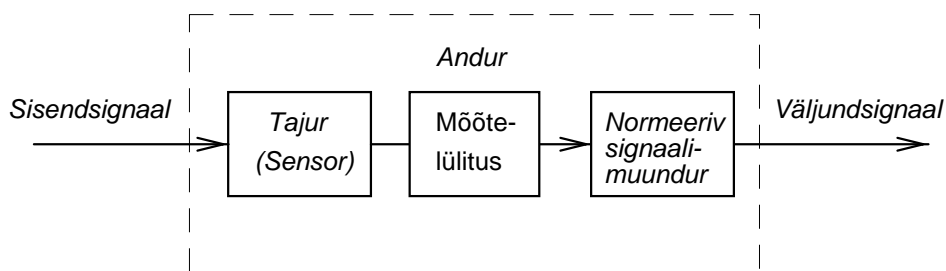


3. ANDURITE TÖÖPÕHIMÕTE

3.1. Põhimõisteid

Andurite kasutusala kuulub automaatika ja mõõtetehnika valdkonda. Andureid võib lugeda nii automaatika- kui ka mõõtevahenditeks. **Automaatika** on omakorda teadus- ja tehnikaharu, mis tegeleb automaatseadmete ja automatiseeritavate tehnoloogiliste protsesside kontrollimise ja juhtimise meetodite ning vahenditega. Automaatikasüsteemide töö rajaneb süsteemi kuuluvate seadmete ja süsteemiosade seisundit kirjeldaval **informatsioonil**, mida edastatakse elektriliste, pneumaatiliste, hüdrauliliste, optiliste jm. **signaalide** abil. Süsteemi talitluse kohta informatsiooni saamise üheks võimaluseks on juhtimisobjekti väljundite **mõõtmine**. Seadmete, masinate või protsesside juhtimiseks tuleb mõõta mitmesuguseid füüsilisi, nt. mehaanilisi, soojuslikke, optilisi, elektromagnetilisi vms. suurusi. Automaatika nüüdisüsteemides edastatakse ja töödeldakse informatsiooni aga valdavalt elektriliste ja optiliste signaalidena. Seepärast on automaatikasüsteemides üheks põhiprobleemiks **signaalide muundamine**. Seadist, mis muundab mõõdetava füüsilise suuruse (nt. rõhu, kiiruse vms.) teiseks suuruseks (signaaliks), mida on parem võimendada, mõõta, edastada või töödelda, nimetatakse **anduriks**.

Enamikes andurites toimub signaalide muudamine kahes etapis. Esmased ehk primaarmuundurid muundavad signaali liiki, nt. mehaanilise suuruse elektriliseks. Teisesed ehk sekundaarmuundurid viivad signaali standardsele ehk normeeritud kujule. Anduri primaarmuundurit nimetatakse ka **tajuriks** või **sensoriks** (joonis 1.1). Elektrilise tajuri väljundsuuruste mõõtmiseks kasutatakse mitmesuguseid **mõõtelülitusi**. Sekundaarmuunduriteks võivad olla erinevad seadised nagu võimendid, analoog-digitaalmuundurid (A/D), digitaal-analoogmuundurid (D/A), impulsi- ja koodimuundurid vms. Seega koosneb andur füüsilise suuruse muundamiseks ettenähtud tajurist, mõõtelülitusest ning normeerivast signaalmuundurist.



Joonis 3.1. Anduri üldine plokkskeem

Sõltuvalt kogutava informatsiooni hulgast võib eristada nelja liiki andureid.

1. Andureid, mis tuvastavad signaali olemasolu või selle puudumist (ühebitised).
2. Andureid, mis tuvastavad, kas signaal vastab soovitudle või mitte ning milline on hälbe suund ehk märk (kahebitised).
3. Andureid, mis väljastavad mõõdetava suuruse etteantud täpsusega arvvärtusena (n-bitised), kus kahendsõna bittide arv ning mõõtmistäpsus on omavahel seotud.

4. Andureid, mille väljundsignaali täpsus sõltub mõõdetavast signaalist, nt. suure signaali korral väiksem ning väikese signaali korral suurem (n-bitised), kus bittide arv on sisendsignaali funktsioon.

Esimest ja teist liiki andureid nimetatakse vastavalt nende toimele ka **mõõtereledeks**. Sõltuvalt relee olekute arvust on esimesel juhul tegemist kahe olekuga (kahepositsioonilise) releega ning teisel juhul kolme olekuga ehk kolmepositsioonilise releega.

Anduritele esitatavad nõuded. Andurid on automaatikasüsteemi väga vastustusrikkad elemendid, sest anduri viga mõjutab kogu süsteemi tööd. Sageli on andurite töötingimused võrreldes automaatikasüsteemi teiste elementidega palju raskemad, sest neid pole võimalik kaitsta keskkonna kõrge temperatuuri, vibratsiooni, keemilise agressiivsuse, ekstreemsete jõudude ja momentide ning muu kahjuliku toime eest. Võrdluseks võib tuua juhtseadme, mida saab juhitava objekti ja ümbritseva keskkonna kahjuliku toime eest kaitsta sobiva kerega, piisava kaugusega ohtlikust tsoonist või sobiva tehiskeskkonna loomisega. Anduri sisendsignaali mõjutavad sageli juhusliku iseloomuga signaalid, mida anduri seisukohalt loetakse **mõõtemüraks**. Anduritele esitatavad põhilised tehnilised nõuded on järgmised:

1. Sisend- ja väljundsuuruste vahel peab olema ühene sõltuvus, s. t. tunnusjoone hüsterees on võimalikult väike või puudub.
2. Väljund peab sõltuma ainult mõõdetavast sisendist ja ei tohi sõltuda muudest signaalidest ega mõõtemürast, s. t. anduril on suur selektiivsus.
3. Väljundsuurus peab sõltuma sisendist võimalikult lineaarselt, s. t. anduril on lineaarne tunnusjoon.
4. Anduril peab olema piisav tundlikkus ning tema tunnusjooned peavad olema ajaliselt stabiilsed.
5. Anduri signaalid peavad olema suunatud toimega sisendist väljundisse ning vastassuunaline toime väljundist sisendisse peab olema minimaalne, s. t. koormus ei tohi oluliselt mõjutada anduri tööd.
6. Anduril peab olema suur toimekiirus.
7. Andur peab olema vastupidav keskkonnaoludele.

3.2. Andurite ja nende elementide liigitusi

Andureid saab liigitada mitmete tunnuste põhjal. Üheks võimaluseks on liigitada neid sisend- ja väljundsuuruste järgi. Antud juhul huvitavad meid peamiselt elektrilise väljundsignaaliga andurid, mida automaatikasüsteemides kasutatakse kõige enam. Tööstusautomaatikas rakendatakse elektrilise väljundiga mehaaniliste, termiliste ja optiliste ja elektromagnetiliste suuruste andureid. Andurite töö põhineb mitmesugustel füüsikalistel nähtustel ja tehnilistel seadmetel.

Mehaanilisteks sisendusuurusteks on nt. kõik liikumisparameetrid nagu tahkete ja vedele kehade asend, siire, kiirus, kiirendus ja tõuge ning samuti kehadele toimivad jõud, momendid, rõhk. Kuna erinevaid mehaanilisi suurusi on palju, siis toimub andurites täiendav mehaaniliste suuruste muundamine. Näiteks, anduri erinevate füüsikaliste sisendsuuruste: jõu, momendi, rõhu ja kiirenduse taandamine mehaanilisele deformatsioonile (siirdele), kasutades selleks Hook'e seadusena tuntud põhimõtet, et elastsete kehade deformatsioon on võrdeline seda põhjustanud jõuga. Mehaaniliste suuruste muundamisest annab ülevaate tabel 1.1.

Elektriliseks väljundsuuruseks võib lugeda tajuri aktiivtakistuse, induktiivsuse, mahtuvuse või genereeritava elektromotoorjõu muutumist sõltuvalt mõõdetavast sisendsuurusest.

Passiivelementide aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvuse muutumine on üldjuhul vaadeldav komplekstakistuse Z muutumisena, kus $Z_R = R$, $Z_L = \omega L$ ja $Z_C = 1/\omega C$ (tabel 3.2). Tabelis 3.2 loetletud füüsikaliste nähtuste põhjal saab luua mitmesuguseid tajureid, mis muundavad mitteelektrilisi suurusi pidevaks elektriliseks suuruseks – komplekstakistuseks või elektromotoorjõuks.

Tabel 3.1

Mehaaniliste suuruste muundamine

Sisendmuutujad	Vahemuutujad	Väljundmuutuja
1. Jõud, F	Jõud, F	Siire $x = kF$ (Hooke seadus)
2. Moment, T	Jõud, $F = \frac{T}{r}$	Siire $x = kF$
3. Rõhk, p	Jõud, $F = pS$	Siire $x = kF$
4. Kiirendus, a	Jõud, $F = m \frac{dv}{dt} = m\dot{v} = ma$	Siire $x = kF$
5. Nurkkiirendus, ε	Moment ja jõud $T = J \frac{d\omega}{dt} = J\dot{\omega} = J\varepsilon$ $T = r \cdot F$	Siire $x = kF$

Lisaks pidevatoimelistele tajuritele kasutatakse ka diskreetseid ehk releetoimelisi tajureid, mille väljundiks on elektriliste kontaktide sulgumine või lahtutumine, pinge hüppeline muutumine või pingeimpulsid. Diskreetsete tajurite tööpõhimõtetest annab ülevaate tabel 3.3.

