kristallile on kantud mitu tensotundlikku elementi, mis on omavahel ühendatud mõõtesilla skeemi kohaselt. Pooljuhtkristall paikneb elastsel alusel, mida saab deformeerida jõu, rõhu või momendiga, sõltuvalt sellest, mis otstarbeks andur on ehitatud. Pooljuht-tensotajuriga rõhuanduri ehitus on näidatud joonisel 4.22.



Joonis 4.20. Manomeetiline vedru



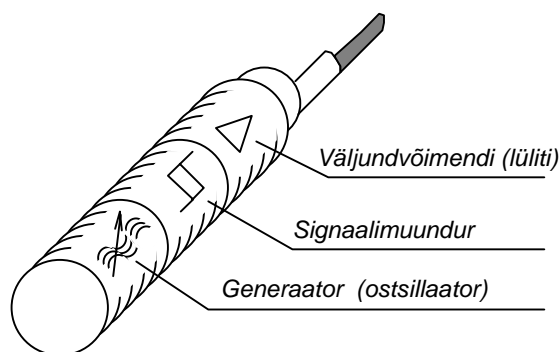
Joonis 4.21. Pooljuhtkristallil tensotajur



Joonis 4.22. Pooljuht-tensotajuriga rõhuandur

## 4.8. Lähedusandurid

Induktiivsed ja mahtuvuslikud lähedusandurid on automaatikasüsteemide tähtsaks komponendiks. Nendega saab koguda infot masinate ja tehnoloogiaprotsesside talitluse kohta ning edastada seda loogikasignaalidena juhtseadmele. Lähedusandurid võimaldavad määrata nii tehnoloogiaseadmete täiturite kui ka töödeldavate esemete asendit (olemasolu etteantud kohas), möödumist ettenähtud punktist, liikumise lõppu, pöörlemissagedust või pöördenurka, samuti loendada esemeid jms.



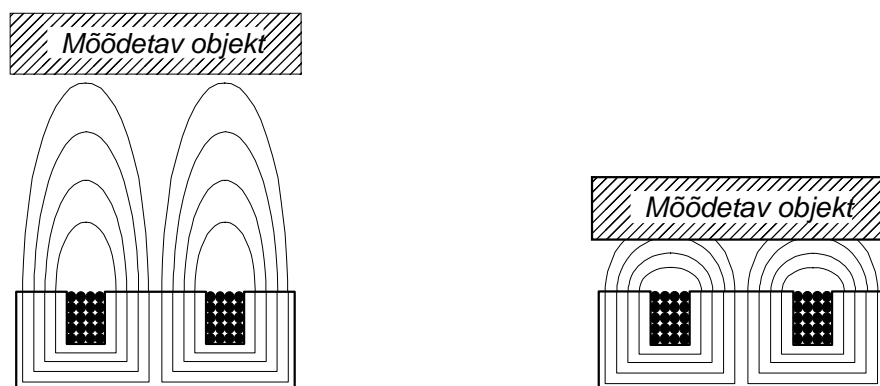
Joonis 4.23. Lähedusanduri üldehitus

Diskreetse väljundiga lähedusandur koosneb tavaliselt kõrgsagedusgeneraatoril põhinevast tajurist, signaalimuundurist ja võimendist (joonis 4.23). Tajurit iseloomustavad tööpõhimõte (induktiivne või mahtuvuslik), kasutusotstarbest sõltuvad kuju ja mõõtmed ning põhilised tehnilised karakteristikud nagu tundlikkus või tundlikkuse sõltuvus mõõdetava objekti ja tajuri vahelisest kaugusest, väljundsignaali hüstereesi olemasolu vms. Lähedusanduri väljundis olevat signaalimuundurit iseloomustavad toiteallika parameetrid (alalis- või vahelduvvool, toitepinge ja -vool, väljundsignaali pinge, lubatav koormusvool jms. Võrreldes kontaktanduritega (piirlülititega) on induktiivsetel ja mahtuvuslikel lähedusanduritel järgmised eelised:

- andur pole kokkupuutes mõõdetava objektiga, mistõttu saab tuvastada määratud või värskest värvitud esemeid,
- anduri rakendamiseks pole vaja rakendada jõudu,
- anduris pole liikuvaid mehaanilisi osi,
- anduril on suur toimekiirus, mis tagab hea ühildatavuse elektronjuhtseadmetega,
- andurit on lihtne kasutada, mis on eriti oluline tööstuskeskkonnas
- anduriga saab mõõta suure kiirusega liikuvaid esemeid.

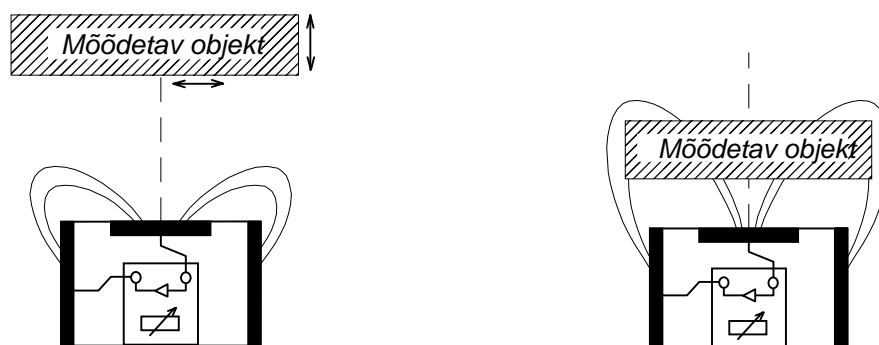
**Induktiivse lähedusanduri** tajur põhineb kõrgsagedusgeneraatoril ehk ostsillaatoril, mille töö sõltub tuvastatava objekti kaugusest. Generaatori mähised moodustavad tajuri tundliku osa, mille lähedal tekitatakse magnetväli. Kui metallist (elektrit juhtiv) objekt satub anduri mähiste magnetvälja mõjupiirkonda, siis selles indutseeritud voolud tekitavad generaatorile lisakoormuse, mida on võimalik mõõta. Lisakoormuse tõttu võib võnkumiste genereerimine katkeda ning rakendub signaalimuunduri juhtlülitus (relee või

loogikalülitus). Vastavalt vajadusele väljastatakse kas loogiline "0" või loogiline "1" signaal, mis vastavad normaalselt lahutatud (N/O) või normaalselt suletud (N/C) kontaktidele.



Joonis 4.24. Induktiivse lähedusanduri tööpõhimõte

**Mahtvusliku lähedusanduri** tajur põhineb kõrgsagedusgeneraatoril ehk ostsillaatoril, mille võnkeahela kondensaator moodustab tajuri tundliku elemendi. Ostsillaatori töötamisel tekib kondensaatori ümber kõrgsageduslik elektriväli. Kui mingi elektrit juhtivast või ka isoleermaterjalist objekt, mille suhteline dielektriline läbitavus on suurem kui 1, satub kondensaatori elektrivälja mõjupiirkonda, siis kondensaatori mahtuvus muutub. Sõltuvalt ostsillaatori ehitusest võib niisugune mahtuvuse muutus põhjustada kas genereerimise katkemise või vastupidi, mahtuvuse muutumisel ostsillaator ergutub ning genereerib kõrgsageduslikku võnkumisi. Ostsillaatori oleku muutumisele reageerib loogikalülitus (relee), mis omakorda moodustab väljundis sulguvale või lahtuvale kontaktile või loogilistele signaalidele "0" ja "1" vastava väljundi.



Joonis 4.25. Mahtvuslike lähedusandurite tööpõhimõte

Tajuri konstruktsiooni järgi liigitatakse lähedusandurid silindrilisteks ja kandilisteks. Sõltuvalt magnetvälja iseloomust jagunevad andurid välis- ja siseanduriteks. Välisandurite korral tekitatakse tajuri aktiivne magnet- või elektriväli väljaspool anduri keret. Siseandurite korral tekitatakse aktiivne magnet- või elektriväli tajuri sees, s. t. tajur reageerib vastavasse avasse pistetud objektile. Eri otstarbeks toodetud lähedusandurid võivad paikneda kas metallist või plastmassist keres. Lähedusandurite häälestamise

hõlbustamiseks on neisse monteeritud rakendumist näitavad valgusdiodid. Asendi täpselt häälestamiseks kinnitatakse andurid alusele, kus nende asendit saab vastavalt vajadusele sujuvalt sättida (häälestada) ning seejärel anduri asukoha täpselt fikseerida.

**Silindriliste andurite** (*cylindrical type sensors*) eeliseks on:

- hõlbustus paigaldus ning häälestus,
- kinnine sisseehitatud ühendusjuhtmete või pistikuga kere,
- väikesed mõõtmed, mis võimaldab monteerida neid ka masinate raskesti ligipääsetavatesse osadesse,
- hea reguleeritavus mõõteskaalaga (*indexed*) kinnitusalusel abil, millega saab täpselt fikseerida anduri asukoha,
- võimalus tellida ka roostevabast terasest kerega andureid.

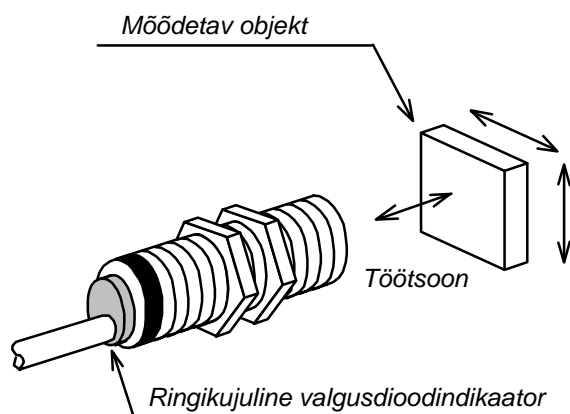
Silindrilised lähedusandurid jagunevad metall- ja plastikkerega anduriteks. Mõlemal juhul on võimalik valida lühikese kerega või pika kerega (A-kuju) andurite vahel.

**Kandiliste andurite** (*block type sensors*) eeliseks on:

- vahetu reguleeritavus, mistõttu järelhäälestust pole vaja,
- väljundklemmide olemasolu, mis tagab ühendamise paindlikkuse,
- lihtsus.

