

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko

Aleš Belič

# **Gradniki in tehnologije v sistemih vodenja**

Ljubljana 22. januar 2012



## Predgovor

Obravnava snovi pri predmetih Gradniki v sistemih vodenja na Univerzitetnem študijskem programu in Gradniki v tehnologiji vodenja na visokošolskem strokovnem študijskem programu Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani je nekoliko drugačna kot pri ostalih predmetih na smeri Avtomatika. Čeprav sta to dva od osnovnih predmetov na smereh, pa se vendarle ne navezujeta čisto neposredno na ostale predmete na študijskih programih Avtomatike. Učbenik obravnava praktične in izvedbene vidike sistemov vodenja, ki ostanejo pri poglobljeni obravnavi algoritmov vodenja mnogokrat v ozadju. Izbira ustreznih merilnih sistemov, krmilnikov ali regulatorjev ter izvršnih sistemov, ki pokrijejo potrebe po moči in preciznosti vodenja, je ključna za kvalitetno izvedbo vodenja. Ne glede na dobro načrtano shemo vodenja, je na koncu vse odvisno od izvedbe. V praksi je delež vloženega dela v resnici močno na strani izvedbenih problemov sistema vodenja, medtem ko se algoritmom vodenja posvetimo šele proti koncu izvedbe, ko je običajno premalo časa, da bi algoritem in njegove parametre optimalno nastavili. Pomen snovi tega predmeta za izvedbo sistemov vodenja je torej nesporen. Po drugi strani pa je to predmet, ki zahteva precej učenja na pamet, saj je potrebno široko poznavanje možnih podsistemov in principov delovanja. Snov, ki je zbrana v tej knjigi je plod lastnih izkušenj avtorja na tem področju s pomembnimi prispevki prof. dr. Riharda Karbe, prof. dr. Juša Kocijana, prof. dr. Maje Atanasijević-Kunc, doc. dr. Gregorja Klančarja in dr. Janka Petrovčiča, ki že dolga leta sodelujejo na temah, ki jih predmet obravnava. Na vsebino in obliko prikaza snovi v učbeniku pa so vplivali tudi vsi ostali sodelavci Laboratorija za modeliranje, simulacijo in vodenje ter Laboratorija za avtonomne mobilne sisteme, posebej pa Milan Simčič pri oblikovanju grafičnih prikazov.

Glede na način razmišljanja in dela študentov v današnjem času so klasične knjige nekoliko neustrezen medij za študij. Da premostimo ta razkorak so glavni deli navedene literature internetne strani proste enciklopedije Wikipedija in strani proizvajalcev opreme. Tako je študentom omogočeno enostavno iskanje po prosto dostopnih virih, ki obravnavano snov še dodatno osvetljujejo.

Študenti in diplomanti so danes pod vedno večjim pritiskom, da prikažejo svoje sposobnosti za reševanje problemov in si s tem zagotovijo ustrezno zaposlitev in vir zanesljivega preživetja. Čeprav je področje avtomatizacije kadrovske podhranjeno, pa prostora za slabe inženirje ni veliko, saj so naloge, ki jih morajo opravljati, zahtevne. Upam, da jim bo ta knjiga pri tem v pomoč.



# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Kratek pregled osnovnih pojmov s področja vodenja sistemov</b>	<b>13</b>
2.1	Standardne strukture vodenja sistemov . . . . .	13
2.1.1	Krmiljenje . . . . .	14
2.1.2	Krmiljenje z upoštevanjem motnje . . . . .	14
2.1.3	Povratnozančna regulacija . . . . .	15
2.1.4	Povratnozančna regulacija z upoštevanjem motnje . . . . .	16
2.1.5	Kaskadna regulacija . . . . .	16
2.1.6	Regulacija razmerja . . . . .	17
2.2	Standardni algoritmi vodenja sistemov . . . . .	18
2.2.1	Dvopoložajno vodenje . . . . .	19
2.2.2	Proporcionalno-integrirno-diferencirno vodenje . . . . .	19
2.3	Parametri kvalitete vodenja . . . . .	21
2.4	Prehod iz bločne sheme vodenja do sheme z gradniki . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Pomembnejše oznake gradnikov in naprav</b>	<b>25</b>
3.1	Oznake gradnikov v tehnoloških shemah . . . . .	25
3.1.1	Grafični simboli v tehnoloških shemah . . . . .	25
3.1.2	Alfanumerične oznake v tehnoloških shemah . . . . .	27
3.2	Stopnje zaščit električnih naprav IP . . . . .	27
3.3	Stopnje mehanskih zaščit električnih naprav IK . . . . .	29
3.4	Eksplozijska zaščita gradnikov . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Tehnologije prenosa informacij med gradniki</b>	<b>33</b>
4.1	Analogni električni prenos informacije . . . . .	33
4.1.1	Nivoji signalov v analognem prenosu informacije . . . . .	34
4.1.2	Pretvorba v digitalne signale . . . . .	34
4.2	Digitalni prenos informacije . . . . .	35
4.2.1	Sistemi digitalnega prenosa podatkov . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Merilni sistemi</b>	<b>45</b>
5.1	Lastnosti merilnih sistemov . . . . .	46
5.2	Merjenje pozicije in orientacije . . . . .	48
5.3	Merjenje oddaljenosti . . . . .	51
5.4	Merjenje linearnega pomika . . . . .	52
5.4.1	Uporovni merilniki pomika . . . . .	52

5.4.2	Kapacitivni merilniki pomika . . . . .	54
5.4.3	Induktivni merilniki pomika . . . . .	56
5.4.4	Optični merilniki pomika . . . . .	59
5.4.5	Merilniki bližine . . . . .	61
5.5	Merjenje zasuka . . . . .	63
5.5.1	Uporovni merilniki zasuka . . . . .	64
5.5.2	Kapacitivni merilniki zasuka . . . . .	64
5.5.3	Induktivni merilniki zasuka . . . . .	65
5.5.4	Optični merilniki zasuka . . . . .	67
5.6	Merjenje nivoja kapljev . . . . .	69
5.6.1	Neposredne meritve . . . . .	69
5.6.2	Pretvorba v maso . . . . .	70
5.6.3	Pretvorba nivoja v tlak . . . . .	71
5.6.4	Vzgonske metode . . . . .	73
5.6.5	Radioaktivne metode . . . . .	75
5.6.6	Pretvorba nivoja v električne veličine . . . . .	75
5.6.7	Vpliv nivoja na prevajanje zvoka . . . . .	79
5.6.8	Optične metode . . . . .	79
5.7	Merjenje nivoja sipkih materialov . . . . .	80
5.8	Merjenje debeline . . . . .	81
5.9	Merjenje linearne hitrosti . . . . .	81
5.10	Merjenje hitrosti vrtenja . . . . .	83
5.11	Merjenje pretoka tekočin . . . . .	86
5.11.1	Volumetrični merilniki ali merilniki s pozitivnim pomikom . . . . .	87
5.11.2	Pretvorba pretoka v silo ali tlak . . . . .	89
5.11.3	Pretvorba pretoka v električne veličine . . . . .	96
5.11.4	Pretvorba pretoka v vrtince . . . . .	96
5.11.5	Vpliv pretoka na prevajanje zvoka . . . . .	97
5.11.6	Vpliv pretoka na prevajanje vibracij po cevovodu . . . . .	99
5.11.7	Pretvorba pretoka v vrtenje . . . . .	100
5.11.8	Pretvorba pretoka v toplotne izgube grelnih teles . . . . .	101
5.12	Merjenje pretoka sipkih materialov . . . . .	102
5.13	Merjenje linearnega pospeška . . . . .	102
5.14	Merjenje rotacijskega pospeška . . . . .	103
5.15	Merjenje mase . . . . .	103
5.16	Merjenje sile . . . . .	104
5.17	Merjenje navora . . . . .	105
5.18	Merjenje tlaka . . . . .	107
5.18.1	Merjenje srednjih tlakov . . . . .	107
5.18.2	Merjenje visokih tlakov . . . . .	112
5.18.3	Merjenje nizkih tlakov (srednjega vakuumu) . . . . .	112
5.18.4	Merjenje ultra nizkih tlakov (visokega in ultra visokega vakuumu) . . . . .	113
5.19	Merjenje temperature . . . . .	114
5.19.1	Kontaktne metode merjenja . . . . .	115
5.19.2	Brezkontaktne metode merjenja . . . . .	124
5.20	Merjenje gostote . . . . .	126
5.20.1	Merjenje gostote kapljev . . . . .	126

5.20.2	Merjenje gostote plinov . . . . .	128
5.20.3	Merjenje gostote trdnih snovi . . . . .	129
5.21	Merjenje viskoznosti . . . . .	129
5.21.1	Viskoznost kapljevin . . . . .	130
5.21.2	Viskoznost plinov . . . . .	132
5.22	Toplotna prevodnost . . . . .	133
5.22.1	Toplotna prevodnost tekočin . . . . .	133
5.22.2	Toplotna prevodnost izolacijskih trdnih snovi . . . . .	134
5.22.3	Toplotna prevodnost prevodnih trdnih snovi . . . . .	135
5.23	Merjenje vlage . . . . .	136
5.23.1	Vlažnost plinov . . . . .	136
5.23.2	Mokrost trdne snovi . . . . .	139
5.24	Merjenje bioelektričnih signalov . . . . .	140
5.25	Neinvazivno merjenje notranje zgradbe predmetov . . . . .	141
5.26	Merjenje električne prevodnosti, faktorja pH in redoks potenciala kapljevin . . . . .	142
5.27	Merjenje molekularne sestave snovi . . . . .	143
5.27.1	Kromatografija . . . . .	145
5.27.2	Masna spektrometrija . . . . .	147
5.27.3	Metode za določanje izražave genov in genskega zapisa . . . . .	148
<b>6</b>	<b>Regulatorji in krmilniki</b>	<b>151</b>
6.1	Industrijski regulatorji . . . . .	151
6.2	Programirljivi logični krmilniki . . . . .	153
6.2.1	Izvedbe krmilnikov . . . . .	154
6.2.2	Vezave stopenjskih merilnih in izvršnih sistemov na PLK . . . . .	155
6.2.3	Programiranje krmilnikov . . . . .	155
6.3	Osební računalniki v kombinaciji z vmesniškimi karticami za zajem podatkov . . . . .	156
6.4	Mikrokrmilniki . . . . .	156
6.5	Sistemi za varovanje krmilnikov ... . . . . .	157
6.6	Operaterski paneli . . . . .	158
6.7	Nadzorni sistem . . . . .	158
<b>7</b>	<b>Izvršni sistemi</b>	<b>159</b>
7.1	Izvori energije . . . . .	159
7.1.1	Elektrika . . . . .	160
7.1.2	Stisnjen zrak . . . . .	164
7.1.3	Hidravlična tekočina . . . . .	167
7.2	Močnostni pretvorniki . . . . .	168
7.3	Aktuatorji in končni izvršni členi . . . . .	172
7.3.1	Električni aktuatorji in končni izvršni členi . . . . .	172
7.3.2	Pnevmatski aktuatorji in končni izvršni členi . . . . .	183
7.3.3	Hidravlični aktuatorji in končni izvršni členi . . . . .	184
7.3.4	Črpalke . . . . .	187
7.3.5	Regulacijski ventili . . . . .	191
<b>8</b>	<b>Izvedbeni problemi sistemov vodenja</b>	<b>203</b>





# 1

## Uvod

Gradniki in tehnologije neposredno določajo izvedljivost sistemov vodenja. Skozi modernejšo zgodovino sistemov vodenja so se razvili raznovrstni algoritmi in sheme vodenja, ki pa so velikokrat obtičali v predalih, dokler tehnologija ni napredovala do te mere, da so jih lahko izvedli v praksi. Uvedba mikroprocesorja je omogočila uporabo nevronske mreže in mehkih modelov za regulatorje v industrijskem vodenju šele v 90' letih prejšnjega stoletja, čeprav so bile metode precej razvite že petdeset let prej. Po drugi strani pa so nove tehnologije tudi velikokrat sprožile razvoj algoritmov in pristopov k vodenju s tem, da so omogočile povsem nove vpoglede v vodene sisteme. Razvoj nadzvočnih letal je tako povzročil napredek področja adaptivnih sistemov, saj so potrebovali sistem vodenja, ki je uspešno deloval v širokem razponu izrazito nelinearne dinamike tovrstnih letal.

Algoritmi, gradniki in tehnologija vodenja vzajemno napredujejo. Čeprav večinoma označujemo za začetek avtomatike čas stare Grčije, ko so na področju Egipta izdelovali prve avtomate za prodajanje vode in razne molilne naprave, pa so v resnici prvi sistemi avtomatskega vodenja nastali z nastankom živih bitij. Še več, danes vedno bolj odkrivamo, da so naše iznajdbe v resnici le slabe kopije naravnih sistemov avtomatskega vodenja. Res pa je, da je imela narava na razpolago bistveno več časa za optimizacijo sistemov. Za začetek moderne dobe sistemov vodenja štejemo Wattovo iznajdbo regulatorja za parne stroje. Parni stroj je namreč nestabilen sistem, ki brez ustreznega nadzora povečuje hitrost vrtenja tako dolgo, dokler ne pride do poškodb sistema oz. dokler ima dovolj pare. To obdobje zaznamujejo enostavni mehanski regulacijski sistemi, ki so sicer zelo robustni a izdelani po naročilu za vsak stroj posebej. V 20' in 30' letih prejšnjega stoletja sta elektrotehnika in pnevmatika počasi začeli prevzemati vodilni vlogi v sistemih vodenja. Sistemi vodenja so bili sicer še vedno delani po naročilu za določen sistem, a so bili sestavljeni iz standardnih elementov, kar je pomenilo določen preskok pri razmišljanju o izvedbah, saj je moral inženir poleg tehnologij poznati tudi gradnike, ki so na bili na voljo za rešitev določenega problema. Izdelava gradnikov, ki so bili dostopni na tržišču ni bila smiselna in je preveč dražila razvoj. Naslednji pomemben korak je prineslo odkritje polprevodniških elementov, ki so naenkrat omogočali izvedbo zelo zapletenih algoritmov s sistemi, ki so zavzemali zelo malo prostora in porabili minimalno količino energije v primerjavi z vodenim sistemom. Tehnica se je s potrebo po podrobnem poznavanju in obvladovanju tehnologij za izvedbo gradnikov še bolj nagnila proti poznavanju že obstoječih elementov in gradnikov. Ker pa so bili na voljo večinoma osnovni elementi gradnikov, je bilo za uspešno izvedbo sistema vodenja nujno potrebno znanje o gradnji podsistemov vodenja iz osnovnih gradnikov. Ob vstopu mikroprocesor-

jev na področje vodenja pa se je celotno področje korenito spremenilo. Pnevmatiski sistemi za izvedbo algoritmov vodenja so se skoraj popolnoma umaknili, razen v nekaj omejenih primerih ko je potrebno delovanje v posebnih pogojih, kjer elektronske izvedbe ne delujejo zanesljivo ali pa ne izpolnjujejo določenih pogojev delovanja (visoke gostote magnetnih polj, stalne in visoke doze radioaktivnega sevanja, stalna izpostavljenost visoki vlagi in temperaturi, čista okolja (farmacija, prehrabena industrija), ...). S prodorom računalniških sistemov na področje vodenja pa so se osnovnem nivoju vodenja, ki zajema sisteme za neposredno vodenje naprav, kot so merilniki, regulatorji, krmilniki in izvršni sistemi, dodali še višji nivoji vodenja. Najprej se je pojavil nadzorni nivo, ki preko opazovanja stanj regulatorjev in krmilnikov nadzoruje pravilnost delovanja sistemov, beleži zgodovino delovanja in sproža alarme ob detektiranih nepravilnostih v procesih. Kasneje pa se je tema dvema nivojema pridružil proizvodni nivo, ki na osnovi strnjenih podatkov iz nadzornega nivoja pomaga pri vodenju celotne proizvodnje podjetja. Nad proizvodnim nivojem pa je poslovni nivo, ki iz podatkov proizvodnega nivoja analizira stanje in razvija srednjeročni plan. Nad njim pa je nivo strateškega odločanja, ki iz informacij poslovnega nivoja in glede na strateške načrte določa dolgoročni plan delovanja podjetja. Z ustrezno uporabo takšne sheme lahko dosežemo optimalno učinkovitost delovanja podjetja. Shema večnivojskega sistema vodenja je na sliki 1.1. V tej knjigi se bomo posvetili le najnižjemu nivoju z izjemo protokolov prenosa podatkov.



Slika 1.1: Piramida nivojev vodenja sistemov: s sivo je označen nivo, ki ga obravnava knjiga

Mikroprocesorji danes obvladujejo večino področja vodenja. S tem pa so se močno spremenila tudi znanja potrebna za uspešno izvedbo sistemov vodenja. V današnjem času je postalo najpomembnejše dobro poznavanje dostopnih gradnikov za izvedbo sistemov vodenja in tehnologij za komunikacijo med njimi. Gradnike in komunikacijo med njimi v celoti konfiguriramo s programskimi orodji. Znanja o delovanju gradnikov pa navidezno postajajo nepomembna. Res je, da za uporabo gradnikov, tehnologij za izvedbo le-teh večinoma ni potrebno poznati do podrobnosti, po drugi strani pa iz tehnologij izvedb gradnikov lahko izhajajo pomembne omejitve za njihovo pravilno delovanje. V času, ko pravna zaščita postaja najpomembnejši element izvedbe sistemov vodenja, pa je v kaj majhno uteho dejstvo, da pravno formalno nismo krivi za probleme vodenja, ker smo zadostili deklariranim pogojem delovanja gradnikov s strani proizvajalca, če pa bi na osnovi poznavanja uporabljene tehnologije lahko dokaj hitro ugotovili, da predlagana izvedba ne more v celoti zadovoljiti zahtev vodenja. Čeprav lahko danes sistem vodenja, ki uporablja gradnike izključno enega proizvajalca, sestavimo brez pravega poznavanja uporabljenih tehnologij, pa daje to lažni občutek, da obvladamo sintezo sistemov vodenja. Poznavanje tehnologij je kljub temu

ključnega pomena za kvalitetno izvedbo sistemov vodenja. Kvaliteta izvedbe pa je na srečo še vedno glavni parameter po katerem ocenjujemo inženirje in s katerim si gradimo lastni sloves.

Namen knjige je prikazati najnovejše tehnologije in gradnike na področju vodenja, skupaj z osnovnimi pojmi teorije vodenja, ki vplivajo na izbor gradnikov. V knjigo pa so vključeni tudi gradniki in tehnologije, ki so sicer manj aktualne, a jih še vedno lahko najdemo v sistemih vodenja, ki trenutno delujejo v industriji. Knjiga je sestavljena iz poglavij, ki opisujejo posamezne sklope gradnikov in tehnologij.

V drugem poglavju so predstavljeni osnovni pojmi s področja vodenja sistemov in sicer, tako standardne strukture v vodenju kot osnovni algoritmi vodenja. Namen tega poglavja je postaviti okvir obravnave gradnikov in tehnologij vodenja, ki sledijo v kasnejših poglavjih.

Označevanje gradnikov v shemah in njihova pripadnost v razrede električnih in protieksplozijskih zaščit je podano v tretjem poglavju.

V četrtem poglavju so obravnavani glavni načini prenosa podatkov. Bralec se tu sezna s klasičnimi analognimi sistemi prenosa informacije, ki počasi izginjajo iz uporabe v industrijskih sistemih, več poudarka pa je na digitalnih sistemih prenosa podatkov, ki vse bolj prevzemajo vodilno vlogo na področju.

Peto poglavje nudi obsežen pregled najpomembnejših metod merjenja najpogostejših veličin, ki jih srečamo v najrazličnejših sistemih, od vodenja letal, satelitov, preko procesne in izdelčne industrije, klimatizacije, do biomedicinskih sistemov. Poglavje obravnava sisteme za merjenje naslednjih veličin: pozicije in orientacije, linearnega in rotacijskega pomika, nivoja, debeline, linearne in rotacijske hitrosti, pretoka, linearnega in rotacijskega pospeška, mase, sile, navora, tlaka, temperature, gostote, viskoznosti, toplotne prevodnosti, vlage, električne prevodnosti in faktorja pH, bioelektričnih signalov, notranje zgradbe predmetov in molekularne sestave snovi.

Šesto poglavje prinaša osnovne podatke o regulatorjih in krmilnikih, s stališča zgradbe in povezljivosti na merilne in izvršne sisteme.

Pregled glavnih izvršnih sistemov skupaj z izvori energije in pretvorniki med krmilnimi in močnostnimi signali pa je prikazan v sedmem poglavju.

Sklepne besede o življenjskem ciklu uporabe gradnikov v sistemih vodenja v osmem poglavju. Poglavje prikazuje tudi vpliv na videz nepomembnih lastnosti na uspešnost delovanja sistema vodenja in poskuša pokazati na širino problematike, ki jo mora diplomirani inženir elektrotehnike na področju avtomatike poznati, da lahko uspešno izpelje projekte vodenja sistemov.



## 2

# Kratek pregled osnovnih pojmov s področja vodenja sistemov

Vodenje sistemov zajema zelo obsežno področje znanj, tehnologij in opreme in pomembno vpliva na naše življenje. Naj na tem mestu definiramo tri najpomembnejše pojme tega področja.

**Sistem** - množica elementov, ki so medsebojno odvisni in povezani tako, da delujejo kot celota.

**Element ali gradnik** - objekt, za katerega pred obravnavo ne poznamo notranjih veličin in odvisnosti temveč le tiste, ki jih lahko opišemo s spremembo vhodnih in izhodnih veličin.

**Proces** - vsaka kvalitativna in/ali kvantitativna sprememba stanj sistema v odvisnosti od časa - dinamičen sistem.

Vodenje sistemov je sistemska znanost, ki mora za uspešno reševanje problemov upoštevati celovitost obravnave. Čeprav je ta knjiga prvenstveno namenjena gradnikom in tehnologijam na področju vodenja, pa vendar ne moremo mimo osnovnih konceptov teorije vodenja. Sistem vodenja začnemo graditi na nivoju analize obstoječega stanja in teoretičnega načrtovanja. V tej fazi moramo nujno poznati strukture sistemov in algoritme vodenja, da lahko načrtamo ustrezen sistem vodenja.

## 2.1 Standardne strukture vodenja sistemov

Sisteme vodenja lahko delimo, glede na uporabljeno strukturo vodenja, na dve glavni skupini: krmiljenje in regulacijo. Čeprav na področju vodenja nimamo popolnoma enotnega poimenovanja, kar vnaša zmedo v tovrstno literaturo, se bomo v tej knjigi držali spodnjih definicij teh dveh izrazov.

**Krmiljenje** je vodenje pri katerem na sistem vplivamo brez sprotne spremljanja veličin sistema. Pri krmiljenju zato izhod sistema ne vpliva neposredno nazaj na njegovo delovanje.

**Regulacija** je način vodenja sistema, pri katerem je nujno sprotno spremljanje pomembnih veličin sistema. Izhodi sistema v regulaciji neposredno vplivajo na delovanje sistema, zato lahko rečemo, da v tem primeru sistem deluje v zaprti ali povratni zanki.

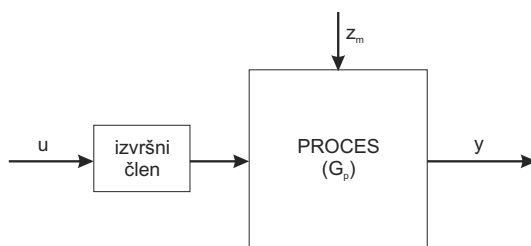
Vsaka od teh dveh glavnih skupin ima več variant, ki izboljšujejo pomanjkljivosti osnovne strukture.

### 2.1.1 Krmiljenje

Najenostavnejši način vodenja je odprtozančno vodenje ali krmiljenje. Kot smo že povedali, pri krmiljenju izhodna stanja sistema nimajo neposrednega vpliva na delovanje. Enačbe, ki opisujejo tako strukturo vodenja so naslednje:

$$y = G_p(u, z_m), \quad (2.1)$$

pri čemer pomenita:  $y$  - krmiljena veličina,  $G_p$  - funkcija odziva krmiljenega procesa na krmilno veličino  $u$  in motnjo  $z_m$ . Shema krmiljenja je prikazana na sliki 2.1. Vidimo, da je



Slika 2.1: Shema krmiljenja:  $u$  – krmilna veličina,  $y$  – krmiljena veličina,  $z_m$  – motnja

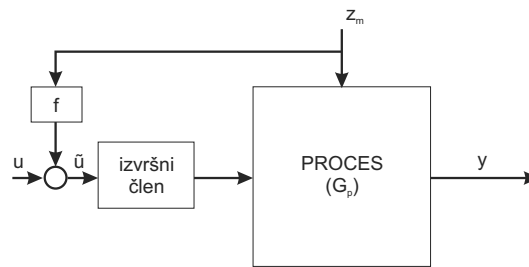
pretok informacije v takšnem sistemu vedno le iz vhoda proti izhodu. Primer za takšnega način vodenja je model jadralnega letala brez radijskega vodenja. Krmilne površine letala nastavimo glede na izkušnje in ga nato vržemo, med letom pa krmilnih površin ne moremo spreminjati in let letala je odvisen od kvalitete izkušenj. Vsaka večja motnja v obliki vetra lahko takšen let zmoti, kar se večinoma konča s polomljenimi krili ali čim podobnim. Krmiljenje sicer ne more destabilizirati stabilnega sistema, ne potrebuje posebne opreme, je pa zelo občutljivo na motnje.

### 2.1.2 Krmiljenje z upoštevanjem motnje

Krmiljenje lahko nadgradimo z merjenjem motnje  $z_m$  in z upoštevanjem le-te pri določanju krmilne vrednosti  $u$ . Enačbe, ki opisujejo tako strukturo vodenja so naslednje:

$$\begin{aligned} y &= G_p(\tilde{u}, z_m) \\ \tilde{u} &= u + f(z_m), \end{aligned} \quad (2.2)$$

pri čemer pomenijo:  $y$  - krmiljena veličina,  $G_p$  - funkcija odziva krmiljenega procesa na kompenzirano krmilno veličino  $\tilde{u}$  in motnjo  $z_m$ ,  $u$  - krmilna veličina,  $f$  - funkcija kompenzacije motnje. Slika 2.2 prikazuje takšno shemo vodenja. Takšna varianta vodenja je bolj robustna od enostavnega krmiljenja, saj lahko uspešno izkrmili motnje v sistemu. Zanimiva je tudi zato, ker uporablja princip z vnaprejšnjim predvidevanjem odziva sistema in zato v resnici prehiteva dinamiko procesa. Princip vnaprejšnjega predvidevanja je možno uporabiti tudi kot samostojen način vodenja glede na referenco; je hiter vendar ne preveč precizen, ker ne more izkrmiliti motenj. Kot primer lahko navedemo sistem ogrevanja brez regulacije temperature, a s prilagajanjem na spremembe zunanje temperature. Vendar so takšni sistemi vodenja redki, uporabljamo jih le v primeru, ko je merjenje krmiljene veličine  $y$  bistveno težje ali dražje od merjenja motnje pri tem pa kvaliteta vodenja ni bistveno slabša. V nasprotnem primeru se raje odločimo za povratnozančno regulacijo.



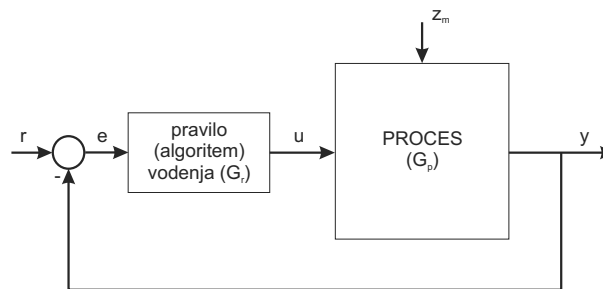
Slika 2.2: Shema krmiljenja z upoštevanjem motnje:  $u$  – krmilna veličina,  $\tilde{u}$  – krmiljena veličina kompenzirana s funkcijo vpliva motnje  $f$ ,  $y$  – krmiljena veličina,  $z_m$  – motnja

### 2.1.3 Povratnozančna regulacija

Povratnozančna regulacija je najpomembnejša oblika vodenja. Njena najpomembnejša lastnost je, da informacija v sistemu stalno kroži od izhoda procesa (regulirane veličine,  $y$ ) do vhoda v proces (regulirne veličine  $u$ ) in preko procesa spet na izhod. Enačbe, ki opisujejo tako strukturo vodenja so naslednje:

$$\begin{aligned} y &= G_p(u, z_m) \\ u &= G_r(e) \\ e &= r - y, \end{aligned} \quad (2.3)$$

pri čemer pomenijo:  $y$  - regulirana veličina,  $G_p$  - funkcija odziva reguliranega procesa na regulirno veličino  $u$  in motnjo  $z_m$ ,  $e$  - pogrešek,  $G_r$  - algoritem vodenja,  $r$  - želena vrednost ali referenca. Osnovna shema regulacije je prikazana na sliki 2.3. Na sliki je lepo vidno



Slika 2.3: Shema povratnozančne regulacije:  $r$  – referenca,  $e$  – pogrešek,  $u$  – regulirna veličina,  $y$  – regulirana veličina,  $z_m$  – motnja

kroženje informacije preko sistema vodenja. Primer je vožnja avtomobila, kjer se moramo sproti odzivati na vse dogodke v prometu. Takšna oblika vodenja je precej bolj učinkovita od krmiljenja, skriva pa tudi svoje pasti. Če je zakasnitev in ojačitev signala v povratni zanki zelo neugodna lahko sistem, ki je sicer stabilen, destabiliziramo. Možno pa je tudi obratno. S povratno zanko lahko stabiliziramo nestabilne sisteme in s tem omogočimo, da sploh funkcionirajo. Primer za to je fisiski jedrski reaktor, ki bi se brez ustrezne regulacije spremenil v atomsko bombo, če bi imel dovolj ustreznega goriva. Z regulacijo lahko izkrmilimo tudi motnje, problem pa lahko nastane, ker odziv sistema vedno nekoliko zaostaja za motnjo, zaostanka pa ne moremo poljubno zmanjšati. Motnja zato vedno vsaj nekoliko vpliva na odziv

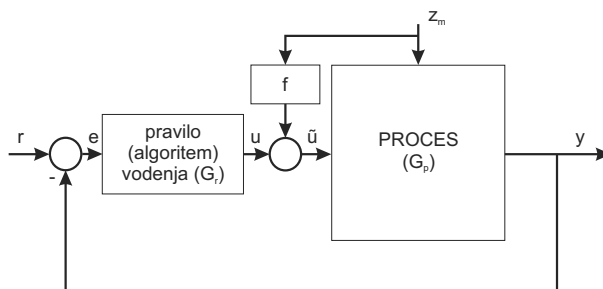
sistema.

### 2.1.4 Povratnozančna regulacija z upoštevanjem motnje

Hitrost odziva osnovne strukture regulacije na motnjo lahko popravimo z dodatnim sistemom, ki spremlja motnjo in glede na to že vnaprej popravlja regulirno veličino. Enačbe, ki opisujejo tako strukturo vodenja so naslednje:

$$\begin{aligned} y &= G_p(\tilde{u}, z_m) \\ \tilde{u} &= u + f(z_m) \\ u &= G_r(e) \\ e &= r - y, \end{aligned} \quad (2.4)$$

pri čemer pomenijo:  $y$  - regulirana veličina,  $G_p$  - funkcija odziva reguliranega procesa na kompenzirano regulirno veličino  $\tilde{u}$  in motnjo  $z_m$ ,  $f$  - funkcija kompenzacije motnje,  $u$  - regulirna veličina,  $e$  - pogrešek,  $G_r$  - algoritem vodenja,  $r$  - referenca. Shema povratnozančne regulacije z upoštevanjem motnje je prikazana na sliki 2.4. Regulacija z upoštevanjem mo-



Slika 2.4: Shema povratnozančne regulacije z upoštevanjem motnje:  $r$  – referenca,  $e$  – pogrešek,  $u$  – regulirna veličina,  $y$  – regulirana veličina,  $z_m$  – motnja

tnje je bolj smiselna in tudi bolj pogosto uporabljena struktura vodenja kot krmiljenje z upoštevanjem motnje. Sodobni sistemi centralnega ogrevanja delujejo v takšnem načinu vodenja, ker spremljajo tako notranjo kot tudi zunanjo temperaturo in sproti prilagajajo moč gretja glede na obe vrednosti.

### 2.1.5 Kaskadna regulacija

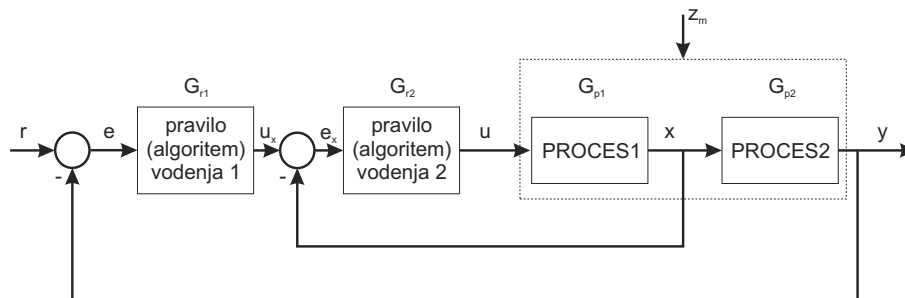
Poleg regulacije z upoštevanjem motnje poznamo še en uveljavljen način pohitritve odziva sistema vodenja. V primeru, da lahko proces razdelimo na enega ali več delov, ki neposredno vplivajo eden na druga, je možno uporabiti tako imenovano kaskadno regulacijo. Enačbe, ki



opisujejo tako strukturo vodenja so naslednje:

$$\begin{aligned}
 y &= G_{p2}(x, z_m) \\
 x &= G_{p1}(u, z_m) \\
 u &= G_{r2}(e_x) \\
 e_x &= u_x - x \\
 u_x &= G_{r1}(e) \\
 e &= r - y,
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

pri čemer pomenijo:  $y$  - regulirana veličina,  $G_{p2}$  - funkcija odziva drugega dela reguliranega procesa na pomožno regulirano veličino  $x$  in motnjo  $z_m$ ,  $G_{p1}$  - funkcija odziva prvega dela reguliranega procesa na regulirno veličino  $u$  in motnjo  $z_m$ ,  $G_{r2}$  - algoritem vodenja pomožne (notranje) zanke,  $G_{r1}$  - algoritem vodenja glavne (zunanje) zanke,  $e_x$  - pogrešek notranje zanke,  $u_x$  - referenca notranje zanke,  $e$  - pogrešek,  $r$  - referenca. Prikaz sheme kaskadne regulacije je na sliki 2.5. Bistvo kaskadne regulacije je, da morajo biti pomožne regulirane



Slika 2.5: Shema kaskadne regulacije:  $r$  – referenca,  $e$  – pogrešek,  $u_x$  – referenca notranje zanke,  $e_x$  – pogrešek notranje zanke,  $u$  – regulirna veličina,  $x$  – pomožna regulirana veličina,  $y$  – regulirana veličina,  $z_m$  – motnja

veličine izbrane tako, da so po vrsti zakasnjene ena napram drugi, in da ima regulirana veličina med njimi največjo zakasnitev. Pri takšnem izboru izhodnih spremenljivk sistema je možno na sistem vplivati, preden se motnja v procesu razširi do regulirane veličine in jo zato lahko prej odpravimo. Primer za to je vodenje električnega motorja po kotu zasuka. Če regulacijo kota zasuka razširimo s kaskado, kjer kot pomožno veličino merimo hitrost vrtenja motorja, je takšna regulacija bolj učinkovita od navadne povratnozančne regulacije.