Tabel 3.2

Elektrilise väljundiga tajurite tööpõhimõtteid

Väljund- suurused	Sisendsuurused					
	Mehaanilised			Soojuslikud	Optilised	Elektro- magnetilised
	Liikumis- siire, asend	Kiirus	Kiirendus, jõud, rõhk, moment	Tempe- ratuur	Valgus- voog	Elektro- magnetiline väli
1	2	3	4	5	6	7
Aktiiv- takistus $R(u) = \text{var}$	$R = \rho \frac{l}{s}$ $l = f(x)$ $s = f(x)$		Tensoefekt $R = \rho \frac{l}{s}$ Hooke'i seadus $x = kF$	Metallide ja pool-juhtide takistuse sõltuvus tempera- tuurist, ülijuhtivus	Pooljuhtide takistuse sõltuvus tempera- tuurist (fotodiodid ja fototran- sistorid)	Galvano- magnetiline efekt $\rho = f(H)$ (varistorid)
Mahtuvus $C(u) = \text{var}$	$C = \frac{\epsilon \cdot S}{l}$ kus: $S = f(x)$ $l = f(x)$		$\epsilon = f(F)$ ϵ - elektri- line läbi- tavus	$\epsilon = f(\vartheta)$		(varikapid)
Induktiivsus $L(u) = \text{var}$	$L = w^2 G$ $M = w_1 w_2 G$ Magnetiline juhtivus $G = \frac{\mu \cdot S}{l}$		$\mu = f(F)$ μ - magne- tiline läbitavus	$\mu = f(\vartheta)$		
Elektro- mootorjõud $E(u) = \text{var}$	(Autotrafo, pöördtrafo, induksioon- regulaator)	Indutseeri- tud elektro- mootorjõud ehk Faraday emj. $E = Bvl$	Pieso- elektriline efekt	Termo- elektro- mootorjõud (termopaar)	Pooljuhtide optoelektro- mootorjõud (päikesepa- tareid)	Halli efekt

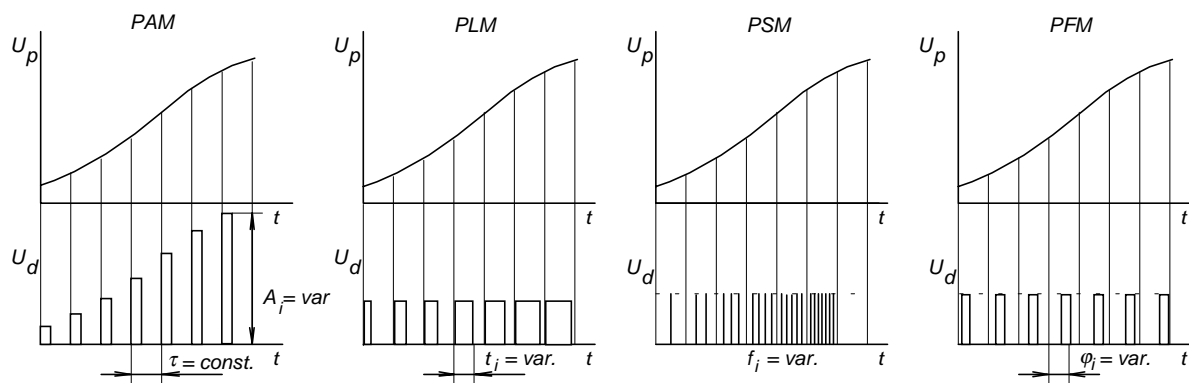
Tabel 3.3

Diskreetse väljundiga tajurite tööpõhimõtteid

Väljund- suurused	Sisendsuurused					
	Mehaanilised			Soojuslikud	Optilised	Elektro- magnetilised
	Liikumis- siire, asend	Kiirus	Kiirendus, jõud, rõhk, moment	Tempe- ratuur	Valgus- voog	Elektro- magnetiline väli
1	2	3	4	5	6	7
Elektriline sulguv või lahutuv kontakt.	Piirlülitid: - lineaar- sed, - pöörd- liikumi- sega.	Kesktooke- jõu toimetel rakerndu- vad kontaktid.	Vedru vastujõul põhinevad piirjõu, piirõhu ja piirmomen- di releed. Hooke'i seadus $x = kF$	Bimetall- tajurid, termo- releed		Keelkon- takttajurid, elektro- magnetili- sed rele- tajurid.
Loogika- ehk binaar- signaal	Induktiiv- sed või mahtuvus- likud positiivse tagasisidega generaator- tajurid, impulss- ja koodmodu- laatorid	Magnet- või valgusvoo impulss- modu- laatorid koos induk- tiivsete või optiliste tajuritega			Pooljuhtide oleku hüppeline muutumine (foto- türistorid, optopaar- tajurid)	

3.3. Andurite signaalid

Edastavate signaalide liigid. Automaatika nüüdissüsteemides, ning järelikult ka andurites, kasutatakse nii pidevatoimelisi ehk **analoogsignaale** kui ka katkelisi ehk **diskreetsignaale**. Diskreetsignaali jagunevad omakorda impulss- ja arvsignaalideks. **Impulss-signaalideks** loetakse neid, kus informatsiooni kodeeritakse impulsi parameetritega. Impulsi olulisemad parameetrid on tema amplituud (A_j) ehk kõrgus, kestus (t_j) ehk laius, sagedus (f_j) või periood (τ_j) ja faasinurk (φ_j) ehk nihe taktimpulsi suhtes. Vastavalt neile neljale parameetrile tuntakse signaalide nelja **pulsimodulatsiooni** liiki. Need on: 1) pulsi amplituudimodulatsioon (PAM); 2) pulsi laiusmodulatsioon (PLM); 3) pulsi sagedusmodulatsioon (PSM) ja 4) pulsi faasimodulatsioon (PFM), mille olemusest annab ülevaate joonis 1.2.



Joonis 3.2. Pulsimodulatsiooni liigid

Kvantimise periood ehk diskreetimisintervall τ valitakse sõltuvalt kvanditava signaali sageduslikest omadustest (spektrist) nii, et kvantimisega ei läheks kaduma signaaliga edastatav info. Selleks peab kvantimise periood τ olema vähemalt kaks korda lühem kui signaali spektri suurima sagedusega harmoonilise komponendi periood.

$$\tau = \frac{1}{2f_{\max}} \quad \text{või} \quad f_i = \frac{1}{\tau_i} = 2f_{\max}, \quad (3.1)$$

kus f_{\max} on signaali spektri harmooniliste komponentide suurim sagedus.

Juhul kui impulsi parameetrid ei ole määratletud, sisaldab üks impulss ühe biti informatsiooni, s. t impulsi olemasolu võib lugeda signaaliks 1 ning selle puudumise signaaliks 0. Signaale, millel on vaid kaks erinevat väärtust nimetatakse **binaarsignaalideks**.

Üks impulss sisaldab ühe biti infot. Kahe impulsi opererides saab edastada $2^2 = 4$ bitti infot jne. Mitmebitilisi impulss-signaale saab kodeerida vastavalt kahendarvude koodile ning neid nimetatakse seepärast **arvsignaalideks**. Digitaaltehnikas kasutatakse kõige enam 8, 10, 12 või 16 bitiseid arvsignaale, mille infosisaldus on vastavalt $2^8 = 256$, $2^{10} = 1024$, $2^{12} = 4096$ ja $2^{16} = 65536$ bitti.

Signaalide normeerimine. Sõltuvalt kasutatavate signaalide mitmekesisusest rakendatakse andurites erinevaid signaalide normeerimise vahendeid. Pidevate signaalide normeerimine seisneb tajurisignaali järgi standardse pinge- ja voolupiirkonnaga väljundsignaalide moodustamises ning nende ülekandmises läbi standardliidese, mis sisaldab standardset pistikühendust, kus juhtmete ühendus ning pistiku klemmide asetus on standardiga täpselt määratletud. Pidevsignaalide amplituudi normeerimiseks kasutatakse sobivalt valitud võimendusteguriga operatsioonivõimendit. Diskreetsete signaalide normeerimine seisneb tajurisignaali standardse amplituudi, sageduse või koodiga impulss- ja arvsignaalide moodustamises ning nende signaalide ülekandmises standardse infovahetusprotokolliga läbi standardliidese.

3.4. Tajurite tööpõhimõte

3.4.1. Takistus- ja potentsiomeetertajurid

Takistus- ja potentsiomeetertajurid on parameetrilised, muutuva aktiivtakistusega tajurid, kus liuguri asendi või pöördenurga muutus põhjustab tajuri elektrilise takistuse muutumise. Kuna praktikas on sobivam saada väljundsignaal pinge muutusena, siis lülitatakse takistustajur mõõteahelasse enamasti potentsiomeetrina. Sel juhul nimetatakse tajurit potentsiomeetertajuriks (joonis 3.3).