Kandilised lähedusandurid jagunevad välisanduriteks (*fixed body* ehk Cenelec'i C-kuju) ning siseanduriteks (*plug-in body* ehk Cenelec'i D-kuju)

Praktikas on enamik lähedusanduriga tajutavaid objekte terasest. Objektide mõõtmed peavad vastama lähedusanduri **tajuripinna** (*sensing face*) mõõtmetele. Objektide kindlaks tuvastamiseks, peavad need tajurist mööduma mitte kaugemalt, kui see on ette nähtud lähedusanduri tehnilistes andmetes. Kõigi erirakenduste korral, nagu liiga väikesed või erinevast materjalist jms. objektid, tuleb teha tajukauguse täpne arvutus.



Joonis 4.26. Lähedusanduri tajukaugus ja töötsoon

Lähedusanduri võib paigutada kas ümbritseva pinna tasandile (*flush mounting*), kus tajukaugust on piiratud pinna varjestava mõju tõttu või ümbritseva pinna õnarusse (*non-flush mounting*), s. t. varjestamata.

Tajuri tasapindasetuse (*flush mounting*) korral on andur on hästi kaitstud ning ümbritsevat metallpinda võib vedelikuga pesta. Puuduseks on anduri väiksem tundlikkus.

Tajuri paigutamisel ümbritseva pinna õnarusse, s. o. süvisasetuse (*non-flush mounting*) puhul on tajukaugus 50...100 % suurem. Anduri ümber oleva vaba ruumi ehk süvise mõõtmed, mille korral oluliselt väheneb ümbritseva metalli mõju, saab määrata vastavalt paigaldusjuhendis antud soovitudele.



Joonis 4.27. Lähedusanduri paigutamine:

a) tajuri paigutamine ümbritseva pinna tasandile, b) tajuri paigutamine ümbritseva pinna õnarusse

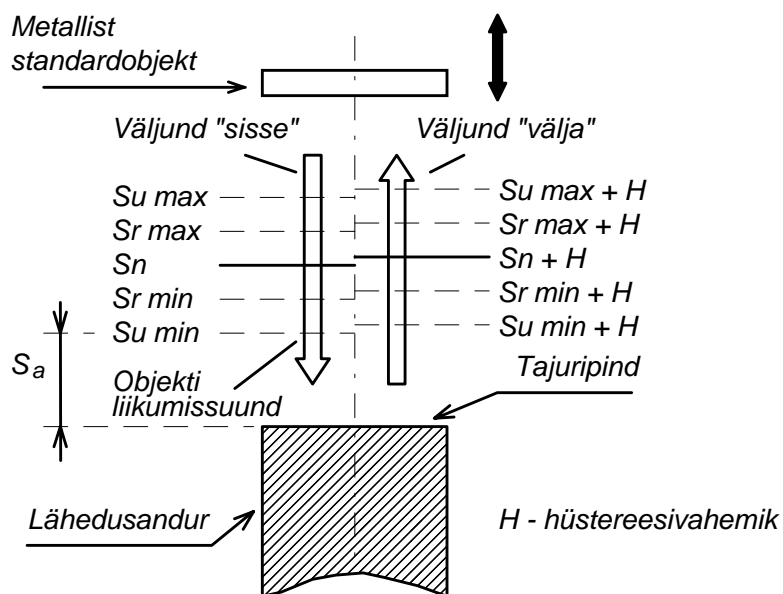
Lähedusanduri tajukauguse mõistet selgitab joonis 4.28

**Nimitajukaugus  $S_n$**  (*nominal or rated sensing distance*) on normeeritud töövahemik tajuri tööpinna ja objekti vahel, mille jaoks andur on projekteeritud. See ei arvesta anduri valmistamise tehnoloogiast põhjustatud tehniliste näitajate tolerantsi või talitluse ajal toimuvaid temperatuuri, toitepinge jms. muutusi.

**Reaalne tajukaugus  $S_r$**  (*real sensing distance*) on nimipingel ( $U_n$ ) ja ümbritseva keskkonna normtemperatuuril ( $T_n$ ) mõõdetud tajukaugus, mis peab olema 90...110 % nimitajukaugusest ehk  $0,9S_n \leq S_r \leq 1,1S_n$ .

**Tegelik tajukaugus  $S_u$**  (*usable sensing distance*) arvestab ümbritseva keskkonna temperatuuri ( $T_a$ ) ja toitepinge ( $U_b$ ) muutumisega seotud piiranguid ning see peab olema 90...110 % reaalsest tajukaugusest ehk  $0,9S_r \leq S_u \leq 1,1S_r$ .

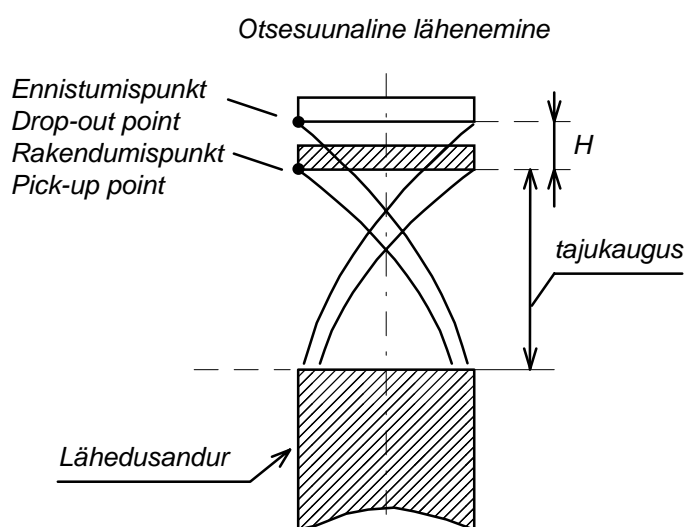
**Töötsoon  $S_a$**  (*operating zone*) on 0...81 % nimitajukaugusest  $S_n$  ehk  $0 \leq S_a \leq 0,9 \times 0,9 \times S_n$ . See on anduri töötsoon ja vastab piirkonnale kus standardse metallobjekti tuvastamine on tagatud, kuigi keskkonna temperatuur ja toitepinge võivad muutuda.



Joonis 4.28. Lähedusanduri tajukauguse määratlemine

**Standardne metallobjekt** (*standard metal target*) on 1 mm paksune ruudukujuline pehmest terasest Fe 360 plaat. Ruudu külje pikkus  $a$  on võrdne ümarristlõikega tajuripinnale graveeritud ringjoone läbimõõduga või kolmekordse tajukaugusega  $S_n$ . Kui on ette antud mõlemad suurused ( $a$  ja  $S_n$ ), kasutatakse neist kahest suuremat.

**Lähedusanduri hüsteresivahemik ehk vahesiire  $H$**  (*differential travel*) on standartse metallobjekti otsesuunalisele lähenemisele ning eemaldumisele vastavate anduri rakendumis- (*pick-up point*) ja ennistumispunktide (*drop-out point*) vaheline kaugus. Vahesiiret iseloomustatakse protsentides reaalse tajukauguse  $S_r$  suhtes.



Joonis 4.29. Lähedusanduri hüsteresivahemik

**Korratavustäpsus  $R$**  (*repeatability*) määratakse tajukauguse paljukordse kontrollimisega. Lugemid tehakse küllalt pika aja jooksul, mil andurile toimivad keskkonna ekstreemsed mõjurid, nt. 8 tunni jooksul ja temperatuurivahemikus 10...30 °C, kusjuures toitepinge muutub nimipinge suhtes  $\pm 5\%$ . **Korratavusviga** väljendatakse protsentides reaalse tajukauguse  $S_r$  suhtes.

**Tajukauguse parandustegurid.** Tajukaugus sõltub ümbritseva keskkonna temperatuurist, tuvastatavate objektide materjalist, kujust ja mõõtmetest ning anduri toitepingest. Praktikas on enamik objekte tehtud terasest ning nende objektide mõõtmed vastavad standardobjekti mõõtmetele või on sellest suuremad. Kõigil nendel juhtudel tuleb kasutada vastavate lähedusandurite tehnilistes andmetes antud tajukauguse väärtusi  $S_a \leq 0,9 \times 0,9 \times S_n$ . Erirakenduste korral, kui töötatakse tavalisest erineva temperatuuriga keskkonnas, kasutatakse ka teistest materjalidest objekte, mille mõõtmed erinevad standardobjektist, saab tajukauguse täpse väärtuse arvutada vastavaid parandustegureid arvestades. Tajukauguse suurust mõjutavad:

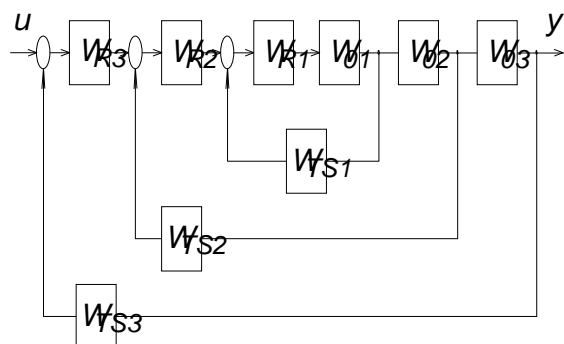
- ümbritseva keskkonna temperatuuri muutumine,
- mõõdetava objekti erinevad materjalid,
- objekti mõõtmete muutumine,
- lähedusanduri toitepinge muutumine.

Keskkonna temperatuuri, objekti materjali ja mõõtmete ning toitepinge muutumist arvestatakse vastavate **parandusteguritega**.