### 2.1.6 Regulacija razmerja

Poseben primer regulacije predstavlja regulacija razmerja. Ker je razmerje kvocient, v katerem se neodvisno spreminjata obe vrednosti, obstaja možnost, da postane imenovalc zelo majhen. Vrednost kvocienta pri imenovalcih, ki so blizu 0, pa je zelo velika, kar v praksi pomeni, da gre lahko preko fizičnih omejitev vrednosti signalov. Takšna situacija bi povzročila, da bi sistem vodenja prišel v nasičenje in nadaljnje delovanje sistema bi bilo nepredvidljivo. Za regulacijo razmerja moramo zato uporabiti trik, kjer razmerje prevedemo na razliko vre-

dnosti:

$$k = \frac{x}{y} \quad (2.6)$$

$$k \cdot y = x.$$

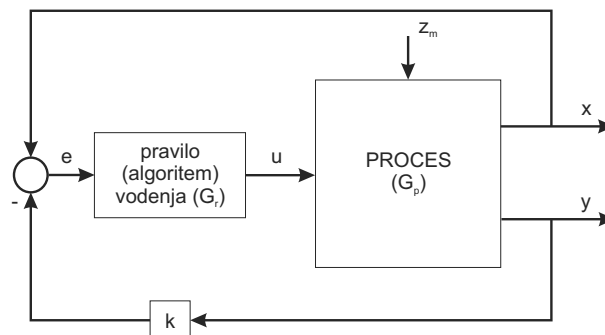
Spremenljivke imajo naslednji pomen:  $k$  - razmerje med vrednostmi veličin  $x$  in  $y$ . Ker pa je to shema vodenja, pri kateri moramo upoštevati, da razmerje dveh veličin ni stalno enako in celo odstopa od želene vrednosti, moramo enačbo 2.6 dopolniti:

$$e = x - k \cdot y. \quad (2.7)$$

Tako dobimo pogrešek, ki ga nato peljemo v regulacijski algoritem, da popravi razmerje na želeno vrednost, kjer je  $e = 0$ . Končne enačbe kaskadne regulacije so tako naslednje:

$$\begin{aligned} [x, y] &= G_p(u, z_m) \\ u &= G_r(e) \\ e &= x - k \cdot y, \end{aligned} \quad (2.8)$$

kjer pomenijo:  $G_p$  - funkcija odziva reguliranega procesa na regulirno veličino  $u$  in motnjo  $z_m$ ,  $G_r$  - regulacijski algoritem. Shema takega principa vodenja je na sliki 2.6. Primer upo-



Slika 2.6: Shema regulacije razmerja:  $k$  - faktor razmerja,  $e$  - pogrešek,  $x$  - prva regulirana veličina  $y$  - druga regulirana veličina,  $z_m$  - motnja,  $u$  - regulirna veličina

rabe vodenja regulacije razmerja je proces nevtralizacije, kjer moramo v pravilnem razmerju zmešati kislino in bazo, da dobimo sol in vodo. Če gre za sprotno nevtralizacijo, kjer je ena od tekočin rezultat procesa na katerega hitrost poteka nimamo vpliva, potrebujemo sistem, ki drugo tekočino dodaja skladno s spreminjanjem pretoka prve, da med njima ohranjamo pravo razmerje. Razmerje med tekočinama ohranjamo z regulatorjem razmerja.

## 2.2 Standardni algoritmi vodenja sistemov

V zaprtozančnih sistemih vodenja moramo uporabiti neko pravilo ali algoritem, ki definira razmerja med pogreškom in potrebno akcijo, ki poskuša pogrešek čim bolj zmanjšati. Algoritmi vodenja so zelo pomemben del sistema vodenja, ker je od njih neposredno odvisna stabilnost zaprtozančnih sistemov. V grobem ločimo dva pristopa: diskretno-dogodkovno vo-

denje in zvezno vodenje. Najenostavnejši algoritem diskretno–dogodkovnega načina vodenja je dvopoložajni regulator, medtem ko je tipičen predstavnik zveznih algoritmov proporcionalno-integrirno-diferencirno (PID) vodenje.

### 2.2.1 Dvopoložajno vodenje

Kot je bilo že omenjeno, je dvopoložajno vodenje najenostavnejši algoritem diskretno–dogodkovnega načina vodenja. Dvopoložajni regulator je izveden tako, da detektira dva dogodka, ki sta navadno definirana kot prekoračitev gornje meje vrednosti regulirane veličine in prekoračitev spodnje meje vrednosti regulirane veličine. Ob prehodu katere koli izmed mej, pa se izhod regulatorja spreminja iz visokega v nizek ali obratno. Zaradi praktičnih problemov preklapljanja zgornja in spodnja vrednost regulirane veličine ne smeta biti enaki, ker bi sicer prišlo do zelo visoke frekvence preklapov, ko bi z regulirano veličino prišli do želene vrednosti. Visoke frekvence preklapov na močnostnem delu sistema vodenja lahko povzročijo hude okvare pri daljšem času obratovanja. Eden od parametrov dvopoložajnega vodenja je torej histereza regulatorja, ki je podana kot razlika med zgornjo in spodnjo mejo regulirane veličine. Posebnost dvopoložajnega vodenja je tudi to, da nimamo eksplicitno podane reference, pač pa se le–ta skriva v zgornji in spodnji meji regulirane veličine. Zaradi takšnega podajanja reference pa se izhod procesa ustali v limitnem ciklu ali periodičnem spreminjajo vrednosti in ne pri točno določeni vrednosti.

### 2.2.2 Proporcionalno-integrirno-diferencirno vodenje

Tipičen algoritem zveznega vodenja je vodenje PID in verzije, ki iz tega izhajajo: proporcionalno (P), proporcionalno-integrirno (PI) in proporcionalno-diferencirno (PD) vodenje.

#### Proporcionalni regulator

Poglejmo si najprej najenostavnejšo varianto, to je proporcionalni ali regulator P. Izhod regulatorja  $u$  je proporcionalen pogrešku  $e$ , razmerje pa definira proporcionalno ojačenje  $k_p$ :

$$u(t) = k_p \cdot e(t). \quad (2.9)$$

S parametrom  $k_p$  vplivamo na hitrost odziva regulatorja na pogrešek in s tem lahko prilagodimo zaprtzančni odziv zahtevam vodenja. Iz enačbe vidimo, da se z večanjem pogreška večja tudi regulirna veličina, ki je namenjena zmanjševanju pogreška, zato sistem teži k minimalnemu pogrešku. Problem algoritma pa je, da pri pogrešku 0 tudi izhod regulatorja pade na nič in zanka postane neaktivna. Če referenca sovpada z ustaljenim stanjem sistema, ko le–ta nima vzbujanja, se tak sistem ustali z ničnim pogreškom. V nasprotnem primeru pa ima v ustaljenem stanju tak sistem vedno nek pogrešek, ki je odvisen od  $k_p$  in z večanjem le–tega upada. Ker pa večanje  $k_p$  lahko negativno vpliva na stabilnost sistema, pogreška ne moremo poljubno zmanjševati. Rešitev problema je možna s prištevanjem konstantnega člena  $U_0$

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + U_0, \quad (2.10)$$

vendar tudi ta rešitev velja samo za eno vrednost reference (delovno točko).

**PI regulator**

Problem odstopanja regulirane veličine od želene vrednosti za poljubno vrednost reference lahko odpravimo z uporabo nekega spominskega elementa, ki ohrani svojo vrednost tudi potem, ko pogrešek pade na nič. To najenostavneje rešimo z vključitvijo integrala pogreška v algoritem:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (2.11)$$

S tako spremembo P regulatorja odpravimo pogrešek v ustaljenem stanju za konstantne vrednosti reference. Slaba stran pa je, da moramo sedaj za uglasitev regulatorja nastavljeni dva parametra  $k_p$  in  $k_i$  in, da se zaradi integrirnega člena poveča oscilatornost sistema, kar lahko povzroči tudi tako imenovani integralski pobeg. Integrirni člen se razmeroma počasi odziva na spremembe, kar razniha sistem pri nepričakovano velikih in hitrih spremembah reference.

**Proporcionalno-diferencirni regulator**

Niso pa vsi sistemi primerni za regulacijo z regulatorjem PI. Sistemi, ki imajo integrirni značaj, kot je električni motor pri regulaciji kota zasuka, so neprimerni za vodenje z regulatorjem PI. Integrirni značaj regulatorja in motorja ima lahko za posledico tudi nestabilen zaprtozančni odziv. Ker so sistemi integrirnega značaja načeloma počasni, je za tak razred sistemov smiselno uporabiti regulator, ki odzive pohitri. Za pohitritev potrebujemo pri regulatorju P člen, ki se burno odziva na spremembe, kar dosežemo z uporabo diferenciranja pogreška. Tako dobimo proporcionalno-diferencirni regulator ali regulator PD:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_d \cdot \frac{de}{dt}. \quad (2.12)$$

Problem pogreška v ustaljenem stanju rešuje integrirni značaj reguliranega procesa. Tudi v tem primeru moramo za uglasitev regulatorja nastaviti dva parametra  $k_p$  in  $k_d$ . Negativna posledica uporabe diferencirnega člena pa je ojačenje visokofrekvenčnega šuma, kar lahko povzroča probleme v okoljih, kjer je veliko visokofrekvenčnih elektromagnetnih motenj. V realni izvedbi diferencirnega člena zato uporabimo nizko prepustni filter. Za vodenje robotskih mehanizmov je to glavni tip regulatorja, ker ne povzroča prenihajev preko ustaljene vrednosti.

**Proporcionalno-integrirno-diferencirni regulator**

Če združimo vse opisane algoritme v enega, dobimo proporcionalno-integrirno-diferencirni regulator ali regulator PID, ki je uporaben za vodenje širokega spektra različnih procesov. Po nekkih podatkih je 80% vseh regulatorjev v industriji tipa PID. Čeprav je algoritem zelo enostaven, pa je osnova za razumevanje bolj kompleksnih algoritmov vodenja. Še več, v resnici tudi veliko nelinearnih algoritmov vodenja temelji na osnovnih principih algoritma

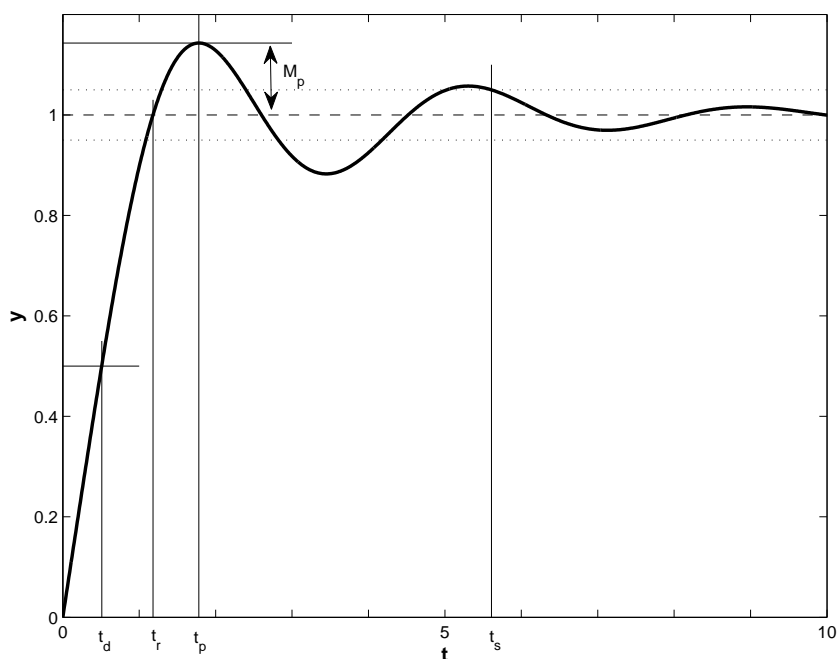
PID, le da so skriti za zelo kompleksnimi podrobnostmi. Algoritem regulatorja je naslednji:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \cdot \frac{de}{dt}. \quad (2.13)$$

Za uglasitev regulatorja moramo sedaj nastaviti tri parametre, oz. štiri, če štejemo še parameter nizko prepustnega filtra diferencirnega člena. Ker uglasjevanje regulatorjev PID ni vedno enostavno, obstajajo v ta namen določena izkustvena pravila, ki upoštevajo lastnosti reguliranega procesa. Dejstvo pa je, da velika večina sistemov v industriji deluje z regulatorji na tovarniških nastavitvah, ker se uglasjevanje vedno izvaja na koncu projekta, ko časa za izvedbo že zmanjkuje.

## 2.3 Parametri kvalitete vodenja

Kvaliteta vodenja sistemov je kriterij, ki ga upoštevamo pri uglasjevanju regulatorjev. Ocenjujemo jo lahko glede na značilnosti časovnega poteka regulirane veličine. Na sliki 2.7 so predstavljeni parametri, ki jih uporabljamo za vrednotenje kvalitete odziva sistema. Parame-



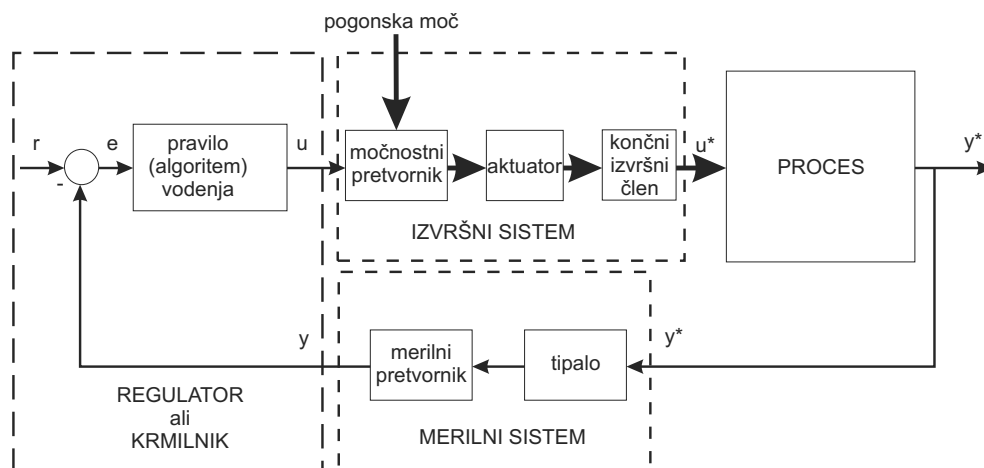
Slika 2.7: Parametri kvalitete vodenja na osnovi časovnega odziva reguliranega sistema:  $t_d$  – čas zakasnitve,  $t_r$  – čas vzpona,  $t_p$  – čas maksimalnega prevzpona,  $t_s$  – umiritveni čas,  $M_p$  – maksimalni prevzpon, črtnana črta – referenčna vrednost, pikčasti črti – tolerančni pas

tri prikazani na sliki uspešno vrednotijo razne aspekte kvalitete vodenja na osnovi odziva zaprtozančnega sistema na stopnico. Čas zakasnitve  $t_d$  je definiran kot čas, ki ga izhod sistema potrebuje, da doseže 50% vrednosti v ustaljenem stanju in pove po kašnem času od

spremembe reference se na izhodu sistema pojavi opazna sprememba. Načeloma želimo čim bolj odziven sistem s čim manjšim časom zakasnitve, ki pa je vezan tudi na kompleksnost reguliranega procesa, zato ga ne moremo poljubno zmanjševati brez posledic za stabilnost sistema. Čas vzpona je definiran kot čas, ki ga izhod sistem potrebuje, da prvič pride do vrednosti v ustaljenem stanju. Tudi ta čas naj bo čim krajši, ker želimo zaprtozančni sistem, ki se čim hitreje odziva. Ker pa krajšanje tega časa povečuje maksimalni prevzpon  $M_p$ , ki je definiran kot največja vrednost signala nad vrednostjo v ustaljenem stanju, tudi tega ne moremo poljubno krajšati. Podobno kot  $t_r$  lahko uporabimo tudi čas maksimalnega prevzpona  $t_p$ , saj sta oba vezana na hitrost spreminjanja odziva sistema v začetni fazi prehodnega pojava. Zelo pomemben je tudi čas umiritve  $t_s$ , ker pove, kako hitro se izhod sistema umiri znotraj tolerančnega pasu okoli referenčne vrednosti. Čas umiritve je definiran kot točka po kateri izhod sistema ne zapusti več tolerančnega pasu. Širina tolerančnega pasu je odvisna od zahtev po natančnosti regulacije. Za kvalitetno regulacijo mora biti tudi čas umiritve čim krajši. Glede na lastnosti dinamičnih sistemov in kriterijev za kvalitetno regulacijo pridemo do rezultata, da je najbolj ugoden odziv sistema aperiodičen z enim razmeroma majhnim prevzponom. S takim odzivom dobimo vse časovne parametre najkrajše, medtem ko je prevzpon v mejah sprejemljivosti. Seveda pa velja pripomniti, da so kriteriji optimalnosti močno odvisni od lastnosti in omejitev reguliranega sistema.

## 2.4 Prehod iz bločne sheme vodenja do sheme z gradniki

Bločne sheme vodenja sicer natančno definirajo strukturo vodenja, ne dajo pa informacije o tem, kako gradniki sodelujejo v sistemu vodenja. Naslednji korak je torej razširitev osnovne bločne sheme na bolj podrobno shemo, kjer točno označimo mesto gradnikov v shemi. Primer takšne sheme za povratnozančno regulacijo je na sliki 2.8. Iz sheme na sliki 2.8 lahko



Slika 2.8: Podrobna shema strukture vodenja z označenimi gradniki sistema:  $y^*$  – regulirana veličina,  $y$  – signal merjene veličine,  $r$  – referenca,  $u$  – signal regulirne veličine,  $u^*$  – regulirna veličina,  $e$  – pogrešek

vidimo, kako informacija prehaja med gradniki in kakšen položaj zavzema vsak gradnik v sistemu vodenja. V nadaljevanju bomo tako sledili toku informacije od merjene veličine do izvršnih sistemov, pri tem pa si bomo ogledali razne gradnike, ki jih lahko v te namene upo-

rabimo. Naj na tem mestu komentiramo uporabo izraza krmilnik v zaprti zanki. Uporaba izraza je zgodovinskega značaja in zajema gradnike, ki opravljajo funkcije vodenja v diskretno dogodkovnih sistemih, kjer povratna zanka ni tako poudarjena kot pri zveznih regulacijah. Danes najdemo krmilnike na različnih področjih, večinoma pa delujejo kot del zaprte zanke, čeprav termin govori o nasprotnem. Žal je na področju avtomatizacije še vedno določena nejasnost glede uporabe izrazov, zato moramo pri njihovi uporabi zelo previdni.





## 3

# Pomembnejše oznake gradnikov in naprav

Glede na raznolikost opreme, ki jo najdemo v sistemih vodenja se moramo zavedati, da obstajajo standardi, ki definirajo potrebne pogoje za njihovo izdelavo in uporabo. Na področju elektrotehnike uporabljamo mednarodne standarde IEC, ki urejajo najpomembnejše postopke področja. Tudi vsa električna in programska oprema na področju vodenja je izdelana v skladu s temi standardi. Poleg standardov IEC pa obstajajo tudi splošnejši mednarodni standardi ISO, ki prav tako vplivajo na postopke in opremo na področju vodenja. Ker se oprema za vodenje sistemov uporablja tudi v zelo zahtevnih okoljskih pogojih, si pogledimo standarde, ki urejajo v kakšnih pogojih lahko določena oprema deluje. To so stopnje zaščite električne opreme z ohišjem pred vodo, delci in udarci ter primernost opreme za eksplozijsko nevarno okolje.





Načrtovanje sistemov vodenja se največkrat začne s tehnološko shemo procesa.







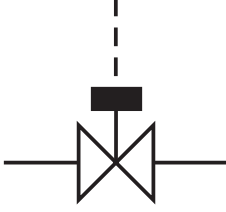
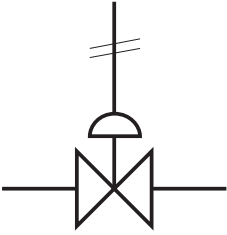
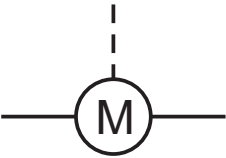
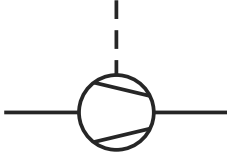

### 3.1 Oznake gradnikov v tehnoloških shemah

Tehnološke sheme so glavni vir informacij o delovanju nekega sistema. Zato so se razvili standardizirani simboli in alfanumerične oznake, ki pripomorejo k lažjemu razumevanju delovanja sistema. Mednarodni standard, ki ureja to področje je ISO 10628. Standard ne določa točne oblike simbolov, medtem ko imajo alfanumerične oznake točno določen pomen.

#### 3.1.1 Grafični simboli v tehnoloških shemah

Primeri grafičnih elementov v tehnoloških shemah so prikazani spodaj:

- procesna linija 
- električni signal 
- pnevmatski signal 
- hidravlični signal 

- lokalno montiran element 
- element na kontrolni plošči v komandnem prostoru 
- element za kontrolno ploščo v komandnem prostoru 
- zožitev cevi 
- namestitev tipala (razen za pretok) 
- ročni ventil 
- električno krmiljen dvopoložajni ventil 
- pnevmatski regulacijski ventil 
- električni motor 
- električni ventilator, kompresor 
- črpalka 

### 3.1.2 Alfnumerične oznake v tehnoloških shemah

Alfanumerične oznake gradnikov so sestavljene iz dveh črk in zaporedne številke gradnika. Prva črka ali prva velika in pridružena mala črka v oznaki pomenita glavno procesno veličino gradnika. Naj navedemo nekaj primerov:

- C - zmes,
- E - napetost,
- F - pretok,
- I - električni tok,
- L - nivo,
- P - tlak,
- Ph - kislost,
- T - temperatura,
- S - hitrost,
- Z - pozicija.

Druga črka v oznaki pomeni tip gradnika, kot prikazujejo naslednji primeri:

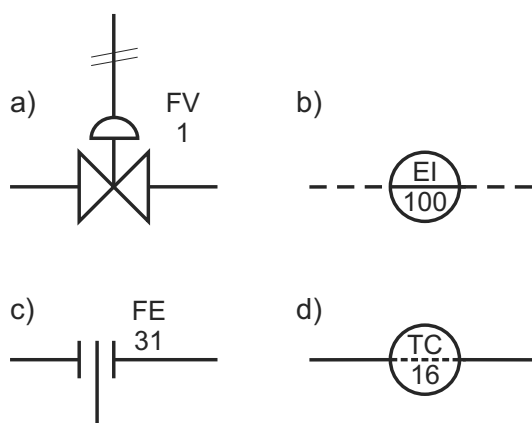
- C - regulator,
- E - primarni element,
- I - prikaz,
- R - registrator,
- T - pretvornik, tipalo,
- V - ventil,
- Z - pogon.

Primeri kombinacije grafičnih simbolov in oznak kot jih uporabljamo v tehnoloških shemah, so prikazani na sliki 3.1.

## 3.2 Stopnje zaščit električnih naprav IP

Standard IEC 60529 definira razrede IP (ang. Ingress Protection Rating, International Protection Rating) zaščite električnih naprav v ohišju. Koda zaščite elementov je sestavljena iz črk IP in pa dveh števil, ki jima sledita in imata naslednji pomen. Prva številka pomeni stopnjo zaščite pred delci:

- 0 - ni zaščite,



Slika 3.1: Primeri oznak v procesnih shemah: a) ventil št. 1 za regulacijo pretoka s pnevmatskim pogonom, b) voltmeter št. 100, montiran na komandni plošči v komandnem prostoru, c) primarni element merilnika pretoka št. 31, d) regulator št. 16 za regulacijo temperature, montiran za komandno ploščo komandnega prostora

- 1 - zaščita pred delci večjimi od 50mm (zaščita je učinkovita pri dotikih z večjimi predmeti ali deli telesa kot je hrbtišče dlani, ne pa pred namernimi dotiki z roko),
- 2 - zaščita pred delci večjimi od 12.5mm (zaščita je učinkovita pri dotikih s prsti in predmeti podobne velikosti),
- 3 - zaščita pred delci večjimi od 2.5mm (zaščita je učinkovita pri dotikih z orodji ali debelejšimi žicami),
- 4 - zaščita pred delci večjimi od 1mm (zaščita je učinkovita pri dotikih vijakov ali tanjših žic),
- 5 - zaščita pred prahom (vdor prahu ni popolnoma preprečen, a ne more povzročiti škode, popolna zaščita pri dotiku),
- 6 - prahotesno (popolna zaščita proti prahu in pri dotiku).

Druga številka pomeni stopnjo zaščite pred vodo:

- 0 - ni zaščite
- 1 - zaščita pred navpično kapljajočo vodo (test traja 10 min, pri tem pa na napravo kaplja voda s pretokom enakovrednim 1 mm/m<sup>2</sup> padavin na minuto),
- 2 - zaščita pred kapljajočo vodo do 15° glede na navpičnico (test traja 10 min, pri tem pa na napravo kaplja voda s pretokom enakovrednim 3 mm/m<sup>2</sup> padavin na minuto),
- 3 - zaščita pred pršenjem vode pod kotom do 60° (test traja 5 min, pri tem pa na napravo prši voda s pretokom 0,7 l/min pri tlaku 180-200 kPa),
- 4 - zaščita pred pljuski vode (test traja 5 min, pri tem pa na napravo teče voda s pretokom 10 l/min pri tlaku 180-200 kPa),

- 5 - zaščita pred šibkim vodnim curkom (test traja vsaj 3 min, pri tem pa je na napravo usmerjen curek vode s pretokom 12,5 l/min pri nadtlaku 30 kPa z oddaljenosti 3 m, premer šobe pa je 6,3 mm),
- 6 - zaščita pred močnim vodnim curkom (test traja vsaj 3 min, pri tem pa je na napravo usmerjen curek vode s pretokom 100 l/min pri nadtlaku 100 kPa z oddaljenosti 3 m, premer šobe pa je 12,5 mm),
- 7 - zaščita pri potopitvi do 1m (test traja 30 min, pri tem je naprava potopljena 1 m pod gladino vode),
- 8 - zaščita pri potopitvi nad 1m (dolgotrajna potopitev naprave pod vodo na globini in ostalih pogojih, ki jih določi proizvajalec).

Standard pa predvideva tudi črke, ki se kodi lahko dodajo. Prva dodana črka pomeni:

- A - zaščita pred dotikom s hrbtiščem dlani,
- B - zaščita pred dotikom s prstom,
- C - zaščita pred dotikom z orodjem,
- D - zaščita pred dotikom z žico.

Druga dodatna črka pomeni:

- H - naprava visoke napetosti,
- M - naprava se je med testom občutljivosti na vodo gibala,
- S - naprava je med testom občutljivosti na vodo mirovala,
- W - prilagojeno za uporabo v določenih vremenskih pogojih.

Nemški standard DIN 40050-9 pa razširja nabor stopenj še za oznako IP69K, ki je namenjena sistemom, ki so varovani pred visoko temperaturo in visokim tlakom. Standard določa, da je med testom v napravo usmerjen curek vode s temperaturo 80°C, pri tlaku 8–10 MPa in pretoku 14–16 l/min. Šobe za ustvarjanje curka so postavljene 10–15 cm od testirane naprave pod koti 0°, 40°, 60° in 90° glede na vodoravno ravnino. Med testiranjem je hkrati odprta samo ena šoba, vsaka šoba pa je odprta 30 s. Naprava je med testom pritrjena na mizi, ki se vrti okoli navpične osi s hitrostjo 5 obr/min.

Včasih so bile del tega standarda tudi oznake za odpornost na mehanske udarce, ki so bile dodane kot tretja števila v oznaki IP. Oznake so zbrane v tabeli 3.1.

### 3.3 Stopnje mehanskih zaščit električnih naprav IK

Oznake za odpornost naprav v ohišju na mehanske udarce sedaj določa standard IEC 62262. Oznaka se začne s črkama IK, ki jima je dodana dvoštevilska koda zaščitne stopnje. Oznake zaščite IK z obrazložitvijo so zbrane v tabeli 3.2.

Tabela 3.1: Stopnje odpornosti IP na mehanske udarce

stopnja IP	energija udarca	ekvivalentna masa/globina padca
0	—	—
1	0,225 J	150 g/15 cm
2	0,375 J	250 g/15 cm
3	0,5 J	250 g/20 cm
5	2 J	500 g/40 cm
7	6 J	1,5 kg/40 cm
9	20 J	5 kg/40 cm

### 3.4 Eksplozijska zaščita gradnikov

V pogojih, ko lahko v okolici gradnika med normalnim delovanjem nastane eksplozijska atmosfera je potrebno uporabljati gradnike, ki so bili posebej zasnovani za delovanje v takšnih okoljih. Gradniki namenjeni tovrstni uporabi so označeni z dvočrkovno oznako Ex, področje pa je urejeno s standardi IEC 60079, IEC 61241, IEC 61779, IEC 62013 in IEC 80079. Glede na standarde moramo prostor, kjer med normalnim delovanjem lahko pride do eksplozijsko nevarne atmosfere, razdeliti v cone glede na povprečni čas trajanja nevarnosti. V tabeli 3.3 so zbrane oznake con in njihova definicija. Glede na cono v kateri se nahaja, moramo ustrezno izbrati razred zaščite gradnika. V tabeli 3.4 so zbrane oznake razredov zaščite opreme in njihove definicije. Poleg razredov zaščite pa standard definira tudi temperaturne razrede. Temperaturni razred, v katerega naprava sodi, je odvisen od maksimalne temperature, ki jo lahko doseže površina naprave med pravilnim delovanjem ali ob kakršni koli okvari in ob temperaturi okolice 40°C. Temperaturni razredi pa so definirani v različnih državah različno. V tabeli 3.5 so prikazani temperaturni razredi in pripadajoče maksimalne temperature površine naprav, kot jih uporabljajo v Veliki Britaniji.

Tabela 3.2: Stopnje odpornosti IK na mehanske udarce

stopnja IK	energija udarca	ekvivalentna masa/globina padca
00	—	—
01	0,15 J	200 g/7,5 cm
02	0,2 J	200 g/10 cm
03	0,35 J	200 g/17,5 cm
04	0,5 J	200 g/25 cm
05	0,7 J	200 kg/35 cm
06	1 J	500 g/20 cm
07	2 J	500 g/40 cm
08	5 J	1,7 kg/29,5 cm
09	10 J	5 kg/20 cm
10	20 J	5 kg/40 cm

Tabela 3.3: Cone eksplozijsko ogroženega prostora

oznaka cone	pogoj
0	eksplozivna mešanica plina, meglice ali pare >1000 h/leto
1	eksplozivna mešanica plina, meglice ali pare 10–1000 h/leto
2	eksplozivna mešanica plina, meglice ali pare <10 h/leto
20	eksplozivna mešanica prahu >1000 h/leto
21	eksplozivna mešanica prahu 10–1000 h/leto
22	eksplozivna mešanica prahu <10 h/leto

Tabela 3.4: Oznake razredov zaščit naprav

razred	vrsta zaščite	dovoljena v conah
Ex ia	v zasnovi varna naprava	0, 1, 2, 20, 21, 22
Ex s	posebna zaščita s certifikatom za cono 0 in 20	0, 1, 2, 20, 21, 22
Ex d	ognjevarna naprava	1, 2, 21, 22
Ex p	naprava pod tlakom, lahko tudi odprta	1, 2, 21, 22
Ex q	naprava napolnjena s prahom	1, 2, 21, 22
Ex o	naprava napolnjena ali potopljena v olje	1, 2, 21, 22
Ex e	povečana varnost naprave	1, 2, 21, 22
Ex ib	v zasnovi varna naprava	1, 2, 21, 22
Ex m	inkapsulirana naprava	1, 2, 21, 22
Ex n	naprava certificirana, da ne more povzročiti vžiga	2, 22

Tabela 3.5: Temperaturni razredi opreme

razred	maksimalna temperatura površine
T1	450°C
T2	300°C
T3	200°C
T4	135°C
T5	100°C
T6	85°C





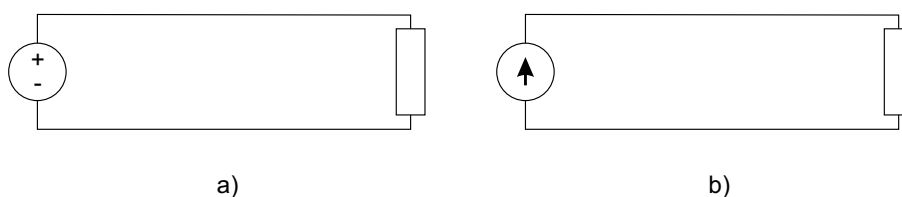
## 4

# Tehnologije prenosa informacij med gradniki

Pri tako obsežnih sistemih kot so sistemi vodenja je nujno poskrbeti za učinkovit prenos informacije med gradniki. V marsikaterem sistemu vodenja prenašamo vzporedno lahko tudi nekaj deset tisoč signalov, zato je standardizacija prenosa informacij še kako smiselna, ker s tem zmanjšamo možnosti napak v komunikaciji. Trenutno sta v rabi dva sistema prenosa, ki temeljita na električnih signalih: klasični analogni prenos, ki se počasi umika in sodobni digitalni prenos informacije, ki postaja vse bolj dominanten zaradi uporabe mikroprocesorjev v gradnikih. Obstaja še pnevmatski prenos informacije, ki pa se je popolnoma umaknil iz industrijske uporabe, ker je bil precej dražji tako za izgradnjo kot za vzdrževanje. Pnevmski prenos je imel dolgo svoj segment uporabe v eksplozijsko nevarnih okoljih in v okoljih s strogimi zahtevami glede čistoče.