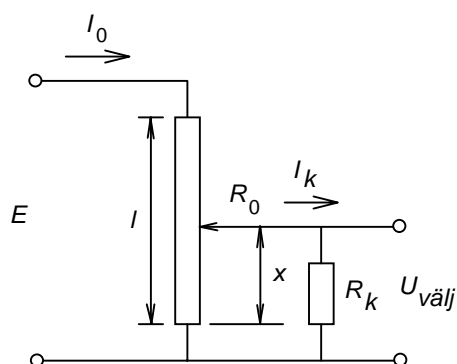
Takistustajuri aktiivtakistus on liuguri asendi funktsioon

$$R = R_x x, \quad (3.2)$$

kus x on liuguri kaugus tema äärmisest asendist ning R_x potentsiomeetri ühe pikkusühiku takistus. Pöördpotentsiomeetrite korral

$$R = R_\alpha \cdot r \cdot \alpha, \quad (3.3)$$

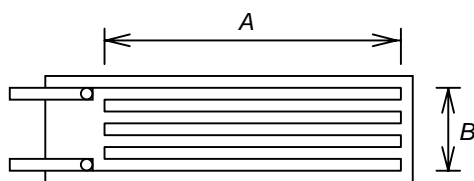
kus r on potentsiomeetri liuguri raadius, α pöördenurk ja R_α takistuse muutus ühe pöördenurga ühiku kohta.



Joonis 3.3. Potentsiomeetertajuri skeem

3.4.2. Tensotajurid

Takistustajurite hulka kuuluvad ka tensotajurid, mille takistus muutub tajuri deformeerimisel. Tensotajureid kasutatakse jõudude, momentide, rõhkude ning dünaamilistes süsteemides ka kiirenduse mõõtmiseks. Tensotajurid jagunevad pealekleebitavateks traat- ja linttajuriteks ning integraallülitustena toodetavateks pooljuhtensotajuriteks. Traat-tensotajur koosneb aluskilele sik-sakina paigutatud traadist, mille takistus deformeerimisel muutub (joonis 3.4). Traadi kogudeformatsioon sõltub tajuri mõõtmest, s. o. pikkusest A ning sik-sakkide arvust ehk kaudselt tajuri laiuusest B .



Joonis 3.4. Pealekleebitav traat-tensotajur

Traadi takistus arvutatakse valemiga

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (3.4)$$

kus ρ on traadi materjali eritakistus, l traadi pikkus ning s traadi ristlõige.

Takistus muutub deformatsiooni toimet nii pikkuse kui ka ristlõike muutumise arvel.

Tensotajurite valmistamise nüüdistehnoloogia sarnaneb integraallülituste tehnoloogiale. Ühele integraallülitusele paigutatakse mitmest tajurist koosnev tensotundlik mõõteskeem, millele vajadusel lisatakse ka võimendi ning signaaluundur. Pooljuht-tensotajurite üheks omaduseks on ka see, et nende abil saab ühe lülitusega mõõta erinevaid füüsikalisi suurusi, nt. rõhku ja temperatuuri.

3.4.3. Termotakistustajurid

Termotakistustajurite töö põhineb metallide ja pooljuhtide elektrilise takistuse muutumisel sõltuvalt temperatuurist. Takistuse ja temperatuuri vaheline sõltuvus $R = f(\vartheta)$ on paljude materjalide korral väga stabiilne ning suures ulatuses lineaarne. Kuna takistuse muutumist on võimalik lihtsalt muundada pinge või voolu muutumiseks, on termotakistustajurid suhteliselt lihtsa ehitusega. Nendega saab mõõta temperatuuri alates absoluutse nulli lähedalt kuni $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja enam, kusjuures saab eristada temperatuuri muutusi alates $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Termotakistustajurites kasutatakse takistuse suure temperatuuriteguriga materjale, milleks sobivad enam mõningad puhtad metallid, sest sulamite korral on takistuse temperatuuritegur väiksem. Anduris kasutatav materjal peab olema keemiliselt inertne kogu mõõdetavas temperatuurivahemikus. Metallide väiksema oksüdeerumise põhjustab takistuse suurenemine, mis anduri väljundsignaali seisukohalt on samaväärne temperatuuri tõusuga ning järelkult rikub anduri gradueeringu. Kõige sobivamad on materjalid, mille takistuse temperatuuritegur sõltub temperatuurist lineaarselt. Termotakistustajurite põhilisteks materjalideks on plaatina, vask, nikkel ja raud. Kõige enam sobib neist omakorda plaatina, mis on keemiliselt inertne ning millel on lineaarne tunnusjoon.

Termotakistustajuritena kasutatakse ka paljusid pooljuhtmaterjale, millest valmistatakse negatiivse takistuse temperatuuriteguriga **termistore** ning positiivse takistuse temperatuuriteguriga **posistore**.

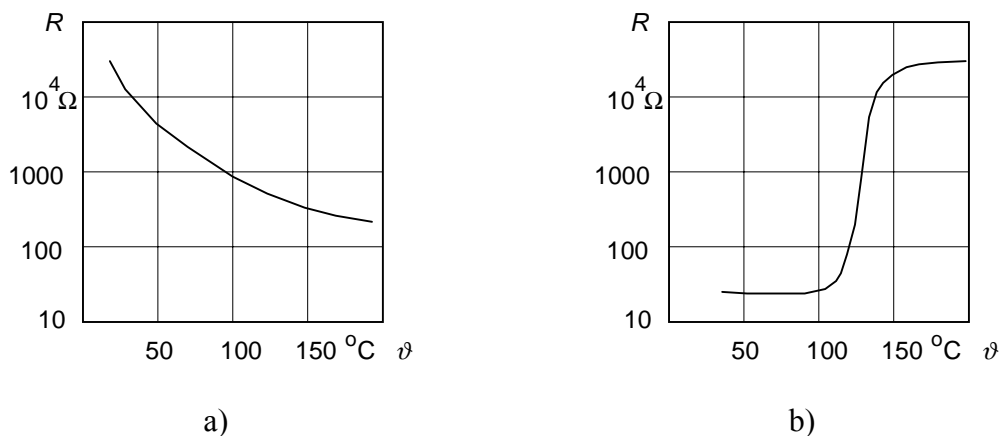
Termistoridele on iseloomulik takistuse eksponentsiaalne sõltuvus temperatuurist:

$$R = R_{\infty} e^{\frac{B}{\vartheta}} = R_{\infty} e^{-\alpha\vartheta}, \quad (3.5)$$

kus R_{∞} ja B on materjalist sõltuvad tegurid, ϑ - absoluutne temperatuur K. Järelikult on termistori takistuse temperatuuritegur

temperatuuri kahanev funktsioon, s. t. temperatuuri tõustes temperatuuriteguri absoluutväärtus langeb. Tundlikkuse poolest ületavad termistorid tunduvalt metallilisi materjale. Nende takistuse temperatuuritegur α ulatub väärtuseni $-(2...8) \%/^{\circ}\text{C}$, mis on kuni 10 korda suurem kui metallidel.

Posistore valmistatakse baariumtitanaadist BaTiO_3 . Toatemperatuuril on puhas baariumtitanaat dielektrik, kuid väikeses koguses legerivaid lisandeid, nagu lantaan või tseerium, muudavad ta juhtivaks. Tavaliselt on posistoride takistus 20°C juures $10...100 \Omega$, kuid temperatuuri suurenemisel toimub vahemikus $60...120^{\circ}\text{C}$ posistori takistuse järsk suurenemine kuni $10^4...10^5 \Omega\text{m}$. Niisugused omadused võimaldavad posistori kasutada tundliku termotajurina.



Joonis 3.5. Pooljuht-termotajurite tunnusjooni
a) termistor; b) posistor

3.4.4. Induktiivtajurid

Induktiivtajuriteks nimetatakse suurt rühma tajureid, kus sisendsuuruse (deformatsiooni, nihke, jõu, momendi) muutus põhjustab elektromagnetilise süsteemi induktiivsuse muutumist. Lugedes suhteliselt väikese õhupiluga ferromagnetilises süsteemis puistevoo tühiseks, võib mähise induktiivsuse avaldada valemiga:

$$L = \frac{w^2}{Z_m} = G_m w^2, \quad (3.6)$$

kus w - mähise keerdude arv, G_m - magnetahela kompleksne magnetiline juhtivus. Seejuures $G_m = 1/Z_m$, kus Z_m on magnetahela kompleksne magnetiline takistus.

$$Z_m = \sqrt{(R_\mu + R_\delta)^2 + X_m^2}, \quad (3.7)$$

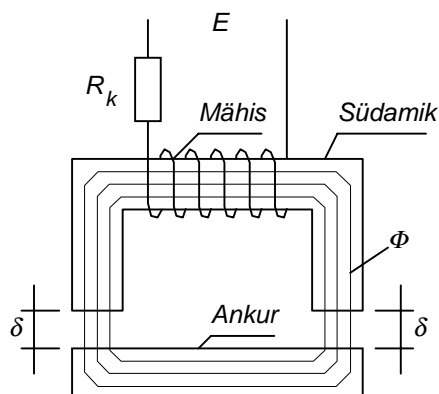
kus $R_\mu = \frac{l}{\mu S_\mu}$ on magnetahela ferromagnetilise osa magnetiline takistus,

l - ferromagnetilise südamikü pikkus; S_μ - ferromagnetilise südamikü ristlõige, $\mu = \mu_T \mu_0$ - südamikü magnetiline läbitavus, μ_T - suhteline magnetiline läbitavus, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$; $R_\delta = \frac{1}{\mu_0 G}$ on õhupilu magnetiline takistus, G - magnetiline juhtivus

(sõltub õhupilu geomeetrisest kujust); $X_m = \frac{P_\mu}{\omega \Phi^2}$ - magnetahela magnetiline reaktiivtakistus, tingituna pöörivooludest ja hüstereesist, P_μ - magnetahela kaovõimsus, $\omega = 2\pi f$, f - sagedus, Φ - magnetvoo efektiivväärtus.