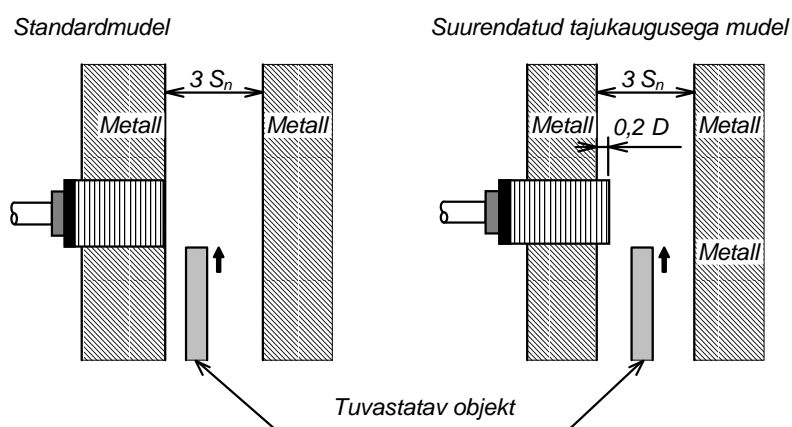
#### 4.8.1. Lähedusandurite paigaldusolud

Andurite paigaldamisel võib eristada mehaanilisi, s. o. nende kinnitamise ja asendi täpse fikseerimisega ning elektriliste ühendustega seotud probleeme. Andurite paigaldamisel kasutatakse asendi täpseks fikseerimiseks kinnitusalusust. Aluse reguleerimiskruvide abil saab anduri asendit sujuvalt muuta ka pärast seda, kui andur on kinnitatud. Alusel on skaala, mis võimaldab anduri vahetamisel paigaldada uue anduri täpselt samasse asendisse kui endine.

Lähedusandurite paigaldamisel tuleb arvestada nende ligiduses olevate metallesemetega, mis võivad mõjutada andurite talitlust. Seepärast nähakse tootja poolt ette anduri tajuripinna teatud minimaalkaugused ümbritsevatest metallesemetest. Eri olukordades võivad need kaugused, nagu ka anduri tajukaugus, muutuda. Silindriliste andurite paigaldamisest annavad ülevaate joonised 4.30 ja 4.31. Iga anduri lähedusse sattunud metallese mõjutab anduri tööd, kuna see moonutab tajuripinda ümbritsevat magnetvälja. Andurit ei tohi paigaldada metallesemete uretesse või nurkadesse, mis mõjutavad oluliselt anduri tajukaugust. Lisaks koguneb masina pesemisel või tööriista jahutamisel uretesse vedelik, mis võib anduri rikkuda. Kahjulikud keskkonnamõjutused, nagu tajuripinda ümbritsevad metallesemed, kõrge või madal temperatuur, metallipuru või laastud, toovad endaga vältimatult kaasa täiendavate meetmete rakendamise vajaduse.



Joonis 4.30. Süvisasetusega metallpinna õnarusse paigaldatud lähedusandur



Joonis 4.31. Metallpinna tasandile või väljaulatuvalt (*flush mounting*) paigaldatud lähedusandurid

Lähedusanduri paigaldamisel tuleb erilist tähelepanu pöörata anduri ühendusjuhtmetele (ühenduskaablile), mida talitluse ajal ei tohi mõjutada täiendavad piki- ega põikijõud ning vibratsioon. Seepärast tuleb ühendusjuhtmed (kaabel) kindlalt kinnitada, jättes võimalike pikijõudude vältimiseks kaablisse aasad või lõtkud. Eriti hästi peavad ühendusjuhtmed olema kaitstud anduri kinnituskoha lähedalt. Selleks otstarbeks saab kasutada ühenduskoha jäikust suurendavat paigaldustoru (*CNOMO adaptor*).

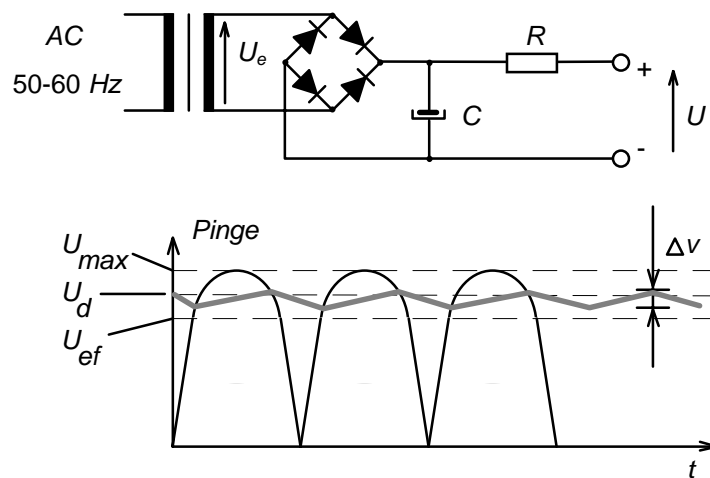
Anduri paigaldamisel ja häälestamisel tohib kasutada ainult sobiva kuju ja mõõtmetega tööriistu. Anduri kinnitus peab olema piisavalt jäik, kaitsmaks teda võimalike löökide ning vibratsiooni eest. Tajuripinna ning ühendusjuhtmete parema kaitse keskkonna mõjutuste eest tagab anduri horisontaalne paigaldus. Tajuripinnale ja juhtmete ühenduskohale ei kogune sel juhul mustust ning need kohad on paremini kaitstud vedelike eest. Kohtades, kus andurit võivad juhuslikult vigastada mööduvad esemed või inimene, tuleb võimaluse korral kasutada anduri kaitsekesta.



## 4.8.2 Lähedusandurite elektrilised prameetrid

**Toiteallikas** (*power supply*). Anduri toiteks kasutatakse sobivat toiteplokki. Toitepinge järgi jagunevad andurid vahelduvvoolu- (*a.c. source*) ja alalisvoolu- (*d.c. source*) ning universaaltoitega anduriteks. Andurite kasutamisel tuleb jälgida, et toitepinge väärtus oleks andurile lubatud piirides.

Alalisvooluahelates kasutatavaid andureid toidetakse alalispingega, mida enamikel juhtudel saadakse võrgupinge alaldamisega (joonis 4.32). Sel juhul tuleb kontrollida, et alaldi väljundpinge vastaks anduri lubatud toitepingele ja pinge pulsatsioon ei ületaks lubatud suurust. Toiteks tuleb valida sobiva pingega toiteplokk, mis koosneb trafost, alaldist ja silumisfiltrist (kondensaatorist).



Joonis 4.32. Alalisvooluahelates kasutatavate lähedusandurite toiteplokk

Ühefaasilise aladiga toiteploki

- maksimaalne alalispinge peab olema väiksem kui andurile lubatud maksimaalne pinge
- minimaalne alalispinge, mis on määratud pulsatsiooniga, peab olema suurem kui andurile lubatud minimaalpinge.


$$\Delta U = (I \times t)/C, \quad (5.2)$$

kus  $\Delta U$  on maksimaalne pinge pulsatsioon,  $I$  - oodatav (*anticipated*) koormusvool (mA),  $t$  - ühe tsükli periood (50 Hz ühefaasilise täisperioodalaldi korral on see 10 ms) ja  $C$  - silufiltri mahtuvus ( $\mu\text{F}$ ).

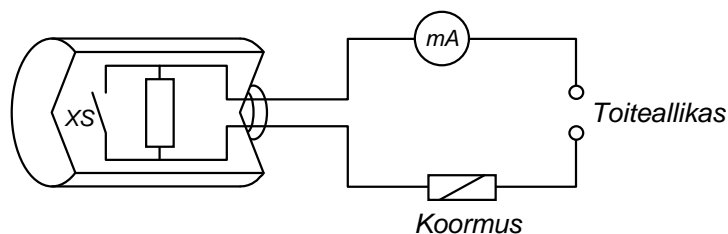
Üldreeglina tuleb kasutada trafot, mille sekundaarpinge on madalam kui anduri nimitööpinge. Nt. kui trafo sekundaarpinge on  $\sim 18$  V, saadakse alaldist = 24 V või kui trafo pinge on  $\sim 35$  V, saadakse alaldist = 48 V.

Silumisfiltris tuleb kasutada vähemalt 400  $\mu\text{F}$  mahtuvusega kondensaatorit ühe anduri kohta või vähemalt 2000  $\mu\text{F}$  mahtuvusega kondensaatorit ühe ampri koormusvoolu kohta. Mõnel anduril on ka suuremad lubatud toitepinge piirid, nt.

- Sarja XS1/XS2 N / XS4 P (10...38 V) andureid võib toita filtreeritud väljundpingega täisperioodalaldi puhul 24 V vahelduvpingeallikast.
- Sarja XS1/XS2 M (10...58 V) 3 juhtmelist anduri mudelit võib toita filtreeritud väljundpingega täisperioodalaldi puhul 24 V vahelduvpingeallikast.

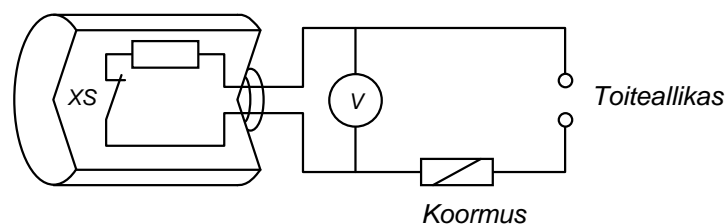
**Isolatsiooniklassi** tähis  näitab, et isolatsioon vastab elektrilöögi ohtu käsitleva standardi NFC 20-030 (IEC 536) 2. klassi nõuetele.

**Jääkvool  $I_r$**  (*residual current*) on vool, mis läbib andurit, selle ennistatud olekus ("open" state). See on kahejuhtmeline lähedusanduri tunnussuurus (joonis 5.15).



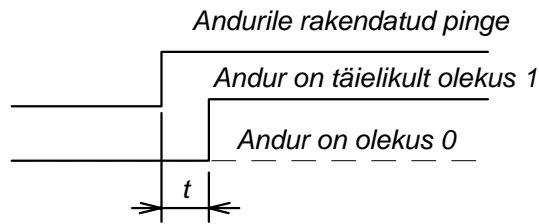
Joonis 4.33. Lähedusanduri jääkvoolu mõõtmine

**Pingelang  $U_d$**  (voltage drop) vastab pingele lähedusanduri klemmidel kui see on rakendunud olekus ("closed" state). Pingelangu mõõdetakse andurit läbiva nimivoolu juures. Pingelang on kahejuhtmeline lähedusanduri tunnussuurus (joonis 4.34).