## 4.1 Analogni električni prenos informacije

Najenostavnejši sistemi prenosa informacije so analogni električni sistemi in so standardizirani s standardom IEC 60381. Topologija prenosa je zvezda, kjer ima vsak gradnik svoje ožičenje, ki predstavlja električno zaključeno zanko. Za ožičenje prenosa informacije potrebujemo dve žici, najpogosteje se uporablja parica (ang. twisted pair). Prenos analognega signala je podvržen elektromagnetnim motnjam, ki se neposredno prištejejo koristnemu signalu. Parica zmanjšuje vpliv induktivno sklopljenih motenj, medtem ko dobro ozemljen oklop kabla zmanjšuje vpliv kapacitivno sklopljenih motenj. Ker imajo lahko vodniki različne točke ozemljitve koristnega signala moramo paziti, da ne pride do prevelikih parazitnih tokov, ko signale pripeljemo do krmilnikov ali regulatorjev. Da se izognemo parazitnim tokovom signale galvansko ločimo. Običajno uporabljamo optične sklopnike, ki so velikokrat že kar del krmilnika. Uporabljamo dva sistema prenosa informacije in sicer kodiranje z napetostnimi nivoji in kodiranje s tokovnimi nivoji (glej sliko 4.1). Pri merilnih sistemih je generator toka ali napetosti lociran v merilnem sistemu, pri aktuatorskih sistemih pa je v regulatorju ali krmilniku. Prenos informacije je vedno enosmeren. Za prenos informacije na kratke razdalje sta oba sistema enakovredna, pri daljših razdaljah pa ima tokovni prenos signala veliko prednost. Upornost vodnikov namreč ne slabi signala in dokler je tokovni vir sposoben pokrivati izgube zaradi upornosti vodnikov, signal z oddaljenostjo ne izgublja moči. Pri napetostnem signalu pa se padec napetosti na vodnikih odšteva od



Slika 4.1: Shemi analogne komunikacije med gradniki: a) napetostni prenos signalov, b) tokovni prenos signalov

poslane vrednosti napetosti, zato je dolet takega sistema pošiljanja podatkov precej manjši. Pri tokovnem sistemu lahko signal prenašamo tudi nekaj 10 km daleč, medtem ko je napetostni prenos podatkov uporaben le do nekaj 100m.

#### 4.1.1 Nivoji signalov v analognem prenosu informacije

Analogni sistem prenosa signalov je standardiziran z območjem nivojev signalov, ki so glede na vrsto prenosa zbrani v tabeli 4.1. Prva štiri območja signalov v Tabeli 4.1 so namenjena

Tabela 4.1: Standardizirani nivoji v analognem prenosu signalov

sistem prenosa	območje nivojev
napetostni	0V – 10V
napetostni	1V – 10V
tokovni	0mA – 20mA
tokovni	4mA – 20mA
stopenjski	0V / 24V

zveznemu prenosu signalov, kar pomeni, da lahko signal zavzame katero koli vrednost na danem intervalu. Zadnje območje signalov pa je namenjeno stopenjskemu prenosu signala, kjer signal lahko zavzame samo nizko ali visoko vrednost. V industrijski rabi je najpogostejši tokovni signal 4-20mA, ker lahko prenaša podatke na velike daljave in omogoča enostavno detekcijo prekinitve vodnikov.

#### 4.1.2 Pretvorba v digitalne signale

V sodobnih sistemih vodenja vse več gradnikov vsebuje mikrokrmilniške sisteme, kar pomeni, da je v nekem trenutku potrebno analogni signal prevesti v digitalnega. Navadno imajo mikrokrmilniški sistemi pretvorbo že izvedeno na vhodu, v nasprotnem primeru pa moramo za to poskrbeti sami. Analogno–digitalni (AD) pretvorniki opravijo tovrstno pretvorbo, vendar pa moramo poskrbeti, da so lastnosti signala takšne, da s pretvorbo ne vnesemo dodatne motnje. Najpomembnejše pri tem je, da je frekvenčna vsebina signala navzgor omejena s polovico vzorčne frekvence pretvornika, sicer lahko pride po Shannonovem teoremu do zgibanja frekvenc, kjer se visoke frekvence signala preslikajo v nizke in s tem zelo popačijo vsebino signala. Signal moramo zato filtrirati z nizko prepustnimi filtri, ki porežejo visoke frekvence. Takšne filtre imenujemo proti zgibni filtri ali sita (ang. anti-aliasing filter) in so pomemben del analogno–digitalne pretvorbe.

## 4.2 Digitalni prenos informacije

Zaradi prevladujoče uporabe digitalne tehnologije vodenja postajajo vse bolj pomembni tudi digitalni prenosi informacije. Digitalni prenos ima pred analognim precej prednosti. Ker se prenašajo številke, ki jih je možno na oddajniški strani kodirati tako, da koda omogoča detekcijo napak pri prenosu, je vpliv elektromagnetnih motenj na kanalu prenosa zelo zmanjšan ali celo nepomemben, razen če motnje niso tako hude, da prenos sploh ni več možen. Dodatno lahko uporabimo tudi optične sisteme prenosov informacij, kar še nadalje izboljša kvaliteto in hitrost prenosa podatkov in brezžične sisteme prenosa, s čimer močno poenostavimo infrastrukturo za prenos informacij. Slaba lastnost sistemov digitalnega prenosa informacije pa je, da sistem potrebuje veliko več opreme, tako strojne kot programske, da lahko izvedemo pošiljanje in sprejemanje podatkov

### 4.2.1 Sistemi digitalnega prenosa podatkov

Pri digitalnem prenosu podatkov je potrebno definirati tako fizični nivo (ožičenje, konektorji, kodiranje števil z električnimi ali svetlobnimi signali, topologijo omrežja, itd.) kot tudi način kodiranja in pomen prenesenih podatkov. Organizacijo in izvedbo protokolov prenosa podatkov določa referenčni model ISO/OSI. Celoten protokol je razdeljen na neodvisne gradnike, ki jih imenujemo plasti protokola in jih prikazuje slika 4.2. Referenčni model

7. uporabniška plast
6. predstavitevna plast
5. plast seje
4. transportna plast
3. omrežna plast
2. povezovalna plast
1. fizična plast

Slika 4.2: Referenčni model ISO/OSI za sisteme digitalnega prenosa podatkov

natančno določa, kaj so funkcije posamezne plasti.

Fizična plast definira fizične lastnosti protokola, kot so ožičenje, nivoji signalov, vrsto signalov in konektorji.

Povezovalna plast omogoča prenos podatkov med dvema napravama na mreži s tem, da skrbi za pretvorbo med fizičnimi vrednostmi signalov in biti ter za njihovo združevanje v enote, ki jih imenujemo okvirji (ang. frames). Le-ti so najmanjše skupine podatkov, ki potujejo po omrežju in so sestavljeni iz začne in končne sekvence ter podatkov med njima. Podatki pa so logično sestavljeni iz glave in podatkov, ki jih želimo prenesti po omrežju. Naloga plasti je tudi detekcija in popravljanje napak, ki nastanejo na fizičnem nivoju prenosa (šum). Na tej plasti se okvirji prenašajo med fizičnimi naslovi naprav.

Omrežna plast skrbi za pravilen prenos podatkov po omrežju s tem, da določi optimalno pot prenosa in, da skrbi za pravilno pretvarjanje logičnih naslovov naprav v fizične naslove.

V omrežni plasti protokola moramo izvesti grupiranje okvirjev v pakete, ki so logične enote podatkov s katerimi plast operira. Z usmerjevalniki in ponavljalniki urejamo promet po omrežju glede na podatke v glavi paketov in s tem izboljšamo učinkovitost prenosa podatkov. Usmerjevalniki in ponavljalniki so del strojne opreme omrežja in lahko prenašajo le pakete njim poznanih protokolov. Z uporabo le-teh lahko izboljšamo tudi varnost omrežja s filtriranjem paketov glede na logične naslove prejemnika ali pošiljatelja.

Transportna plast skrbi za pravilno dostavo podatkov med oddajnikom in sprejemnikom, za urejanje pretoka podatkov in za zanesljivo dostavo podatkov višjim plastem protokola. Naloga plasti je, da preverja ali so bili podatki dostavljeni naslovniku, v primeru napak pa podatke pošlje še enkrat. Enote podatkov nad katerimi plast operira so segmenti, ki so sestavljeni iz paketov. Na tej plasti so izvedeni tunelski protokoli, ki za prenos podatkov uporabljajo prve tri plasti nekega drugega protokola, ki že deluje na omrežju, pakete pa zapakirajo v segmente tako, da jih sprejemnik lahko pravilno dekodira.

Plast seje skrbi za povezavo med posameznimi napravami. Skrbi za vzpostavitev, vzdrževanje in končanje povezave na kontroliran način, lahko pa skrbi tudi za avtomatsko ponovno vzpostavitev povezave ob nenadnem izpadu. Preko te plasti lahko izvedemo klice programov ali procedur na oddaljenih napravah.

Predstavitvena plast omogoča kodiranje in dekodiranje podatkov iz kode uporabniške plasti v kodo omrežja tako, da zagotovi neodvisnost prenosa od kodiranja podatkov, podobno kot prevajalci pri prevajanju med različnimi jeziki.

Uporabniška plast neposredno prejema podatke od uporabniškega programa in jih pošilja v omrežje. Na tej plasti preverjamo identiteto pošiljatelja in prejemnika, preverimo, če imamo na voljo dovolj resursov in če povezava med napravama obstaja. Ob pozitivnem rezultatu preverjanja pošljemo podatke proti nižjim nivojem protokola in nato do naslovnika, kjer se podatki po obratni poti spet sestavijo v informacijo.

Ker navkljub definiranim modelu izvedbe protokolov lahko definiramo neskončno mnogo različnih protokolov prenosa podatkov, je potrebno določiti nek standard prenosa podatkov, da naprave sploh lahko komunicirajo med seboj. Tako so se zaradi lažjega povezovanja gradnikov pod okriljem večjih proizvajalcev opreme razvili različni, bolj ali manj standardni, sistemi prenosa informacij. Na žalost pa je vpeljava digitalnega prenosa podatkov vnesla na področje komunikacije med gradniki večjo neenotnost kot pa je vladala v času analognega prenosa. Na tržišču obstaja množica standardiziranih protokolov, a vsakega od njih uporablja le nekaj proizvajalcev. Uporaba opreme različnih proizvajalcev v sistemu vodenja je tako precej otežena, saj potrebujemo vmesnike imenovane konverterji protokolov. Konverzija protokolov pa zaradi raznolikosti protokolov ni enostavna. Konverterji protokolov morajo ustrezno pretvoriti tako fizično plast kot tudi vse višje plasti. Kot osnovo digitalnih protokolov na nivoju prenosa podatkov na nižjem nivoju vodenja štejemo shemo fieldbus (1988), ki je bila namenjena zamenjavi do takrat prevladujočega analognega sistema prenosa podatkov 4-20mA. Sistem naj bi povezal merilne in izvršne sisteme s krmilniki ali regulatorji preko podatkovnega vodila. Shema prenosa podatkov fieldbus je danes standardizirana s standardoma IEC 61158 in IEC 61784, poznamo pa več konkretnih realizacij standarda. Ker so se v tem času začeli razvijati tudi nadzorni sistemi vodenja, je bilo potrebno tudi krmilnike in regulatorje povezati na nadzorne računalnike (SCADA – supervisory control and data acquisition) in te naprej na poslovni nivo. Začetek na tem področju predstavlja sistem Modbus, ki ga še vedno razvijajo. Razvoj komunikacije na nižjih in višjih nivojih poteka ločeno, ker imamo na nižjem nivoju opravka s časovno kritičnimi operacijami, medtem ko na višjih nivojih lahko prenašamo informacijo z zakasnitvijo brez večje škode. Danes imamo

na tržišču klasične digitalne protokole prenosa podatkov, ki večinoma uporabljajo serijsko komunikacijo po standardu RS-485 ali pa definirajo lastno strukturo ožičenja in protokole prenosa podatkov. Vedno bolj pa se uveljavljajo novejši protokoli digitalnega prenosa podatkov, ki za svojo osnovo uporabljajo ethernet z nadgradnjo za učinkovito pošiljanje podatkov v realnem času. Poglejmo si nekaj konkretnih primerov delujočih protokolov prenosa podatkov.

### **Sistemi serijskega digitalnega prenosa podatkov za časovno kritične operacije**

Serijski sistemi digitalnega prenosa podatkov za časovno kritične operacije so glede ožičenja še vedno podobni analognim sistemom, omogočajo pa priključitev več naprav na isto signalno zanko.

**Sistem HART (Highway Addressable Remote Transducer protocol).** Sistem HART je ena najstarejših izvedb standarda fieldbus. V resnici je bil izveden celo pred objavo standarda sredi osemdesetih let prejšnjega stoletja. Zanimivost protokola je, da lahko uporablja ožičenje analognega tokovnega sistema prenosa 4-20mA. Takšen način ožičenja je bil izbran zaradi takrat prevladujočega sistema prenosa signalov, saj so s tem olajšali uporabo sistema HART. Razvit je bil pod okriljem podjetja Rosemount in je od 1986 javno odprt standard.

Gradniki, ki podpirajo ta sistem prenosa podatkov lahko delujejo v topologiji zvezde, kjer se analogni in digitalni signal lahko prenašata po istem ožičenju. V taki izvedbi mora biti vsak gradnik priključen na svoji signalni zanki. Pri popolnoma digitalni komunikaciji pa lahko na isto zanko vežemo do 63 naprav, ki mora imeti vsaka svoj unikatni naslov. V tem primeru v zanki stalno teče tok 4mA. Poleg uporabe ožičenja z dvema žicama lahko danes ta protokol deluje tudi preko brezžičnega omrežja. Za prenos podatkov sistem HART uporablja standard Bell 202, ki določa način prenosa podatkov z modulacijo s faznim preskokom. Omogoča prenos s hitrostjo 1200 bit/s, logična nič je kodirana s frekvenco 2200 Hz, logična 1 pa s frekvenco 1200 Hz. Signal je superponiran na analogni signal 4-20mA tako, da se ne motita. Naprave med seboj komunicirajo po principu gospodar-suženj (ang. master-slave). Sistem predvideva, da suženjska naprava pošilja podatke samo, če jo kontaktira gospodar. Na posamezni zanki sta lahko dva gospodarja; regulator ali krmilnik kot primarni gospodar in ročni komunikator kot sekundarni gospodar.

**Sistem Interbus.** Sistem Interbus je eden od vodilnih sistemov za digitalni prenos podatkov po standardu Fieldbus. Uporablja ga več kot 500 proizvajalcev opreme vodenja, razvit pa je bil leta 1987 s strani podjetja Phoenix Contact. Sistem se je sedaj združil s sistemom PROFIBUS in se samostojno ne razvija več, ostaja le še vzdrževanje obstoječih inštalacij, zato ga bomo tu le omenili.

**Sistem PROFIBUS (PROcess Field BUS).** Sistem PROFIBUS je ena najbolj razširjenih izvedb digitalnega prenosa podatkov v industriji po standardu Fieldbus. Sistem so v osnovi razvili pri Siemensu, kasneje pa so ga podprli še drugi proizvajalci. Za razvoj in vzdrževanje skrbi združenje uporabnikov PROFIBUS, ki ima okoli 1400 članov med katerimi so najmočnejša podjetja s področja avtomatizacije. Obstajata dve verziji, ki pa sta kompatibilni in lahko sobivata na istem sistemu vodenja. Verzija PROFIBUS DP je namenjena vodenju v izdelčni

industriji, medtem ko je verzija PROFIBUS PA namenjena vodenju v procesni industriji in omogoča tudi uporabo v eksplozijsko nevarnih okoljih.

Za izvedbo ožičenja obstajajo tri možnosti. Najosnovnejše je ožičenje po standardu RS-485 po parici z upornostjo  $150 \Omega$  v topologiji vodila. V taki konfiguraciji je možen prenos podatkov s hitrostmi od 9.6 kbit/s do 12 Mbit/s pri dolžini kablov med ponavljalniki med od 1200 m do 100 m. Ta varianta se uporablja pri obeh verzijah sistema. Prav tako lahko uporabimo optični prenos podatkov v topologijah zvezda, vodilo in obroč. Dolžina posamezne povezave je omejena na 15 km, medtem ko je hitrost prenosa poljubna na intervalu od 9.6 kbit/s do 12 Mbit/s. Za verzijo sistema PA pa je definirana tudi uporaba sistema MBP (ang. Manchester bus powered). Sistem MBP je sestavljen iz parice v topologiji vodila po kateri prenašamo signal po metodi Manchester (tip modulacije s faznim preskokom). Posamezne povezave so omejene na 1900 m s stalnim prenosom podatkov 31,25 kbit/s. Posebnost sistema je, da je možno preko signalnih vodov napajati tudi oddaljene naprave. Ne glede na izvedbo ožičenja je možno hkrati priključiti do 126 naprav. Nadzor prenosa podatkov je izveden s protokolom FDL (Fieldbus Data Link), ki je kombinacija sistema gospodar-suženj in obroča z žetoni. Obroč z žetonom deluje tako, da po omrežju med napravami kroži poseben okvir imenovan žeton. Samo naprava, ki ima žeton ima pravico do oddajanja podatkov. Vsaka naprava v sistemu ima svoj naslov, ki mora biti enoumno določen. Sistem pošilja podatke po protokolu DP in sicer po eni izmed verzij V0 do V2, odvisno od zahtevnosti uporabnika.

**Sistem MelsecNet.** Sistem MelsecNet je sistem proizvajalca Mitsubishi Electric za digitalno komunikacijo med napravami. Trenutna verzija sistema je MelsecNet/H, v uporabi pa so še starejše verzije MelsecNet, MelsecNet/B in MelsecNet/10.

Za izvedbo ožičenja sta možni dve varianti, preko koaksialnega ali optičnega kabla. V obeh primerih so naprave povezane v zanko v kateri informacija kroži v eno smer. Sistem pa predvideva tudi dvojno ožičenje, kar pomeni dve vzporedni zanki, zato lahko v primeru pretrganja ene zanke sistem še vedno deluje. Sekundarno ožičenje prevaja podatke v obratni smeri kot primarno. Sistem deluje po principu gospodar-suženj, s tem da omogoča avtomatsko izbiranje gospodarja, kar poveča robustnost omrežja v primeru okvar na napravah, ki so gospodarji omrežja (običajno regulatorji in krmilniki). Na eno omrežje lahko priključimo do 64 suženjskih naprav, sistem pa lahko organiziramo v 255 zank, ki med seboj komunicirajo preko prehodov. Protokol MelsecNet/H omogoča prenos podatkov z 10 Mbd ali 25 Mbd do razdalje 30 km (optika) oz. do razdalje 500 m med napravami (koaksialni kabel).

**Sistem CC-Link.** Sistem CC-link je bil razvit na osnovi protokola MelsecNet, le da je postal odprt standardni protokol namenjen povezovanju naprav drugih proizvajalcev v omrežje pretežno Mitsubishijevih naprav. Sistem je narejen v skladu s standardom fieldbus, za njegov razvoj pa skrbi neprofitna organizacija CLPA (CC-Link Partner Association). Obstaja več verzij tega sistema: splošno namenski CC-Link, CC-Link LT in CC-Link Safety. Razlika med njimi je v njihovi namembnosti. Sistem CC-Link LT je okrnjena verzija protokola z zmanjšanim dosegom in hitrostjo prenosa podatkov, CC-Link Safety pa je namenjen uporabi skupaj z napravami s povečano varnostjo.

Ožičenje sistema je izvedeno po standardu RS-485 z oklopljenim trižilnim prepletenim kablom. Dolžina posameznih kablov je omejena na 1,2 km oz. na 13,2 km s ponavljalniki. Hitrost prenosa podatkov v omrežju je maksimalno 10 Mbit/s s tem, da je pri tem lahko maksi-

malna dolžina posameznih kablov le 100 m oz. 4.3 km s ponavljalniki. Na omrežju je lahko prisotnih do 64 suženjskih naprav. Podatki se v polno zasedenem omrežju lahko osvežujejo hitreje kot na 3,9 ms. Omrežje je organizirano po sistemu gospodar–suženj z avtomatsko izbiro gospodarja in možnostjo priklopa in odklopa naprav med delovanjem omrežja. Naprave, ki lahko postanejo gospodarji mreže morajo biti deklarirane kot gospodarji v pripravljenosti (maksimalno 26 naprav). Omrežje ima lahko topologije vodila, T-razvejitve ali pa zvezde. Naprava, ki je gospodar mreže, stalno preverja stanja ostalih naprav.

**Protokol LonTalk.** Podjetje Echelon je dalo na trg odprt sistem za vodenje sistemov LonWorks, katerega glavni del je protokol komunikacije LonTalk. Sistem je zelo razširjen na področju avtomatizacije pametnih hiš. Protokol LonTalk je bilo sprva možno dobiti samo z nakupom čipa Neuron, ki je omogočal komunikacijo med napravami. Od leta 1999 pa je protokol možno dobiti kot standard ANSI/CEA 709.1, deli protokola LonTalk pa so standardizirani tudi s protokolom IEC 14908.

Protokol lahko komunicira preko parice, močnostnega omrežja, radijskih valov, infrardeče (IR) svetlobe, tunela IP, optičnega in koaksialnega kabla. Pri uporabi parice lahko dosežemo prenos podatkov s hitrostjo 78 kbit/s, pri uporabi močnostnega omrežja pa je hitrost 3,6 kbit/s ali 5,4 kbit/s, odvisno od uporabljene nosilne frekvence signala. Tip ožičenja tudi določa koliko naprav se lahko hkrati nahaja v omrežju, a okvirna vrednost je okoli 64. Signal je moduliran s faznim preskokom in sicer z diferencialnim kodiranjem Manchester.

**Sistem CAN (Controller Area Network).** Sistem CAN je bil razvit v podjetju Robert Bosch GmbH za komunikacijo med napravami v vozilih že leta 1983. Je eden izmed protokolov standardiziranih v OBD-II in EOBD, ki definirata sisteme za diagnostiko vozil. Sistem je definiran s standardom ISO 11898. Ideja sistema je, da poveže vse elektronske naprave v avtomobilu v enoten sistem.

Sistem nima definirane načina ožičenja in konektorjev ampak to prepušča posameznemu uporabniku. V praksi je kot konektor zelo pogosto uporabljen DE-9, ki ga najdemo tudi pri standardu RS-232. Topologija sistema je vodilo, pri katerem sta vodnik za nizek nivo in vodnik za visok nivo sklenjena v zanko preko dveh 120  $\Omega$  uporov. Naprava, ki pošilja in sprejema informacijo po sistemu CAN ne more biti priključena na vodilo neposredno, ampak mora vsebovati sprejemnik/oddajnik, ki skrbi za pretvorbo nivojev signalov med vodilom in krmilnikom CAN ter varuje krmilnik CAN pred poškodbami zaradi prenapetosti na vodilu. Krmilnik CAN skrbi za izmenjavo podatkov med procesorjem naprave in vodilom. Naprave pošiljajo sporočila, ki so rangirana po prioriteti. Sporočilo, ki ima najvišjo prioriteto je poslano najprej, ostala pa počakajo, da se vodilo sprosti. Pri dolžinah vodila do 40 m je možna hitrost prenosa do 1 Mbit/s, pri 500 m pa le še 125 kbit/s. Vsako sporočilo na vodilu mora imeti enolično identifikacijsko številko, da ne pride do napak pri prenosu. Klasično so bile identifikacijske številke sporočil generirane na osnovi tipa sporočila in pošiljatelja. V kombinaciji s sistemom, ki je sporočilom dodeljeval prioriteto glede na dolžino identifikacijske številke je smelo biti vodilo obremenjeno maksimalno 30% za uspešno delovanje, ker je sicer lahko prišlo do velikih zakasnitev pri pomembnih sporočilih. Nov pristop pa identifikacijske številke generira glede na nujnost sporočila, kar omogoča uspešno delovanje tudi pri 70-80% obremenitvi sistema. Glede na zgoraj povedano lahko rečemo, da je CAN zelo ohlapen standard, ki določa samo delovanje sistema prenosa podatkovnih paketov, medtem ko je vse ostalo prepuščeno uporabniku. Deklaracija, da naprava komunicira po sistemu

CAN torej ne zagotavlja, da je združljiva z ostalimi napravami, ki ustrezajo temu standardu.

**Sistem LIN (Local Interconnect Network).** Sistem LIN je bil zasnovan s strani konzorcija evropskih avtomobilskih proizvajalcev ter podjetij Volcano Avtomotive Group in Freescale. Namenjen je nezahtevni komunikaciji majhnega števila naprav. V glavnem se uporablja za vzpostavitev pod mreže na vodilu CAN. Dobra stran protokola je, da je prosto dostopen vsakomur brez plačila.

Ožičenje sistema je samo ena žica, saj se tokokrog zaključi preko karoserije avtomobila, kar je standardna rešitev v avtomobilski industriji (standard ISO 9141). Sistem LIN uporablja napetost napajanja in prenosa podatkov 12 V in je izveden s pomočjo nizko cenovne standardne opreme UART, ki je osnova za komunikacijo po standardih RS-232, RS-422 ali RS-485. Topologija povezave je vodilo, ki sistemu omogoča maksimalne hitrosti prenosa 20 kbit/s. Prenos deluje po sistemu gospodar-suženj, kjer gospodar določa frekvenco vodila. Na vodilu je lahko do 16 suženjskih naprav. Sistem omogoča določanje naslova sužnja po zagonu sistema in detekcijo okvarjenih naprav na vodilu. Sistem pozna dve stanji: spanje in aktivno stanje. Ko se na vodilu nahajajo podatkovni paketi morajo biti vse naprave v aktivnem stanju, a se po nekem času neaktivnosti postavijo v stanje spanja. Za ponovno aktiviranje naprav je potrebno poslati budilni okvir, ki ga lahko pošlje katera koli naprava na vodilu po potrebi oz. gospodar vodila v določenih časovnih intervalih. Podatki se po vodilu pošiljajo združeni v osem bitov z dodanim začetnim in končnim bitom ter brez zagotavljanja paritete bitov. Sinhronizacija poteka preko poslanih okvirjev, zato suženjske naprave ne potrebujejo lastnih ur. Organizacija podatkov v okvirju omogoča identifikacijo pošiljatelja, tipa sporočila in detekcijo napak.

**Sistem VAN (Vehicle Area Network).** Sistem VAN je ravno tako sistem prenosa podatkov v avtomobilski industriji. Razvit je bil s strani francoskih proizvajalcev PSA Peugeot Citroen in Renault. Sistem je na fizičnem nivoju močno podoben sistemu CAN, standardiziran pa je s standardom ISO 11519.

Topologija je diferencialno vodilo, signali pa so kodirani po sistemu razširjeni Manchester, kar je na področju protokolov prenosa podatkov v vozilih posebnost. Vodilo omogoča prenos podatkov do 125 kbit/s.

### **Sistemi serijskega digitalnega prenosa podatkov za časovno nekritične operacije**

Sistemi za digitalni prenos informacije časovno nekritičnih operacij so skoraj 10 let starejši od sistemov za časovno kritične operacije. Razloga za to sta vsaj dva. Prvenstveno so bili namenjeni komunikaciji med krmilniki, za katere sistem prenosa podatkov do takrat še ni obstajal. Njihova izvedba je bila enostavnejša kot izvedba za prenos časovno kritičnih informacij.

**Sistem Modbus.** Sistem MODBUS je bil razvit s strani podjetja Modicon (sedaj v lasti Schneider Electric) že leta 1979 in je bil namenjen komunikaciji med krmilniki. Danes se še vedno uporablja za iste namene, poleg tega pa še za prenos podatkov na nivo nadzornih sistemov (SCADA–Supervisory Control And Data Acquisition). Sistem ni namenjen prenosu časovno kritičnih podatkov. Za razvoj standarda skrbi Organizacija Modbus v katero so včlanjena podjetja s področja avtomatizacije.



Sistem Modbus je točno definiran samo na nivoju pomena prenesenih podatkov, ostali parametri prenosa podatkov, kot je ožičenje, topologija, protokol prenosa podatkov pa so prepuščeni uporabniku. Sistem omogoča priključitev do 249 naprav na isto omrežje. Pri uporabi etherneteta za prenos podatkov pa je ta številka precej višja. Omrežje deluje po principu gospodar–suženj, kjer je naprava gospodar določena v naprej. Glede na starost protokola pa je nabor dovoljenih podatkovnih tipov zelo omejen. Obstaja več verzij protokola, odvisno od tega v kakšnih okvirjih se prenaša sporočilo, kar je vezano na hitrosti prenosa fizičnega nivoja komunikacije.

**Sistem DLMS/COSEM (Device Language Message Specification/Companion Specification for Energy Metering).** Tudi na področju mnogo večjih omrežij, kot so električna, plinska in vodovodna omrežja obstaja standard za prenos podatkov od števec, ki so montirani pri uporabnikih do informacijskega sistema distributerja. Sistem se imenuje DLMS/COSEM in je definiran s standardom IEC 62056. Nad standardom bdi združenje uporabnikov DLMS.

Fizični nivo komunikacije je postavljen tako, da lahko poteka preko kakršnega koli medija, žičnega, optičnega ali brezžičnega in je osnova na kateri teče protokol COSEM, ki definira pomen podatkov in njihov prenos. Merilna naprava je tako po najlaže dostopnem mediju priključena na modul, ki zbira podatke iz merilnika. Z ročnim čitalnikom nato ob določenih trenutkih lahko odčitamo podatke z modula in jih nato odnesemo do zbirnega mesta operaterja. Sistem torej ni mišljen kot sprotno prenašanje informacije temveč zgolj kot olajšanje dela pri rednih odčitavanjih števec.

#### **Sistemi digitalnega prenosa podatkov na osnovi sistema ethernet (industrijski ethernet)**

Glede na izjemno uspešnost omrežja ethernet, se vse več proizvajalcev opreme vodenja odloča za vpeljavo le–tega tudi na področje industrijskega vodenja. Ethernet določa standard IEEE 802.3 in definira fizično plast omrežja, to pomeni ožičenje in način prenosa podatkov. Sistem uporablja prenos podatkov z upoštevanjem zasedenosti prenosnega kanala. Dovoljuje prenose podatkov do 10 Gbit/s, v pripravi pa so že standardi za prenose podatkov do 100 Gbit/s. Razvit je bil že v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja v razvojnem centru PARC (Palo Alto Research Center Incorporated – včasih v lasti podjetja XEROX). Omogoča pa povezave po najrazličnejših ožičenjih od parice, koaksialnih kablov do optičnih povezav v različnih topologijah. Zaradi velikih hitrosti prenosa, velike dolžine povezav in preizkušene tehnologije so se pojavile tudi industrijske izvedbe standarda IEEE 802.3. Problem uporabe so razmeroma veliki okvirji prenosa podatkov (minimalno 80b) glede na potrebe sistemov vodenja (okoli 8b) in pa delovanje v realnem času (predvsem protokol TCP).

**Protokol EtherNet/IP (Ethernet Industrial Protocol).** Protokol EtherNet/IP je bil razvit s strani podjetja Rockwell Automation v poznih devetdesetih letih prejšnjega stoletja na osnovi standarda CIP (Common Industrial Protocol). Za razvoj skrbi Združenje Open DeviceNet Vendors Association (ODVA). Protokol je skladen s standardom fieldbus. Prenos podatkov je na transportni plasti modela ISO/OSI izveden s protokoloma TCP (Transmission Control Protocol – protokol za nadzor prenosa) ali UDP (User Datagram Protocol – protokol uporabniških datagramov), ki sta standardna protokola sistema ethernet. Protokol TCP vedno najprej vzpostavi povezavo med oddajnikom in sprejemnikom, potem pa preverja dostavljanje posameznih podatkovnih paketov. Protokol zagotavlja, da bodo ve-

dno preneseni vsi podatki, ne pa časovnega okvira, ki je za to potreben. Protokol UDP pa ne vzpostavlja povezave med oddajnikom in sprejemnikom in ne preverja sprejema paketov (datagramov) na strani prejemnika. Zanesljivost prenosa podatkov se s tem zmanjša, precej pa se poveča hitrost prenosa. Če sprejemnik prejme paket, potem ga prejme znotraj definiranega časovnega okvira.

Protokol pošilja časovno kritične podatke po protokolu UDP, medtem ko se časovno nekritične informacije prenašajo po protokolu TCP. Uporabljena vrata protokola TCP so 44818, pri protokolu UDP pa 2222. Omogoča hitrosti prenosa do 1 Gbit/s

**Protokol PROFINET (PROcess Field NET).** Protokol PROFINET je bil razvit s strani organizacije PROFIBUS & PROFINET International, ki skrbi za vzdrževanje in razvoj protokolov PROFIBUS in PROFINET. Organizacija je sestavljena iz pomembnih podjetij na področju avtomatizacije. Protokol je skladen s standardom fieldbus oz. je njegov del.