Toodud valemite järgi võib konstrueerida peaaegu kõiki olemasolevate induktiivtajurite liike, s. o.: 1) muudetava keerdude arvuga w , 2) deformatsiooni toimet muutuva μ_T -ga, 3) muutuva õhupiluga (muutub R_δ), 4) alalise eelmagneetimise abil muudetava magnetahela takistusega (muutuvad R_μ ja R_δ) ja 5) ekraani või lühiskeeru abil muudetava reaktiivtakistusega X_m tajureid.

Praktikas kasutatakse lihtsa ehituse tõttu kõige enam muudetava õhupiluga induktiivtajureid (joonis 3.6).



Joonis 3.6. Muudetava õhupiluga induktiivtajur

Induktiivsus on avaldatav kujul

$$L = \frac{\mu_0 S_\mu w^2}{2\delta}. \quad (3.8)$$

Seega, ülekaalus on lineaarne magnetiline takistus, mistõttu siinuselise toitepinge korral on ka vool tajuris siinuseline.

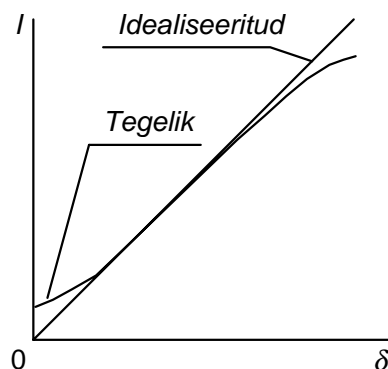
$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad (3.9)$$

kus E on toitepinge, $R = R_k + R_0$ on ahela aktiivtakistus, R_k - anduri koormustakistus, R_0 - mähise aktiivtakistus,

Kuna mähise induktiivtakistus on tavaliselt palju suurem, kui ahela aktiivtakistus, võib tajuri voolu sõltuvalt õhupilust avaldada valemiga

$$I \approx \frac{E}{\omega L} = \frac{2E}{\mu_0 \omega w^2 S_\mu} \delta. \quad (3.10)$$

Seega, juhul kui ei arvestata mähise aktiivtakistust, ferromagnetilise südamiku magnetilist takistust ja puistevoogu, saadakse voolu lineaarne sõltuvus õhupilust $I = f(\delta)$. Reaalne tunnusjoon $I = f(\delta)$ erineb lineaarsest väikeste õhupilude piirkonnas R_μ ning suurte õhupilude puhul magnetahela ehituse ja puistevoo mõju tõttu (joonis 3.7).



Joonis 3.7. Vahelduvvoolutoitega induktiivtajuri voolu sõltuvus õhupilust

Kui mähist läbib vool, tekib ankrule ja südamiku vahel tõmbejõud, mis väljundahela märgatava võimsuse ja väikese õhupilu korral on küllalt suur ning häirib tajuri tööd.

Toitepinge sageduse suurendamisega saab ankrule mõjuvat jõudu vähendada (suureneb induktiivtakistus X_L ja väheneb vool I , kuid sel juhul suurenevad ka kaod tajuri südamikus. Teiseks võimaluseks vähendada ankrule mõjuvat jõudu on diferentsiaalse induktiivtajuri kasutamine.

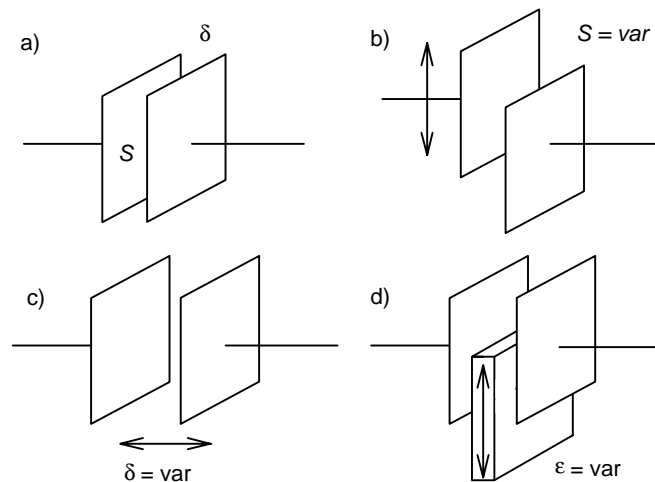
3.4.5. Mahtuvustajurid

Mahtuvustajurites muundatakse lineaarnihe või nurgamuutus kondensaatori mahtuvuse muutuseks. Plaatkondensaatori mahtuvus arvutatakse üldjuhul valemiga

$$C = \epsilon G_e = \epsilon \frac{S}{\delta}, \quad (3.11)$$

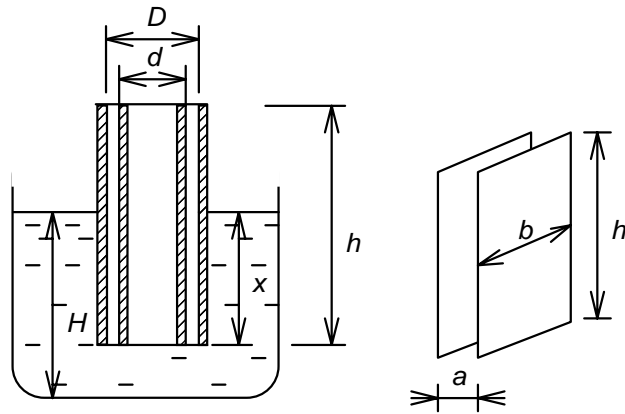
kus $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ on elektrodidevahelise keskkonna dielektriline läbitavus, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-6} \text{ F/m}$ on vaakumi dielektriline läbitavus, ϵ_r - suhteline dielektriline läbitavus, G_e -elektrodidevahelise pilu geometriline juhtivus. Seega, kondensaatori mahtuvust on võimalik muuta elektrodidevahelise pilu geometriliste mõõtmete või isolaatori dielektrilise läbitavuse muutmisega (joonis 3.8).

Muutuva dielektrilise läbitavusega mahtuvustajuriks on kahe vedelikku sukeldatud elektrodiga kondensaator, mille mahtuvus on vedelikku sukeldatud osa x ja väljaulatuva osa $h-x$ mahtuvuste summa. Dielektriliste vedelike ja puistematerjalide nivoo mõõtmisel kasutatakse isoleerimata elektroode (joonis 3.9).



Joonis 3.8. Plaatkondensaatori mahtuvuse muutumine
 a) kondensaatori põhiparameetrid; b) kattumispinna muutmine;
 c) õhupilu muutmine; d) dielektrilise läbitavuse muutmine

Seega, konkreetse tajuri mahtuvus on vedeliku või puistematerjali nivoo funktsioon $C = f(x)$ (tingimusel, et $\epsilon_m = \text{const.}$ ja $\epsilon_g = \text{const.}$), kusjuures anduri tundlikkus suureneb mõõdetava ja gaasilise keskkonna dielektrilise läbitavuse erinevuse suurenemisega ning vastupidi, tundlikkus läheneb nullile, kui $\epsilon_m \rightarrow \epsilon_g$.

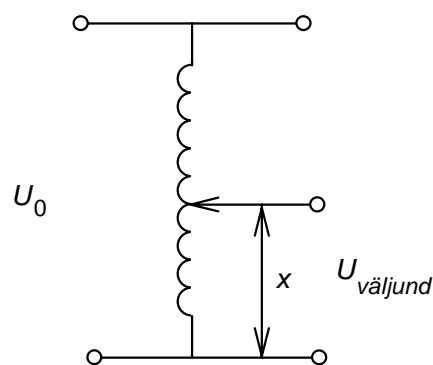


Joonis 3.9. Muutuva dielektrilise läbitavusega mahtuvustajur

Mahtuvustajurite elektrodide (plaatide) vastava profileerimisega on võimalik saada tajureid, mille mahtvus C on lineaarses sõltuvuses paagis oleva vedeliku ruumalast V , s. t. $C = c V$, kus c on tajuri erimahtvus. Kütuseandurite tajuritel $c = 0,001 \dots 0,005 \text{ pF/m}^3$.

3.4.6. Trafotajurid

Asendist sõltuva elektromotoorjõu saamise lihtsim viis on potentsiomeetrilise pingejaguri või autotrafo kasutamine. Kui potentsiomeetrilise pingejaguri võib vabalt liigitada takistustajurite hulka, siis autotrafo on pigem muutuva elektromotoorjõuga tajur ehk transformatoorne pingejagur (joonis 3.10). Autotrafo sekundaarpinge sõltub liuguri asendist. Kuna liugur kommuteerib trafo mähise väljavõtteid (või libiseb lihtsalt mööda trafo mähist), siis on väljundpinge mitte pidevalt, vaid astmeliselt muudetav. Trafo mähise keerdude arvu suurendamisega saab pinge diskreetsust (astmete suurust) vähendada.