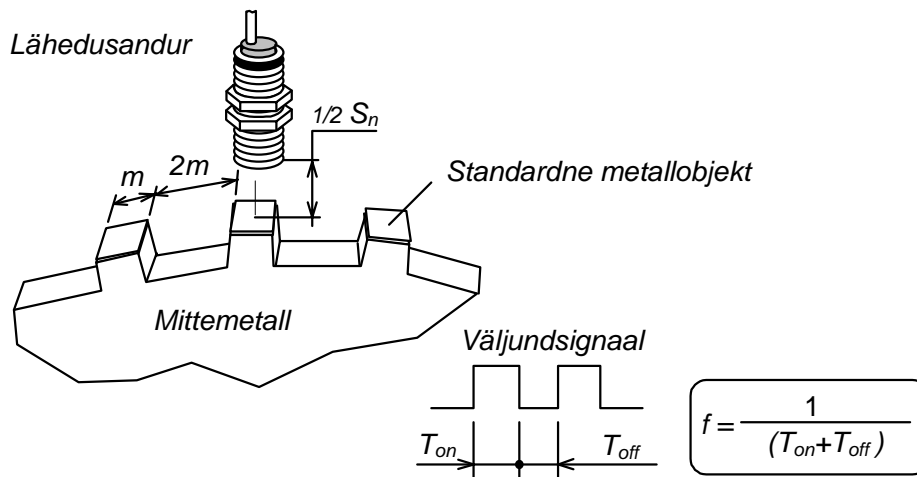
Joonis 4.34. Lähedusanduri pingelangu mõõtmine

**Algrakendumise viivitus** (*first up delay*) on ajavahemik  $t$  alates toitepinge sisselülitamisest kuni anduri täieliku rakendumiseni (joonis 4.35).



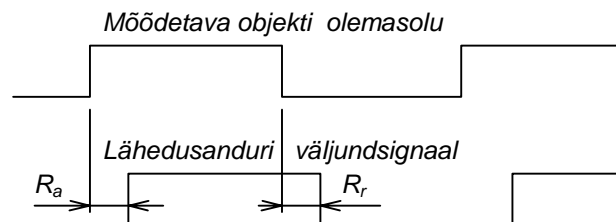
Joonis 4.35. Lähedusanduri algrakendumise viivitus

**Lülitussagedus** (*switching frequency*) iseloomustab anduri toimekiirust ning see määratakse alljärgneval meetodil (joonis 4.36) vastavalt standardile EN 50010. Maksimaalne lülitussagedus saadakse tajukaugusel  $0,8 S_n$ . Standardse tuvastatava objekti küljepikkus on  $m$ .



Joonis 4.36. Lähedusanduri lülitussageduse määramine

**Reaktsiooniaeg  $R_a$**  (*response time*) on ajavahemik alates mõõdetava objekti viimisest anduri töötsiooni, kuni sellest tingitud anduri väljundsignaali muutumiseni. See parameeter määrab objekti mõõtmete ning selle liikumiskiiruse vahelise seose.



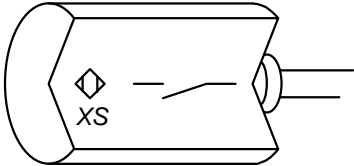
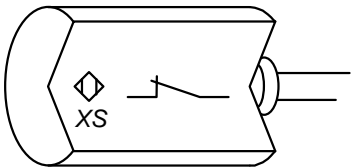
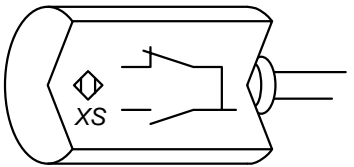
Joonis 4.37. Lähedusanduri reaktsiooniaja määramine

**Taastumisaeg  $R_r$**  (*recovery time*) on ajavahemik alates mõõdetava objekti eemaldamisest anduri töötsioonist, kuni sellest tingitud anduri väljundsignaali oleku muutumiseni. See parameeter piirab mõõdetavate objektide üksteisele järgnemise ajavahemikku.

**Väljundsignaal** (*output signal*) sõltub sellest kas anduri rakendumisel tekib väljundahelas vool või vastupidi, vool katkeb. Kui anduri rakendumisel tekib ahelas vool, vastab see kontakti sulgemisele või pooljuhtkommutaatori viimisele juhtivasse olekusse. Vastavat väljundit nimetatakse **normaalselt avatud väljundiks** (*NO output*). Kui anduri rakendumisel ahela vool katkeb, vastab see kontakti lahtumisele või pooljuhtkommutaatori viimisele mittejuhtivasse olekusse. Vastavat väljundit nimetatakse **normaalselt suletud väljundiks** (*NC output*). Kui anduril on kaks väljundahelat, millest ühes ahelas vool katkeb ning teises ahelas vool tekib, on tegemist **täiendväljunditega** (*C/O output või NO/NC output*). Väljundsignaalide olekuid iseloomustab tabel 4.3.

Tabel 4.3

**Lähedusandurite väljundsignaalide olekud**

	<p><b>NO väljund</b> Lähedusanduril on NO väljund, kui selle väljundtransistor või -türistor läheb mõõdetava objekti lähenemisel juhtivasse (suletud) olekusse</p>
	<p><b>NC väljund</b> Lähedusanduril on NC väljund, kui selle väljundtransistor või -türistor läheb mõõdetava objekti lähenemisel mittejuhtivasse (avatud) olekusse</p>
	<p><b>C/O või NO/NC täiendväljundid</b> Lähedusanduril on täiendväljundid, kui mõõdetava objekti sattumisel töösooni läheb üks väljund suletud olekusse ja teine avatud olekusse.</p>

## 4.9. Fotoelektrilised andurid

*Telemecanique* fotoelektrilised andurid on ette nähtud mitmesuguse kuju ja mõõtmetega esemete tuvastamiseks eri kauguselt. Mõõtmete ning kasutusotstarbe järgi jagunevad Telemecanique fotoelektrilised andurid minianduriteks, kompaktanduriteks, kiudoptilise sisendiga anduriteks ning eraldi mõõtepea ja võimendiga anduriteks. **Miniandurid** on väikeste mõõtmetega, sisseehitatud võimendiga ning ette nähtud suhteliselt väikeste objektide tuvastamiseks. **Kompaktandurid** on sisseehitatud võimendiga ning tuvastavad keskmiste mõõtmetega objekte. **Kiudoptikaga andurite** puhul kasutatakse eraldi võimendit, mille külge ühendatakse kiudoptilise kaabliga valgusvoo saatja-vastuvõtja. Kiudoptiline sisend võimaldab tuvastada väga väikeseid objekte. Sarnasel põhimõttel töötab ka eraldi **optilise mõõtepeaga andur** (*optical head sensor*), kus mõõtepeas asuvad valgusvoo allikas ja vastuvõtja. Signaalimuundur ja võimendi on aga eraldi kestad, kusjuures mõõtepea ja võimendi vahel on elektriline ühendus.

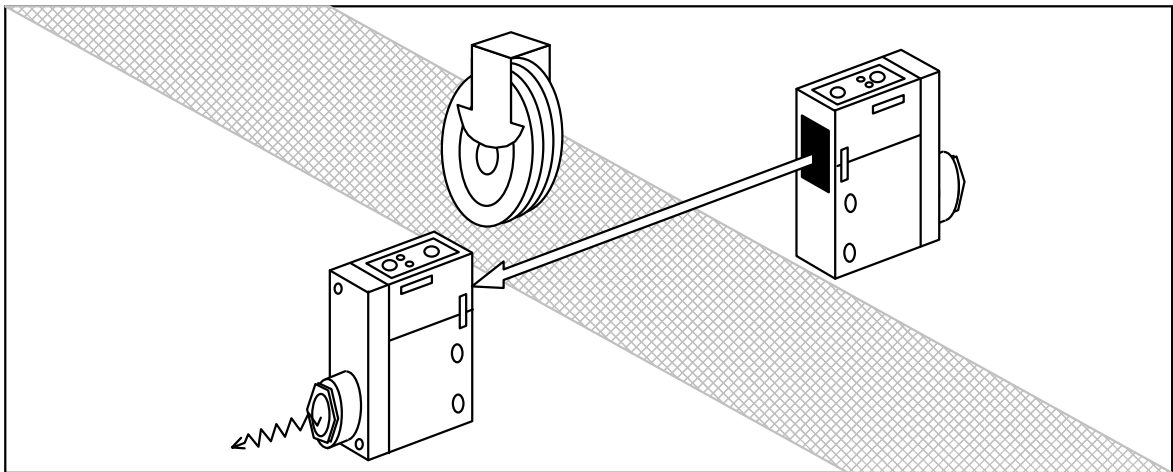
Esemete tuvastamiseks kasutatakse kahte eri meetodit: kiire tõkestussüsteeme ja kiire hajutussüsteeme.

**Kiire tõkestussüsteemid** (*light beam block system*), kus tuvastatav objekt tõkestab valgusvoo allikalt väljastatava valguskiire tee valgusvoo vastuvõtjani. Sel juhul eristatakse omakorda kolme mõõtesüsteemi, s. o. läbivkiire- (*thru-beam*), peegeldunud kiire (*reflex*) ja polariseeritud peegeldunud kiire (*polarised reflex*) tõkestussüsteeme.