Za komunikacijo uporablja protokole: izosinhronski protokol v realnem času (ang. isochronous real time protocol (IRT)), protokol v realnem času (ang. real time protocol (RT)), protokol v realnem času preko UDP (ang. Real time over UDP protocol (RTU)) in omogoča prenos podatkov z minimalnim časom vzorčenja 1 ms. Maksimalna hitrost prenosa je 1 Gbit/s.

**Protokol CC-link IE (Industrial Ethernet).** Protokol CC-link je bil razvit na osnovi protokola MelsecNet/G in je postal odprti standardni protokol namenjen povezovanju naprav drugih proizvajalcev v omrežje pretežno Mitsubishijevih naprav. Obstajata verziji Control in Field. Verzija Field je namenjena povezovanju gradnikov vodenja na najnižjem nivoju, medtem ko je verzija Control namenjena prenosu podatkov iz nižjega nivoja na višji nivo. Razvoj protokola usmerja in nadzira CC-link Partner Association.

Obe verziji lahko prenašata podatke s hitrostjo 1 Gbit/s in urejata promet po mreži z žetoni. Pri verziji Control je topologija mreže zanka oz. dvojna zanka za večjo zanesljivost. Omogoča pa priklop 120 naprav ter uporablja konektorje IEC 61754-20 LC ter optične kable po standardu IEEE 802.3z. Dolžina povezave med napravami je lahko maksimalno 550 m, celotna dolžina omrežja pa je lahko največ 66 km. Verzija Field je lahko urejena v topologiji zvezda, zaporedna vezava ali obroč. Povezave so izvedene z oklopljenimi paricami in priključene s konektorji RJ45. Protokola sta združljiva s klasičnim serijskim protokolom CC-link.

**Protokol EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology).** Protokol EtherCAT razvija skupina EtherCAT Tehcnology Group, ki jo sestavljajo vodilni svetovni proizvajalci opreme vodenja in uporabnikov. Protokol je vključen v standard fieldbus.

Protokol podpira uporabo vseh omrežnih topologij podprtih s strani etherneteta. Omogoča prenos podatkov hitrostjo 100 Mbit/s, pri tem pa lahko prenese podatke med 1000 postajami v približno 30  $\mu$ s. Protokol uporablja klasični okvir etherneteta, vanj pa skriva svoje okvirje, zato je komunikacija z internetom zelo enostavna.

**Protokol Ethernet POWERLINK** Protokol Ethernet POWERLINK razvija skupina Ethernet POWERLINK Standardization Group (EPG), originalno pa je bil razvit s strani Avstrijskega podjetja B&R leta 2001.

Protokol je odprt in omogoča prenose do 1Gbit/s in uporablja standardne kovinske kable in konektorje (RJ45). Omogoča prenos časovno kritičnih podatkov v realnem času. Prenos

podatkov je izveden tako, da lahko hkrati dostopa do omrežja samo ena naprava, pri tem pa ločimo asinhronsko fazo, v kateri se prenašajo časovno nekritične informacije in izosinhronsko fazo (časovno ekvidistančni dogodki) v kateri se prenašajo časovno kritične informacije. Za dostop do omrežja pa skrbi vodilna naprava, ki ostalim napravam dovoljuje ali prepoveduje dostop do omrežja in s tem preprečuje trke na omrežju.

#### **Sistem digitalnega prenosa časovno nekritičnih podatkov na osnovi sistema Microsoft Windows**

**Sistem OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control).** Standard OPC je nastal na osnovi Microsoftove tehnologije OLE. Standard je namenjen za prenos časovno nekritičnih informacij iz nivoja krmilnikov in regulatorjev do nadzornih sistemov (SCADA) v realnem času. Razvit je bil leta 1996 s strani Industrijske delovne skupine za industrijsko avtomatizacijo. Po objavi standarda pa je bila ustanovljena Fundacija OPC, ki skrbi za razvoj standarda. Standard zaenkrat še ni bil standardiziran s strani kakšne mednarodne ustanove za standardizacijo, vendar ima kljub temu širok krog uporabnikov.

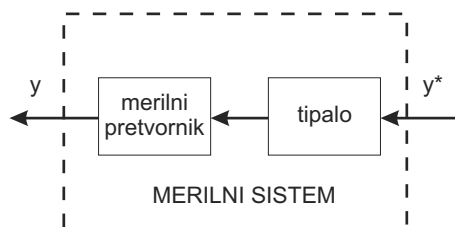
Sistem deluje po sistemu strežnik–klient in definira objekte, vmesnike in metode za uporabo na področju avtomatizacije. Sistem potrebuje delujoče računalniško omrežje in omogoča komunikacijo med krmilniki ali drugimi napravami na katerih je možno postaviti klienta OPC. Na nadzornem računalniku teče strežnik OPC, ki od klientov dobiva podatke in jim pošilja ukaze. Razvoj sistema gre v smeri osamosvojitve od platforme Microsoft Windows in v smeri prenosa in analize podatkov na višjih nivojih vodenja.



## 5

# Merilni sistemi

Merilni sistemi zbirajo informacijo o reguliranem ali krmiljenem sistemu in jo podajajo regulatorju, krmilniku ali pa zgolj prikazovalniku (slika 5.1). Merilni sistemi so edini gradniki,



Slika 5.1: Zgradba merilnega sistema:  $y$  – signal regulirane veličine,  $y^*$  – regulirana veličina

ki sistemu vodenja sporočajo informacije o trenutnih vrednostih stanj reguliranega sistema. Slika o stanju reguliranega sistema je torej močno odvisna od pravilnega delovanja merilnih sistemov in natančnost sistema vodenja je neposredno odvisna od natančnosti merilnikov. Osrednje poglavje te knjige bomo zato posvetili merilnim sistemom.

Merilni sistem (ang. measuring system; lahko pa tudi: sensor, gauge, meter, transducer, ...) je načeloma sestavljen iz dveh delov, prvi del navadno pretvarja merilno veličino v električni signal in ga imenujemo senzor ali tipalo (ang. sensor, gauge, detector, ...). Za senzor lahko uporabimo naslednjo definicijo:

**Senzor ali tipalo je skrinjica, ki pretvori znanje o procesnih parametrih, odzivu sistema ali o značaju produktov v uporabno informacijo.**

Drugi del merilnega sistema pa spremeni električni signal tipala v nek standardni signal, ki kodira informacijo tako, da jo je možno enostavno prenašati v sistemu vodenja in ga imenujemo merilni pretvornik (glej sliko 5.1) (ang. transducer, transmitter, ...). Merilne sisteme najdemo v:

- tehniških sistemih (klasična definicija merilnega sistema),
- bioloških sistemih (čutila, molekule s posebnimi lastnostmi) in
- socioloških sistemih (anketa).

V tehniških sistemih lahko najdemo naslednje izvedbe merilnikov:

- samo senzorski del brez merilnega pretvornika,
- integrirana senzor in pretvornik,
- z visoko stopnjo integracije funkcij (inteligentni senzori),
- mikro in nano senzori in
- biosenzorji.

Najcenejši so izvedbe, kjer dobimo samo senzorski del, vendar zahtevajo precej dodatnega dela, preden postane senzor res uporaben. Primerni so za testiranje osnovnih principov delovanja sistema vodenja in za razvoj opreme. Integrirane izvedbe, ki vsebujejo senzor in pretvornik so najpogostejši merilni sistemi v industriji. Ker sta tako senzor kot pretvornik tovarniško preizkušena, so takšne izvedbe zelo zanesljive in primerne za rutinsko uporabo v sistemih vodenja. Novejši sistemi pri katerih so merilni pretvorniki izvedeni z mikroprocesorjem, pa omogočajo dodatne funkcionalnosti merilnega sistema kot so: samodiagnostika, beleženje zgodovine merjene veličine, samodejna vzpostavitev protokola komunikacije, brezžična komunikacija, ipd. Za posebne namene pa obstajajo tudi zelo majhni in lahki senzori, ki omogočajo merjenja v zelo majhnih prostorih in povsod tam, kjer je dodatna masa lahko kritična, kot so letala in sateliti. Kadar je možno izdelati senzorje za različne veličine na isti osnovi (npr. silicijeva ploščica), to izkoriščamo za izdelavo elementov, ki imajo integrirane različne senzorje, ker zavzamejo precej manj prostora kot individualni elementi. Najnovejše variante senzorjev pa so biosenzorji, ki z uporabo biološkega materiala kot senzorja, lahko signalizirajo detekcijo prisotnosti snovi s spremembo svetlobnih ali električnih lastnosti. Njihov problem je razmeroma kratkotrajna obstojnost in selektivnost.

V zadnjem času smo priča izredno hitremu razvoju merilnih sistemov, ki pa se senzorskega dela sistema praktično ni dotaknil. Površna ocena je, da se na področju principov merjenja že od devetdesetih let prejšnjega stoletja ni nič bistvenega spremenilo. Povsem drugače pa je na področju merilnih pretvornikov, ki so se iz preprostih ojačevalnikov spremenili v mikroprocesorske sisteme in s tem povsem spremenili način komunikacije med merilnim sistemom in regulatorjem ali krmilnikom. S tem pa se je velik del razvoja posvetil programski opremi merilnega pretvornika, medtem ko je strojna oprema bolj ali manj standardne izvedbe.

## 5.1 Lastnosti merilnih sistemov

Navkljub zelo širokemu spektru različnih senzorjev, tako glede merjene veličine kot uporabljenega principa merjenja, imajo senzori precej lastnosti, ki jih lahko opišemo s splošnimi značilnostmi. Lastnosti senzorjev opisujejo razne karakteristike od katerih so najpomembnejše statične in dinamične. Na osnovi le-teh lahko izberemo in načrtamo sistem vodenja. Poglejmo si najprej statične lastnosti:

- statična karakteristika (ang. static characteristic) je relacija, ki povezuje izhodno vrednost merilnega sistema z vrednostjo merjene veličine v ustaljenem stanju.
- Merilno območje (ang. range) določa minimalno in maksimalno vrednost merjene veličine, ki jo merilnik lahko zajame s podano natančnostjo in brez poškodb senzorja.

- Točnost (ang. accuracy) je podana v procentih merilnega območja in je določena z enim standardnim odstopanjem stresanja merilnih rezultatov okrog prave vrednosti.
- Ponovljivost, natančnost (ang. precision) je definirana kot eno standardno odstopanje stresanja okoli srednje vrednosti ponovljenih meritev iste vrednosti veličine in je podana v procentih merilnega območja. Velikokrat jo zamenjujemo s točnostjo.
- Linearnost (ang. linearity) je največje odstopanje statične karakteristike merilnika od linearizirane karakteristike in je podana v procentih merilnega območja.
- Občutljivost (ang. sensitivity) je definirana kot naklon statične karakteristike merilnega sistema.
- Ločljivost ali resolucija (ang. resolution) je najmanjša sprememba merjene veličine, ki povzroči še opazno (merljivo) spremembo izhoda merilnika. Podajmo jo absolutno ali v procentih merilnega območja.
- Nično ali konstantno odstopanje (ang. bias) je konstantna vrednost, za katero je izhod merilnega sistema različen od vrednosti merjene veličine. Štejemo ga med pogreške merilnega sistema.
- lezenje (ang. drift) je konstantna hitrost s katero se izhod merilnika spreminja pri konstantni vrednosti merjene veličine in je najbolj neugodna oblika pogreška merilnega sistema.
- Histereza (ang. hysteresis) je maksimalna razlika med karakteristikama merilnega sistema, ki ju dobimo z merjenjem pri povečevanju in pri zmanjševanju merjene veličine.
- Prag merilnika (ang. threshold) je minimalna vrednost merjene veličine, pri kateri že dobimo nenično izhodno vrednost merilnega sistema.

Poleg statičnih lastnosti merilnega sistema so pomembne tudi dinamične lastnosti, ki določajo, kako hitre spremembe merjene veličine z njim še pravilno izmerimo. Parametri, ki določajo dinamične lastnosti merilnega sistema so naslednji:

- hitrost odziva (ang. reaction time) definirata ali časovna konstanta (ang. time constant) merilnega sistema ali maksimalna frekvenca merjene veličine (ang. maximum frequency).
- Dušenje (ang. damping) pa pove, kako hitro se izhod merilnega sistema ustali po spremembi merjene veličine.

Poleg statičnih in dinamičnih lastnosti pa so za izvedbo sistema vodenja pomembni tudi parametri glede na praktično uporabo, kot so:

- velikost,
- teža,
- napajanje,
- zahteve pri montaži (orientacija merilnika, predpriprava merjene veličine, ...),

- pritrditev,
- priključitev signalnih vodov,
- protokol komunikacije,
- predpisano vzdrževanje,
- ...

Ob načrtovanju sistema vodenja moramo upoštevati vse navedene lastnosti merilnih sistemov, pri čemer so v začetnih fazah bolj pomembne statične in dinamične lastnosti, pred izvedbo pa moramo izpolniti še vse zahteve v zvezi s praktično uporabo. Dejstvo pa je, da nikoli ne moremo dobiti merilnega sistema, ki bi idealno pokrilo potrebe, zato moramo vedno sklepati kompromise, ki morajo biti podrejeni glavnim zahtevam projekta.

V naslednjih podpoglavjih si bomo pogledali nekaj principov merjenja veličin, ki jih v procesni in izdelčni industriji najpogosteje srečamo. Naš namen je seznaniti bralca z osnovnimi informacijami o možnih pristopih k merjenju raznih veličin, ki jih najpogosteje srečamo v industriji. Za podrobne lastnosti merilnikov pa se bo bralec moral obrniti neposredno na proizvajalce opreme, ker so izvedbe tako raznolike, da bi že naštevaje le-teh močno presegalo okvirje te knjige. Na srečo so danes tehnične informacije o gradnikih enostavno dosegljive preko katalogov, ki so objavljeni na svetovnem spletu s strani proizvajalcev. Edina informacija, ki zahteva neposredni kontakt s proizvajalcem je cena opreme, ki se lahko razlikuje glede na to, kje na svetu naročamo opremo.

Kot smo že omenili, so merilni sistemi najpomembnejši del sistema vodenja, zato jim bomo posvetili precej pozornosti. Pri tem pa ne bomo obravnavali merilnih pretvornikov, ker so v glavnem neodvisni od uporabljenega principa merjenja in so vezani na konkretno izvedbo merilnika, kar pa ni predmet te knjige.

## 5.2 Merjenje pozicije in orientacije

Za vse sisteme, ki se lahko svobodno gibljejo v dvo ali tridimenzionalnem prostoru, potrebujemo informacijo o njihovi poziciji in orientaciji, če jih hočemo uspešno voditi po prostoru. Pozicijo in orientacijo podajamo v koordinatah, ki so vezane na koordinatne sisteme, ki imajo svoje izhodišče na zemlji. Običajno je pozicija podana v univerzalnih koordinatah sistema WGS-84. Potrebe po sistemu merjenja pozicije in orientacije vozil in plovil so že zelo stare, izšle pa so iz potovanja po morju, kjer je bila orientacija glede na značilnosti pokrajine nemogoča. Tako so se razvili načini orientacije po zvezdah in soncu (sekstant), ki so izkoriščali značilnosti potovanja zvezd in sonca po nebu, glede na dan v letu in trenutni čas opazovalca, ki je bil vezan na lokalni čas neke referenčne točke na zemlji (GMT - Greenwich Middle Time). S tem so določili lego plovila v prostoru, s kompasom pa njegovo orientacijo. Ker so se vozila, plovila in letala vse bolj izpopolnjevala, tako glede dosega kot glede hitrosti, je bilo potrebno tudi vse boljše določanje pozicije. Pri tem je imelo veliko vlogo tudi vojaško udejstvovanje, kjer je imela hitrost in točnost določanja položaja lahko velik vpliv na izid spopadov. Danes imamo v uporabi kar nekaj sistemov, mi pa si pogledjmo najbolj pogosto uporabljane.



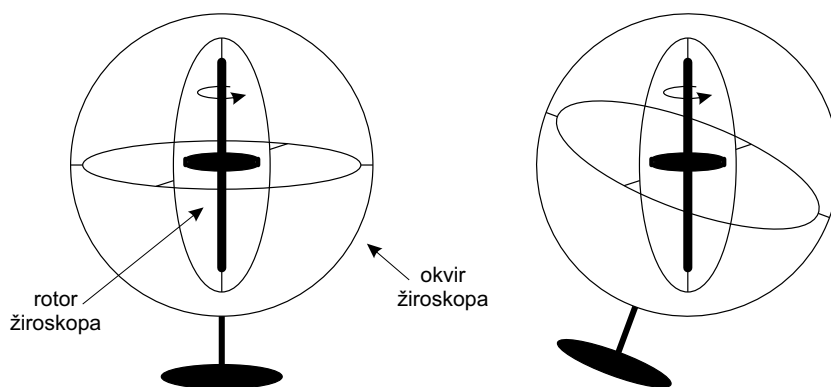
**Globalni pozicijski sistem (ang. global positioning system - GPS).** Za namene določanja pozicije na kopnem, v zraku in na morju uporabljamo globalni pozicijski sistem. Sistem je sestavljen iz satelitov, ki krožijo okoli zemlje in oddajajo signale s podatki o svoji poziciji in točnem času ter iz sprejemnika, ki te signale sprejema in iz njih določi svojo pozicijo. Sistem kodira informacijo z modulacijo psevdonaključnih binarnih signalov (ang. pseudo-random binary signal – PRBS). Psevdo naključne binarne signale običajno uporabljamo kot simulacijo šuma, saj imajo statistično zelo podobne lastnosti. PRBS je natančno določen z velikostjo registra, začetnimi vrednostmi registra in algoritmom, ki iz trenutnih vrednosti registra izračuna novo vrednost registra. Nova vrednost registra se doda v register na eni strani, medtem ko na drugi strani ena vrednost iz registra izpade in se pošlje kot nova vrednost signala (ang. shift-register). Če opazujemo pojavljanje vrednosti nič in ena v tako generiranem signalu, na prvi pogled izgleda popolnoma naključno, a se po nekem zelo dolgem času ponovi. Čas ponavljanja je odvisen izključno od dolžine registra. Vsi sateliti sistema GPS oddajajo informacije na dveh frekvencah in sicer na 1575,42 MHz in 1227,60 MHz, vendar vsak satelit s svojim PRBS. Informacija je kodirana v sistemu C/A (coarse/acquisition), ki je namenjen civilni rabi in v sistemu P (precise), ki je namenjen vojaški rabi in omogoča večje natančnosti pozicioniranja. Trenutno je v uporabi 31 satelitov, ki krožijo v različnih krožnih orbitah okoli zemlje tako, da je pokritost površine s signalom čim boljša. Sprejemnik določi pozicijo tako, da določi čase potovanja signala od satelita do sprejemnika  $t$ . Ker se širi signal s svetlobno hitrostjo  $c$ , je torej razdalja od satelita do sprejemnika  $R = c \cdot t$ . Ker oddajnik predstavlja točko v prostoru, smo s potjo  $R$  določili radij krogle okoli oddajnika na kateri se nekje nahajamo. Če sedaj dodamo še en satelit, dobimo presek dveh krogel in možno pozicijo zožimo na področje presečne krožnice. Ko dodamo še tretji satelit, dobimo presečišče krogel in krožnice, kar zoži možno pozicijo na dve točki, od katerih se ena nahaja v vesolju ena pa na zemlji. Največji problem za natančno pozicioniranje predstavlja slaba natančnost ure sprejemnika GPS. Če namreč čas potovanja od satelita do sprejemnika ocenimo samo za  $1 \mu\text{s}$  narobe, s tem naredimo 300 m napake. Ker hočemo, da je sprejemnik čim cenejši, si ne moremo privoščiti tako natančne ure, pač pa jo kompenziramo s signalom četrtega satelita. Sateliti imajo atomske ure z natančnostjo 10 ns, ki jih vsake toliko časa z zemlje sinhronizirajo. Za večjo natančnost pa upoštevajo še popravek zaradi vpliva težnosti na širjenje elektromagnetnega valovanja. Vsi sateliti pošljejo paket informacije vsake pol minute in to vsako celo in polovično minuto. Za določitev pozicije moramo torej rešiti naslednji sistem enačb:

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= ((t - t_1 + b) c)^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= ((t - t_2 + b) c)^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= ((t - t_3 + b) c)^2 \\(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 &= ((t - t_4 + b) c)^2,\end{aligned}\tag{5.1}$$

kjer so  $x_i, y_i$  in  $z_i$  kartezične koordinate satelitov,  $x, y$  in  $z$  kartezične koordinate sprejemnika,  $t_i$  čas oddaje paketa  $i$ -tega satelita,  $t$  čas sprejema paketov in  $b$  pogrešek ure sprejemnika. Neznanke so koordinate sprejemnika in pogrešek ure sprejemnika. Ker je natančnost rešitve odvisna od medsebojnega položaja satelitov, sprejemnik vedno izbere tiste, ki dajejo boljše rešitve, lahko pa za izračun uporabimo tudi več satelitov, kar izboljša natančnost rešitve. Natančnost ure na satelitih omogoča natančnost določanja pozicije na 30 cm natančno, v praksi pa z navadnimi sprejemniki za civilno rabo lahko dosežemo natančnost pozicije na

10 m natančno. Za nadmorsko višino je to razmeroma slabo, za zemljepisno dolžino in širino pa dober rezultat. Z uporabo diferenčnih sprejemnikov pa lahko dosežemo centimetrsko natančnost, vendar potrebujemo za to referenčni sprejemnik na stalni in znani lokaciji, ki oddaja korekturni signal mobilnim sprejemnikom.

**Žiroskop (ang. gyroscope).** Za merjenje orientacije v prostoru uporabljamo žiroskope. Klasični žiroskop je rotor z zelo visokim vztrajnostim momentom, ki ga ves čas vrtimo z visokimi obrati. Rotor je postavljen v okvir, ki se lahko suka po treh pravokotnih oseh. Ležaji vseh treh osi morajo omogočati obračanje že pri zelo majhnih navorih. V takem primeru vrtilna količina rotorja ohranja orientacijo vrtenja osi v isti smeri, kot je bil orientiran ob štartu, medtem ko se okvir lahko poljubno suka in s tem določa svojo orientacijo v prostoru glede na vrtilno količino rotorja. Ilustracija sistema je prikazana na sliki 5.2. Problem merilnika so

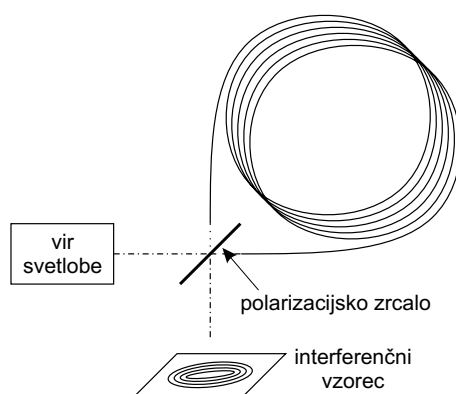


Slika 5.2: Prikaz delovanja žiroskopa

navori na rotor, ki nastopijo pri velikih hitrostih sukanja zaradi končno majhnega trenja v ležajih okvirja.

Ker pa imajo mehanski žiroskopi slabo natančnost, so jih danes nadomestile boljše izvedbe. Obstaja varianta z optičnim kablom, ki ga zvijemo v tuljavo, nato pa po njem pošljemo žarek z dvema pravokotnima polarizacijama, ki ga razdelimo s polarizacijskim zrcalom tako, da potuje ena polarizacija žarka v eni smeri, druga pa v drugi. Dokler optična tuljava miruje sta oba žarka sofazna, ko pa ju z istim polarizacijskim zrcalom spet sestavimo, dobimo na zaslonu koncentrične kroge zaradi interference dveh koherentnih virov. Če tuljavo začnemo sukati okoli svoje osi navitja pa se koncentrični krogi premaknejo odvisno od hitrosti in smeri sukanja. Merilnik izkorišča Sagnacov efekt, po katerem se pot žarka, ki se giblje v smeri vrtenja podaljša, pot žarka, ki se giblje v nasprotni smeri pa skrajša, zato žarka nista več v fazi, ko se ponovno združita. Če hitrost vrtenja integriramo, dobimo kot zasuka. Prikaz merilnika je na sliki 5.3. Če postavimo tri optične tuljave na tri med seboj pravokotne osi, s tem dobimo zasuke po vseh prostorskih kotih. Problem merilnika so majhna občutljivost pri majhnih hitrostih rotacije in lezenje zaradi integracije.

Najbolj pogosto pa je v uporabi vibracijski žiroskop. Običajno gre za piezoelektrični kristal, ki ga napajamo z izmenično napetostjo. Če začnemo ravnino vibracij sistema sukati, začne delovati Coriolisova sila, ki ukrivi kristal. Če deformacijo kristala merimo, lahko ugo-



Slika 5.3: Prikaz delovanja žiroskopa z optičnimi kabli

tovimo hitrost sukanja vibrirajočega kristala. Integracija hitrosti zasuka podaja kot zasuka. Tovrstni merilniki so enostavni za izdelavo in dovolj natančni, da jih najdemo tako na letalih kot tudi v boljših mobilnih telefonov. Problem merilnika so majhna občutljivost pri majhnih hitrostih rotacije in lezenje zaradi integracije.

**Zvezdni merilnik pozicije (ang. star tracker).** Za korekcijo orbit satelitov ne moremo uporabljati sistema GPS, ampak se moramo uporabiti moderne različice sledenja zvezd, ki jo imenujemo zvezdni merilnik pozicije. Merilnik je sestavljen iz fotocelice ali digitalne kamere, ki poskuša najti znane zvezde na sliki, ki jo zajamemo v optični smeri merilnika. Za navigacijo uporabljamo zvezde, ki po svoji svetlosti ali spektru svetlobe izstopajo. Trenutno je v širši uporabi 57 takšnih zvezd, lahko pa najdemo tudi sisteme, ki spremljajo do 1000 zvezd. Merilnik je občutljiv na motnje sončne svetlobe, odboja svetlobe od atmosfere in na razna optična popačenja, ki jih povzročijo plini pogojskih sistemov satelita.

### 5.3 Merjenje oddaljenosti

Ko imamo pozicijo v prostoru določeno oz. imamo neko referenčno točko, lahko določamo pozicijo objektov z merjenjem oddaljenosti od referenčne točke. Oddaljenost podajamo v metrih (m) in ustreznih večjih ali manjših potencah te enote. V Angleško govorečih deželah pa so v uporabi še čevlji, palci, milje in podobne enote. Navadno merimo oddaljenosti do nekaj 100 m, če ne gre za merjenje oddaljenosti nebesnih teles. Poglejmo si merilnike, ki jih uporabljamo za merjenje oddaljenosti za namene vodenja sistemov.

**Laserski merilnik oddaljenosti (ang. laser distance sensor or rangefinder).** Laserski merilnik oddaljenosti deluje na principu odboja svetlobe od površine merjenega objekta. Za daljše razdalje uporabljamo merilnike na osnovi časa preleta. Laserski žarek oddamo in počakamo, da dobimo nazaj odboj. Ker je hitrost svetlobe velika pa je taka varianta primerna le za meritve oddaljenosti nad 100 m, ker so sicer časi preleta tako kratki, da jih ne moremo dovolj natančno izmeriti. Za krajše razdalje pa uporabljamo metodo faznega zamika. Moč laserskega žarka moduliramo s sinusno frekvenco in gledamo fazni zamik odbitega žarka. Maksimalna razdalja merilnika je omejena z valovno dolžino modulirne frekvence, zato ve-

likokrat uporabljamo več frekvenčno modulacijo. Oddaljenost  $D$  dobimo kot:

$$D = \frac{c\varphi}{4\pi f}, \quad (5.2)$$

kjer je  $c$  hitrost svetlobe,  $\varphi$  fazni zamik in  $f$  frekvenca modulirnega signala. Ločljivost povečujemo z večanjem modulirne frekvence, vendar pa s tem hkrati zmanjšujemo doseg merilnika, ker so fazni zamiki omejeni na območje od 0 do  $2\pi$ .

**Ultrazvočni merilnik oddaljenosti (ang. ultrasonic distance sensor).** Ultrazvočni merilniki delujejo na principu odboja zvočnega signala od merjenega predmeta. Delujejo na principu časa preleta. Za natančne meritve je potrebno dobro poznati hitrost razširjanja valovanja zvoka po prostoru kjer merimo razdalje. Ultrazvočni merilniki oddaljenosti imajo nekaj centimetrov od oddajno/sprejemne enote mrtvo cono, da odboji v merilni sondi ne povzročajo motenj. Paziti moramo tudi na neželene odboje signala od predmetov, ki se nahajajo ob poti razširjanja zvoka.

## 5.4 Merjenje linearnega pomika

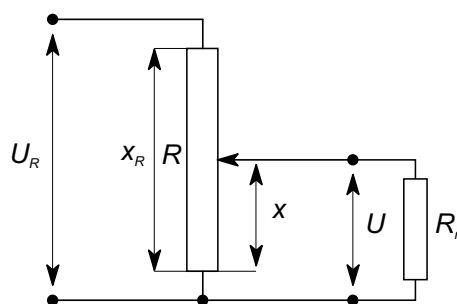
Manjše spremembe v poziciji objekta imenujemo pomik in ga merimo v metrih (m) in ustreznih večjih ali manjših dolžinskih enotah. Merjenje pomika je običajno omejeno na nekaj metrov, medtem ko zahtevamo veliko natančnost meritve, pri tem pa je včasih dovolj, da merimo le pomik ne pa tudi absolutne pozicije. Za merjenje pomika potrebujemo neko nepremično točko od katere nato merimo pomike.

### 5.4.1 Uporovni merilniki pomika

Ustaljena metoda merjenja pomika je uporaba spremembe upornosti ob pomiku objekta. Poznamo dva načina, prvi je sprememba pozicije drsnika, drugi pa vpliv raztezka materiala na njegovo upornost.

**Potenciometer (ang. potentiometer).** Merilni potenciometer je podoben spremenljivemu uporu, ki ga uporabljamo za nastavljanje upornosti v električnih vezjih, le da je uležajen tako, da omogoča čim lažje pomikanje. Sestavljen je iz uporovne sledi, ki je nepremično montirana na telo potenciometra in drsnika, ki drsi po uporovni sledi in je uležajen na telesu. Telo potenciometra je pritrjeno na nepremično podlago, medtem ko je drsник pritrjen na objekt, katerega pomik merimo. Pri tem moramo paziti, da je smer pomikanja objekta vedno vzporedna s smerjo potenciometra in, da je pomik objekta manjši ali enak merilnemu območju potenciometra. Potenciometer moramo napajati z napetostnim virom na priključkih uporovne sledi, napetostni signal pa odvezemamo med enim priključkom na uporovni sledi in priključkom na drsniku. Potenciometer tako predstavlja uporovni delilnik, kot je prikazano na sliki 5.4. Čeprav imajo digitalni voltmetri zelo visoko notranjo upornost, pa je za bolj precizne meritve potrebna korekcija karakteristike zaradi končne notranje upornosti merilnika. Pri neobremenjenem potenciometru velja:

$$U = U_R \frac{x}{x_R}, \quad (5.3)$$



Slika 5.4: Prikaz vezave potenciometra:  $U_R$  – napajalna napetost potenciometra,  $x_R$  – maksimalni pomik potenciometra,  $R$  – upornost uporovne sledi,  $x$  – pomik,  $U$  – napetost zaradi pomika,  $R_n$  - notranja upornost voltmetra

medtem ko moramo pri obremenjenem potenciometru upoštevati:

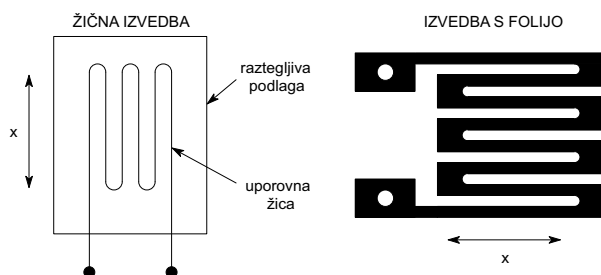
$$U = U_R \frac{x}{x_R + \frac{R(x_R x - x^2)}{R_n x_R}} \quad (5.4)$$

Poleg sprememb karakteristike zaradi vpliva bremena, pa imajo potenciometri tudi probleme zaradi šuma drsnika in mehanske obrabe uporovne sledi in drsnika, ki s časoma pokvari karakteristiko. Poznamo žične potenciometre in potenciometre iz prevodne plastike, pri vseh pa je življenjska doba omejena na število pomikov. Najbolj kakovostni potenciometru imajo življenjsko dobo nekaj milijonov pomikov. Merilno območje je omejeno zaradi problemov izdelave na nekaj metrov, dosegajo pa natančnosti do 1 % in imajo lahko več sledi.