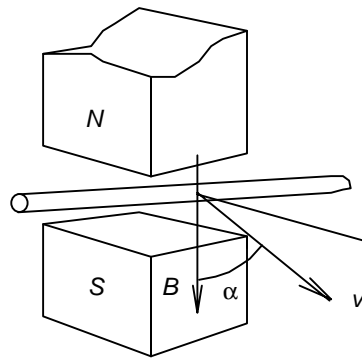
Joonis 3.10. Autotrafo

3.4.7. Elektromehaanilised generaatoritajurid

Muutuva elektromotoorjõuga tajuriteks on mitmesugused elektromotoorjõu generaatorid. Kõige levinum elektromotoorjõu genereerimise viis põhineb M. Faraday poolt avastatud elektromagnetilise induktsiooni seadusel. Selle seaduse kohaselt indutseeritakse magnetväljas liikuv juhis (joonis 3.11) elektromotoorne jõud, mis on võrdeline magnetvälja induktsiooni, liikumiskiiruse, juhi pikkuse ning magnetvoo- ja kiirusvektori vahelise nurga siinusega.

$$E = Bvl \sin \alpha. \quad (3.12)$$

Sellel seadusel põhineb kõigi elektrimasinate, sealhulgas ka pöörlemiskiiruse mõõtmiseks kasutatavate tahhogeneaatorite töö.



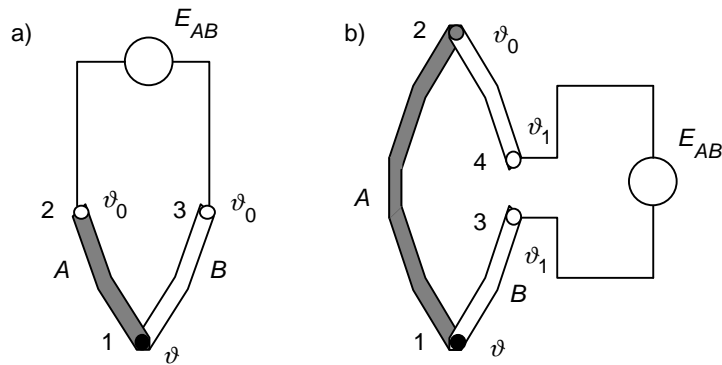
Joonis 3.11. Magnetväljas liikuv elektrijuht

3.4.8. Termopaartajurid

Termopaartajurid ehk termopaarid on samuti elektromotoorjõu generaatorid. Nende temperatuuridiapason on väga lai - absoluutse nulli vahetust lähedusest kuni metallide sulamistemperatuurideni. Temperatuuridel kuni 700 °C kasutatakse peale termopaaride ka teisi, nt. takistustermotajureid. Vahemikus 700...1600 °C kasutatakse praktiliselt ainult termopaare. Temperatuuril üle 1600 °C on peamiselt kasutusel optilised püromeetrid.

Termopaaridega saab mõõta otseselt temperatuuride vahet. Nende jadaühendusega saab oluliselt suurendada anduri väljundsignaali ning tundlikkust. Täpistermopaaridega mõõdetakse temperatuuride erinevust alates 10^{-6} °C.

Termopaaride töö põhineb 1821. a avastatud termoelektrilisel efektil, mis seisneb selles, et erinevatest juhtivatest materjalidest elektri ahelas tekib elektromotoorjõud, kui materjalide ühenduskohad hoitakse eri temperatuuridel (joonis 3.12). Nähtust seletatakse metallide elektronteooriaga, mille kohaselt metallides leidub alati vabu elektrone, kusjuures nende tihedus on erinevates metallides erinev.



Joonis 3.12. Termopaari ühendamine elektriahelasse

Eri metallide puutekohas tekib elektriväli, mis takistab elektronide edasist difusiooni. Nii kujuneb välja tasakaal. Tasakaaluolekus on metallide A ja B vahel mingi potentsiaalide vahe. Kuna vabade elektronide difusiooniprotsess sõltub temperatuurist, on ka ühenduskohtade elektromotoorjõud erinevad. Joonisel 3.12, a näidatud ahelas on kolm ühenduskohta, kusjuures ühenduskohtade 2 ja 3 temperatuur on võrdne $\vartheta_2 = \vartheta_3 = \vartheta_0$. Joonisel 3.12, b näidatud lülituses on neli ühenduskohta, kusjuures punktide 3 ja 4 temperatuur peab olema võrdne $\vartheta_3 = \vartheta_4 = \vartheta_1$. Mõlemad lülitused on tegelikult samaväärsed, sest termopaari elektromotoorjõud ei muutu, kui viia ahelasse kolmas juhe, mille otste temperatuurid on võrdsed. Elektromotoorjõud

$$E_{AB}(\vartheta - \vartheta_0) = f(\vartheta) - f(\vartheta_0). \quad (3.13)$$

Mõne metalli füüsikalisi omadusi, s. h. termoelektromotoorjõudu, iseloomustab tabel 3.4.

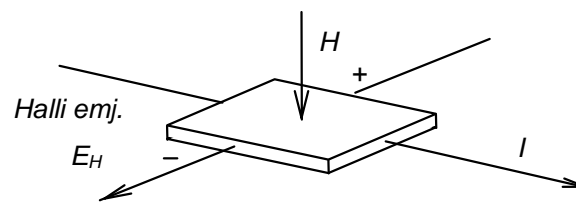
Tabel 3.4

Metallide füüsikalisi omadusi

Materjal	Termoemj. plaatina suhtes $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	Sulamis-temperatuur $^\circ\text{C}$	Eritakistus $10^6 \Omega\text{m}$	Takistuse temperatuuri-tegur, $10^3/^\circ\text{C}$
Alumiinium	+ 4,0	658	0,025...0,027	4,3
Alumell	- (10,2...13,8)	1450	0,33...0,35	1,0
Höbe	+ 7,2	960,5	0,0147	4,1
Konstantaan (60%Cu + 40%Ni)	- 35,0	1220	0,45...0,5	0,04
Kopell (56%Cu + 44%Ni)	- 40,0	1250	0,49	-0,1
Kromell (90%Cu + 10%Cr)	+ (27,1...31,3)	1450	0,7	0,5
Plaatina	0,00	1779	0,098...0,106	3,94
Raud	+ 18	1528	0,0907	6,25...6,57
Räni	+ 448			
Tsinkoksiid	-714			
Vask (juhtmed)	+ 7,6	1083	0,017	4,25...4,28
Volfram	+7,9	3410	0,055...0,0612	4,21...4,04

3.4.9. Halli tajurid

Halli tajuri töö põhineb Halli efektil, mis seisneb elektrivälja tekkimises magnetväljas asetsevas vooluga juhis. Elektrivälja on nii magnetväljaga kui ka voolu suunaga risti. Isotroopse (igas suunas ühesuguste füüsikaliste omadustega) juhi korral on elektrivälja tugevus $E = RH \times j$, kus H on magnetvälja tugevus, j voolutihedus ja R Halli konstant; viimane on pöördvõrdeline vabade laengukandjate kontsentratsiooniga juhis (joonis 3.13). Halli efekti põhjustab laengukandjate kõrvalekaldumine magnetvälja mõjul risti voolu suunaga. Metallides, kus vabade elektronide kontsentratsioon on suur, on Halli efekt nõrk. Pooljuhtides on Halli efekt seda märgatavam, mida suurem on elektronide ja aukude liikuvuse erinevus ning mida väiksem on pooljuhi elektrijuhtivus.



Joonis 3.13. Halli tajuri tööpõhimõte

Halli tajureid kasutatakse magnet- ja elektriväljade tugevuse mõõtmisel. Kuna vooluga juhi poolt tekitatud magnetvälja tugevus on võrdeline vooluga, kasutatakse Halli tajureid ka vooluandurites.

1980. a. avastati Halli kvantefekt: juhtivuselektronide liikumisel tugevas magnetväljas ja madalate temperatuuridel (1,5 K) olevas õhukeses (≤ 10 nm) elektrongaasikihis omandab Halli konstant ainult kindlaid väärtusi $R_H = h/ie^2$, kus i võib olla täisarv või mõni murdarv ($i = 1/3, 2/3, 2/5 \dots$), h on Plancki konstant ja e elementaarlaeng.

3.4.10. Piesotajurid

Nimetus pieso tuleneb kreekakeelsest sõnast piézo, mis tähendab survet. Piesotajuritena kasutatakse mitmesuguseid piesoelektrilisi materjale, millest tuntumad on kvarts, senjetisool ja baariumtitaanaat. Neist viimane kuulub nn. piesokeraamiliste materjalide hulka. Kristalliliste (anisotroopsete) materjalide korral on juhtivusomadused materjali eri suundades erinevad ning seepärast avaldub ka piesoeffekt eri suunas erinevalt. Piesoelektrilisi materjale saab kasutada mitmesuguste elektromehaaniliste muundurite nagu piesoelektriliste resonaatorite, mikrofonide, kõlarite ja andurite valmistamiseks.

Piesoelektrilisi materjale iseloomustavad järgmised suurused:

- Piesotajuri **elektromehaaniline ülekandetegur**

$$k_{em} = d \sqrt{\frac{4\pi E}{\varepsilon}}, \quad (3.14)$$

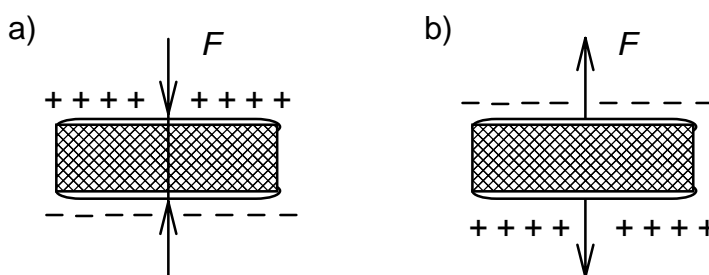
kus d on piesomoodul, E elastsusmoodul ja ε - dielektriline läbitavus.