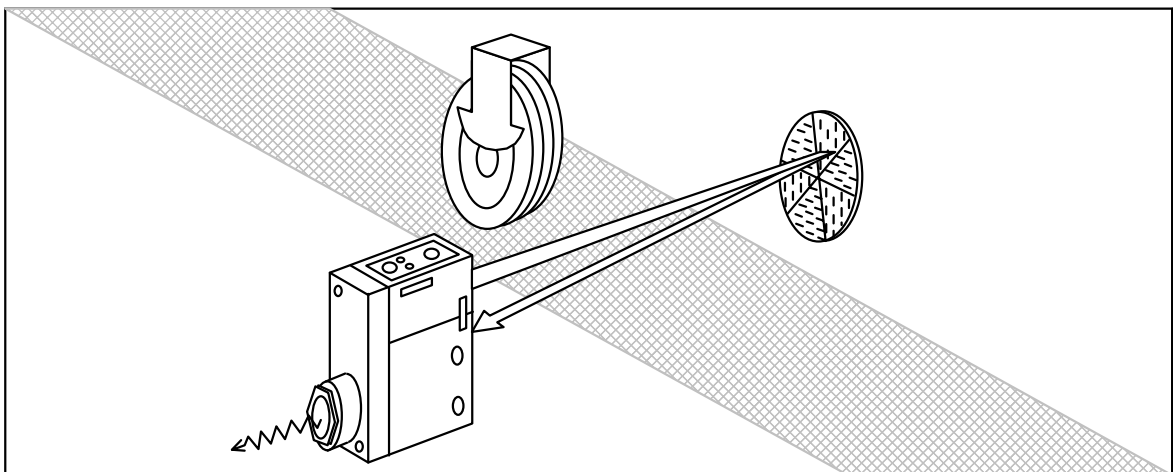
**Läbivkiire tõkestussüsteemides** asuvad valgusvoo allikas ja vastuvõtja teineteisest eraldi ning tuvastatav objekt liigub nende vahelt läbi (joonis 4.38). Läbivkiire süsteemide eeliseks on suur tuvastuskaugus, täpsus ning töökindlus. Neid saab kasutada ka rasketes keskkonnatingimustes. läbivkiire süsteemid vajavad aga väga täpset paigaldust ning häälestust.

**Helkuriga peegeldunud kiire tõkestussüsteemides** asuvad valgusallikas ja valgusvoo vastuvõtja teineteise läheduses, nt. ühises keres ning kiire peegeldamiseks kasutatakse peeglit või helkurit (*reflector*), mis tagab kiire **suundpeegelduse** (joonis 4.39). Peegeldunud kiire tõkestussüsteemide eeliseks on paigaldamise ja häälestamise lihtsus. Helkuri mõõtmed peavad olema väiksemad kui tuvastatava objekti mõõtmed. Vastupidisel juhul peegeldub valgus suurelt pinnalt, objekt ei suuda kiirt tõkestada ning andur ei tööta. Helkuri asukoht ning suunistus peavad olema hoolikalt valitud, et peegeldunud valguskiir satuks täpselt valgusvoo vastuvõtjasse. Andur ja helkur tuleb asetada nii, et oleks välistatud kiirte peegeldumine juhuslikelt objektidelt, sealhulgas ka tuvastatavalt objektilt peegeldunud kiirte sattumine vastuvõtjasse.

**Helkuriga polariseeritud peegeldunud kiire tõkestussüsteemiga** saab tuvastada ka läikivaid objekte (joonis 4.40). Valgusvoo allika ees kasutatakse kiirgust polariseerivaid filtreid, nt. pääseb filtrist läbi vaid vertikaalselt polariseeritud kiirgus. Peegeldunud kiirte polarisatsioonitasand muutub helkuri pinna erilise ehituse tõttu. Vastuvõtja ette on paigutatud horisonataalne polarisatsioonifilter. Vastuvõtja tajub vaid helkurilt peegeldunud valgust, mille polarisatsioonitasand on muutunud. Läikivad objektid peegeldavad valgust samas polarisatsioonitasandis kui on langev valguskiir. Seepärast anduri vastuvõtja ei reageeri objektilt ega ümbritsevatelt esemetelt peegeldunud valgusele ning reageerib üksnes objektile, mis tõkestab helkurilt peegeldunud valguskiire.



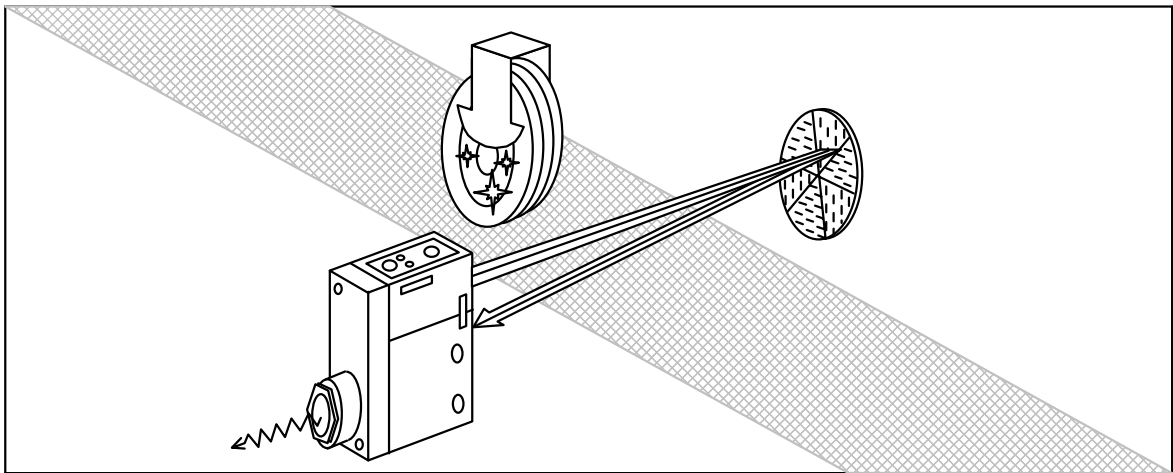
Joonis 4.38. Läbivkiiresüsteem



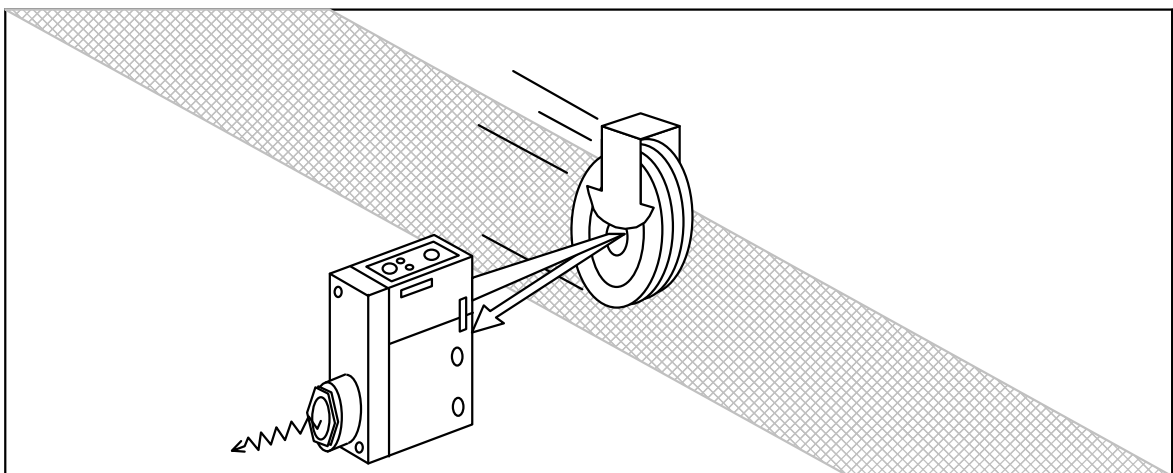
Joonis 4.39. Reflektoriga peegeldunud kiire süsteem

**Kiire hajutussüsteemides** (*diffuse systems*) on tegemist **hajupeegeldusega**, kus tuvastatav objekt peegeldab valgusallikast väljuva kiire tagasi valgusvoo vastuvõtjasse (joonis 4.41). Kiire hajutussüsteemide eeliseks on võimalus tuvastada esemeid ühelt küljelt. Hajutussüsteemide puuduseks on asjaolu, et sel juhul etendab olulist osa tuvastatavate objektide taust (muud esemed või sein), mis peegeldab samuti valgust. Kiire hajutussüsteemi häälestamisel valitakse anduri võimendustegur vastavalt peegeldunud kiire intensiivsusele nii, et see tagaks anduri reageerimise vaid tuvastatava objekti ilmumisel anduri töösooni. Seega sõltub võimendustegur nii objekti pinna peegeldumistegurist kui ka tuvastatava objekti kaugusest. Kui taust peegeldab valgust enam kui objekt, tuleb rakendada meetmeid tausta peegeldumisteguri vähendamiseks (joonis 4.42).

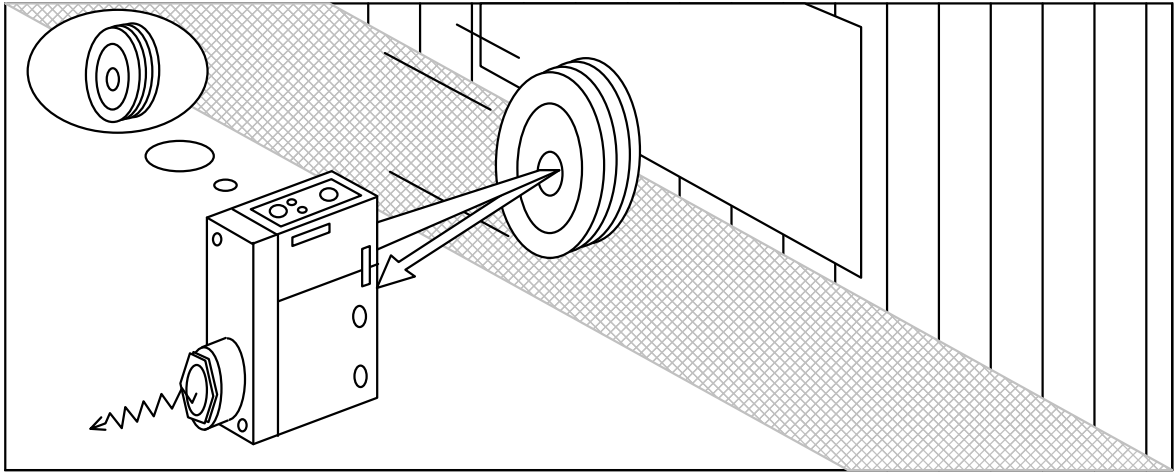
Tausta peegeldumisteguri vähendamiseks (*background suppression*) tuleb võimendustegur reguleerida nii, et andur ei rakenduks taustalt peegeldunud valguse toimel ning rakenduks ainult tuvastatava objekti ilmumisel. Tausta toime vähendamiseks on võimalik viia see tuvastatavatest objektidest piisavalt kaugemale, et valguskiir neelduks keskkonnas (joonis 4.43). Seega saab andurit häälestada teatud kaugusel liikuvate objektide tuvastamiseks. Samuti saab sel viisil tuvastada objekte sõltumata nende värvusest.