**Uporovni lističi (ang. strain gauge).** Uporovni lističi izkoriščajo vpliv raztezka materiala na spremembo upornosti. Ker so narejeni iz kovine ali polprevodniških materialov, je njihovo območje meritve omejeno na nekaj  $10\mu\text{m}$ , zato niso uporabni kot merilniki pomika ampak jih uporabljamo kot sekundarne merilnike za merjenje različnih veličin, ki jih lahko prevedemo na raztezek materiala. Pri raztezk materiala pride do dveh vrst deformacije, ki vplivata na upornost materiala. Prva je deformacija geometrije, zaradi katere se kos materiala podaljša in zoži, kar oboje vpliva na povečanje upornosti. Druga pa je sprememba specifične upornosti zaradi vpliva na kristalno mrežo materiala. Upornost materiala  $R$  je definirana z naslednjo enačbo:

$$R = \zeta \frac{l}{S}, \quad (5.5)$$

kjer je  $\zeta$  specifična upornost materiala,  $l$  dolžina in  $S$  nazivni presek kosa materiala. Pri kovinskih materialih je najbolj izražena geometrijska deformacija, medtem ko je pri polprevodniških materialih večji vpliv raztezka na specifično upornost. Da povečamo vpliv raztezka, uporovni material formiramo v več vijug. Sedaj dobimo razteg na vsaki vijugi posebej in s tem tolikokratno ojačenje kot imamo vzporednih žic ali sledi materiala. Shematično sta dve izvedbi kovinskega uporovnega lističa prikazani na sliki 5.5. Proizvajalci uporovnih lističev izdelujejo kovinske lističe v dveh izvedbah in sicer v žični in folijski, ki pa sta glede uporabe povsem enakovredni. V obeh primerih je potrebno listič zelo skrbno nalepiti na objekt, katerega raztezek merimo. Pri tem moramo paziti na čistost in ravnost površine objekta,



Slika 5.5: Prikaz žičnega in folijskega uporovnega lističa

pravilno elastičnost lepila (najbolje, če se držimo navodil proizvajalca), zelo enakomeren nanos lepila na površino objekta in enakomerno porazdeljeno silo s katero listič pritisnemo na lepilo na površini objekta. Če so smo pri teh korakih površni, je meritev raztezka zelo slaba. Najpomembnejše za dobro izvedbo meritev pa so praktične izkušnje. Uporovni lističi imajo veliko temperaturno odvisnost, ki daje signale reda velikosti signalov raztezka, zato jih moramo kompenzirati. To storimo tako, da uporabimo vezavo v Wheatstonov mostič in sicer polovični ali polni mostič. Sprememba upornosti lističa je definirana kot:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta x}{x} \quad (5.6)$$

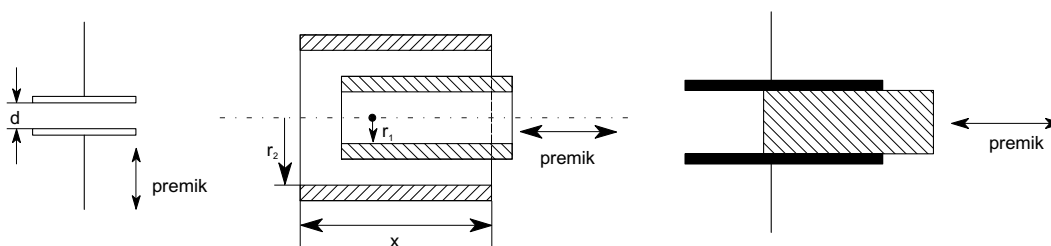
Za kovinske lističe je koeficient občutljivosti lističa  $k$  običajno 2, medtem ko je prečna občutljivost lističa nekaj procentov vzdolžne. Temperaturni koeficient pa je tudi običajno nekaj procentov vzdolžne občutljivosti. Pri polprevodniških lističih je vzdolžna občutljivost okoli 100, problematična pa je temperaturna občutljivost, ki je v istem rangi velikosti. Za polprevodniške lističe moramo zato obvezno izvesti temperaturno kompenzacijo. Dobra stran polprevodniških lističev je ta, da so majhni in, da jih lahko izdelamo integrirane v neko vezje ali kar na silicijevo membrano, ker se izdelujejo iz istega substrata kot vsi polprevodniški elementi.

#### 5.4.2 Kapacitivni merilniki pomika

Za meritve pomika, kjer je potrebna velika natančnost in robustnost merilnika so bolj ugodne meritve, kjer ni drsnih kontaktov, ki se obrabljajo. Ena možnost so kapacitivni merilniki. Kondenzator v splošnem sestavljata dve kovinski elektrodi in dielektrik med njima. Najenostavnejši za teoretično obravnavo so ploščni kondenzatorji, ki pa se v praksi redko uporabljajo, ker je njihova konstrukcija zelo nepraktična. Kapacitivnost  $C$  ploščnega kondenzatorja je definirana kot:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}, \quad (5.7)$$

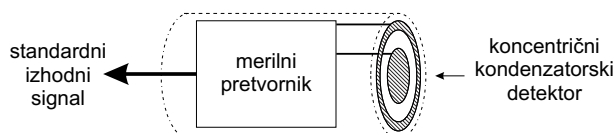
kjer je  $\epsilon$  dielektričnost snovi med ploščama kondenzatorja,  $d$  razdalja med ploščama in  $A$  efektivna površina kondenzatorskih plošč. Na kapacitivnost torej lahko vplivamo na tri načine, z oddaljenostjo plošč, s spremembo efektivne površine ali s spremembo dielektričnosti med ploščama kondenzatorja. Variante so prikazane na sliki 5.6. V praksi za merjenje pomika uporabljamo varianto s premikanjem dielektrika v nehomogenem polju, za posebne namene, kot je merjenje deformacije membran pa uporabljamo varianto s spreminjanjem efektivne razdalje med ploščama kondenzatorja. Varianta s spreminjanjem efektivne



Slika 5.6: Principi spreminjanja kapacitivnost v odvisnosti od pomika

površine kondenzatorjevih plošč pa se uporablja pri inkrementalnih izvedbah kapacitivnih merilnikov.

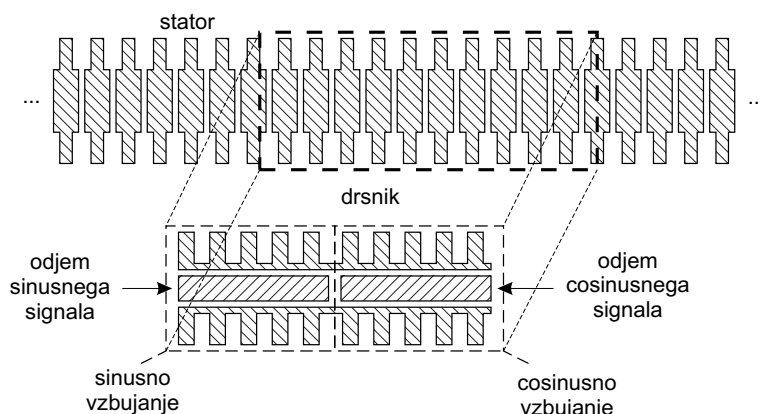
**Kapacitivni merilnik bližine (ang. capacitive proximity sensor).** Kapacitivni merilnik bližine ustvarja nehomogeno polje v katerem detektira prisotnost dielektrika, ki ima dielektričnost dovolj različno od zraka. Prikaz merilnika je na sliki 5.7. Spremembe kapacitivnosti



Slika 5.7: Kapacitivni merilnik bližine

zaradi spremenjene dielektričnosti so razmeroma majhne, zato jih moramo detektirati z mostičnimi vezavami ali pa z detekcijo spremembe lastne frekvence nihajnega kroga, ki ga povzroči sprememba kapacitivnosti. Doseg merilnika je v rangu enega centimetra. Merilniki so zelo zanesljivi, možni pa so problemi v področjih z močnimi radiofrekvenčnimi motnjami. Običajno so izdelani kot plastična palica z navojem, ki služi za pritrditev merilnika.

**Inkrementalni kapacitivni merilnik pomika (ang. capacitive linear encoder).** Za merjenje večjih pomikov uporabljamo inkrementalni kapacitivni merilnik pomika. Sestavljen je iz statorja, ki je periodičen vzorec kovinskih med seboj ločenih ploščic, ki se nahajajo na neprevodnem traku in so zalite z neprozornim izolacijskim materialom. Nad statorjem se pomika drsnik, ki je sestavljen iz kovinskih ploščic z vzorcem, ki ima isto periodo kot vzorec statorja, le da je krajši in na sredini premaknjen za pol periode in se potem do konca nadaljuje zakasnjeno. Prvi del je namenjen sinusnem vzbujanju statorja, drugi pa cosinusnem vzbujanju. Med periodično oblikovanima ploščicama sta dve pravokotni ploščici, ki segata od roba pa do preskoka faze v vzorcu. Prikaz merilnika je na sliki 5.8. Ploščici drsnika, ki sta periodične oblike, sta priključeni na izmenično napetost frekvence okoli 100 kHz. Ko se pokrijeta vzorca za sinusno vzbujanje in statorja, dobimo maksimalni signal na pravokotni ploščici za odjem sinusnega signala in ko se pokrijeta statorski vzorec in vzorec cosinusnega vzbujanja dobimo maksimalni signal na ploščici za odjem cosinusnega signala. Ker sta maksimuma zakasnjena za četrt periode, lahko glede vrednosti teh dveh signalov določamo smer gibanja drsnika. Če štejemo prehode maksimumov sinusnega ali cosinusnega signala, dobimo zelo grobo meritev, ker je perioda vzorcev statorja in drsnika precej velika. Zveznost signala med periodo pa omogoča precizno določanje pozicije drsnika tudi med polnim korakom



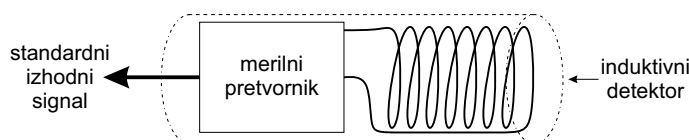
Slika 5.8: Inkrementalni kapacitivni merilnik pomika

in dovoljuje natančnost določanja pomika do  $1 \mu\text{m}$ . Inkrementalne kapacitivne merilnike v glavnem uporabljamo na kljunastih merilih in za merjenje pomikov na koordinatnih miza obdelovalnih strojev za kovine. Problem predstavljajo neenakomerne naslage, ki se naberejo med statorjem in drsnikom, saj spreminjajo permeabilnost kondenzatorjev, ki jih tvorijo ploščice statorja in drsnika. V splošnem pa je to zelo precizen in robusten merilnik pomika, ki za napajanje potrebuje zelo malo moči in običajno deluje na baterije.

### 5.4.3 Induktivni merilniki pomika

Manj občutljivi na motnje in ravno tako robustni so induktivni merilniki pomika. Izkoriščajo spremembo induktivnosti navitij zaradi pomikanja jedra, ki lahko vpliva na lastno induktivnost navitja ali pa na magnetno sklopitev dveh ali več navitij. Zaradi razmeroma velike gostote magnetnih polj, ki jih merilniki uporabljajo, so neobčutljivi na elektromagnetne motnje iz okolice in dajejo dovolj velike vrednosti izhodnih signalov, ki ne potrebujejo dodatnega velikega ojačenja.

**Induktivni merilnik bližine (ang. inductive proximity sensor).** Zelo pogosti so induktivni merilniki bližine. V grobem so sestavljeni iz tuljave z jedrom. Če približamo koncu tuljave predmet, ki ima permeabilnost različno od zraka, to spremeni induktivnost tuljave, kar lahko detektiramo s spremembo lastne frekvence nihajnega kroga v katerem se merilna tuljava nahaja ali pa z mostično vezavo. Prikaz induktivnega merilnika bližine je na sliki 5.9. Obstajata zvezna in diskretna izvedba merilnika, obe pa imata območje merjenja nekaj



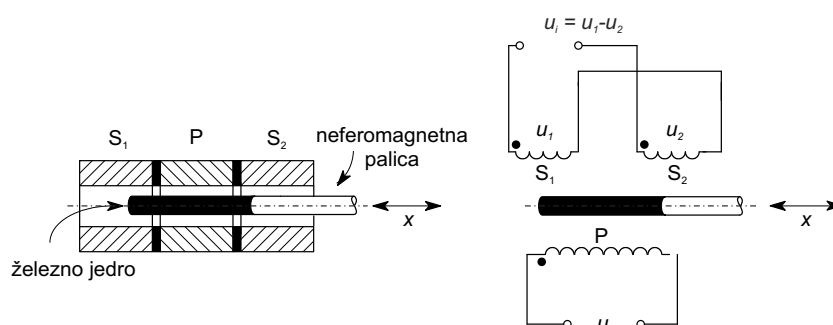
Slika 5.9: Induktivni merilnik bližine

centimetrov pri natančnosti  $1 \mu\text{m}$ . Spoznamo jih že po izgledu, ker so običajno izvedeni kot kovinske navojne palice. Navoj na merilniku služi za njegovo pritrditev in namestitev na



ustrezno razdaljo od merjenega objekta. Pri tem je treba pripomniti, da je natančnost merjenja odvisna od ponovljivosti poti pomika merjenega objekta in njegove orientacije, ker oboje močno vpliva na spremembo induktivnosti merilne tuljave.

**Diferencialni transformator (ang. linear-variable differential transformer – LVDT).** Induktivni merilniki z večjim območjem merjenja pomika so diferencialni transformatorji, ki jih bolj pogosto srečamo poimenovane po angleški kratici LVDT. Po zgradbi so to tri koaksialna navitja, ki so nameščena drugo ob drugem, jedro transformatorja pa je premično. S premikanjem jedra spreminjamo medsebojno induktivnost obeh robnih sekundarnih navitij in centralnega primarnega navitja. Izhod merilnika je razlika napetosti na sekundarnih navitjih tuljav. Prikaz merilnika je na sliki 5.10. Merilnik potrebuje izmenično napajanje s

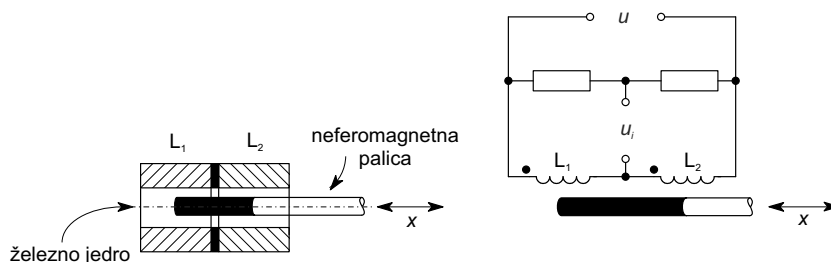


Slika 5.10: Prikaz in vezje diferencialnega transformatorja

frekvencami na območju med 50 Hz in 10 kHz in na izhodu daje izmenični signal, zato ga moramo za uporabo v sistemih vodenja še usmeriti. Pomembna pa je tudi faza izhodnega signala, ker nosi informacijo o smeri gibanja jedra. LVDT ima merilno območje nekaj 10 cm in dobro natančnost. Njegova največja prednost pred ostalimi merilniki pomika je izjemna robustnost in neobčutljivost na udarce in temperaturo, zato je uporaben v najtežjih pogojih delovanja, kot so stroji za vojne namene.

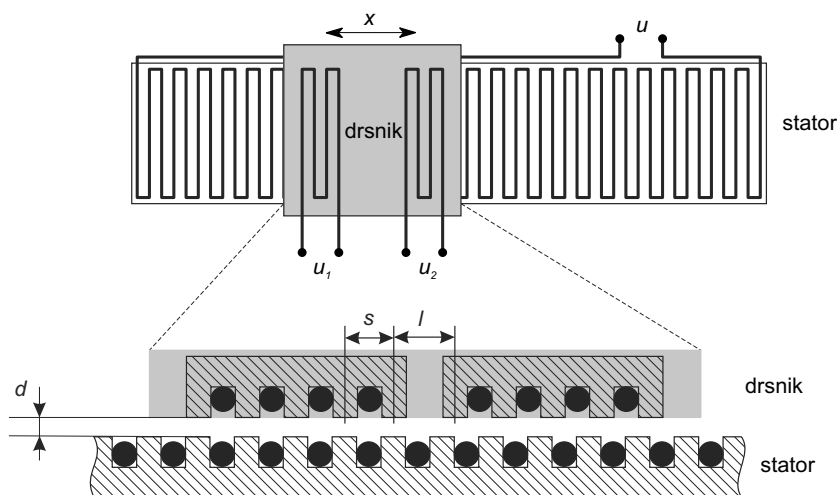
**Diferencialni induktor (ang. linear-variable differential inductor – LVDI).** Zelo podoben merilniku LVDT, tako po svoji zgradbi kot po lastnostih, je diferencialni induktor ali LVDI. Merilnik je sestavljen iz samo dveh koaksialnih navitij, ki sta postavljeni drugo ob drugem. Gibljivo jedro spreminja medsebojno in lastni induktivnosti obeh navitij in s tem spreminja pomik v razliko napetosti na navitjih. Ker v resnici spreminjamo razmerje impedanc med obema navitjema in ker spremembe niso zelo velike, sta navitji vezani v izmenični Wheatstonov mostič. Prikaz LVDI je na sliki 5.11. Bistvena razlika med LVDT in LVDI je masa merilnika. Slednji ima namreč eno navitje manj in je zato precej lažji. Ravno zaradi velike zanesljivosti in robustnosti ter manjše mase kot LVDT ga veliko uporabljajo kot merilnik pomika v letalih (kolesa, krmilne površine, ...). Napajanje je izmenična napetost s frekvencami med 50 Hz in 10 kHz, območje merjenja pomikov pa je do nekaj 10 cm.

**Induktosin (ang. inductosyn).** Zelo natančen merilnika pomika na osnovi indukcije je induktosin. Princip meritve je podoben inkrementalnemu kapacitivnemu merilniku pomika. Sestavljen je iz statorja in drsnika. Stator je feromagnetno jedro z izraženimi poli, med katerimi je napeljana žica. Drsnik je sestavljen iz dveh ločenih jeder z izraženimi poli, med



Slika 5.11: Prikaz in vezje diferencialnega induktorja

poli pa je napeljana žica. Poli statorja in drsnika so izvedeni periodično, pravokotno na smer pomika. Perioda statorskega jedra in obeh drsnikovih jedr je enaka, le da sta jedri v drsniku med seboj zamaknjeni za  $5/4$  periode. Prikaz induktosina je prikazana na sliki 5.12. Vzbujanje sistema je na statorju induktosina. Napajamo ga z izmenično napetostjo  $u$ , na dr-



Slika 5.12: Prikaz induktosina od zgoraj (gornji del slike) in od strani (spodnji del slike):  $x$  – smer pomika,  $u$  – napajalna napetost statorja,  $u_1$  in  $u_2$  – merjeni napetosti na drsniku,  $d$  – razdalja med statorjem in drsnikom (tipično 0.125 mm),  $l$  – razdalja med jedroma drsnika (četrtnina periode polov jedra  $s$  plus nek poljuben večkratnik cele periode)

sniku pa dobimo napetosti  $u_1$  in  $u_2$ , ki sta za četrtno periodo zamaknjeni med seboj, kar lahko zapišemo z enačbami:

$$\begin{aligned}
 u &= U \sin(2\pi ft) & (5.8) \\
 u_1 &= Ku \sin\left(\frac{2\pi x}{s}\right) \\
 u_2 &= Ku \cos\left(\frac{2\pi x}{s}\right),
 \end{aligned}$$

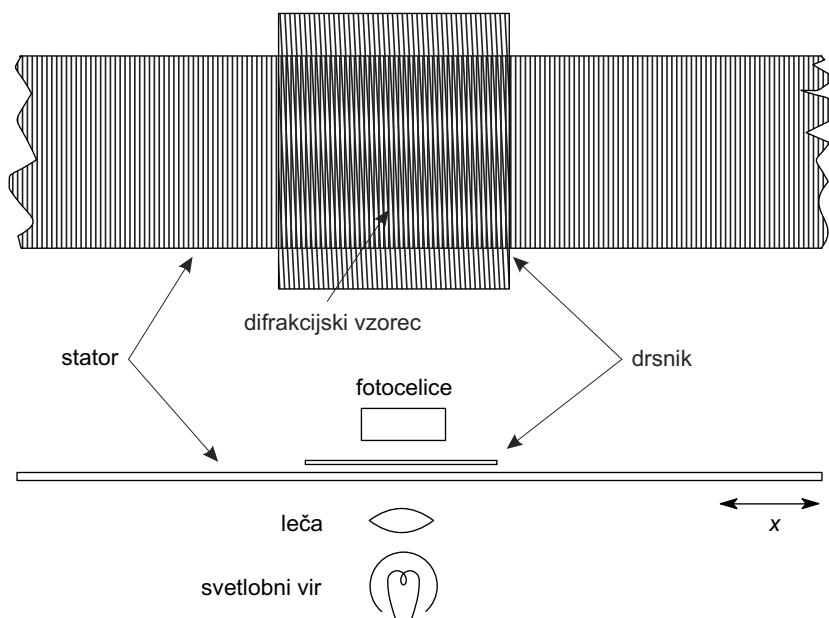
kjer je  $K$  faktor induktivne sklopitve statorja in drsnika. Za napajanje običajno uporabljamo frekvence od 5 kHz do 10 kHz. Z merilnikom izmerimo pomike, ki so večji od periode zob inkrementalno, kar pomeni, da štejemo kolikokrat smo dosegli maksimum usmerjene vrednosti ene od signalnih napetosti  $u_1$  ali  $u_2$ , med inkrementalnimi koraki pa določimo

pomik  $x$  iz znanih vrednosti usmerjenih napetosti  $u_1$  in  $u_2$  kot rešitev sistema enačb (5.8). Induktosin omogoča zelo precizno merjenje (reda  $\mu\text{ m}$ ) na skoraj poljubno velikem merilnem območju in zato spada me zelo natančne merilnike pomika. Ima dolgo življenjsko dobo in praktično ne potrebujejo vzdrževanja.

#### 5.4.4 Optični merilniki pomika

Poleg električnih principov merjenja pomika so danes zelo priljubljeni tudi optični principi, ker zagotavljajo brezkontaktno merjenje in so neobčutljivi na elektromagnetne motnje, če so električni pretvorniki izmerjenega signala dobro zaščiteni. Uporabljamo vse tri glavne principe optičnih merjenj kot so: inkrementalni, na osnovi izgube moči svetlobnega žarka po odboju v odvisnosti od oddaljenosti točke odboja in interferenčno sliko.

**Difrakcijska mrežica (ang. optical linear encoder).** Najpogosteje uporabljeni merilnik linearnega pomika je zagotovo difrakcijska mrežica. Najdemo jo v vseh aparatih srednjega cenovnega razreda z gibljivimi deli, ki jih je potrebno natančno pozicionirati, kot so tiskalniki in risalniki. Merilnik je sestavljen iz statorja, ki je lahko prosojna plastika s periodičnim vzorcem črt ali pa neprosojna plastika s periodičnim vzorcem zarez. Drsnik vsebuje izvor svetlobe, običajno so to svetleče diode, in enak vzorec črt ali zarez kot stator, le da so nagnjene za nek kot napram vzorcu na statorju. Če posvetimo skozi stator in vzorec na drsniku, se pojavi črtni vzorec, ki je pravokoten na vzorec statorja in se tudi giblje v pravokotni smeri glede na smer drsenja drsnika. Lastnost tega vzorca je tudi ta, da se premakne za celo periodo, ko se drsnik premakne le za pol periode. S štetjem prehoda črt dobimo informacijo o pomiku, smer pomikanja črt pa je odvisna od smeri pomikanja drsnika. Prikaz difrakcijske mrežice je na sliki 5.13. Obstajajo tudi variante, kjer je drsnik pritrjen, medtem ko se sta-

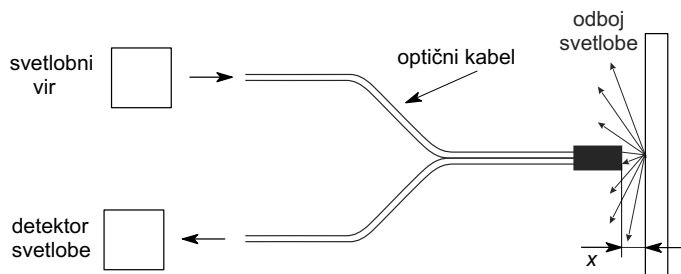


Slika 5.13: Prikaz difrakcijske mrežice

torski trak lahko pomika. Za manjše natančnosti pa obstajajo tudi variante, ki neposredno

štejejo črte statorja in ne uporabljajo difrakcije. Difrakcijska mrežica ima skoraj neomejeno območje merjenja z natančnostjo reda  $\mu\text{m}$ . Merilnik je dokaj neobčutljiv, probleme pa lahko povzroča prah in nalaganje naslag na statorski trak v zelo prašnih okoljih. Obstajajo tudi variante z absolutnim kodiranjem dolžine, ki imajo območje meritve do 10 m, točnostjo 1  $\mu\text{m}$  in ločljivostjo 1 nm.

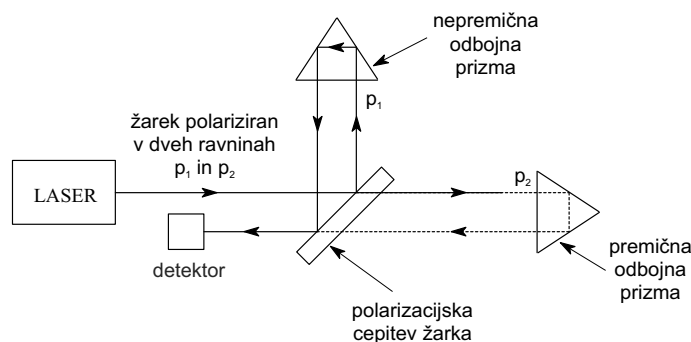
**Razpršilni optični merilnik pomika z optičnimi kablji (ang. fiber optic displacement sensor).** Za brezkontaktno merjenje majhnih pomikov lahko uporabljamo razpršilni optični merilnik z optičnimi kablji. Sestavljen je iz svetlobnega vira in detektorja, ki sta v skupnem ohišju. Iz ohišja pa izhajata dva optična kabla z velikim številom optičnih žic. Kabla se združita v merilni glavi tako, da se žice med seboj prepletejo. Po enem kablju vodimo svetlobo od svetlobnega vira (običajno svetleča dioda) do merjenca, po drugem pa do fotodetektorja vodimo odbiti žarek. Prikaz merilnika je na sliki 5.14. Merilno območje merilnika



Slika 5.14: Prikaz razpršilnega optičnega merilnika z optičnimi kablji

je reda nekaj centimetrov, natančnost pa v območju 0,01 mm. Merilnik je zelo občutljiv na površinsko obdelavo koncev optičnega kabla. Neravne površine namreč povzročajo dodatne odboje, ki slabijo žarek in se tako prištevajo k informaciji o pomiku in močno zmanjšujejo merilno območje. Za dobro delovanje potrebujemo površinsko polirane optične kabla, medtem ko s plastičnimi kablji, ki jih enostavno odrežemo, merilnik sploh ne deluje.

**Laserski interferometer (ang. Michelson-Morley interferometer).** Najbolj precizen merilnik za merjenje pomika je laserski ali Michelson-Morleyev interferometer. Merilnik uporablja podoben pristop kot žiroskop z optičnimi kablji. Potrebujemo izvor laserske svetlobe, ki ima dve ravnini polarizacije. Svetlobo razdelimo s polprepustnim zrcalom, tako da se polarizirana v eni ravnini odbije od zrcala, potuje skozi prizmo, se vrne nazaj do zrcala in se odbije v detektor. Druga polarizacija žarka pa potuje skozi zrcalo, skozi prizmo in se vrne nazaj do zrcala v isti osi kot prvi del žarek in se z njim združi. Ker poti obeh žarkov nista enaki, se na detektorju pokaže interferenčni vzorec koncentričnih krogov, ker žarka nista v fazi. Če eno od prizem pomikamo, se vzorec koncentričnih krogov širi ali oža, odvisno od smeri pomikanja prizme. Z detekcijo prehodov temnih in svetlih senc vzorca lahko štejemo pomik v valovnih dolžinah uporabljene svetlobe. Če izvedemo še detekcijo pomika sence, lahko natančnost meritve še izboljšamo. Na sliki 5.15 je prikaz delovanja laserskega interferometra. Merilnik je namenjen za uporabo v posebnih sistemih, kjer zahtevamo veliko natančnost. Običajno ga najdemo v laboratorijskih napravah, v industrijskih pa le redko, ker je zelo občutljiv in lahko že šibkejši udarec dovolj premakne prizmo in zrcalo, da se premaknejo izven optične osi, in s tem onesposobi merilnik. Narava meritve je inkrementalna, zato



Slika 5.15: Prikaz delovanja laserskega (Michelson–Morleyevega) interferometra

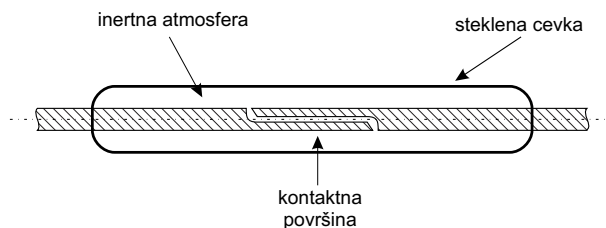
potrebujemo začetno inicializacijo sistema.

#### 5.4.5 Merilniki bližine

Velikokrat ne potrebujemo točne vrednosti pomika, ampak zadostuje že informacija, da smo se nečemu dovolj približali. Pri inkrementalnih merilnikih pa potrebujemo neko izhodiščno točko meritve od katere dalje nato štejemo korake merilnika. V obeh primerih uporabljamo merilnike bližine, ki so binarna izvedba merilnikov pomika. Merilniki bližine so torej izključno namenjeni javljanju vstopa merjenega predmeta v neko področje okoli merilnika.

**Elektromehansko končno stikalo (ang. electromechanical end-switch).** Najenostavnejši merilnik bližine je elektromehansko stikalo. Elektromehansko stikalo je sestavljeno iz jezička, ki ga vzmet potiska stran od električnega kontakta. Ko objekt, katerega bližino detektiramo, pritisne na jeziček z dovolj veliko silo, se vzmet poda in jeziček sklene kontakt, kar signalizira bližino objekta. Elektromehansko stikalo je zelo nezanesljivo, ker ima nezavarovane kontakte, ki jih prej ali slej prekrije oksid in s tem zveča upornost kontakta. Ko je upornost kontakta dovolj velika, stika ne zaznamo več ali pa le ob dotikih, ki proizvedejo zelo veliko silo. Pri uporabi elektromehanskega stikala moramo paziti, da objekt lahko proizvede dovolj veliko silo za sklenitev stikala. Ta izvedba končnega stikala ni primerna za varovanje sistemov pred prevelikimi pomiki zaradi slabe zanesljivosti.

**Reed-kontaktnik (ang. reed relay).** Bistveno izboljšavo elektromehanskega stikala predstavlja reed-kontaktnik. Sestavljen je iz dveh jezičkov, ki sta zataljena v stekleni cevki. V cevki je inertni plin, ki zvečuje prebojno trdnost lokalne atmosfere in ščiti jezička pred oksidacijo. Jezička sta narejena iz feromagnetnega materiala in sta postavljena drug ob drugem na razdalji manjši od milimetra. Če kontaktnik izpostavimo magnetnemu polju, se pojavi med jezičkoma privlačna sila, ki ju sklene. Skica reed-kontaktnika je na sliki 5.16. Reed-kontaktnik zagotavlja zelo zanesljiv kontakt in hiter preklon tudi pri višjih frekvencah preklonov. Paziti pa moramo, da čez njega ne tečejo preveliki tokovi, sicer lahko pride do zavarjenja kontaktov, kar se še posebno velikokrat zgodi pri induktivnem značaju priklapljenega vezja. Nekdaj so bili uporabljeni kot električna stikala v vezjih, dokler jih niso izpodrinili tranzistorji, danes pa jih najdemo kot končna stikala. Velik preporod pa so doživeli ob uvedbi varnostnih mehov v avtomobile, kjer je sistem permanentni magnet, vzmet in



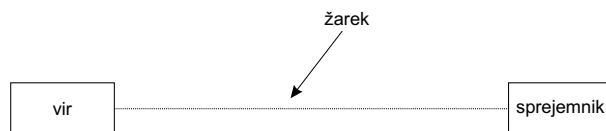
Slika 5.16: Reed-kontakt

reed-kontakt uporabljen kot stikalo s senzorjem pospeška. Ob dovolj velikem pospešku se magnet na vzmeti toliko približa kontaktniku, da sklene kontakt in odpre zračne mehove.

**Kapacitivni merilnik bližine (ang. capacitive proximity sensor).** Kapacitivni merilnik bližine lahko najdemo v izvedbah z binarnim izhodom in ga uporabljamo kot končno stikalo. Ker je merilnik zelo občutljiv na elektromagnetne motnje, so binarne izvedbe bolj pogoste od zveznih. Merilnik zaznava razne vrste materialov in je zelo zanesljiv.

**Induktivni merilnik bližine (ang. inductive proximity sensor).** Tudi induktivni merilnik obstaja v binarni izvedbi in ga pogosto uporabljamo namesto reed-kontaktnika, ker je za detekcijo dovolj kovinski material, zato ni potrebna montaža magnetov na objekte, da bi jih zaznali. To je zelo robusten merilnik, ki ga dobimo tudi v zelo majhnih izvedbah s premerom nekaj milimetrov. Uporabljamo ga tudi kot merilnik za merjenje hitrosti vrtenja tako, da z njim merimo frekvenco pojavljanja zob zobnika.

**Presvetlitveni senzor (ang. thru-beam sensor).** Presvetlitveni senzor je pogost senzor za detekcijo bližine neprosojnih predmetov. Sestavljen je iz dveh fizično ločenih podsistemov, vira in sprejemnika. Vir oddaja svetlobo v vidnem ali infrardečem spektru, izveden pa je večinoma s svetlečo diodo. Sprejemnik je foto dioda ali foto tranzistor. Vir in sprejemnik sta postavljena drug nasproti drugem v isti optični osi. Prekinitev žarka pa sproži spremembo stanja na izhodu merilnika. Uporabljamo jih lahko kot končan stikala, večinoma pa jih uporabljamo za varovanje delovnih prostorov potencialno nevarnih strojev in avtomatskih vrat. Njihova dobra lastnost je, da s postavitvijo senzorja natančno omejimo žarek in s tem prostor, ki ga pokriva, tako da ne more prihajati do neželenih odbojev in preklopov. Prikaz merilnika je na sliki 5.17. Obstajajo tudi letve takšnih merilnikov, ki jih uporabljamo za ščitenje

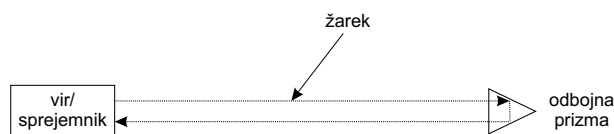


Slika 5.17: Prikaz postavitve optičnega presvetlitvenega merilnika

prehoda neke ravnine in jih imenujemo svetlobna zavesa (ang. light curtain).