- Piesotajuri **kasutegurit** iseloomustav suurus

$$k_{em}^2 / \tan \delta, \quad (3.15)$$

kus δ on dielektriline kaonurk.

Piesotajuritele esitatavad põhinõudeiks on suur elektriline ja mehaaniline vastupidavus, väike temperatuurisõltuvus, niiskusekindlus ning suur hüvetegur. On olemas nii otsene piesoefekt kui ka pieso pöördefekt. Piesotajurite töö põhineb otsesel piesoefektil, mille korral välise jõu toimel tekib piesomaterjali pinnal elektripotentsiaal (joonis 3.14). Pöördefekti kasutatakse piesotäiturites, nt. kõlarites ja mootorites, kus piesomaterjali elektilise mõjutamise tulemusena muutuvad tema mõõtmed. Piesoelektriliste materjalide omadustest annab ülevaate tabel 3.5.



Joonis 3.14. Piesotajuri tööpõhimõte
a) otsene piesoefekt; b) pieso pöördefekt

Tabel 3.5

Pieoelektriliste materjalide omadusi

Materjal	k_{em}	$k_{em}^2 / \tan \delta$
Kvarts	< 0,095	> 0,4
Senjetisool	0,67	<13
Baariumtitaanaat	0,16...0,17	1,5...2,2

Kristallide pieoelektrilised omadused sõltuvad nende struktuurist. Pieoelektrikuteks on kõik püroelektrikud, s. t. spontaanselt polariseeritud dielektrikud. Mehaanilise deformatsiooni korral muutub spontaanse polariseerituse suurus, mille tulemuseks on otsene piesoefekt. Pieoelektriline efekt tekib ka mõnede teiste materjalide, nt. kvartsi korral. Võib väita, et piesoefekti ei teki kristallides, millel on sümmeetrilise, s. t. polarisatsioon tekib vaid mittesümmeetriliste kristallide puhul.

3.4.11. Fototajurid

Masinate liikuvate osade asendi kindlakstegemiseks kasutatakse nüüdisajal üha enam optilisi signaale ning neid tuvastavaid fototajureid. Optiline infoedastus koosneb tavaliselt valgusvoo allikast, optilisest ülekandekanalist ning valgusvoo vastuvõtjast. Valgusvoo allikateks ehk saatjateks (*transmitter*) on nii nähtava kui ka infrapunakiirguse valgusdiodid. Valgusvoo vastuvõtjatena (*receiver*) kasutatakse fototakisteid ja fotoelemente.

Fototajurite töö põhineb mitmesugustel fotoelektrilistel nähtustel, mida põhjustab nähtav või infrapunane elektromagnetkiirgus. Fotoelektilised nähtused on kvantnähtused, mis tekivad valguskvandi (footonite) piisava energia korral. Gaasidele on iseloomulik fotoionisatsioon, mis suurendab nende elektrijuhtivust. Mittemetallilistes tahketes ainetes esineb mitut liiki fotoelektrilisi nähtusi. Kui footonid suudavad aatomeid või molekule üksnes ergastada, võib muutuda aine dielektriline läbitavus (fotodielektriline efekt). Kui neelduvate footonite energia ületab keelutsooni laiuse või atomaardefektide ionisatsioonienergia, tekib fotojuhtivus ehk sisefotoefekt. Tõkkekihis (pn-siire, pooljuhi ja metalli kokkupuutepind) kaasneb fotojuhtivusega harilikult ka fotoelektromotoorjõu teke (ventiilfotoefekt). Kui footonite energia on piisav tekitamiseks juhtivuselektrone, mis suudavad ületada energiabarjääri ning ainest väljuda, ilmneb fotoemissioon ehk välisfotoefekt. Välisfotoefekt on omane metallidele.

Fotojuhtivusel põhinevates pooljuhtfotoelementides muutub valguse toimel homogeense pooljuhi juhtivus (fototakisti) või vastupingestatud pn-siirde juhtivus (fotodiod, fototransistor) või tekib pn-siirde elektromotoorjõud (ventiilfotoefekt).

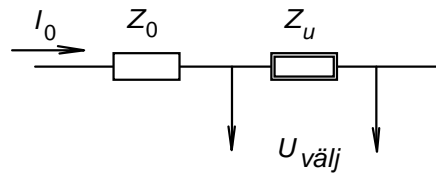
Fotojuhtivuse avastas 1873 USA insener W. Smith (1828 - 91), ventiilfotoefekti avastasid 1876 inglise füüsikud W. G. Adams (1836 - 1915) ja R. Day (s. 1844), fotoemissiooni 1887-88 H. Hertz ja saksa füüsik W. Hallwachs (1859 - 1922), selle kvantolemuse selgitas 1905 A. Einstein.

3.4.12. Tajurisignaali mõõtelülitused.

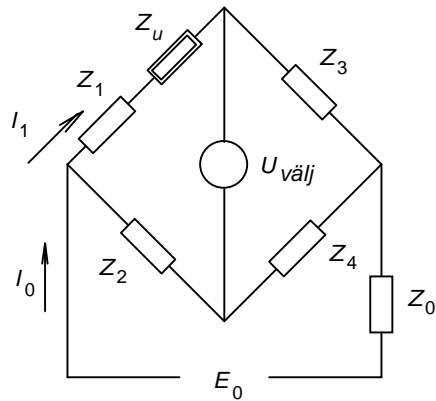
Tajurisignaali mõõtmiseks kasutatakse elektrotehnikas tuntud elementide põhilülitusi nagu jadalülitus, rööplülitus, sildlülitus ja diferentsiaallülitus.

Takistusliku, induktiivse või mahtuvusliku tajuri Z_U jadalülitus on näidatud joonisel 3.15. Tajurit ning sellega jadas olevat takistust Z_0 läbib konstantne vool I_0 . Väljundsignaaliks on tajuri pingelang. Jadalülituse peamiseks puuduseks on selle väike tundlikkus sisendsignaali muutuste suhtes, eriti siis kui sisendi muutus ΔZ_U on palju väiksem kui sisendi algväärtus Z_U s. t. $\Delta Z_U \ll Z_U$. Seda puudust pole sild- ja diferentsiaallülitusel.

Ühe või mitme tajuri sildlülitus on näidatud joonisel 3.16. Antud juhul on tajur Z_U lülitatud silla ühte õlga jadamisi takistusega Z_1 . Anduri tundlikkuse suurendamiseks võib tajuri jaotada mitmesse ossa ning lülitada need osad mitmesse silla õlga. Kasutatakse vastavalt 1, 2 või 4 sisendtajuriga sildlülitusi. Seejuures tuleb arvestada, et silla vastasõlgades peab sisendi muutus olema samamärgiline, naaberõlgades aga vastasmärgiline.

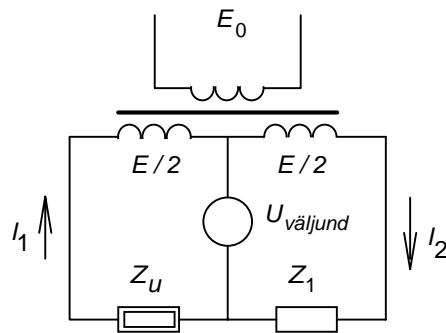


Joonis 3.15. Tajuri jadalülitus

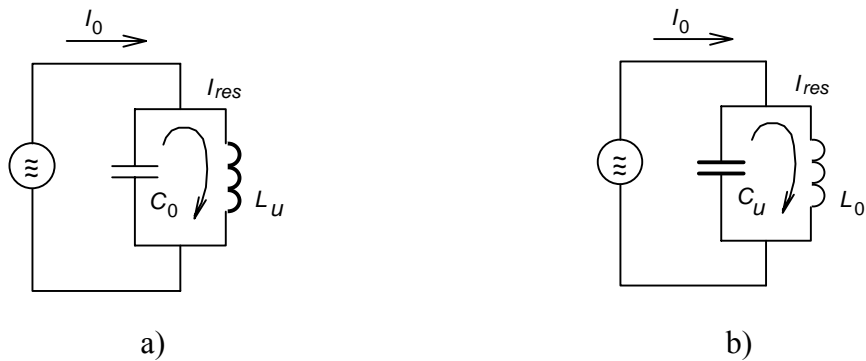


Joonis 3.16. Tajuri sildülitus

Tajuri diferentsiaallülitus on näidatud joonisel 3.17. Mõõtelülituse väljundis mõõdetakse tajuri ja seadetakisti voolude vahet ($I_1 - I_2$). Tajuri rööplülitused, mida enamikel juhtumitel kasutatakse resonantslülitustena on näidatud joonisel 3.18. Sel juhul on tajurina kasutatav induktiivsus või mahtuvus resonantskontuuri elemendiks.