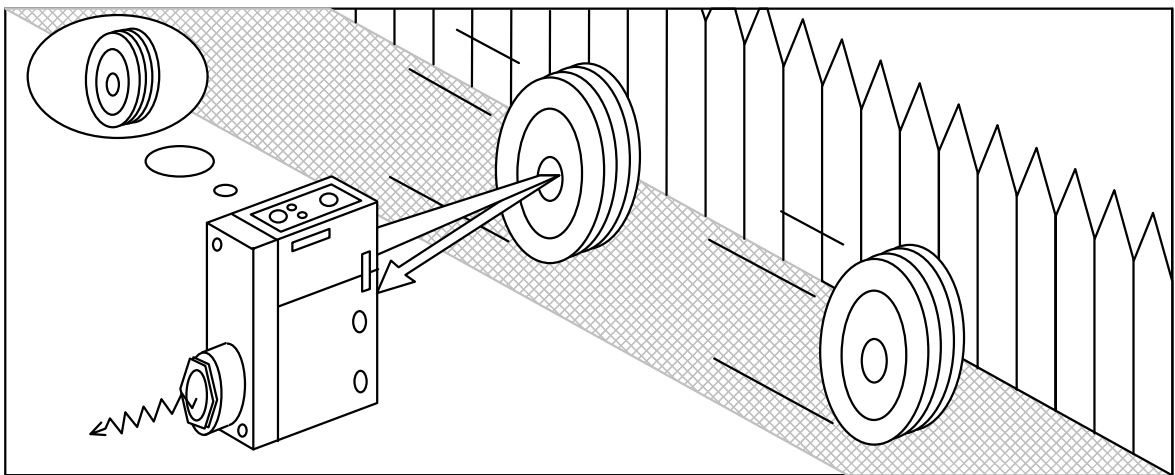
Joonis 4.40. Reflektoriga polariseeritud peegeldunud kiire süsteem



Joonis 4.41. Kiire hajutussüsteem



Joonis 4.42. Tausta mittearvestav ehk tausta peegeldumisteguri vähendamisega hajutussüsteem



Joonis 4.43. Etteantud kaugusel värvist sõltumatult objekte tuvastav hajutussüsteem

**Andurite toiteallikad.** Fotoelektrilisi andureid valmistatakse nii alalispingeahelatele, vahelduvpingeahelatele kui ka universaal- ehk alalis- või vahelduvpingeahelatele.

**Andurite väljundid.** Fotoelektrilisi andureid valmistatakse nii releeväljundiga (*relay output*) kui ka kontaktivaba väljundiga (*solid state output*). Releeväljundiga andurid on hästi koormatavad ning lihtsalt häälestatavad. Kontaktivaba väljundiga andurid on suure toimekiirusega ning väga töökindlad.

**Töömoodused.** Fotoelektrilisi andureid kasutatakse kahel moodusel. Esiteks, andur rakendub valguskiire ilmumisel (*light switching*) ning teiseks, andur rakendub valguskiire katkemisel (*dark switching*).

**Anduri ühendamine.** Fotoelektrilised andurid ühendatakse kolme liiki elektrilise ühendusega: sisseehitatud juhtmestuse (*pre-cabled*), pistikühenduse (*connector*) või kruviklemmide (*screw terminals*) abil.



#### 4.9.1. Fotoelektiliste andurite põhimõisteid

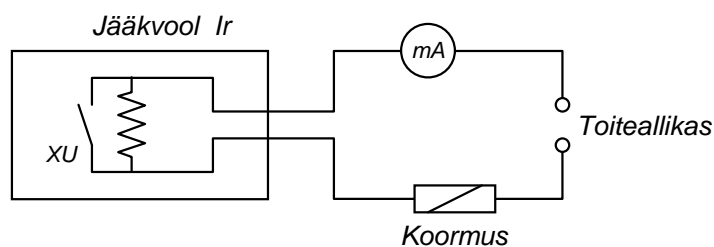
**Nimitajukaugus  $S_n$**  (*nominal or rated sensing distance*) on normeeritud töövahemik, mille jaoks andur on projekteeritud. See ei arvesta tootmise tehnoloogiast põhjustatud tehniliste näitajate tolerantsi või talitluse ajal toimuvaid temperatuuri, pinge jms. muutusi.

**Tajukaugus  $S_a$**  (*operating distance*) arvestab ümbritsevat keskkonda (tolmu) ning kasutatava helkuri tüüpi. Kõigi tingimuste arvestamisel  $S_a \leq S_n$ .

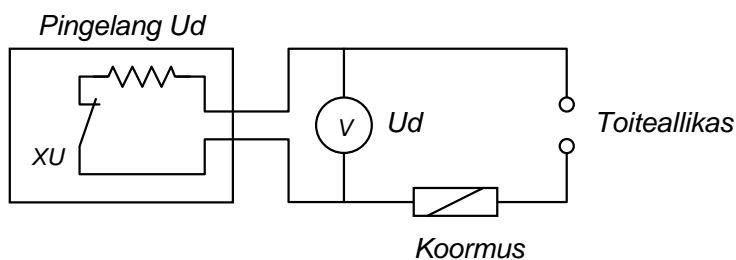
**Jääkvool  $I_r$**  (*residual current*) on vool, mis läbib andurit, selle ennistatud olekus ("open" state). See on kahejuhtmeline anduri tunnussuurus (joonis 4.44).

**Pingelang  $U_d$**  (*voltage drop*) vastab pingele anduri klemmidel kui see on rakendunud olekus ("closed" state). Seda pinget mõõdetakse andurit läbiva nimivoolu juures. Pingelang on kahejuhtmeline lähedusanduri tunnussuurus (joonis 4.45).

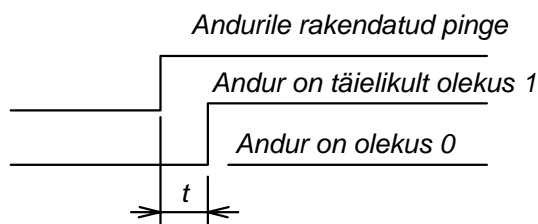
**Algrakendumise viivitus** (*first up delay*) on ajavahemik  $t$ , mida mõõdetakse alates toitepinge sisselülitamisest kuni anduri täieliku rakendumiseni (joonis 4.46).



Joonis 4.44. Fotoelektrilise anduri jääkvoolu mõõtmine

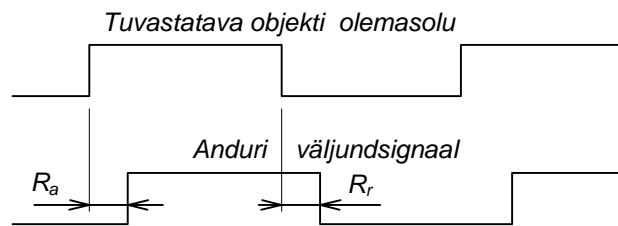


Joonis 4.45. Fotoelektrilise anduri pingelangu mõõtmine



Joonis 4.46. Fotoelektrilise anduri algrakendumise viivitus

**Viivitused.** Reaktsiooniaeg  $R_a$  (*response time*) on ajavahemik alates mõõdetava objekti viimisest anduri töötsooni, kuni sellest tingitud anduri väljundsignaali muutumiseni. See parameeter määrab mõõdetava objekti mõõtmete ning liikumiskiiruse vahelise seose. **Taastumisaeg**  $R_r$  (*recovery time*) on ajavahemik alates mõõdetava objekti eemaldamisest anduri töötsoonist, kuni sellest tingitud anduri väljundsignaali muutumiseni. See parameeter piirab mõõdetavate objektide üksteisele järgnemise ajavahemikku (joonis 4.47).



Joonis 4.47. Fotoelektrilise anduri viivituste määramine

**Lülitussagedus** (*switching frequency*) iseloomustab toodet ning see määratakse alljärgneval meetodil. Maksimaalne lülitussagedus on leitud eeldusel, et  $d = 0,5 S_n$  ja standardse tuvastatava objekti küljepikkus  $m = 55$  mm (joonis 4.48). Objekti mõõtmetest ja kiirusest sõltuva väljundsignaali kestuse saab arvutada joonisel 4.49 toodud näite põhjal. Lühemate ajavahemike korral tuleb arvestada anduri toimekiirusest tingitud viivitusi.

$$\tau_r = CR$$

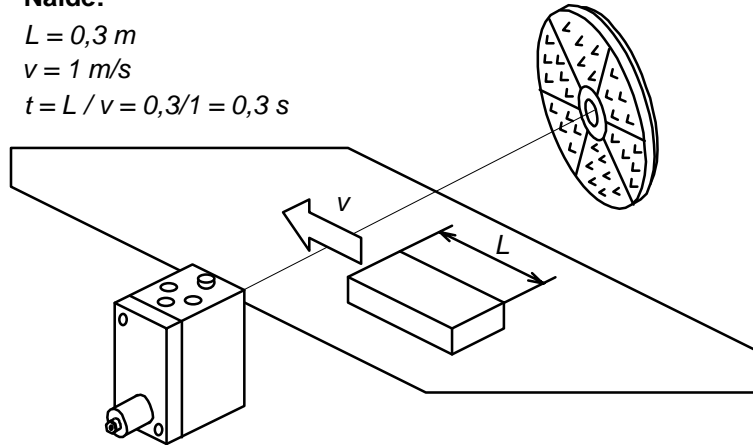
Joonis 4.48. Fotoelektrilise anduri lülitussageduse määramine