**Odbojni senzor (ang. retro-reflective sensor).** Odbojni senzorji so zelo podobni presvetlitvenim, le da sta vir in sprejemnik v istem ohišju, na nasprotni strani pa imamo le odbojno

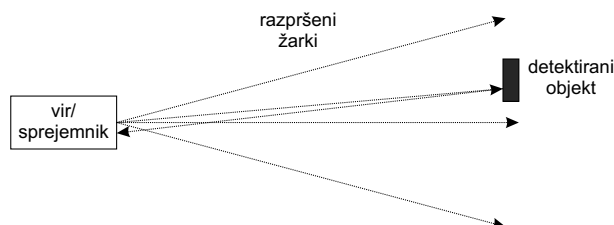
zrcalo, zato prostor ščitimo z dvema žarkoma na en merilnik. Prikaz merilnika je na sliki 5.18. Merilnik zaznava vse neprosojne materiale in ga uporabljamo za podobne namene kot



Slika 5.18: Prikaz postavitve optičnega odbojnega merilnika

presvetlitveni senzor.

**Razpršilni optični senzor (ang. diffuse mode sensor).** Kadar presvetlitvenega ali odbojnega sensorja ne moremo uporabiti zaradi prostora montaže, lahko uporabimo razpršilni optični senzor. Žarek sensorja je namenoma bolj širok, da zajame čim širše področje okoli sensorja, signal na izhodu sensorja pa se spremeni ko se od merjenega objekta odbije dovolj svetlobe nazaj do sprejemnika. Prikaz merilnika je na sliki 5.19. Področje uporabe merilnika



Slika 5.19: Prikaz postavitve optičnega presvetlitvenega merilnika

je podobno kot za presvetlitveni in odbojni merilnik.

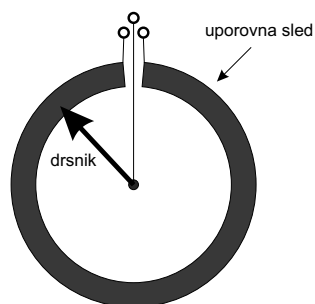
## 5.5 Merjenje zasuka

Tako kot za merjenje pomika, potrebujemo tudi za merjenje zasuka neko nepremično referenčno točko. Zasuk podajamo v kotnih stopinjah ( $^{\circ}$ ) ali radianih ter manjših izvedenih enotah. Merilnik zasuka je poleg neposredne meritve zasuka velikokrat uporabljen tudi kot sekundarni merilnik pri merjenju drugih veličin, zato štejemo zasuk kot eno izmed osnovnih fizikalnih veličin. Tudi merjenje linearnega pomika velikokrat pretvorimo v zasuk, saj so merilniki zasuka bolj kompaktni in ker s tem lahko zmanjšamo število različnih merilnikov sistema vodenja. Merjenje zasuka lahko izvedemo izjemno natančno (absolutni optični kodirniki imajo točnost reda kotne sekunde, ločljivost reda tisočinke kotne sekunde), problem pa predstavlja večličnost veličine. Pri sukanju objekta se le-ta lahko večkrat obrne okoli svoje osi, kar pomeni, da je vrednost kota zasuka v tem primeru tudi več kot  $2\pi$ . Pri vrtenju rotorjev pa kot zasuka celo linearno narašča, čeprav je orientacija rotorja vedno omejena le na področje  $[0, 2\pi]$ . Prav ta večličnost kota zasuka lahko v vodenju povzroče velike preglavice, zato moramo poskrbeti, da izhod merilnika stalno popravljamo na omenjeno območje. S tem pa pridemo do nove težave in sicer nezveznost meritve kota. Signal namreč ob prečkanju polnega kota spet pade na nič, kar seveda vnaša probleme v sisteme vodenja. Čeprav je merjenje kota razmeroma enostavno, pa je informacija, ki jo dobimo od merilnika večkrat problematična za uporabo v sistemih vodenja.

### 5.5.1 Uporovni merilniki zasuka

Uporovne metode merjenja zasuka so enostavne za uporabo. Pravzaprav poznamo samo potenciometer, ki pa se od potenciometra za linearni pomik loči po tem, da drsnik teče po krožnici.

**Potenciometer (ang. potentiometer).** Potenciometer je zelo pogost merilnik zasuka. Uporaba merilnika je popolnoma enaka kot pri potenciometrih z linearnim pomikom, edina razlika je fizična zgradba potenciometra. Prikaz merilnika je na sliki 5.20. Na sliki vidimo enega

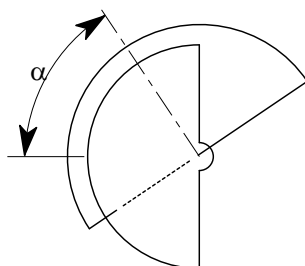


Slika 5.20: Prikaz rotacijskega potenciometra

od problemov merjenja zasuka s potenciometrom in sicer, da je območje merilnika manjše od polnega kota, ker se uporovna sled ne sme stikati sama nase. Obstajajo pa tudi vijačne variante potenciometrov, ki imajo večinoma deset obratov od ene do druge končne lege. S tem pokrijemo deset zasukov vendar pa moramo drsnik na koncu fizično omejiti. Pri planarnih potenciometrih pa srečamo variante z neomejenim in z omejenim zasukom. Ostale lastnosti so podobne lastnostim potenciometrov za merjenje linearnega pomika.

### 5.5.2 Kapacitivni merilniki zasuka

Spremembo kapacitivnosti zaradi zasuka lahko neposredno merimo preko spremembe efektivne površine kondenzatorjevih plošč, kot je prikazano na sliki 5.21. V realnih aplikacijah



Slika 5.21: Prikaz merjenja zasuka s pomočjo spremembe efektivne površine kondenzatorjevih plošč

pa se tak tip ne uporablja pogosto, bolj je poznan kot način uglaševanja nihajnih krogov. Za merjenje zasuka s kapacitivnim principom pogosteje uporabljamo inkrementalne merilnike.

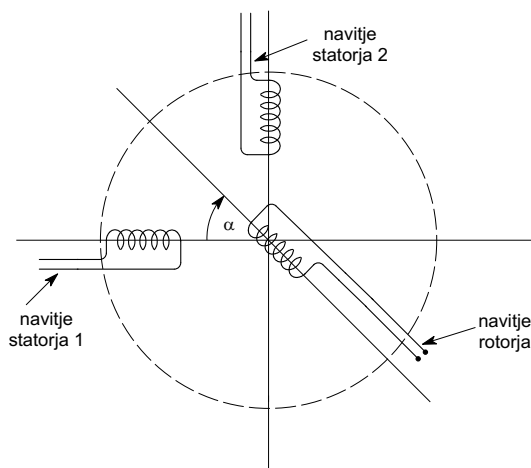


**Inkrementalni kapacitivni merilnik zasuka (ang. capacitive rotary encoder).** Merilnik je izveden tako kot varianta za linearni pomik, le da je stator v ravnini zavrt v krožnico, drsnik pa je prav tako prilagojen pomikanju v krogu in se vrti okoli centra, ki je v središču krožnice statorja. Vzorec na statorju je izveden tako, da je popolnoma simetričen po kotu s periodo, ki omogoča točno ponovitev po enem obhodu. Merilnik dosega zelo velike natančnosti in pokriva celotno območje kota brez omejitve na zasuku.

### 5.5.3 Induktivni merilniki zasuka

Najbolj raznoliki merilniki zasuka imajo induktivni značaj. Razvili so jih na osnovi izkušenj z električnimi motorji, njihova skupna lastnost pa je velika robustnost in dolga življenjska doba.

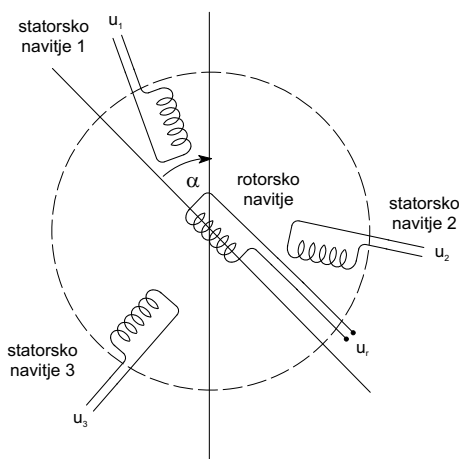
**Resolver (ang. resolver).** Zelo robusten merilnik za uporabo v najbolj neugodnih razmerah je resolver. Sestavljen je iz dveh statorskih navitij, ki sta med seboj premaknjeni za  $90^\circ$  in rotorskega navitja. Prikaz merilnika je prikazana na sliki 5.22. Območje merilnika zajema



Slika 5.22: Prikaz resolverja:  $\alpha$  – kot zasuka

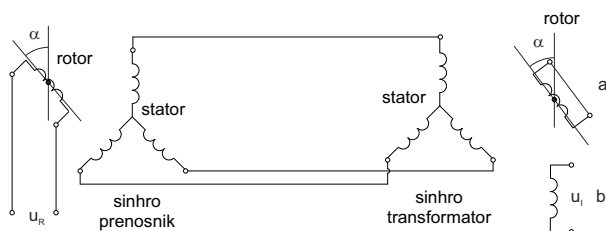
poln kot in nima omejitve na zasuku. Napajamo lahko obe navitji statorja in sicer s fazno zakasnenima sinusnima signaloma frekvence do 10 kHz, tako da njuna fazna zakasnitev ustreza fizičnemu zamiku obeh navitij. Na rotorju s tem dobimo signal, ki je kombinacija obeh signalov v odvisnosti od kota zasuka rotorja. Druga možnost je napajanje rotorja, na statorskih navitjih pa dobimo projekciji kota na pravokotni osi navitij. Pri tem vidimo, da merilnik lahko opravlja tudi vlogo transformatorja kartezičnih v polarne koordinate in obratno. Merilnik dosega zadovoljivo natančnost za večino aplikacij vodenja.

**Sinhrotransformator (ang. Synchrotransfomer, Synchro, Selsyn).** Sinhrotransformator je izvedba induktivnega merilnika kota s tremi statorskimi fazami. Po ustroju je to sinhronski izmenični motor, ki pa je narejen za majhne napetosti in tokove. Prikaz merilnika je na sliki 5.23. Pri sinhrotransformatorju napajamo rotorsko navitje s sinusnim signalom frekvenc do 10 kHz. Kot zasuka določamo iz amplitud sinusnih signalov na statorju merilnika. Računanje kota iz treh komponent je nekoliko zamudno, a ima merilnik zaradi postavitve



Slika 5.23: Prikaz sinhrotransformatorja:  $\alpha$  – kot zasuka,  $u_r$  – napajalna napetost,  $u_1$ ,  $u_2$  in  $u_3$  – izhodne napetosti na statorskih navitjih

statorskih navitij sposobnost, da z vezavo dveh sinhrotransformatorjev v par lahko prenesemo kot ali signal na daljavo. V resnici lahko sestavimo celo verigo sinhrotransformatorjev od katerih eden daje signal, ostali pa ga sprejemajo. Prikaz vezave sinhrotransformatorjev v par je na sliki 5.24. Danes sinhrotransformatorje redko srečamo, ker obstajajo novejšje metode

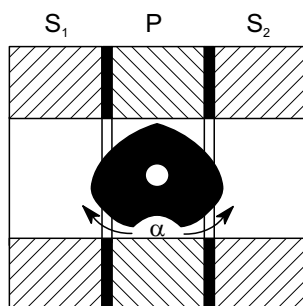


Slika 5.24: Prikaz vezave para sinhrotransformatorjev:  $u_R$  – napajalna napetost,  $u_I$  – izhodna napetost, a) rotor sinhrotransformatorja je kratko sklenjen in na daljavo prenašamo kot, b) rotor sinhrotransformatorja je fiksiran pri referenčnem kotu in napetost na rotorju daje informacijo o kotu

prenosov signala na daljavo.

**Diferencialni transformator (ang. rotary-variable differential transformer – RVDT).** Za merjenje kota lahko uporabimo tudi posebno verzijo diferencialnega transformatorja, ki ima posebno oblikovano jedro. Prikaz merilnika je na sliki 5.25. Merilnik ima območje meritve kota  $120^\circ$ , pri tem pa je natančnost razmeroma slaba.

**Diferencialni induktor (ang. rotary-variable differential inductor – RVDI).** Diferencialni induktor ravno tako obstaja v izvedbi za merjenje zasuka. Jedro je oblikovano podobno kot pri RVDT (glej sliko 5.25), lastnosti merilnika pa ravno tako.



Slika 5.25: Prikaz diferencialnega transformatorja za merjenje zasuka

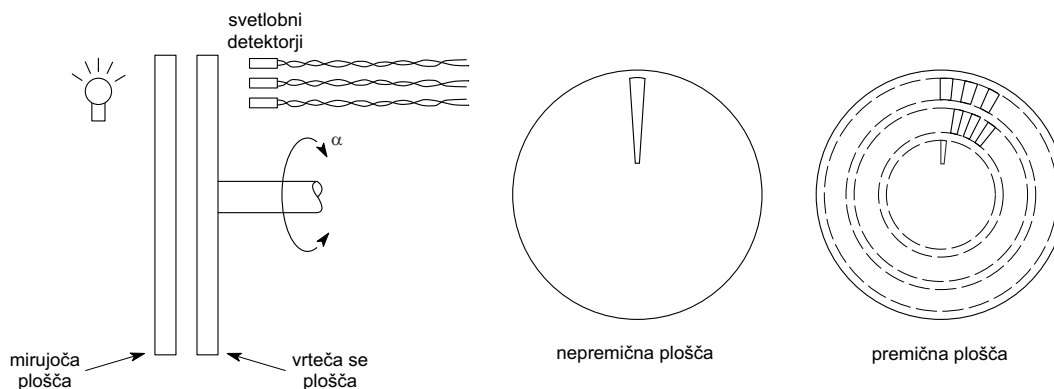
**Induktosin (ang. inductosyn)** Rotacijska verzija induktosina je izvedena tako, da se drsnik preoblikuje v rotor, ki je sestavljen iz dveh polovic, ki pa nista simetrični, da lahko dobimo smer zasuka. Stator induktosina pa je ukrivljen v rotor tako, da so poli obrnjeni proti rotorju, na notranji strani statorja. Merilnik ima dobro natančnost, nima omejitve na kotu zasuka in je zelo zanesljiv.

#### 5.5.4 Optični merilniki zasuka

Med vsemi merilniki zasuka so optični merilniki trenutno najbolj razširjeni. So enostavni za izdelavo, izhodni signal pa je lahko neposredno vezan na digitalne vhode mikrokontrolerov. V glavnem gre za različne vrste kodirnikov za katere se je tudi pri nas splošno uveljavil izraz enkoder.

**Optični kodirnik (ang. optical rotary encoder).** Najpogostejši merilnik zasuka je optični enkoder. Sestavljen je iz nepremične maske, ki ima drugo pod drugim izrezana okenca skozi katera sveti svetloba. Na drugi strani maske je vrtljiva okrogla plošča z okenci, ki kodirajo informacijo o zasuku. Nasproti svetlobnega vira so nameščeni svetlobni senzorji, ki detektirajo presvetlive in pošiljajo električni signal na izhod. Obstajata dve varianti optičnega kodirnika: inkrementalni in absolutni optični kodirnik.

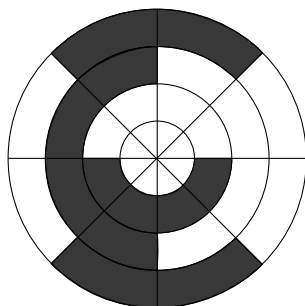
Inkrementalni optični kodirnik je prevladujoči tip kodirnika. Vrtljiva plošča je sestavljena iz dveh koncentričnih periodičnih vzorcev zarez, ki sta med seboj zamaknjena za četrto periodo vzorcev. Tretji koncentrični vzorec pa je sestavljen iz samo ene zareze, ki označuje en polni obrat plošče. Prikaz inkrementalnega optičnega kodirnika je na sliki 5.26. Ko se vrtljiva plošča zavrti, dobimo zaradi presvetlitev zarez dva pravokotna signala. Prvi signal označimo navadno s črko *A*, drugi signal pa s črko *B*. Signala sta med seboj zamaknjena za četrto periodo, zato lahko ugotovimo, v katero smer se plošča vrti. Gostota zarez na premični plošči določa ločljivost merilnika. Danes dobimo merilnike s premerom centimetra, ki imajo 20000 zarez ali več na en obrat in ločljivost nekaj kotnih sekund. Vendar merilnik ne more delovati kot merilnik kota, dokler signale ne pripeljemo do števca, ki iz dveh pulznih signalov določi smer in kot zasuka od kota pri priklopu napajalne napetosti. Inkrementalni optični merilnik navadno kombiniramo s končnim stikalom, da določimo začetni kot. Področje uporabe pa praktično ni omejeno in jih najdemo skoraj povsod, kjer potrebujemo zanesljivo, natančno in poceni meritev kota. Problematični so lahko v primerih, kjer se merjeni kot zelo hitro spreminja in števec ne more slediti pri tako visokih gostotah zarez. Dejansko



Slika 5.26: Prikaz inkrementalnega optičnega enkoderja

so zelo precizni inkrementalni enkoderji omejeni na hitrosti le nekaj 100 obr/min. Probleme lahko pričakujemo tudi v zelo prašnih okoljih, kjer bi prah lahko prodrl v ohišje in motil optične poti. V takem primeru lahko uporabimo elektromehanske ali magnetne izvedbe.

Absolutni optični enkoder je redkejši in tudi bolj kompliciran tako za izvedbo kot za uporabo. Vzorec na gibljivi plošči je odvisna od števila bitov, ki kodirajo kot. Pri absolutnem optičnem enkoderju kota zasuka ne določamo s štejem impulzov ampak bitna koda natančno določa kot zasuka. Za kodiranje kota uporabljamo Grayevo kodo, ki zagotavlja, da se ob prehodu med sosednjima kodama kotov spremeni le en bit, kar je ključnega pomena, da ne prihaja do napak v kodiranju. Detektorje je nemogoče postaviti točno v linijo, zato pri hkratni spremembi več bitov na izhodu ne dobimo prehoda teh bitov popolnoma istočasno ampak se vmes pojavijo še druge kode, ki pa so nesmiselne. Primer premične plošče absolutnega optičnega enkoderja je na sliki 5.27. Če primerjamo strojno opremo inkrementalnega



Slika 5.27: Premična plošča absolutnega optičnega enkoderja

optičnega enkoderja in absolutnega optičnega enkoderja s tri bitno kodo, vidimo, da sta primerljiva, nikakor pa ni primerljiva njuna ločljivost. Za primerljivo ločljivost potrebujemo pri absolutnih enkoderjih vsaj 22-bitno kodo, kar pomeni neprimerno bolj kompliciran sistem. Pri tem pa velja omeniti tudi to, da potrebujemo za prenos podatkov  $n + 1$  žic, kjer je  $n$  število bitov. Obstajajo tudi posebne izvedbe absolutnih enkoderjev, ki uporabljajo neke vrste črtno kodo in dosežejo ekvivalentno ločljivost kot 32-bitni klasični absolutni enkoder z Grayevo kodo. Najboljši absolutni enkoderji zmorejo natančnost v rangi kotne sekunde in in to pri nekaj 10000 obr/min.

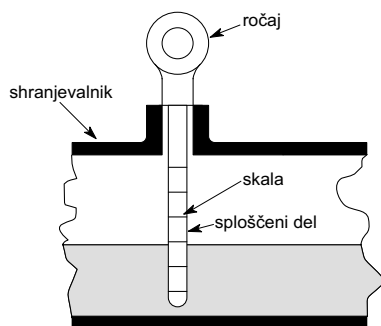
## 5.6 Merjenje nivoja kapljev in

Merjenje nivoja kapljev in je poseben primer uporabe merilnikov pomika in zasuka, podajamo pa ga v metrih in ostalih dolžinskih enotah. V nasprotju s pomikom in zasukom pa je točna meritev nivoja zelo problematična. Za merjenje nivoja moramo najprej dobro detektirati gladino, ki je meja med kapljevino in plinom nad njo. Izkaže se, da to ni najbolj enostavno. Vsaka kapljevina ima drugačni površinsko napetost, kar daje gladini specifične lastnosti. Shranjevalniki kapljev in, kjer navadno merimo nivoje imajo dotoke in odtokove, preko katerih kapljevina dotakamo in iztakamo, kar povzroča valovanje na gladini. Določeni procesi povzročajo penjenje kar močno otežuje detekcijo gladine, prav tako kot na površini plavajoči delci. Glede na različne lastnosti kapljev in in razmer v katerih moramo meriti nivoje obstaja zelo veliko različnih principov merjenja, nobeden pa ni univerzalen.

### 5.6.1 Neposredne meritve

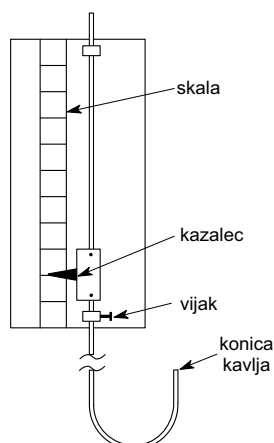
Najbolj preprosti merilniki izkoriščajo neposredne meritve nivoja. Pri neposrednih metodah gre za detekcijo nivoja s pomočjo potapljanja merilnika v kapljevino.

**Potopna palica (ang. dip stick, stick gauge).** Potopna palica je najenostavnejši merilnik nivoja. Sestavljen je iz palice, ki je merilna letev. Potopimo jo v shranjevalnik dokler ne dosežemo dna ali točke naslona, nato pa jo izvlečemo in odčitamo do kje je kapljevina omočila palico. Referenca merilnika je tako dno oz. naslon shranjevalnika. Električnega izhoda merilnik nima, zato je primeren le za občasno preverjanje nivoja, pa tudi natančnost je slaba (reda enega centimetra), ker je težko odčitati do kje je kapljevina palico omočila, še posebno pri brezbarvnih kapljev inah. Prikaz merilnika je na sliki 5.28.



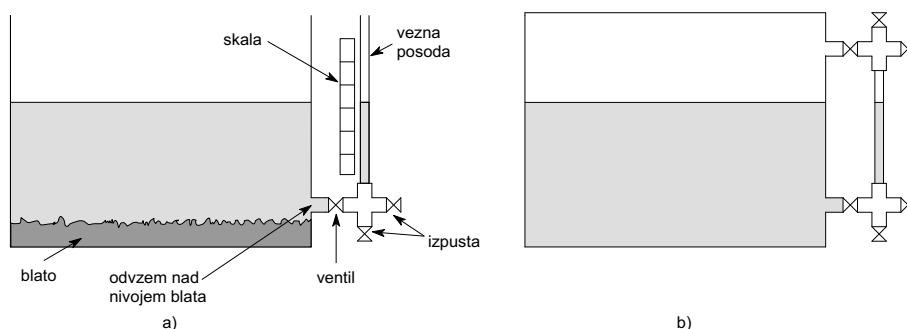
Slika 5.28: Prikaz potopne palice

**Kavljasti merilnik (ang. hook gauge).** Izboljšana verzija potopne palice je kavljasti merilnik. Sestavljen je iz palice, ki je na koncu zavita v kavelj. Konica kavelja je obarvana s kontrastno barvo. Kavelj je pritrjen na posodo tako, da ga lahko dvigamo in spuščamo, pritržitev pa hkrati predstavlja referenčno točko merilnika. Za izmero nivoja kavelj potopimo v tekočino in ga nato toliko časa dvigujemo dokler konica ne pride na površino, kar detektiramo z intenziteto kontrastne barve konice. Merilnik je možno avtomatizirati s kamero in sistemom za dvigovanje in spuščanje, a ni primeren za sprotne meritve pa tudi natančnost je reda nekaj milimetrov (slika 5.29).



Slika 5.29: Prikaz kavljastega merilnika

**Vezna posoda (ang. glass gauge).** Posebno v zaprtih neprosojnih shranjevalnikih imamo običajno kot sekundarni merilnik uporabljeno vezno posodo. Vezna posoda je steklena ali pleksi cev, ki je na shranjevalnik pritrjena preko enega ventila pri dnu shranjevalnika. Vezna posoda mora biti enako visoka kot shranjevalnik oz. vsaj toliko, da pokrije najvišje pričakovane nivoje in dovolj trdna, da zdrži tlake tekočine v shranjevalniku. Ventil preko katerega je povezana s shranjevalnikom pa ima varnostno funkcijo, kadar pride do poškodb na vezni posodi, da tekočina iz shranjevalnika ne odteče v okolico. Žal pa ventil lahko povzroči tudi probleme, ker ga lahko nekdo zapre, s tem pa se nivo v vezni posodi ne uravnoveša več z nivojem v shranjevalniku. Kadar je shranjevalnik pod tlakom moramo vezno posodo izvesti tako, da je v spodnji in zgornji točki povezana s shranjevalnikom, da se lahko izenači tudi tlak plina nad kapljevino. Prikaz vezne posode je na sliki 5.30. Električni si-



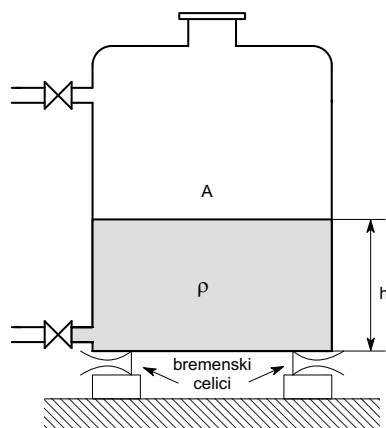
Slika 5.30: Normalno tlačna (a) in visokotlačna izvedba (b) vezne posode

gnal lahko dobimo s presvetlitvenimi senzorji, vendar je natančnost slaba, zato jo večinoma uporabljamo le za vizualno indikacijo nivoja.

## 5.6.2 Pretvorba v maso

Da se izognemo detekciji gladine tekočine, lahko merjenje nivoja prevedemo v merjenje mase, pri tem pa moramo upoštevati dimenzije in maso shranjevalnika in gostoto tekočine.

**Merilnik nivoja na osnovi sile teže (ang. load cell).** Merilnik nivoja na osnovi sile teže je izveden tako, da so merilniki sile nameščeni na vseh podpornih točkah shranjevalnika. Na tak način sproti zaznavajo vse spremembe sile teže, ki jo povzroča shranjevalnik in kapljevina. Prikaz merilnika je na sliki 5.31. Merilnik je možno uporabljati za razne namene,



Slika 5.31: Merilnik nivoja na osnovi sile teže:  $h$  – nivo kapljevine,  $A$  – presek shranjevalnika, ki ga zaponi kapljevina,  $\rho$  – gostota kapljevine

posebno tam, kjer merimo nivoje agresivnih ali zelo vročih tekočin kot so razne taline. Nivo izračunamo po enačbi:

$$h = \frac{m - m_s}{\rho A}, \quad (5.9)$$

kjer so  $h$  – nivo kapljevine,  $m$  – izmerjena masa,  $m_s$  – masa shranjevalnika,  $\rho$  – gostota kapljevine,  $A$  – efektivna površina posode. Če posoda nima konstantnega preseka pa moramo v enačbi upoštevati še spreminjanje preseka shranjevalnika z višino. Merilnik je zelo občutljiv na valovanje kapljevine v shranjevalniku posode in na vibracije podlage. V primeru, da poznamo lastnosti motenj, lahko le-te kompenziramo. Ne smemo pa zanemariti vpliva temperature na gostoto kapljevine, ker lahko zelo vpliva na vrednost izračunanega nivoja.

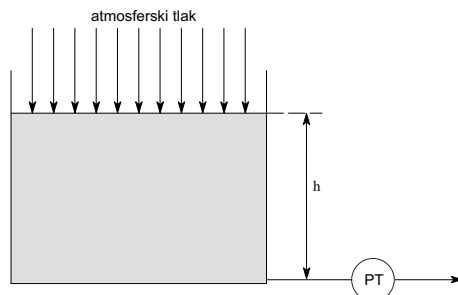
### 5.6.3 Pretvorba nivoja v tlak

Zelo pogosto uporabljamo pretvorbo nivoja v tlak. Ideja je podobna kot pretvorba v maso, le da v tem primeru masa posode in njena oblika ne vplivata na rezultat. Pretvorbo iz meritve tlaka  $p$  v vrednost nivoja  $h$  izvedemo po naslednji enačbi:

$$h = \frac{p}{\rho g}, \quad (5.10)$$

kjer je  $\rho$  gostota kapljevine in  $g$  težnostni pospešek. Za natančno meritev moramo upoštevati spremembe gostote zaradi sprememb temperature in lokalno vrednost težnostnega pospeška, kar pa je le redko smiselno, saj so motnje na meritvi tlaka, zaradi valovanja kapljevine precej večje kot pa napaka, ki jo napravimo z neupoštevanjem vpliva temperature in razlik v težnostnem pospešku.

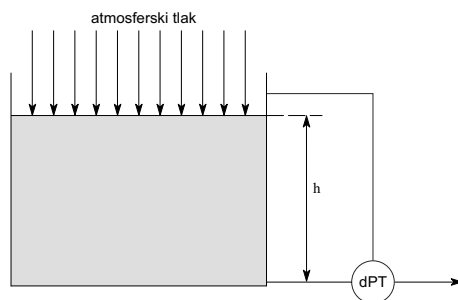
**Absolutni merilnik hidrostatskega tlaka (ang. absolute pressure gauge).** Za tekočine z visoko gostoto in visokimi nivoji uporabljamo absolutni merilnik hidrostatskega tlaka. Merilnik je nameščen čim bližje dnu shranjevalnika. Prikaz merilnika je na sliki 5.32. Največji



Slika 5.32: Merilnik nivoja na osnovi absolutnega tlaka:  $h$  – nivo kapljevine, PT – merilnik tlaka

vpliv na pogrešek merilnika ima sprememba tlaka nad gladino kapljevine. Nihanje zračnega tlaka zaradi vremenskih sprememb lahko precej vpliva na izhod merilnika nivoja, zato je merilnik primeren samo takrat, ko je nad gladino kapljevine stalen tlak, ali kadar je hidrostatski tlak tako velik, da je vpliv spremembe zračnega tlaka na izhod merilnika zanemarljiv.

**Diferencialni merilnik hidrostatskega tlaka (ang. differential pressure gauge).** Problem sprememb tlaka nad gladino kapljevine rešimo z diferencialnim merilnikom tlaka. Ta izvedba meri razliko tlakov na dnu in nad gladino kapljevine in s tem kompenzira vse spremembe tlaka nad gladino. Prikaz merilnika je na sliki 5.33. Merilnik je primeren za merjenje

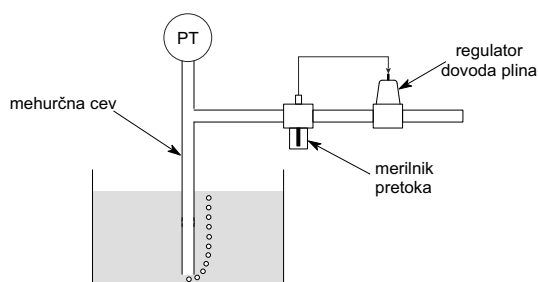


Slika 5.33: Merilnik nivoja na osnovi diferencialnega tlaka:  $h$  – nivo kapljevine, dPT – merilnik diferencialnega tlaka

tako visokih kot tudi nizkih nivojev in daje dobre rezultate, še posebno tam, kjer pene in podobne ovire onemogočajo dobro detekcijo gladine kapljevine. Tudi valovanje tekočine nima prevelikega vpliva na merilnik.

**Mehurčni merilnik (ang. bubbler).** Nekoliko poseben merilnik na osnovi absolutne meritve tlaka je mehurčni merilnik. Merilnik je sestavljen iz cevi, ki sega skoraj do dna shranjevalnika in dovaja zrak. Količino dovedenega zraka merimo in s tlakom uravnavamo tako, da iz cevke zelo počasi izhajajo mehurčki. Tako lahko sklepamo, da je tlak znotraj cevi približno enak tlaku na dnu shranjevalnika. Prikaz merilnika je na sliki 5.34. Merilnik je primeren





Slika 5.34: Mehurčni merilnik nivoja na osnovi absolutnega tlaka: PT – merilnik tlaka

za merjenje nivoja agresivnih kapljevine, kjer merilnik tlaka ne sme priti v neposredni stik s kapljevino. Sistem pa potrebuje stisnjen zrak ali kak drug plin, kar pa ni vedno enostavno dostopno.

#### 5.6.4 Vzgonske metode

Ker je detekcija gladine kapljevine problematična, jo poskušamo reševati tudi tako, da izkoristimo objekte z manjšo gostoto od kapljevine. Takšen objekt razmeroma dobro kaže kje se nahaja prehod med plinom in kapljevino, merimo pa lahko njegov pomik ali pa silo vzgona.