Joonis 3.17. Tajuri diferentsiaallülitus



Joonis 3.18. Tajuri rööplülitused resonantsahelates
 a) tajuriks on induktiivsus; b) tajuriks on mahtuvus

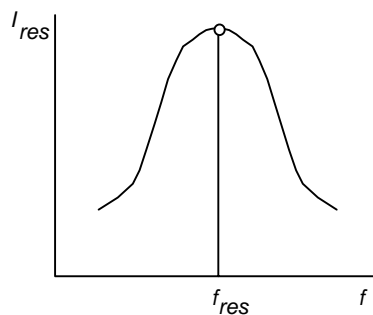
Resonantssagedus arvutatakse valemiga

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{C_0 L_u}} \quad \text{või} \quad \omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_u}}. \quad (3.16)$$

Resonantskontuuri vool on sageduse funktsioon, mille maksimum langeb kokku resonantssagedusega (joonis 3.19)

Resonantslülituses tajuri signaali saab kasutada mitmeti:

1. Mõõta kontuuri voolu maksimumile vastavat resonantssagedust, mis on sisendinduktiivsuse või sisendmahtuvuse funktsioon.
2. Kasutada positiivse tagasisidega (endaergutusega) resonantskontuuri, kus võnkumiste genereerimine või võnkumiste puudumine sõltub ahela parameetritest. Sisendparameetrik võib seejuures olla nii tajuri induktiivsus kui ka mahtuvus.



Joonis 3.19. Resonantskontuuri voolu sõltuvus sagedusest

Tajuri poolt genereeritava elektromotoorjõu mõõtmiseks kasutatakse jadalülitusi, kompensatsioonilülitusi ja sildlülitusi (joonis 3.20). Väljundpinge sõltub elektromotoorjõuallika (tajuri) sisetakistuse R_0 , ahela sisetakistuse R_s ning koormustakistuse suhtest R_k . Jadalülituse korral (joonis 3.20, a)

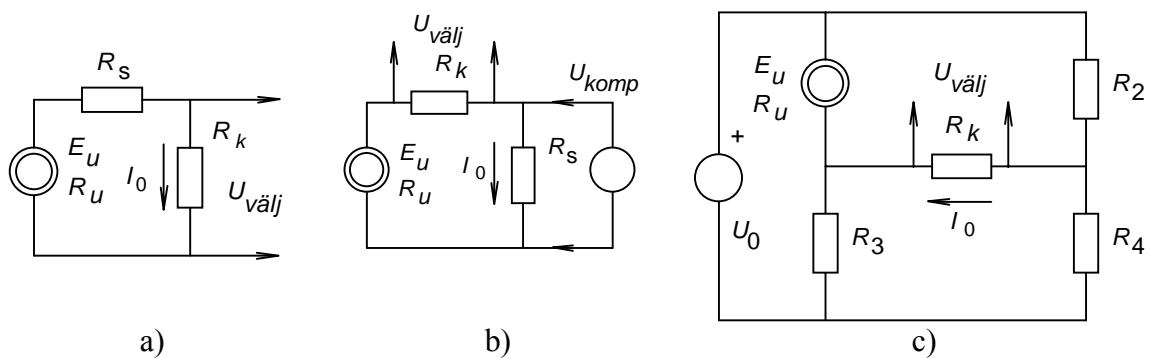
$$U_{\text{välj}} = I_0 R_k = \frac{E_u R_k}{R_k + R_u + R_s}. \quad (3.17)$$

Kompensatsioonilülituse korral (joonis 3.20, b)

$$U_{\text{välj}} = I_0 R_k = \frac{(E_u - U_{\text{komp}}) R_k}{R_k + R_u + R_s}. \quad (3.18)$$

Sildlülituse korral (joonis 3.20, c)

$$U_{\text{välj}} = I_0 R_k = \frac{E_u}{\left(1 + \frac{R_u R_2}{R_3 + R_4}\right) + R_u + R_2}. \quad (3.19)$$



Joonis 3.20. Tajuri elektromotoorjõu mõõtelülitused:
 a) jadalülitus; b) kompensatsioonilülitus; c) sildlülitus

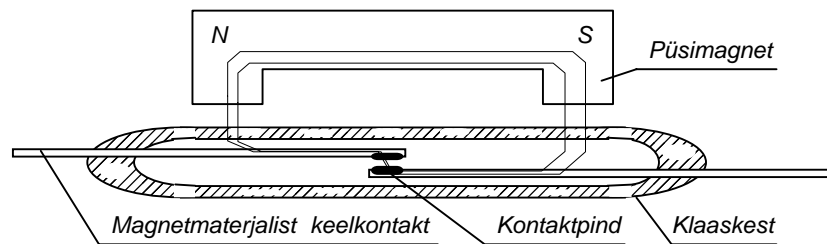
3.4.13. Keelkontakttajurid

Magnetmaterjalist keelkontaktid (joonis 3.21) on magnetväljale reageerivad diskreetse toimega tajurid. Keelkontaktid asuvad inertse gaasiga, nt. argooniga, täidetud hermeetilises klaaskestas. Magnetmaterjalist kontaktid täidavad mitut funktsiooni. Nad on samaaegselt nii magnetjuhiks, elektrijuhiks kui ka kontakti ennistusvedruks. Kontakttakistuse vähendamiseks ning oksüdeerumise vältimiseks on kontaktipinnad kaetud väärismetalliga, nt. kulla või platinaga.

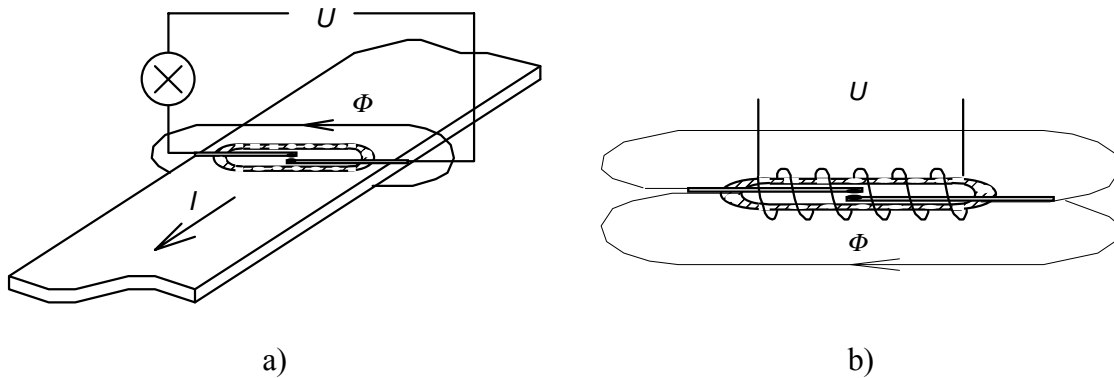
Keelkontaktide töölerakendamiseks tuleb tekitada magnetvoog, mis läbib kontaktide vahelist õhupilu. Magnetvoo tekitamiseks võib kasutada püsिमagnetit (joonis 3.21), keelkontakti läheduses olevat vooluga latti või teda ümbritsevat solenoidi (joonis 3.22).

Keelkontaktide vahemik on tavaliselt mõnest sajandikust kuni mõne kümnendiku millimeetriteni. Valmistatakse sulguvaid, ümberlülituvaid ning püsिमagnetitega polaar- ja mälukeelkontakte. Suuremate voolude kommuteerimiseks kasutatakse kaarekustutuskontaktiga keelkontakte. Tajuri seisukohalt on keelkontaktide puuduseks lai hüstereesisilmus, eeliseks aga suur toimekiirus (rakendusae g 0,5...2 ms), ning töökindlus.

Andurites kasutatakse keelkontaktajureid koos mehaaniliste muundurite ning püsिमagnetitega. Näiteks, kontakti lülitav püsिमagnet võib olla kinnitatud nivooanduri ujukiga, rõhuanduri manomeetrilise vedruga, asendianduri liuguriga jne.



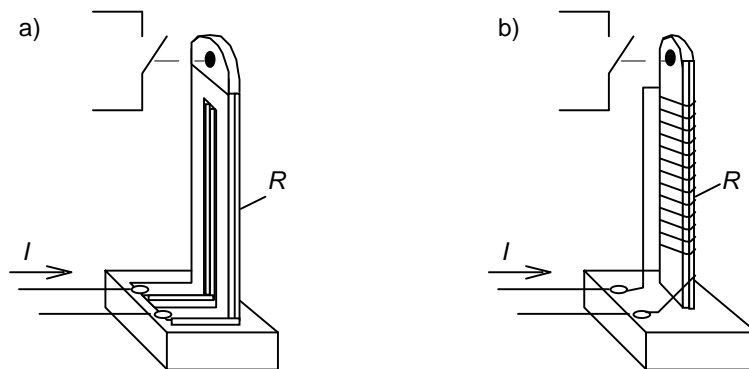
Joonis 3.21. Keelkontakt



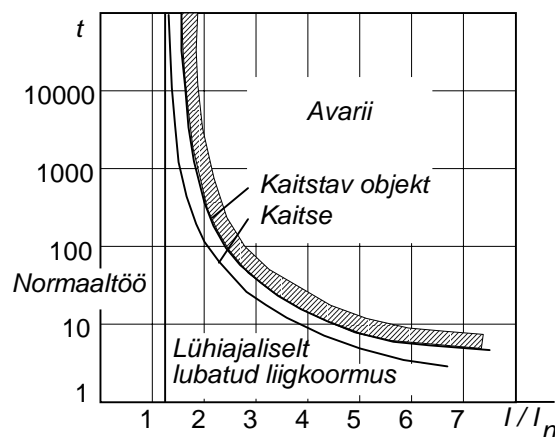
Joonis 3.22. Keelkontaktide kasutamine:
a) voolutajurina, b) elektromagnetilise releena