**Näide:**

$$L = 0,3 \text{ m}$$

$$v = 1 \text{ m/s}$$

$$t = L/v = 0,3/1 = 0,3 \text{ s}$$



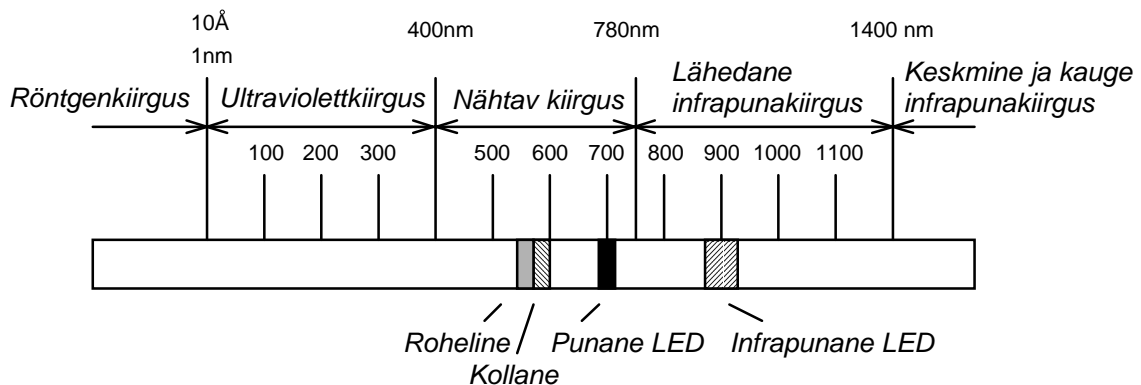
Joonis 4.49. Anduri väljundsignaali kestuse määramine

### 4.9.2. Fotoelektriliste andurite optilised omadused

Valgusvoog tekitatakse anduris valgusdiodiga (*LED, light emitting diod*). Valgusvoo vastuvõtuks kasutatakse fotodioode ja fototransistore. Valgusdiod on pooljuhtelement, mis elektrivoolu läbimisel tekitab optilist kiirgust. See võib sõltuvalt kiirguse lainepikkusest olla kas nähtavas või mitted nähtavas spektrialas. Eri lainepikkustel, s. o. nähtavas või infrapunases spektrialas, kasutatakse erinevaid valgusdioode ning fototransistore (joonis 4.50).

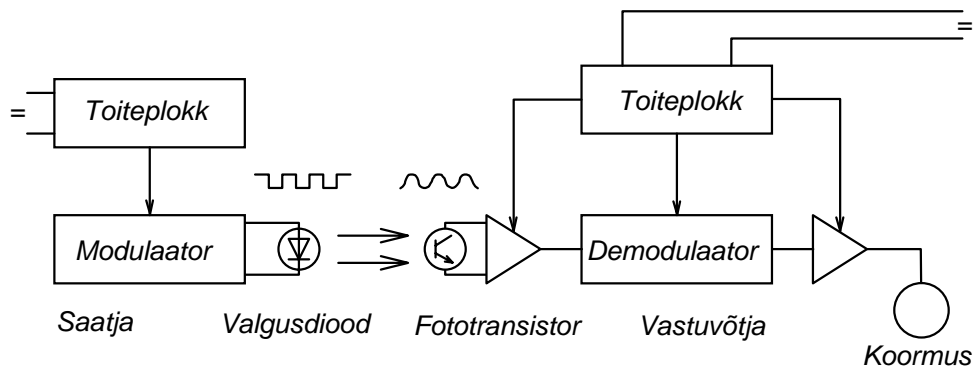
Infrapunakiirguse valgusdiodid ja fototransistorid (*photo-transistors*) on suure temperatuuritaluvusega, pika elueaga, mehaaniliselt vastupidavad löökidele ja vibratsioonile ning sobivad seetõttu kasutamiseks automaatikaseadmetes.

Nähtava punakiirguse valgusdioode ja fototransistore kasutatakse koos plastikust kiudoptiliste kaablitega ning polariseeritud peegeldunud kiire hajutussüsteemis töötavate andurite (*polarised reflex diffuse detectors*) korral.



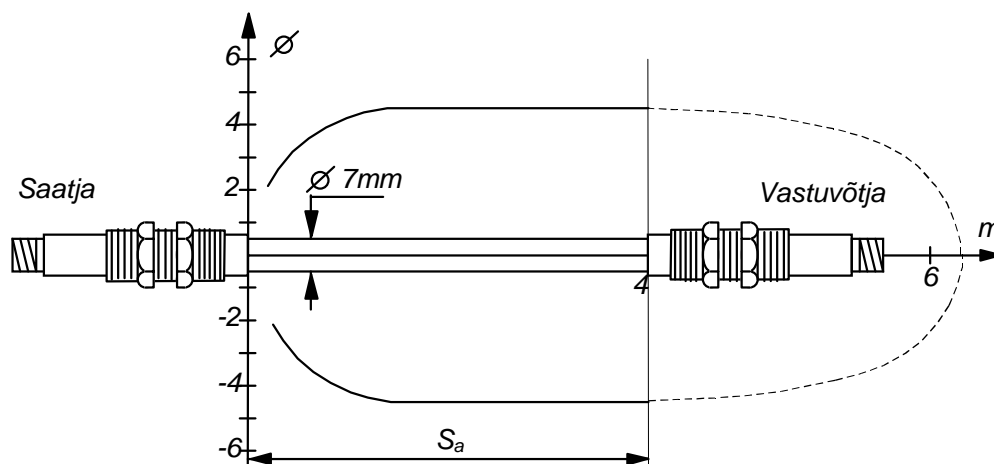
Joonis 4.50. Optilise kiirguse spekter

**Valgussignaali modultatsioon** (*modulation*). Valgusdiode eeliseks on nende suur toimekiirus. Samuti pole optiline infoedastussüsteem tundlik ümbritseva valguse suhtes. Valgusvoo moduleerimiseks muudetakse diodi voolu ning saadakse voolust sõltuvad kiirgusimpulsid. Need kantakse üle fototransistorile. Viimane reageerib kiirgusimpulssidele ning muudab vastavalt kiirgusvoo muutusele oma pinget, mille järgi toimub koormuse juhtimine. Optiline infoedastussüsteem on näidatud joonisel 4.51.

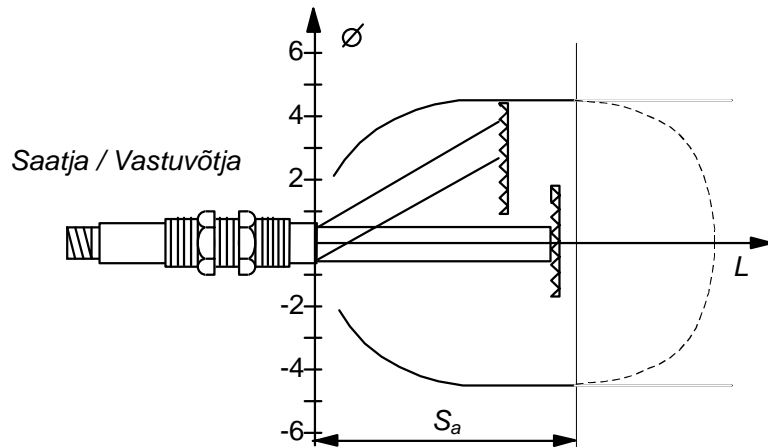


Joonis 4.51. Optiline infoedastussüsteem

**Töötsoonid.** Peegeldunud ja läbivkiiresüsteeme (*reflex and thru-beam systems*) iseloomustavad neile omased töötsoonid (joonised 4.52 ja 4.53). Valgusvoo vastuvõtja või reflektori võimalik asukoht valgusallika (diodi) kiirgustsoonis peab olema töötsoonis  $S_a$ . Kriipsjoonega on näidatud optilise süsteemi võimalik rakendatav tajukaugus (*usable sensing distance*). Iga objekt, mis läbib seda tsooni katkestab valgusvoo ning muudab anduri väljundsignaali. Vastavalt vajadusele saab kiire sihti sobitada **optiliste maskide** paigutamise läätsele. Näiteks, nii saab tuvastada objekti kõrguse vastavust etteantud suurusele vms.

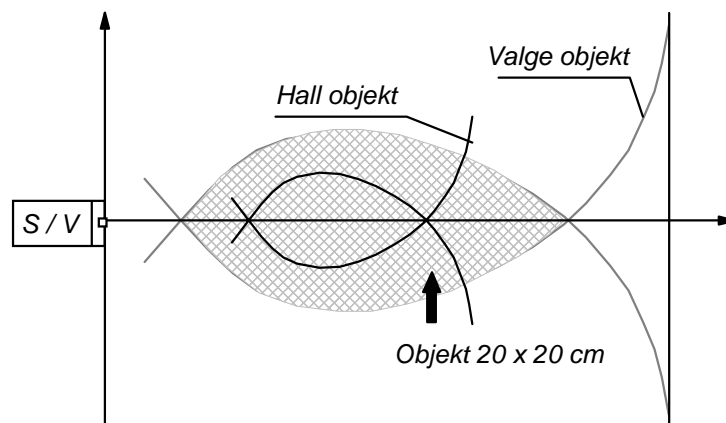


Joonis 4.52. Läbivkiirega süsteemi töötsoon



Joonis 4.53. Peegeldunud kiirega süsteemi töötsoon

**Standardne hajutussüsteemi** (*standard diffuse system*) töötsoon on näidatud joonisel 4.54. Viirutatud ala  $S_a$  kujutab endast anduri tajutsooni (*detector's area of sensitivity*), kus iga oluline peegeldav objekt, mis satub sellesse tsooni noolega näidatud suunast, muudab anduri väljundsignaali. Joonisel näidatud tumedam ala on süsteemi võimalik tajutsoon. Joonega ümbritsetud väiksem ala vastab valge pinnaga objektile, suurem ala aga valge pinnaga objektile. Anduri tundlikkuskatsete põhjal saab arvutada tajukauguse vastavalt objekti peegeldumistegurile. Kiire hajutussüsteem koos tausta toime vähendamisega (*background suppression*) võimaldab tuvastada värvilisi või erineva peegeldumisteguriga objekte, mis asuvad näivalt (*virtually*) samal kaugusel.