**Plovec (ang. float).** Plovci so zelo razširjena skupina cenениh merilnikov nivoja. Plovec plava na površini kapljevine in s tem kaže kje se nahaja gladina kapljevine. Pomik plovca navadno spremenimo v zasuk preko škripca ali pa s togo povezavo do točke rotacije. Pri prvem sistemu pretvorbe v zasuk je nivo  $h$  določen kot:

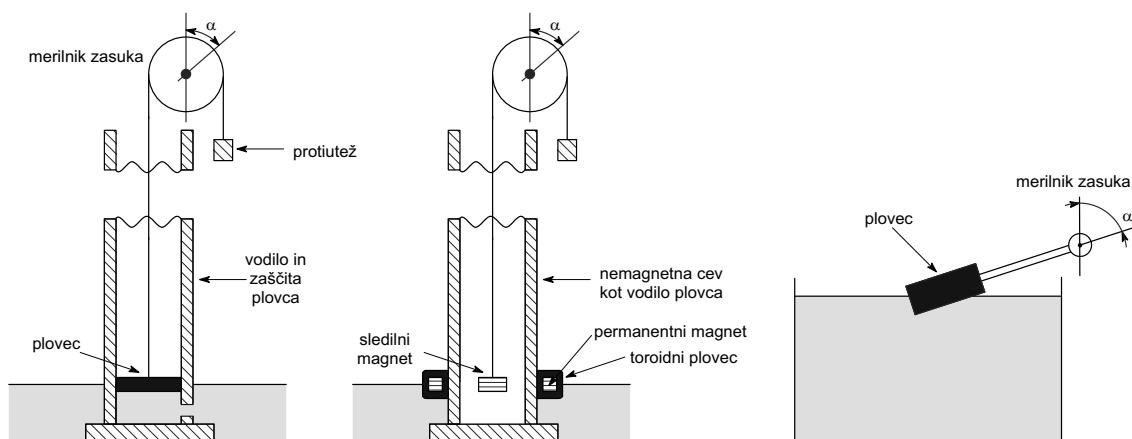
$$h = r \cdot \alpha, \quad (5.11)$$

kjer je  $r$  radij kolesa škripca in  $\alpha$  kot zasuka škripca, ki ima lahko poljubno vrednost in ga ne smemo preračunavati na območje  $[0, 2\pi]$ . Če plovec neposredno pritrdimo na točko vrtenja pa izračunamo nivo po enačbi:

$$h = r \sin(\alpha), \quad (5.12)$$

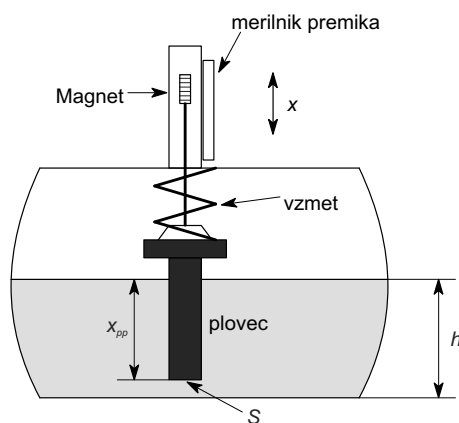
kjer je  $r$  razdalja med točko vrtenja in točko na plovcu, ki je ne glede na zasuk ves čas točno na gladini kapljevine. Prikaz merilnika je na sliki 5.35. Merilnik sicer dobro zaznava gladino kapljevine vendar je zelo občutljiv na valovanje, zato ga moramo zaščititi. Običajno zaščito naredimo tako, da ga zapremo v cev, ki ima blizu dna majhne odprtine, da se lahko napolni s kapljevino podobno kot vezna posoda, le da ga skupaj s cevjo postavimo v shranjevalnik. Majhne odprtine delujejo kot filtri, ki filtrirajo valovanje tekočine v shranjevalniku in umirijo nihanje plovca. Plovec mora biti narejen tako, da ga je približno 2/3 pod gladino kapljevine, zato da je njegova lega v kapljevini stabilna. To so običajni merilniki za merjenje nivoja goriva v vozilih in letalih. Njihova točnost je odvisna od spreminjanja gostote kapljevine, kvalitete uležajenja pretvornika in točnosti merilnika kota.

**Merilnik sile vzgona (ang. displacer).** Za merjenje sile vzgona uporabimo plovec iz materiala katerega gostota je veliko manjša od gostote merjene kapljevine. Plovec z vzmetjo potiskamo proti tekočini. Ko se tekočina dviguje vse večji del plovca ostaja pod gladino in



Slika 5.35: Plovec z dvema sistemoma merjenja pomika

sila vzgona se večja in stiska vzmet. Prikaz merilnika je na sliki 5.36. Plovec je pritrjen na



Slika 5.36: Merilnik nivoja na osnovi sile vzgona:  $x$  – pomik plovca,  $x_{pp}$  – globina ugreza plovca,  $h$  – nivo,  $S$  – ploščina preseka plovca

palico, katere pomik  $x$  je sorazmeren sili vzmeti  $F$  po Hookovem zakonu  $F = k \cdot x$ . Nivo kapljevine  $h$  pri obliki plovca s konstantnim presekom  $S$  v navpični smeri zato izračunamo kot:

$$\begin{aligned}
 V_{pp} &= S \cdot x_{pp} & (5.13) \\
 x &= h - x_{pp} \\
 F &= k(h - x_{pp}) \\
 F &= (\rho_k - \rho_p)g \cdot S \cdot x_{pp} - F_g \\
 h &= \frac{(\rho_k - \rho_p)g \cdot S \cdot x_{pp} - F_g}{k} + x_{pp},
 \end{aligned}$$

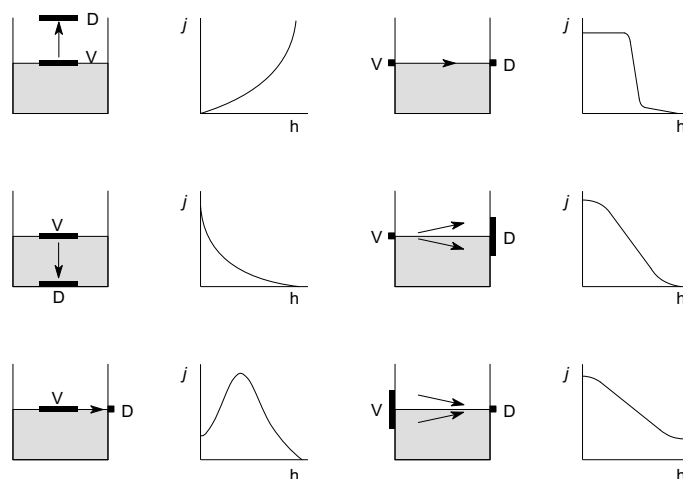
kjer so  $V_{pp}$  volumen plovca pod gladino kapljevine,  $x_{pp}$  globina ugreza plovca,  $k$  konstanta vzmeti,  $\rho_k$  gostota tekočine,  $\rho_p$  gostota plovca,  $F_g$  sila teže plovca in  $g$  težnostni pospešek. Zaradi sile vzmeti je merilnik manj občutljiv za valovanje tekočine vseeno pa ga je pametno

zaščititi pred vplivi valovanja, da signal ni preveč pošumljen. Točnost je še najbolj odvisna od spreminjanja gostote kapljevine, ostale veličine so manj problematične.

### 5.6.5 Radioaktivne metode

Nivo lahko merimo tudi z elektromagnetnim valovanjem visokih energij, kot so  $\gamma$  in rentgenski žarki. Če potrebujemo brezkontaktno meritve in če proces obsevanje s takimi energijami dopušča, je to zelo zanesljiva meritev nivoja.

**Radioaktivni merilnik nivoja (ang. gamma ray gauge).** Za detekcijo nivoja z radioaktivnim merilnikom potrebujemo izvor  $\gamma$  žarkov in detektor le-teh. Vsaka snov absorbira energijo, ki skozi njo prehaja, odvisno od svoje gostote, in s tem zmanjšuje gostoto energijskega toka. Prav tako gostota energije upada z oddaljenostjo od vira, odvisno od njegove oblike. Oba razloga za vpad energijske gostote valovanja lahko izkoristimo za delovanje merilnika. Pri nepremično nameščenih viru in detektorju izkoriščamo slabljenje energijske gostote v kapljevini, pri viru, ki ga namestimo na plovec pa izkoriščamo upad gostote energije z razdaljo. Prikaz več različnih variant merilnika je na sliki 5.37. Točnost merilnika je



Slika 5.37: Izvedbe radioaktivnih merilnikov nivoja: D – detektor, V – vir,  $j$  – energijska gostota sevanja na detektorju,  $h$  – nivo

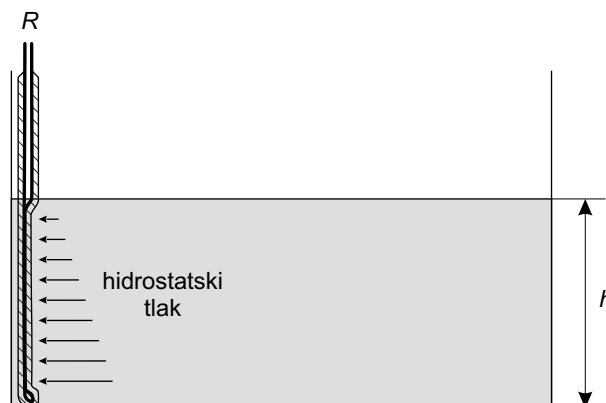
odvisna od slabljenja vira zaradi razpadanja radioaktivnega materiala in zaradi sprememb gostote merjene kapljevine.

### 5.6.6 Pretvorba nivoja v električne veličine

Pretvorba nivoja v električne veličine je ravno tako zelo učinkovita, predvsem zato, ker je električni signal na voljo brez dodatnih sekundarnih merilnikov. So pa tudi tovrstni merilniki podvrženi raznim pogreškom in zato niso nič bolj točni kot ostali principi.

**Uporovni merilnik nivoja (ang. resistive level probe)** Obstaja več variant uporovnih merilnikov. Eni uporabljajo elektrode s katerimi pošiljajo tok skozi tekočino in s tem merijo

upornost tekočine, ki je poleg ostalih faktorjev odvisna tudi od površine stika med elektrodami in kapljevino, kar je odvisno od nivoja kapljevine. Bolj pogosta izvedba pa uporablja uporovno žico, ki je popolnoma izolirana od tekočine. Uporovna žica je oblikovana v vzmetni trak v dveh vzporednih krakih tako, da teče prvi krak od vrha navzdol, na dnu shranjevalnika naredi zanko in se vrne kot drugi krak tik ob prvem nazaj. Ko kapljevina zalije merilnik, hidrostatski tlak potisne kraka drug proti drugem in ju sklene. Ker ima trak razmeroma veliko upornost, kratki stik med krakoma močno vpliva na skupno upornost s tem, da skrajša električno pot. Prikaz merilnika je na sliki 5.38. Merilnik ima podobno natančnost

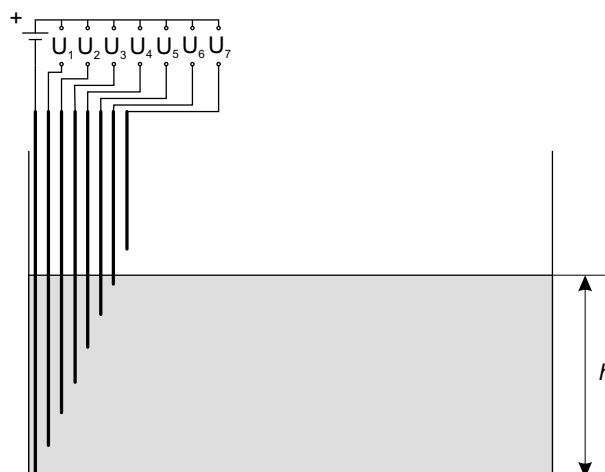


Slika 5.38: Uporovni merilnik nivoja:  $R$  – upornost merilnika,  $h$  – nivo kapljevine

kot tlačni merilniki nivoja, le da ima počasnejši odziv in zato dobro filtrira valovanje gladine.

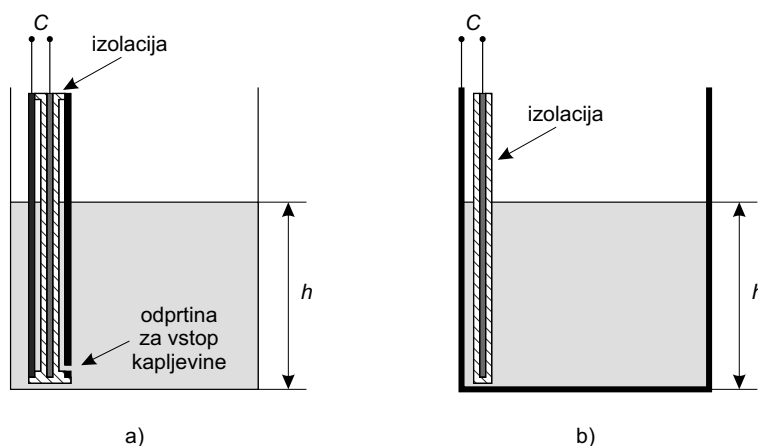
**Prevodnostni merilnik nivoja (ang. conductive level switch).** Prevodnostni merilnik nivoja izkorišča prevodnost tekočine za sklenitev kontaktov. Kontakti so izvedeni kot prevodne palice, ki gredo od vrha shranjevalnika proti dnu in so različno dolge. Ko kapljevina pride do posamezne palice s tem sklene kontakt in tako dobimo diskretno informacijo o nivoju. Prikaz merilnika je na sliki 5.39. Če hočemo uporabljati tovrstni merilnik, mora imeti kapljevina vsaj minimalno prevodnost. Visoka notranja upornost merilnika napetosti pa zagotavlja, da učinek elektrolize in nabiranja naslag na elektrodah ni prevelik. Najugodnejše je za napajanje merilnika uporabiti izmenično napetost, ker se s tem precej zmanjšajo vsi problemi zaradi toka v kapljevinah. Problem lahko predstavlja tudi pena, če se pojavlja na gladini kapljevine, saj lahko sklene kontakt še predno je nivo v resnici dosežen. Vse neskleknjene elektrode pa zaradi visoke notranje upornosti merilnika napetosti predstavljajo anteno za visokofrekvenčne elektromagnetne motnje, zato je potrebno uporabljati dovolj visoko napajalno napetost. Iz prikaza merilnika tudi vidimo, da gre za nezvezno meritev nivoja.

**Kapacitivni merilnik nivoja (ang. capacitance level sensor, RF gauge, admittance level sensor).** Kapacitivni merilniki nivoja so najpogostejši merilniki nivoja na osnovi električnih lastnosti kapljevine. Izrabljajo prevodnostne in dielektrične lastnosti kapljevine. Obstaja več izvedb merilnikov, ki se ločijo tako po fizični zgradbi kot po obdelavi signala. Nekateri so za prevodne medije, drugi za izolatorje, merimo pa lahko vplive nivoja na kapacitivnost merilnika ali na celotno impedanco. Vse variante pa imajo svoje prednosti in slabosti. Najbolj pogoste izvedbe uporabljajo meritev kapacitivnosti in so uporabne tako za prevodne kot za neprevodne medije, ker izkoriščajo vpliv dielektričnosti kapljevine na kapacitivnost



Slika 5.39: Prevodnostni merilnik nivoja:  $U_1$  do  $U_7$  – napetosti na elektrodah glede na referenčno elektrodo,  $h$  – nivo kapljevine

kondenzatorja. Dve izvedbi takšnega merilnika sta prikazani na sliki 5.40. Merilnik nivoja



Slika 5.40: Prerez dveh izvedb kapacitivnih merilnikov nivoja: a) merilnik za prevodne ali neprevodne kapljevine v neprevodnih shranjevalnikih, b) merilnik za prevodne ali neprevodne kapljevine v prevodnih shranjevalnikih,  $C$  – kapacitivnost merilnika,  $h$  – nivo kapljevine

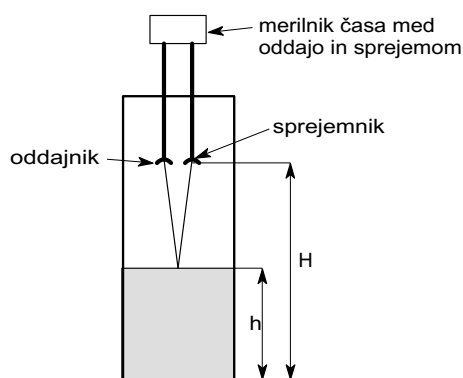
za uporabo v neprevodnih shranjevalnikih ima obe plošči kondenzatorja izvedeni v kompaktni izvedbi kot dva koncentrična valja, od katerih je srednji obdan z izolacijo, tako da je edina lastnost kapljevine, ki vpliva na kapacitivnost merilnika njena dielektričnost. Ker je najmočnejše polje med koncentričnima valjema, ima zunanji valj odprtino preko katere kapljevina lahko zapolni notranjost in s tem dosežemo večjo spremembo kapacitivnosti, kot bi jo lahko, če bi kapljevina oblivala merilnik samo iz zunanje strani, kjer električnega polja skoraj ni. Bistveno bolj enostaven pa je merilnik za uporabo v prevodnih shranjevalnikih. Sestavljen je iz izolirane prevodne palice, ki predstavlja eno ploščo kondenzatorja, druga plošča pa je kar posoda.

Kapacitivni merilniki nivoja spadajo med preciznejše merilnike, vendar imajo probleme

s penami in hlapi nad kapljevino, če je njihova dielektričnost dovolj velika. Na delovanje vpliva tudi spreminjanje dielektričnosti kapljevine in naslage, če se naberejo na stene merilnika. Paziti moramo tudi na visokofrekvenčne elektromagnetne motnje, ker je merilnik dobra antena. Merjenje kapacitivnosti pa izvajamo lahko z vezavo v mostič ali z merjenjem resonančne frekvence merilnika in ostalega dela merilnega vezja.

**Induktivni merilnik nivoja (ang. inductive level sensor).** Induktivni merilnik nivoja lahko deluje na dva načina. Kot detektor števila navojev tuljave, kjer imamo opravka s prevodno kapljevino, ki zalije merilno tuljavo, kar pa je težko izvesti, ker mora biti žica tuljave neizolirana s tem pa tvegamo, da bo prišla sama s seboj v stik in pokvarila meritev. Bolj uporabna je varianta kjer kapljevina prevzame vlogo jedra tuljave, res pa je, da ni veliko kapljev, ki imajo dovolj veliko permeabilnost, da bi opazno vplivale na induktivnost tuljave. Obstajajo v glavnem specialne izvedbe merilnikov, ki jih uporabljamo na področju jeklarstva, uporabljamo pa jih za merjenje nivoja staljenega železa v talini. Za meritve uporabljamo tuljavo elektroindukcijske peči. Merilnik lahko zaznava nivo staljenega feromagnetnega materiala, medtem ko neferomagnetne primesi, ki imajo navadno manjšo gostoto in se nabirajo na gladini, ne vplivajo na meritev. Čeprav imajo staljeni materiali močno spremenjene magnetne lastnosti glede na trdno stanje, pa neka merljiva razlika med feromagnetnimi in neferomagnetnimi materiali še vedno ostaja.

**Radiolokacijski merilnik nivoja (ang. radar level transmitter).** Radiolokacijski merilnik uporablja mikrovalove za določanje nivoja kapljev. Nad gladino kapljevine je nameščena antena oddajnika, ki odda elektromagnetni pulz s frekvencami v področju mikrovalov, sprejemna antena pa po odboju ta signal sprejme. Prikaz merilnika je na sliki 5.41. Dobra lastnost



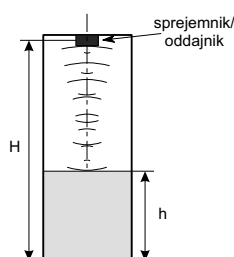
Slika 5.41: Radiolokacijski merilnik nivoja:  $h$  – nivo kapljevine,  $H$  – pozicija oddajnika/sprejemnika

radiolokacijskega merilnika je, da ga pena in hlapi na motijo, ker so za elektromagnetno valovanje uporabljenih frekvenc nevidni. Problem pa predstavlja zelo precizen merilnik časa v področju nanosekund, da lahko zanesljivo izmerimo razmeroma kratke razdalje pri svetlobni hitrosti razširjanja valovanja.

### 5.6.7 Vpliv nivoja na prevajanje zvoka

Tako kot za merjenje oddaljenosti, lahko uporabimo zvočne metode tudi za merjenje nivoja. V glavnem uporabljamo merilnike na osnovi časa prehoda zvočnega signala, redkeje pa merilnike na osnovi različnih hitrosti prevajanja zvoka po različnih medijih.

**Ultrazvočni merilnik nivoja (ang. ultrasonic level transmitter).** Najprimernejše frekvenčno območje zvoka je ultrazvok, ker ima pri visoki frekvenci tudi kratko valovno dolžino in zato tudi visoko ločljivost. Najpogosteje uporabljamo merilnik na osnovi odboja. Pravo-kotno nad gladino kapljevine namestimo oddajnik in sprejemnik, ki sta velikokrat fizično isti piezoelektrični kristal. Kadar deluje kot oddajnik, ga z električnim signalom vzbudimo v vibracije, kadar deluje kot sprejemnik pa na njem merimo napetost kot posledico deformacij zaradi zvoka. Za preklon med oddajo in sprejemom imamo dovolj časa, saj potrebujemo običajno okoli 10 cm mrtve cone merilnika, da odboji zvoka po ohišju ne morejo motiti sprejema pravih signalov. To pri hitrosti zvoka 343 m/s znese približno 0.3 ms od konca oddaje do začetka sprejema. Preklop iz sprejema v oddajo pa navadno ni kritičen. Prikaz postavitve merilnika je na sliki 5.42. Ultrazvočni merilnik se ne obnese najbolje pri kaplje-



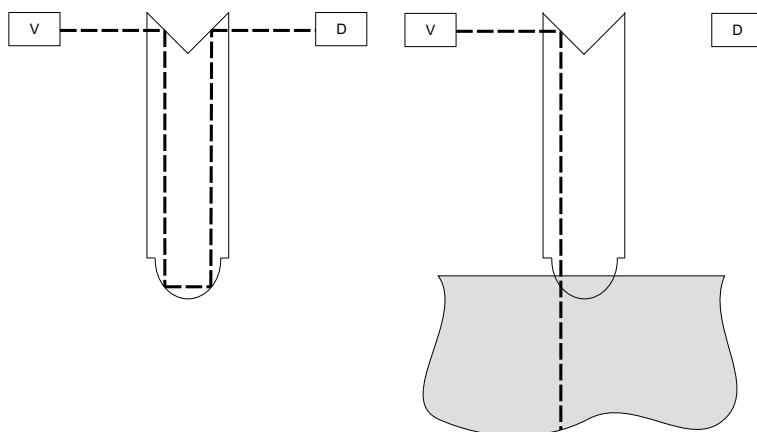
Slika 5.42: Ultrazvočni merilnik nivoja:  $h$  – nivo kapljevine,  $H$  – pozicija oddajnika/sprejemnika

vinah, ki tvorijo peno ali hlape, ker to lahko spremeni odbojne lastnosti ali celo tako močno absorbira zvočno energijo, da ne dobimo dovolj odboja, da bi ga lahko zaznali. Merilnik je razmeroma občutljiv na valovanje površine, ker razprši zvočni signal, prav tako pa moramo paziti, kakšna je notranjost shranjevalnika, da ne dobimo preveč nezaželenih odbojev, ki motijo meritev. Ob inicializaciji merilnika imajo boljši merilniki možnost identifikacije nezaželenih odbojev zaradi zgradbe shranjevalnika, ki jih potem med delovanjem izločajo na osnovi časa prihoda odbitega signala, vendar morajo biti dovolj specifični, da jih lahko ločimo od koristnega signala.

### 5.6.8 Optične metode

Optične metode so razmeroma slabo zastopane v meritvah nivoja. Ker površina kapljev in nikoli ne miruje popolnoma so odboji svetlobe lahko zelo nepredvidljivi, zato obstaja samo en merilnik na tem principu.

**Optični merilnik nivoja (ang. electro-optic level switch).** Optični merilnik nivoja je sestavljen iz prosojne sonde, ki mora biti narejena tako, da lomni količnik napram zraku odbije žarek nazaj v notranjost sonde, medtem ko napram vodi dovoli žarku prehod skozi steno.



Slika 5.43: Optični merilnik nivoja: V – vir svetlobe, D – detektor svetlobe

Prikaz delovanja merilnika je na sliki 5.43. Merilnik zato deluje binarno in je uporaben le kot detektor izbranega nivoja tekočine. Merilnik je razmeroma robusten, pri merjenju nizkih nivojev postane opazna histereza zaradi površinske napetosti tekočine, ob neugodnih razmerah pa lahko kapljica kapljevine ostane na merilniku, kar merilnik detektira kot nivo kapljevine.

## 5.7 Merjenje nivoja sipkih materialov

Merjenje nivoja sipkih materialov je prav tako problematično kot merjenje nivoja kapljev. Resda nimamo opravka s penjenjem ali valovanjem površine in je meja med materialom in plinom nad njim bolj ostra kot pri kapljevini. Vendar pa sipki materiali ne ustvarijo ravne gladine, ampak se navadno nasujejo v enega ali več kupov. Definicija nivoja je torej v tem primeru še težja. Izbira merilnikov je manjša kot pri merjenju nivoja kapljev, pa še ti so zgolj detektorji nivoja in ne zvezni merilniki, razen v primeru uporabe radioaktivnih metod, ki jih je možno uporabiti pri merjenju nivoja nekaterih materialov.

**Vibracijska sonda (ang. vibrating point gauge).** Vibracijska sonda je piezoelektrični kristal, ki ga električno vzbujamo v ultrazvočnem področju. Sonda je montirna na kabel in jo lahko spuščamo ali dvigamo. Ko sonda zadane ob nasuti material in se vanj rahlo zarije, se skočno spremeni amplituda vibracij, kar detektiramo kot dotik z materialom. Nameščena je na poziciji, ki najbolje označuje nivo snovi.

**Rotacijski merilnik nivoja (ang. rotating paddle sensor)-** Rotacijski merilnik je mešalo, ki se razmeroma počasi vrti. Nameščen je na kablu, ki ga lahko spuščamo, pri tem pa merimo dolžino spuščene kablo. Ko se mešalo dotakne nasutega materiala naraste tok motorja ali pa upadejo obrati, kar označimo kot dotik z nivojem nasutega materiala.

**Merilne vilice (ang. tuning-fork transmitter)** Merilne vilice so montirane po steni zalogovnika na točkah, ki so pomembne za delovanje procesa. Običajno označujejo minimalne

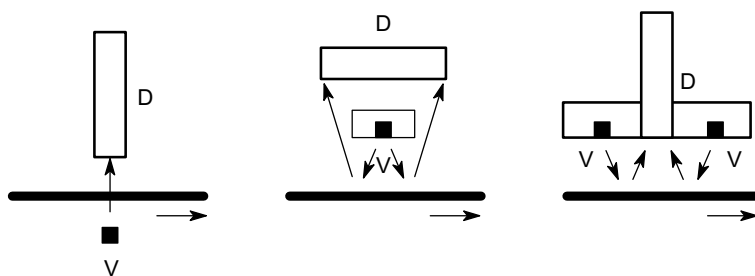


in maksimalne nivoje. Vilice vzbujamo s piezoelektričnim kristalom, da nihajo z zvočno frekvenco. Amplituda nihanja pa je različna za zasute in proste vilice, zato lahko na osnovi le-te določamo ali je nivo materiala dosegel merilne vilice.

## 5.8 Merjenje debeline

Tudi merjenje debeline je poseben primer merjenja razdalje, ki ga lahko izvedemo z merilniki pomika ali pa s specializiranimi merilniki. Kot sprotna meritev je pomembna v kontroli kvalitete izdelkov.

**Radioaktivni merilnik debeline (ang. x-ray/beta/gamma backscatter sensor).** Edini merilnik, ki res meri debelino materiala je radioaktivni merilnik. Merilnik izkorišča slabljenje žarkov visoke energije v materiji ali pa njihov odboj. Meritev je v resnici odvisna od gostote in debeline materiala, zato moramo paziti, da je gostota merjenega materiala dobro poznana, če potrebujemo točno meritev. Prikaz različnih izvedb merilnika je na sliki 5.44. Uporaba



Slika 5.44: Izvedbe radioaktivnih merilnikov debeline: V – vir sevanja, D – detektor sevanja

merilnika pa je omejena na objekte, ki tako visoke energije lahko brez škode prenesejo, sicer moramo uporabiti drugačno metodo.

**Pretvorba v pomik** Zelo enostavna je pretvorba debeline v merjenje pomika. Merjeni objekti morajo biti postavljeni na ravni podlagi, ki je izhodišče za meritev, nato pa izmerimo razliko med površino objekta in podlago. Merjenje lahko izvajamo tudi na tekočem traku, če je merilnik pomika povezan na kolo ali podobno pripravo, ki najprej drsi po podlagi, nato pa se povzpne na objekt, ko le-ta pride mimo. Razlika obeh vrednosti je debelina materiala. Če deluje merilnik pomika brezkontaktno, pa mehanskega sistema prenosa ne potrebujemo (optične, elektromagnetne ali ultrazvočne meritve).

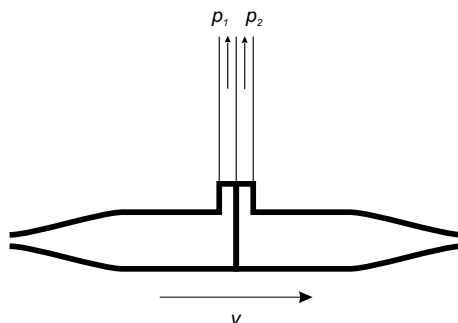
## 5.9 Merjenje linearne hitrosti

Linearna hitrost je definirana kot linearni pomik v časovni enoti. Merimo jo v metrih na sekundo (m/s) ali podobnih enotah. Za merjenje linearne hitrosti nimamo velike izbire merilnikov. Več ali manj imamo na voljo samo pet možnosti. Uporabimo lahko merilnik pospeška in diferenciramo izhodni signal, kar pa je neugodno, ker s tem ojačujemo visokofrekvenčni šum. Druga možnost je integracija izhodnega signala merilnika pomika ali oddaljenosti, kar pa je podvrženo lezenju zaradi ojačevanja nizkih frekvenc. Tretja in tudi najpogostejša

možnost je pretvorba linearnega gibanja v vrtenje, kar lahko izvedemo z zobniki ali navadnimi kolesi. Tu moramo paziti, da imajo kolesa konstanten radij, sicer je pretvorba nenačnančna. Nato pa uporabo merilnik rotacijske hitrosti, kjer je izbira pestrejša. Četrta možnost je merjenje pretoka zraka zaradi gibanja, kar storimo s Pitotovo cevjo. Zadnja možnost pa zahteva merilnik, ki je nepremično postavljen in meri gibanje objektov z Dopplerjevim principom. Meritev nizkih hitrosti je zelo nenatančna zaradi neugodnega razmerja med signalom in šumom meritve.

**Globalni pozicijski sistem (ang. global positioning system – GPS).** Pogosto uporabljamo za določanje hitrosti kar integracijo podatkov pozicije, ki jih dobimo iz merilnika GPS. Zaradi narave merilnika lahko prihaja do skokov in upadov trenutne hitrosti, povprečno hitrost pa lahko zelo dobro ocenimo. Problem je računanje nizkih hitrosti, kjer postane šum merilnika večji od signala hitrosti. Vsekakor pa je to dovolj zanesljiv merilnik tudi za uporabo v zanesljivostno kritičnih aplikacijah.

**Pitotova cev (ang. Pitot tube).** Za merjenje hitrosti letal še vedno uporabljamo Pitotovo cev. Sestavljena je iz dveh delov, od katerih je eden obrnjen v smer gibanja, drugi pa v nasprotno smer. Izhod obeh delov cevi je vezan na diferencialni merilnik tlaka tako, da izmerimo razliko med dinamičnim tlakom v cevi, ki je obrnjena v smer gibanja, in statičnim ali zastojnim tlakom v cevi, ki je obrnjena v nasprotno smer. Prikaz merilnika je na sliki 5.45. Za izračun hitrosti iz razlike tlakov uporabimo Bernoullijevo enačbo in dobimo:



Slika 5.45: Pitotova cev:  $p_1$  – zastojni ali statični tlak,  $p_2$  – dinamični tlak,  $v$  – hitrost gibanja

$$v = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \quad (5.14)$$

Vidimo, da je rezultat odvisen od gostote tekočine skozi katero se gibljemo. Pri uporabi v letalstvu pa je pomembno tudi to, da merilnik daje informacijo o hitrosti napram zraku, kar pomeni, da imamo med letenjem v vetru napačen podatek o hitrosti glede na zemljo. Merilnik daje slabe meritve pri nizkih hitrostih, pri visokih hitrostih pa je dokaj zanesljiv, če pazimo, da ni izpostavljen vrtincem.

**Dopplerjev merilnik hitrosti (ang. Doppler velocity sensor).** Za merjenje hitrosti s stališča opazovalca uporabljamo Dopplerjev merilnik hitrosti. Merilnik je sestavljen iz oddajnika in sprejemnika, deluje pa lahko na treh različnih principih: odboju radarskih valov, odboju

svetlobe in odboju zvočnih valov. Vse tri variante imajo podobne značilnosti in se ločijo le v podrobnostih, ki določajo pogoje uporabe. Ultrazvočni merilniki so slabši pri merjenju na odprtih prostorih, ker na rezultat lahko vpliva tudi veter in turbulence v zraku, medtem ko sta ostala dva manj občutljiva. Problem za dobro meritev predstavlja odbojna površina objekta katerega hitrost merimo. Odboj, ki zelo razprši merilni žarek lahko precej pokvari točnost meritve. Pomembno je tudi to, da je merilnik nepremičen, sicer moramo meriti tudi njegovo hitrost in jo nato kompenzirati. Iz razlik v frekvenci oddanega ( $f_0$ ) in sprejetega ( $f$ ) valovanja določimo hitrost gibanja predmeta  $v$  kot:

$$v = c \cdot \frac{f - f_0}{f_0}, \quad (5.15)$$

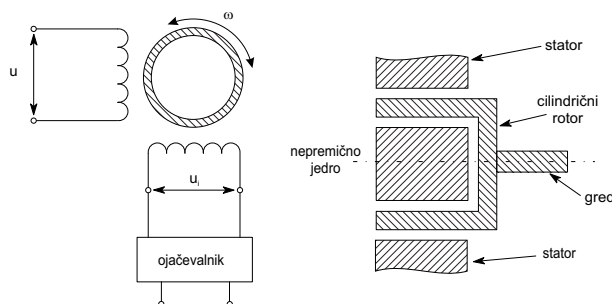
kjer je  $c$  hitrost razširjanja valovanja v prostoru. Tak princip merjenja hitrosti lahko uporabljamo tudi za spremljanje hitrosti zelo oddaljenih nebesnih teles.

## 5.10 Merjenje hitrosti vrtenja

Merjenje kotne hitrosti je najbolj razširjen način merjenja hitrosti in ga uporabljamo celo za merjenje linearne hitrosti po pretvorbi v vrtenje. Kotno hitrost merimo v obratih na sekundo (obr/s), obratih na minuto (obr/min) ali radianih na sekundo (rad/s), večinoma pa uporabljamo prvi dve enoti, kadar gre za vrtenje in zadnjo enoto, kadar gre za manjše zasuke. Obstaja kar nekaj principov merjenja, najbolj pogosti pa so elektromagnetni in optični. Danes prevladujejo frekvenčne metode merjenja hitrosti, kjer štejemo število pulzov na časovno enoto. Frekvenčne metode prevladujejo zaradi prikladnosti izvedbe z mikroprocesorjem, potrebujemo pa merilnike s pulznim izhodom. Tako kot vsaka meritev hitrosti je tudi meritev kotne hitrosti problematična s stališča točnosti pri majhnih hitrostih, kjer je razmerje signal/šum neugodno.