3.4.14. Bimetalltajorid

Bimetalltajorit ehk termoreleed kasutatakse mitmesuguste seadmete ning elektriahelate kaitseks liigsoojenemise eest. Bimetalltajor koosneb kahest erineva soojuspaisumisega metallist (joonis 3.23). Soojenemisel bimetall kaardub väiksema soojuspaisumisega metalli suunas. Kui bimetalltajor on mehaaniliselt ühendatud elektriliste kontaktidega, toimub bimetall-lehe kaardumisel kontaktide ümberlülitumine (termorelee rakendumine). Bimetalltajori ülesandeks on kaitstava objekti soojuslike omaduste modelleerimine ning väljundsignaali hüppeline muutmine kahjulike pöördumatute muutuste või avariiohu tekkimisel. Näiteks, liigkoormusvool toimib nii kaitstavale objektile kui ka bimetalltajorile, kusjuures mõlemad soojenevad voolu toimetel. Bimetalltajori rakendumislävi valitakse vastavalt kaitstavale objektile nii, et termorelee rakenduks enne kui liigkuumenemine muutub kaitstavale objektile ohtlikuks. Seega, bimetalltajor on sisendsuurusest sõltuva toimega releetajuri, kusjuures tema rakendumisaeg on soojenemisprotsessi kestuse tõttu suhteliselt suur. Bimetalltajoriga termorelee sekund-amper tunnusjoon on joonisel 3.24.



Joonis 3.23. Bimetalltajoriga termoreleed:
a) otseküttega; b) kaudse küttega



Joonis 3.24. Bimetalltajoriga termorelee sekund-amper tunnusjoon

Eeldades, et bimetalitajuri soojenemine toimub kiiresti ning soojenemise ajal soojusülekanne keskkonda ei toimu, saab väita, et soojenemisprotsess on adiabaatiline.

Sel juhul on termorelee rakendusmisaja sõltuvus voolust logaritmilistes koordinaatides kujutatav sirgjoonena. Vastavat tunnusjoont nimetatakse sekund-amper tunnusjooneks. Elektrisüsteemides iseloomustab see tunnusjoon kõiki liigkoormuse kaitseaparaate, sealhulgas ka termoreleesid. Üldjuhul saab bimetal-termotajuri rakendumisaja arvutada valemiga

$$t_{rak} = T_{\vartheta} \ln \frac{(I/I_n)^2 - (I_0/I_n)^2}{(I/I_n)^2 - (I_{\infty}/I_n)^2}, \quad (3.20)$$

kus T_{ϑ} on termorelee ajakonstant, I/I_n on suhteline vool I_0/I_n - suhteline algvool ning I_{∞}/I_n suhteline vool kui rakendumisaeg läheneb lõpmatusale.

Kui termorelee lülitatakse sisse jahtunud olekus, s. t. $I_0/I_n = 0$ ja rakendumisaeg

$$t_{rak} = T_{\vartheta} \ln \frac{(I/I_n)^2}{(I/I_n)^2 - (I_{\infty}/I_n)^2}. \quad (3.21)$$

3.4.15. Optopaartajurid

Nüüdissüsteemides kasutatakse optopaartajureid enamikel juhtudel diskreetsete signaalide tuvastamiseks, kusjuures anduri komplekti kuuluvad nii valgusvoo allikas, modulaator kui ka signaali vastuvõtja.

Valgusvoo muudab diskreetseks elektriline või mehaaniline modulaator. Elektriline modulaator kujutab endast valgusvooallika (tavaliselt valgusdiodi või laserdiodi) juhtlülitus. Valgusdiodi voolu diskreetisel muutmisel, muutub sama seaduspärasuse järgi ka diodi valgusvoog. Järelkult kujutab valgusvoo elektriline moduleerimine endast valgusdiodi voolu reguleerimist ühel võimalikul pulsimumulatsioonil põhimõttel. Mehaanilisi modulaatoreid kasutatakse mehaanilise liikumise tuvastamiseks. Pöördliikumise korral kasutatakse valgusvoo moduleerimiseks pilu- ja koodkettaid, mis liikumisel sulgevad perioodiliselt valgusvoo pääsu saatjalt vastuvõtjale. Valgusimpulsside sagedus iseloomustab liikumise kiirust, impulsside arv aga asendimuutust ehk siiret. Impulsside sageduse ning ühtlasi täpsuse suurendamiseks kasutatakse valgusvoo teel lisaks modulatsiooniketta piludele veel rasterplaate. Pilude ja ratri koostoimel valgusimpulsside sagedus mitmekordistatakse.

Koodkettad on mitmekanalilised ning väljastavad asendile vastava kahendkoodi. Linearse liikumise tuvastamiseks kasutatakse sama põhimõtet, kuid modulatsiooniketaste asemel kasutatakse samaks otstasbeks pilu ning koodimustriga varustatud liugureid.

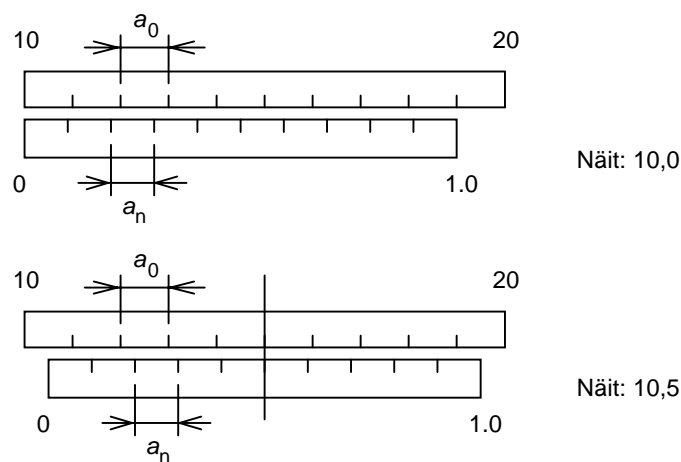
3.4.16. Täpsuse suurendamine nooniuse ja rastritega

Noonius on mõõteriista või anduri täpsust suurendav vahend, millega saab moodustada skaalajaotise murdosi. Elektrilistes andurites kasutatav noonius sarnaneb oma põhimõttelt mehaaniliste joonmõõtevahendite nooniuusele. Nooniuskaala jaotise väärtus määratakse valemiga

$$a_n = ma_0 \pm c = ma_0 \pm \frac{a_0}{n}, \quad (3.22)$$

kus a_0 on põhiskaala jaotis, m nooniuskaala moodul ja n skaalajaotiste arv (c on nooniuuse diskreetsus). Nooniuskaala jaotiste arv n näitab, mitu korda on nooniuuse viga põhiskaala veast väiksem.

Nooniuse põhimõtet saab rakendada eri tüüpi asendiandurites, nt. mitmepooluselistes elektrimasinandurites või fotoelektrilistes impulssandurites. Mitmepooluseliste elektrimasinandurite korral tehakse staatori ja rootori poolusjaotused vastavalt nooniuusele erinevad. Staatori ja rootori suhtelisel liikumisel indutseeritakse sel juhul mõõtemähises pulsseeruv pinge, mille sagedus on nooniuuse skaalajaotiste arv korda suurem kui staatori ja rootori ühesuguse poolusjaotuse korral.

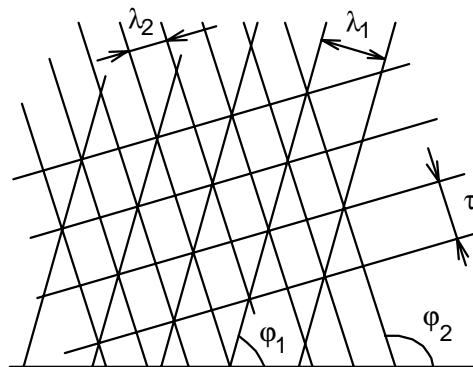


Joonis 3.25. Noonius

Nooniuse leiutas 1631. aastal prantsuse matemaatik P. Vernier ja nimetas seda portugali matemaatiku P. Nuñeze (lad. Nonius 1492 - 1577) järgi. Optikas on laialt levinud rastrite kasutamine. Raster on paljudest ühetaolistest elementidest koosnev optikasüsteem. Mõnikord nimetatakse niisuguseid süsteeme ka meandriteks.

Andurites kasutatakse rastreid samaks otstarbeks nagu noonius. Rastriks võivad olla teineteise suhtes teatud nurga all kaldu olevate piludega plaadid, mida nimetatakse rastrivõreks. Kahe rastrivõre sobitamisest annab ülevaate joonis 3.26. Ühe võre pilud on sammuga λ_1 ja kaldu nurga all φ_1 , teise võre pilud aga sammuga λ_2 ning nurga all φ_2 . Kahe võre pilud langevad omavahel kokku punktides, mis asuvad samuti sirgjoontel sammuga τ .

Seega, rastri abil saab moodustada uue skaal jaotusega τ . Rastrivõrede sammude ning kaldenurkade sobiva valikuga saab uue skaalajaotise muuta tunduvalt väiksemaks kui on rastrapilude jaotus.



Joonis 3.26. Rastrivõrede sobitamine