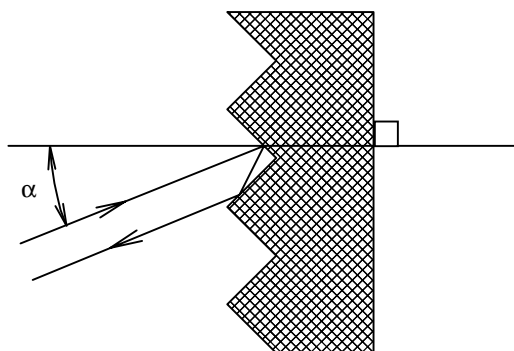


Joonis 4.54. Standardse neeldumissüsteemi töötsoon

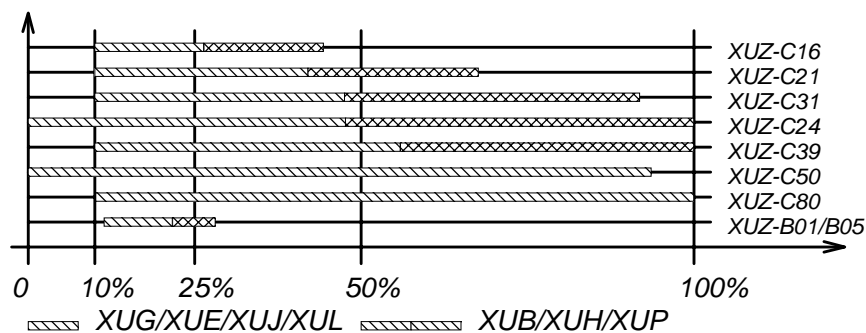
**Helkurid** on peegeldunud kiirega süsteemis kasutatavad lisaseadmed valgusvoo peegeldamiseks. Helkuri pind koosneb suurest hulgast kolmetahulistest nurkadest (*trihedrons*) või mikrokuulikestest, mis tagavad valguskiirte täieliku peegeldumise langevate kiirtega samas sihis tagasi (joonis 4.55). Kasutatakse kolme eri kujuga helkureid: ringi- ja ristkülikukujulisi helkureid ning valgust peegeldavat linti. Helkur valitakse sõltuvalt maksimaalsest ja minimaalsest tajukaugusest. Joonisel 4.56 on näidatud eri tüüpi helkurite korral saavutatav suhteline tajukaugus võrreldes nimitajukaugusega  $S_n$ .

**Helkuri suunanurk** (*reflector orientation angle*) ehk suunistus mõjutab oluliselt tajukaugust. Sõltuvalt helkuri suunanurgast tuleb korrigeerida anduri tajukaugust ja töösooni. Seda tehakse vastava parandusteguriga (joonis 4.57).

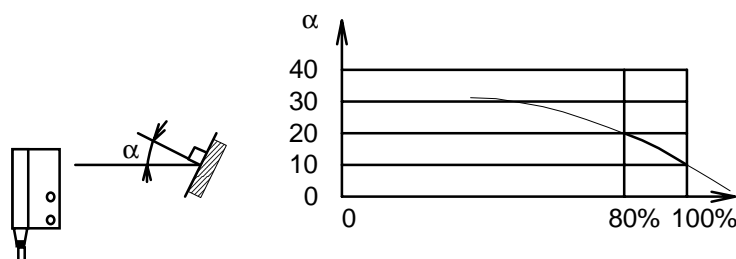
**Peegeldava lindi** korral kasutatakse peegeldaval pinnal mikrokuulikesi. Lindi peegeldumistegur on väiksem kui kolmetahuliste nurkadega helkuril. Reeglina väheneb anduri tajukaugus peegeldava lindi kasutamisel umbes 60 % võrra.



Joonis 4.55. Helkuri tööpõhimõte



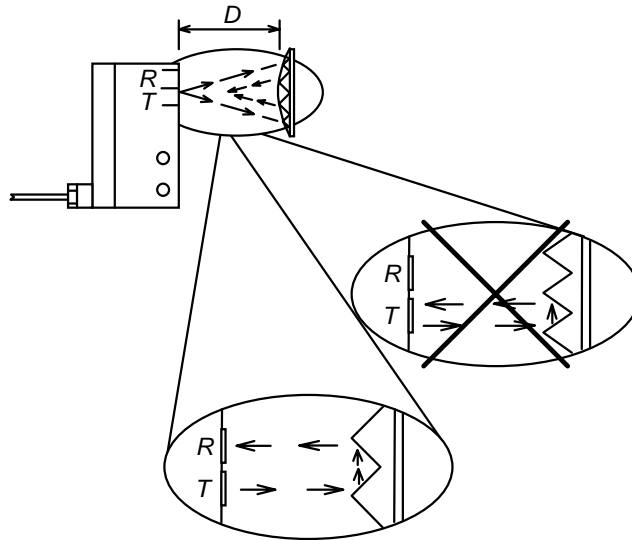
Joonis 4.56. Eri tüüpi helkuritega saavutatav suhteline tajukaugus



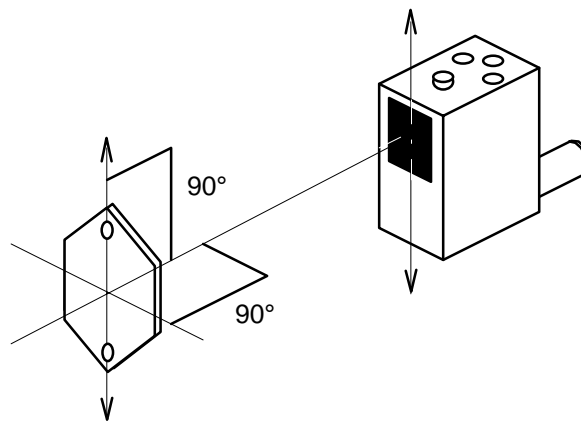
Joonis 4.57. Anduri tajukauguse sõltuvus helkuri suunistusest

Kui peegeldunud kiire süsteemi kasutatakse tingimustes, kus anduri ja reflektori vahel on väike vahemaa, tuleb normaalseks talitluseks valida sobiva peegeldumispinnaga helkur.

Väikeste kolmetahuliste pindade (*trihedrons*) korral peegeldub kiir tagasi valgusvoo allika suunas ning ei jõua vastuvõtjasse (joonis 4.58). Suurte kolmpindadega reflektori puhul peegeldub kiir vastuvõtjasse. Lühikesest vahemaast tingitud probleemid tekivad siis, kui  $D < 0,1 S_n$ . Lühikese vahemaa korral on oluline ka reflektori täpne asukoht ning suunistus (joonis 4.59).

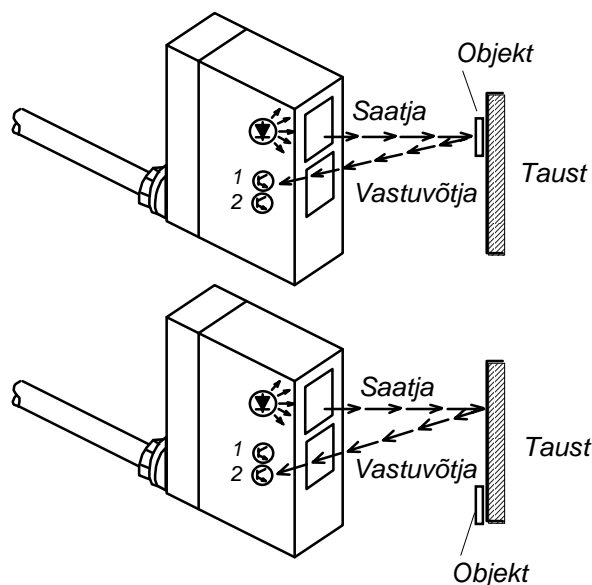


Joonis 4.58. Anduri koostöö väikesel kaugusel oleva helkuriga



Joonis 4.59. Optilise süsteemi teljed ning helkuri asukoha valik

**Tausta peegeldumisteguri vähendamine.** Kiirguse hajutussüsteemi puhul tuleb taustpinna lähedal liikuvate esemete tuvastamiseks maksimaalselt vähendada tausta peegeldustegurit, tagades samal ajal maksimaalse peegelduse avastatavalt objektilt. Seda saab teha ka kahe peegeldusteguri võrdlemisega (joonis 4.60) ning vastuvõtja häälestamisega täpselt vajalikule tundlikkusele.

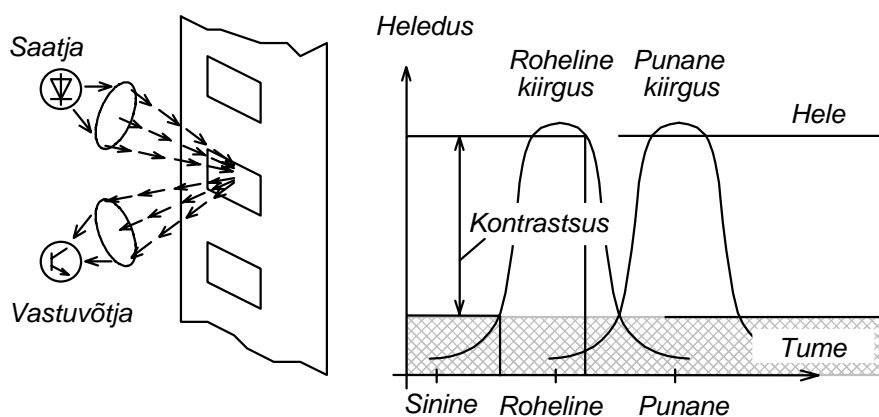


Joonis 4.60. Vastuvõtja signaalide võrdlemine ning võimendi tundlikkuse häälestamine

**Kontrastse värvikoodi lugemine** (*registration mark detection*). Fokuseeritud kiirega andurid tuvastavad kontrastseid, üle 0,5 mm laiusi värvimärke(triipe). Värvimärgid asuvad nähtava valguse allika lähedal, mistõttu iga märki võib vaadelda kui omaette valgusallikat. Andurid ei erista nähtava valguse korral värvusi nende kontrasti järgi.

Roheline kiirgus: heleroheline, kollane, valge.

Punane kiirgus: kollane, punane, valge.



Joonis 4.61. Kontrastsete värvimärkide tuvastamine