**Enosmerni tahogenerator (ang. DC tacho generator).** Klasični merilnik hitrosti je enosmerni tahogenerator. Po zasnovi je to enosmerni motorček s permanentnimi magneti na statorju in z več navitji na rotorju. Ko os motorja zavrtimo se v rotorskih navitjih inducira napetost sorazmerna hitrosti vrtenja. Ker je relacija med inducirano napetostjo na odprtih sponkah in hitrostjo gibanja prevodnika skozi magnetno polje linearna, je tudi izhod merilnika linearno odvisen od hitrosti vrtenja rotorja. Poskrbeti pa moramo, da skozi rotor ne tečejo tokovi večji od  $\mu\text{A}$ . Smer vrtenja določa predznak merjene napetosti. Problematičen del merilnika je komutator, ki signal iz rotorja prenese do izhoda merilnika. Ker imamo na komutatorju drsni stik, ki se obrablja, je to glavni vir šuma in napak na merilniku. Območje merilnika gre do nekaj 1000 obr/min s solidno natančnostjo, problematičen pa je razmeroma velik vztrajnostni moment rotorja, zato merilnik ni primeren za merjenje rotacije v sistemih, kjer se hitrost hitro spreminja, navori na osi pa so majhni. Na izhodnih sponkah dobimo dovolj visoke vrednosti enosmerne napetosti, tako da posebni ojačevalniki niso potrebni.

**Izmenični tahogenerator (ang. AC tacho generator).** Izmenični tahogenerator je dvofazni izmenični motor, ki ima napajalno in merilno navitje na statorju, rotor pa je kratkostična kletka oblikovana v tanek in lahek bakren ali aluminijast cilinder. Prikaz merilnika je na sliki 5.46. Zaradi vrtenja rotorja v magnetnem polju se v rotorju inducirajo vrtnični tokovi,



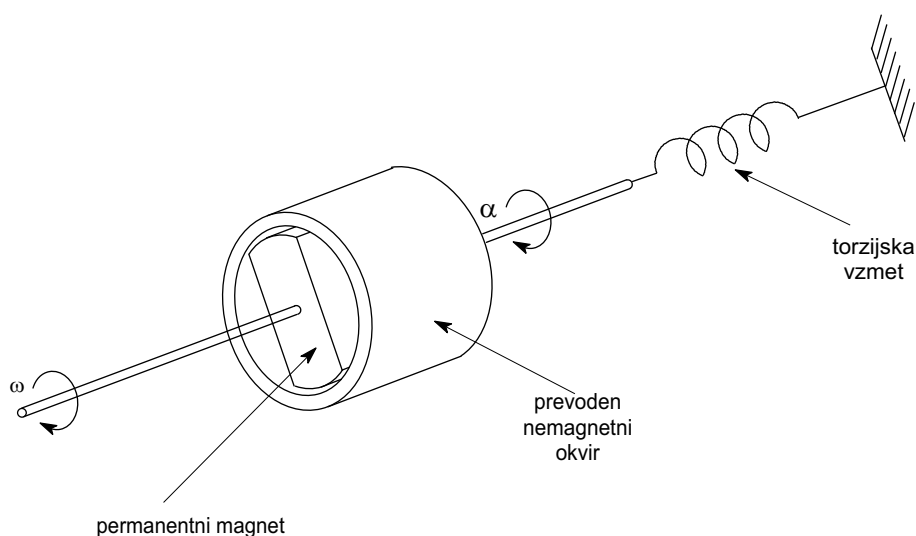
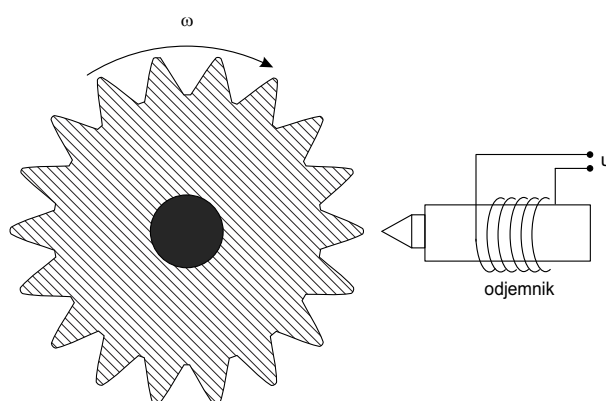
Slika 5.46: Izmenični tahogenerator:  $u$  – vzbujačna izmenična napetost,  $u_i$  – izhodna izmenična napetost,  $\omega$  – kotna hitrost rotorja

ki v merilnem navitju inducirajo nizko izmenično napetost. Pri vzbujačni napetosti moramo paziti, da ne pride do prevelikih tokov, sicer bi vzbujačna napetost na vrteči rotor prenašala preveliko moč in rotor bi lahko vplival na hitrost vrtenja. Hitrost vrtenja rotorja vpliva tako na amplitudo inducirane napetosti v merilnem navitju kot tudi na fazo, zato lahko merimo eno ali drugo veličino. Predznak faze glede na signal vzbujačnega navitja daje podatek o smeri vrtenja. Merilnik je robusten in ne zahteva veliko vzdrževanja, problematično je le razmerje signal šum, ker ima nizek nivo izhodnega signala in ga je potrebno zato filtrirati in ojačiti. Za potrebe vodenja pa potrebujemo še predhodno usmerjanje signala.

**Izmenični alternator (ang. single-phase AC tacho generator).** Izmenični alternator je sestavljen iz navitja na statorju in permanentnega magneta na rotorju. Z vrtenjem rotorja ustvarjamo v navitju spremenljivo magnetno polje in induciramo sinusno izmenično napetost. Inducirana napetost je odvisna od hitrosti vrtenja, smeri pa s tem merilnikom ne moremo določiti.

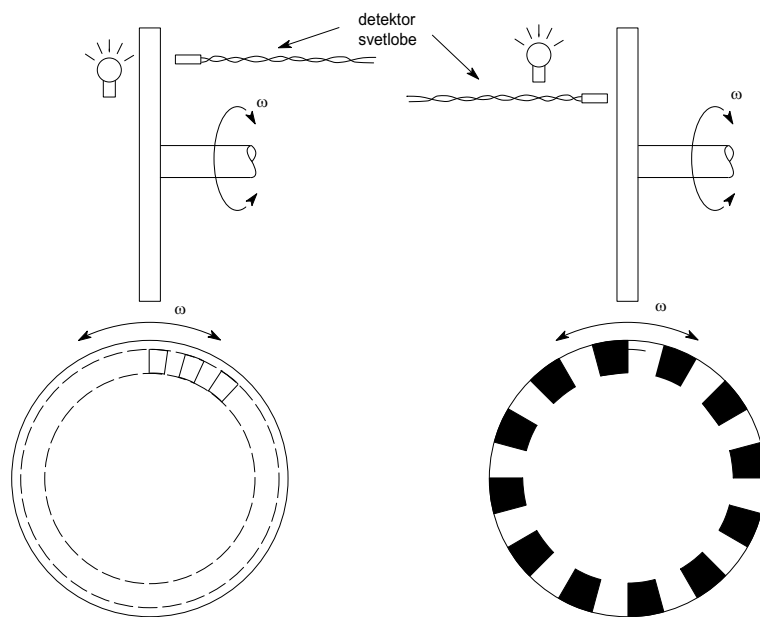
**Tahometrski generator (ang. mechanical tachometer).** Tahometrski generator je že nekoliko zastarel merilnik, ki v osnovi nima električnega izhoda, hitrost vrtenja pa pretvarja v navor, ki ga kompenziramo s torzijsko vzmetjo, zasuk okvirja nosi informacijo o hitrosti. Prikaz merilnika je na sliki 5.47. Če vzmet merilnika zamenjamo z elektromagnetom in s tokom kompenziramo navor, lahko dobimo tokovni električni izhod. Ker pa so danes bolj uporabne meritve kotne hitrosti, ki dajejo pulzni signal, je takšna varianta merilnika bolj izjemna kot pravilo. Poleg tega je tak merilnik zelo zapleten, ker mora imeti sistem za pozicioniranje okvirja merilnika, kar pa je razmeroma drago.

**Merilnik s spremenljivim magnetnim pretokom (ang. inductive rotational-speed sensor)**  
Zelo uporaben merilnik kotne hitrosti je merilnik s spremenljivim magnetnim pretokom. Sestavljen je iz zobnika iz feromagnetnega ali prevodnega materiala in odjemnika, ki je lahko induktivni merilnik bližine. Vrtenje zobnika ustvarja različno magnetno permeabilnost v osi odjemnika, kar odjemnik detektira kot vstop in izstop objekta iz polja njegove zaznave. Iz frekvence pulzov določimo hitrost vrtenja. Prikaz merilnika je na sliki 5.48. Obstaja tudi druga izvedba merilnika, kjer imamo rotirajoči del merilnika narejen iz neprevodnega kolesa z vdelanimi prevodnimi ali magnetnimi vložki v periodičnem vzorcu na obodu kolesa. Merilnik je uporaben tudi zato, ker za rotirajoči del lahko uporabimo že obstoječi zobnik v na-

Slika 5.47: Tahometerski generator:  $\omega$  – kotna hitrost,  $\alpha$  – zasuk okvirjaSlika 5.48: Merilnik s spremenljivim magnetnim pretokom:  $\omega$  – kotna hitrost,  $u_i$  – izhodna napetost

pravi, kjer merimo kotno hitrost. Merilnik je zelo zanesljiv, paziti pa moramo, da so dimenzije odjemnika usklajene z velikostjo zob zobnika, da res zaznavamo prisotnost samo enega zoba, sicer lahko dobimo popačeno informacijo o kotni hitrosti. Če hočemo zaznati smer vrtenja, moramo uporabiti dva odjemnika, ki sta med seboj zasukana za poljubno večkratnik periode zob zobnika in še za dodatno četrtno periode, da dobimo ustrezno zakasnjena signala na izhodu odjemnikov. Merilnik dobro deluje tudi pri nižjih hitrostih vrtenja, medtem ko so višje hitrosti vrtenja problematične zaradi zelo visoke frekvence števnih pulzov, ki je nekajkrat večja od frekvence vrtenja.

**Optični merilnik (ang. optical rotational-speed sensor).** Najpogostejši senzor kotne hitrosti je optični merilnik. Njegova zgradba je popolnoma enaka ploščnemu kodirniku, le da ima samo eno sled. Obstajata varianti z odbojno in presvetlitveno tehniko, ki sta prikazani na sliki 5.49. Merilnik najdemo v tiskalnikih, računalniških miškah in podobnih sistemih. Občutljiv je na prah, sicer pa je zelo robusten in zanesljiv. Ker ima pulzni izhod, ga lahko



Slika 5.49: Optični merilnik kotne hitrosti: levo s presvetlitveno tehniko in desno z odbojno tehniko,  $\omega$  – kotna hitrost

priključimo neposredno na mikrokrmilnike, ne moremo pa detektirati smeri vrtenja. Če imamo na napravi že ploščni kodirnik, lahko za merjenje hitrosti povsem enakovredno uporabimo kar enega od njegovih izhodov. Res pa je, da je gostota zarez na merilniku hitrosti navadno nižja, da lahko merimo do višjih hitrosti vrtenja. Merilnik ima zadovoljivo točnost tudi pri nižjih hitrostih vrtenja.

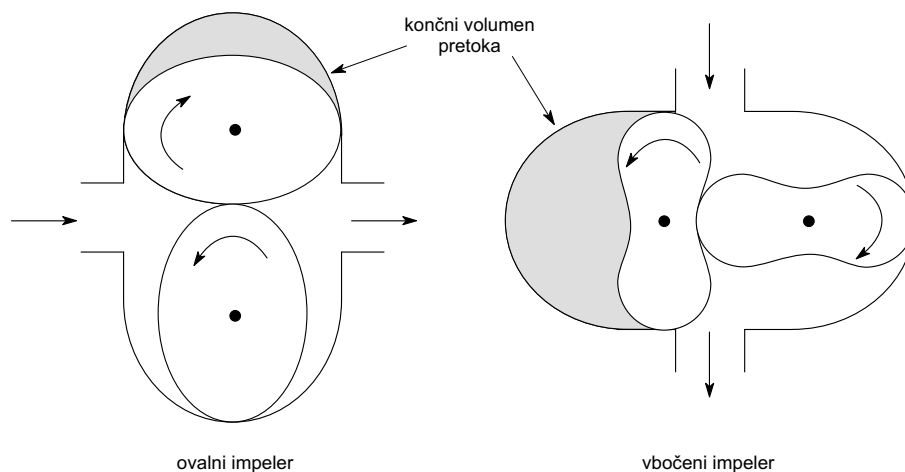
## 5.11 Merjenje pretoka tekočin

Merjenje pretoka je najstarejša znana meritev, ki so jo uporabljali že v prvih znanih civilizacijah. Tako pomembna je zato, ker ima lahko neposreden vpliv na zasluzke pri prodaji tekočin. Merjenje pretoka je poseben primer merjenja hitrosti. Običajno pretok obravnavamo na dva načina, kot volumski pretok, kjer nek končen volumen tekočine v končnem času premaknemo iz ene točke v drugo ali kot masni pretok, kjer v končnem času med točkama premaknemo neko končno maso. Enota za volumski pretok so kubični metri na sekundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), za masni pretok pa kilogrami na sekundo ( $\text{kg}/\text{s}$ ), uporabljamo pa tudi ustrezne izvedene enote. Ker pa je tok tekočine zvezen proces, lahko definicijo spremenimo tako, da rečemo, da je pretok gibanje tekočine pri neki hitrosti skozi znani presek. Ker presek lahko določimo z geometrijo merilnega sistema moramo torej izmeriti le hitrost gibanja tekočine. Tako kot merilniki hitrosti imajo tudi merilniki pretoka probleme pri nizkih vrednostih pretoka. Zaradi tako dolge zgodovine razvoja merilnikov so se razvili številni bolj ali manj uspešni principi merjenja.

### 5.11.1 Volumetrični merilniki ali merilniki s pozitivnim pomikom

Najstarejši znani merilniki so uporabljali volumetrični princip, kjer gre za merjenje pretoka s pretakanjem znanih volumnov iz vhoda merilnika na izhod. Zgradba merilnikov se je do danes sicer precej spremenila, ampak osnovna ideja je ostala enaka. Njihova najpomembnejša lastnost je, da ne potrebujejo umerjanja, ker so volumni, ki jih merilnik prenaša iz vhoda na izhod natančno določeni. Zaradi takega načina merjenja so to eni redkih merilnikov pretoka, ki niso problematični pri majhnih pretokih tekočin.

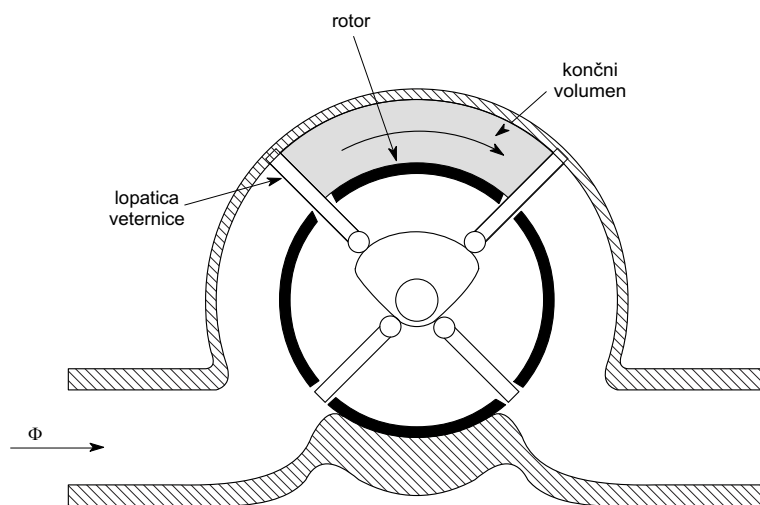
**Impeler (ang. impeler).** Merilnik je sestavljen iz dveh rotirajočih teles, ki se tesno prilegata eno na drugo in ju imenujemo impelerja. Vrtita se v ohišju, ki ima obliko dveh zelo nizkih valjev z nekoliko razmaknjenima vzporednima osema. Rotirajoči telesi se zelo natančno prilegata v ohišje, zato z vsakim obratom spustita skozi točno določen volumen tekočine. Prikaz merilnika je na sliki 5.50. Obstaja več oblik rotirajočih elementov, vsi pa delujejo na



Slika 5.50: Merilnik pretoka z impelerjem

povsem enak način. Merilniki imajo precej skupnega z zobniškimi črpalkami, le da na osi nimajo pogona ampak merilnik kotne hitrosti. Iz kotne hitrosti vrtenja impelerja in znanega pretočnega volumna lahko pretok tekočine natančno določimo. Merilnik je primeren tako za pline kot kapljevine, predstavlja pa razmeroma velik upor v pretoku. Problematično je tesnjenje merilnika, ki pri merjenju pretoka plinov pri višjih tlakih lahko povzroči velike napake.

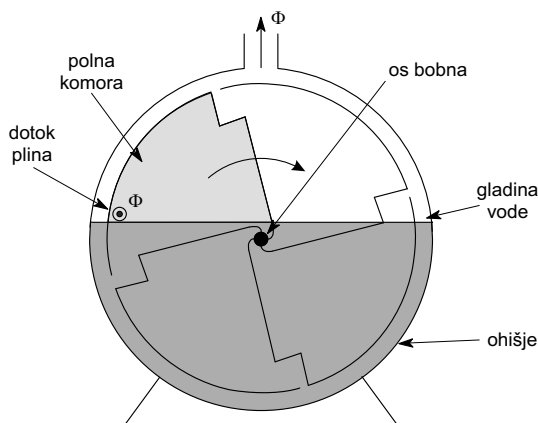
**Merilnik z drsečo vetrnico (ang. rotating valve flow meter).** Merilnik z drsečo vetrnico je sestavljen iz ohišja, ki ima znotraj ovalen valjast prostor kamor centrično postavimo rotor z lopaticami, ki jih vzmeti potiskajo proti steni ohišja, tako da tesnijo. Rotor je votel, znotraj pa je postavljen ekscentričen element, ki skrbi za to, da lopatice čim bolj sledijo obliki ohišja. Med dvema lopaticama vetrnice se nahaja končni volumen, ki ga merilnik prenese iz vhoda na izhod. Na en obrat prenese merilnik toliko končnih volumnov tekočine, kolikor je lopatic na vetrnici. Merilnik je prikazan na sliki 5.51 in je podoben črpalki, le da nima pogona ter je narejen tako, da povzroča čim manj upora v pretoku. Na osi rotorja ima merilnik kotne



Slika 5.51: Merilnik z drsečo vetrnico:  $\phi$  – pretok

hitrosti, ki ima izhod umerjen v enotah pretoka. Merilnik je uporaben tako za pline kot kapljevino.

**Bobnasti merilnik (ang. drum type gas flow meter)** Bobnasti merilnik je sestavljen iz valjastega ohišja, ki ima centrično postavljen vrteči se boben. Boben je narejen iz komor, ki jih tvorijo ustrezno oblikovane lopatice, ki so med seboj ločene, napram ohišju pa zatesnjene s kapljevino, ki sega čez os bobna. Dotok plina polni vedno le eno komoro bobna in ko se le-ta polni, se zaradi povečevanja vzgona dviguje in s tem vrtil boben. Ko se komora dovolj zavrti, spusti plin iz komore, da nadaljuje svojo pot po cevovodu. Prikaz merilnika je na sliki 5.52. Bobnasti merilnik je izključno namenjen merjenju pretoka plinov. Prenese lahko



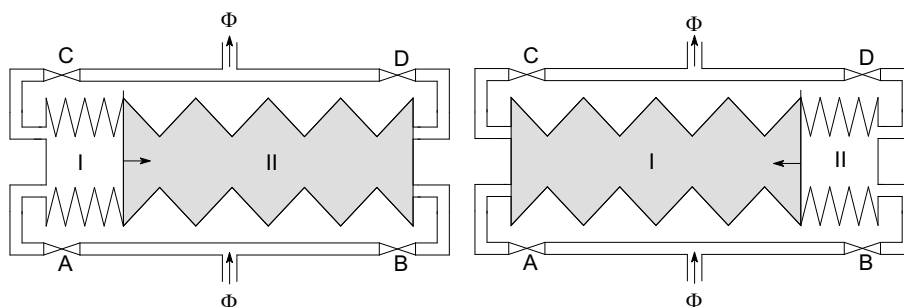
Slika 5.52: Bobnasti merilnik pretoka:  $\Phi$  – pretok plina

visoke tlake, temperatura pa je omejena na vrelišče tesnilne kapljevine.

**Suha plinska ura (ang. piston gas flow meters)** Suha plinska ura je namenjena merjenju pretoka plinov. Sestavljena je iz dveh mehov ali pnevmatskega cilindra z dvostranskim po-



gonom, ki ju izmenično polnimo in praznimo. To povzroči nihanje sistema, frekvenca pa natančno določa pretok. Izvedba z dvema mehovoma je prikazana na sliki 5.53. Frekvenco



Slika 5.53: Suha plinska ura:  $\Phi$  – pretok, levo – polnjenje mehu I in praznjenje mehu II, ventila A in D sta odprta, ventila B in C sta zaprta, desno – praznjenje mehu I in polnjenje mehu II, ventila B in C sta odprta, ventila A in D sta zaprta

merimo na skupni steni obeh mehov ali na batu. Merilnik je prenese visoke tlake in temperature, potrebuje pa regulacijski sistem za odpiranje in zapiranje ventilov za polnjenje in praznjenje mehov ali cilindra.

### 5.11.2 Pretvorba pretoka v silo ali tlak

Danes so najpogostejši merilniki pretoka tekočin merilniki s pretvorbo pretoka v spremembo tlaka. Čepprav povzročajo veliko oviro v pretoku, pa poenostavijo logistiko, saj so v procesni industriji poleg merilnikov pretoka zelo pogosti tudi merilniki tlaka in tako imamo lahko obe meritvi izvedeni z isto opremo. Osnovo za delovanje predstavlja Bernoullijeva enačba, ki opisuje dogajanje ob stiku dveh cevi različnih presekov:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2, \quad (5.16)$$

kjer so  $\rho$  – gostota tekočine,  $v_1$  – hitrost na prvem preseku cevi,  $p_1$  – tlak na prvem preseku cevi,  $v_2$  – hitrost na drugem preseku cevi in  $p_2$  – tlak na drugem preseku cevi. Pri tem pa na prehodu med presekomoma upoštevamo še enačbo zveznosti:

$$\Phi = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2, \quad (5.17)$$

kjer so  $\Phi$  – pretok tekočine,  $A_1$  – ploščina preseka prvega dela cevi in  $A_2$  – ploščina preseka drugega dela cevi. Z zoženjem preseka cevi lahko zato dobimo razliko tlakov, ki je odvisna od pretoka tekočine skozi cevovod. Enačbe so sicer precej poenostavljen model pretakanja, ki držijo le za nestisljive medije pri laminarnem pretoku. Laminarnost ali turbulentnost pretoka pa ugotavljamo z Reynoldsovim številom  $R_e$ :

$$R_e = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta}, \quad (5.18)$$

kjer sta  $D$  premer cevi in  $\eta$  dinamična viskoznost tekočine. Velike vrednosti  $R_e$  (v praksi večje od 10) pomenijo turbulenten pretok, majhne pa laminaren. V praksi pa se tovrstni merilniki uporabljajo tudi v mejnih območjih, zato jih je potrebno umeriti, da dobimo dobre

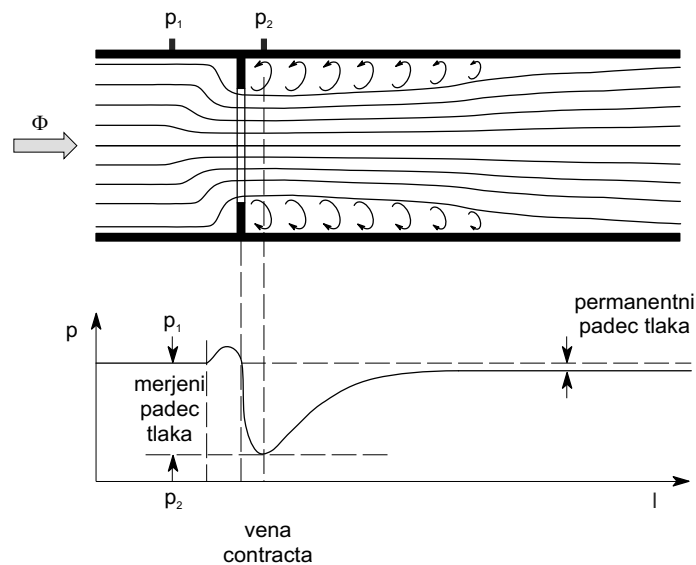
rezultate. Če so vsi pogoji izpolnjeni izračunamo pretok iz meritve tlakov kot:

$$\Phi = \frac{A_2}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (5.19)$$

kjer je:

$$m = \frac{A_2}{A_1}. \quad (5.20)$$

Kot smo že omenili, je praktična uporaba tovrstnih merilnikov velikokrat na meji ali pa celo ne izpolnjuje več vseh pogojev za veljavnost Bernoullijeve enačbe. Na sliki 5.54 so prikazane običajne razmere delovanja merilnikov. Kot vidimo iz slike 5.54, se za oviro na robu pretoka



Slika 5.54: Dejanske razmere pri uporabi merilnikov, ki pretvarjajo pretok v tlak ali silo:  $p$  – tlak,  $\Phi$  – pretok,  $l$  – vzdolžna koordinata cevi

pojavi vrtinci. To pomeni, da so rezultati, ki jih dobimo z uporabo enačbe 5.19 napačni. V praksi se zato uporablja enačba:

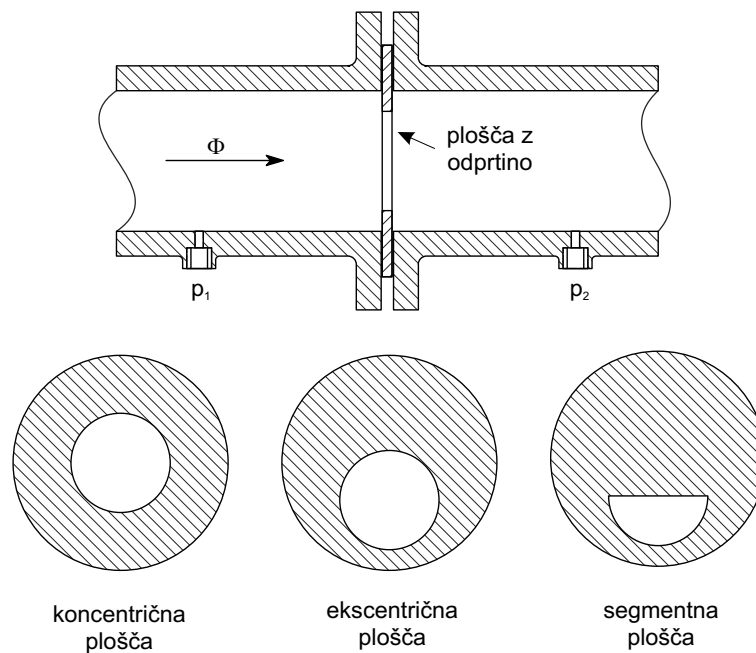
$$\Phi_v = \frac{C_D \cdot d}{\sqrt{1-\beta^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (5.21)$$

kjer je  $d$  premer zožitve,  $D$  premer cevi,  $\beta = \frac{d}{D}$  in  $C_D$  konstanta, ki upošteva Reynoldsovo število, razliko med premerom cevi in zožitve ter dejanskim premerom pretoka, stisljivost in vse ostale neidealnosti, ki jih Bernoullijeva enačba zanemari. Tu velja omeniti tudi to, da glede na korensko zvezo med tlakom in pretokom lahko uporabljamo merilnike tlaka slabše natančnosti, kadar je izraz pod korenem večji od 1, kar lahko dosežemo z ustrezno izbiro merilnika glede na gostoto in pričakovane hitrosti tekočine. Tudi zato so to zelo priljubljeni merilniki za merjenje pretoka.

Poleg merilnikov, ki pretvarjajo pretok v tlak, uporabljamo tudi merilnike, ki pretvarjajo

pretok v silo. V tovrstnih merilnikih sila zaradi pretoka premika nek prečni del ventila ali pa povzroča vibracije. Ta vrsta merilnikov pa ni tako pogosta kot merilniki s pretvorbo v tlak.

**Plošče z odprtino (ang. orifice plate).** Plošče z odprtino so zelo pogosti merilniki za merjenje pretoka pare, plinov nekoliko redkeje pa tudi tekočin. So zelo enostavne za izvedbo. Cev cevovoda prerežemo in na obeh koncih izvedemo prirobnice. Med prirobnici namestimo kovinsko ploščo z odprtino, ki je precej manjša od preseka cevi. Na obeh straneh plošče izvrtamo luknji za priklop merilnika diferencialnega tlaka. Prikaz merilnika je na sliki 5.55. Plošče z odprtino predstavljajo zelo grobo oviro v pretoku, zato pa ustvarijo veliko razliko

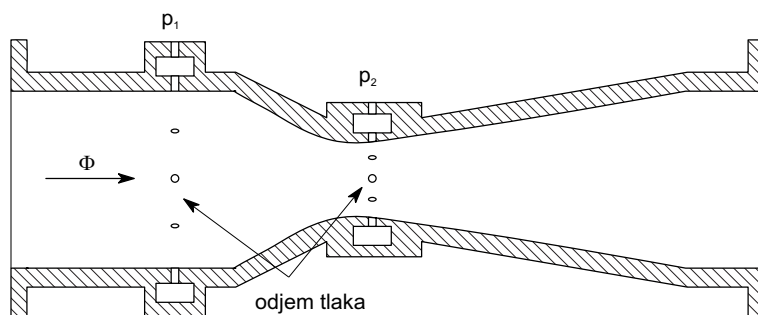


Slika 5.55: Izvedbe plošč z odprtino:  $\Phi$  – pretok,  $p_1$  – odjem tlaka pred ploščo,  $p_2$  – odjem tlaka za ploščo

tlakov, kar pomeni, da lahko dobimo dober signal tudi pri manjših pretokih. Problem je obraba ostrih robov odprtine in nalaganje naslag ob plošči, kar pa je problematično le pri pretakanju kapljev. Pri merjenju pretoka plinov in pare imajo plošče zelo dolgo življenjsko dobo in ne potrebujejo pogostega umerjanja. Ravno zaradi problemov abrazije pa niso najbolj primerne za merjenje pretoka kapljev, ker je potrebna dokaj pogosta umerjanje. Zelo moramo paziti tudi na čistost kapljev, sicer se na plošči lahko nabirajo naslage, ki popačijo karakteristiko in zelo hitro lahko dobimo napačne podatke o pretoku. Zaradi velikih tlačnih razlik lahko prihaja do kavitacije, ki lahko ploščo uniči v nekaj urah, zato moramo zelo pazljivo določiti razmerje med presekom cevi in odprtine v plošči.

**Venturijeva cev (ang. Venturi tube).** Venturijeva cev ustvarja skoraj idealne pogoje pretoka, zato lahko neposredno uporabimo Bernoullijevo enačbo za izračun pretoka iz razlike tlakov. Merilnik je zelo zahteven za izdelavo, ker je to cev, ki ima zvezno oblikovan prehod iz večjega na manjši premer. Oblika Venturijeve cevi je določena tako, da ustvarja minimalni

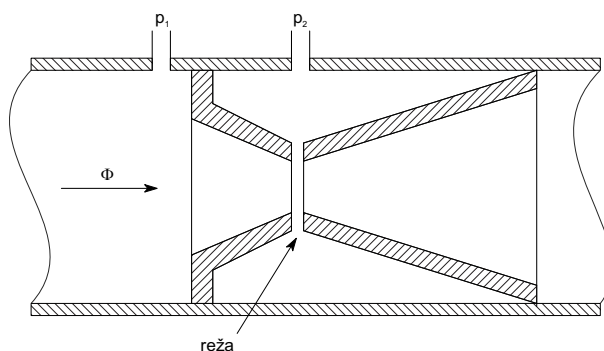
upor v pretoku in ne dovoljuje nastajanja vrtincev. Prikaz merilnika je na sliki 5.56. Pritrditev



Slika 5.56: Venturijeva cev:  $p_1$  – odjem tlaka pred zožitvijo,  $p_2$  – odjem tlaka na zožitvi,  $\Phi$  – pretok

izvedemo tako, da na cev privarimo prirobnici, nanju pa privijamo merilnik. Venturijeve cevi uporabljamo v glavnem za merjenje pretoka v cevovodih z velikimi premeri, velikimi pretoki in dragocenimi tekočinami. Za manjše premere je izdelava predraga, pri manjših pretokih pa je tlačna razlika majhna, ker Venturijeve cevi predstavljajo premajhno oviro v pretoku. So pa neobčutljive na obrabo in naslage, zato z njimi lahko merimo tudi pretoke kapljev, ki vsebujejo delce.

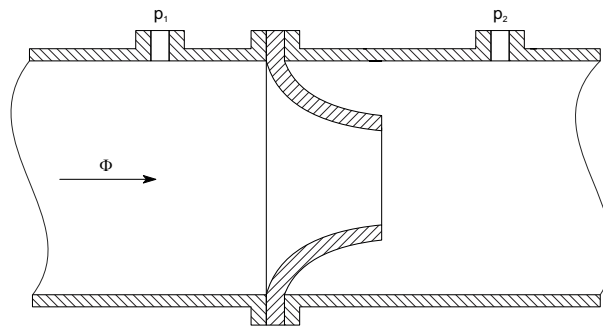
**Dallova cev (ang. Dall tube).** Dallove cevi so izpeljane iz Venturijevih cevi z namenom poenostavitve izdelave, pri čemer naj bi se izgubilo čim manj dobrih lastnosti Venturijevih cevi, predvsem majhen upor v pretoku in majhno obrabo. Dallova cev je izdelana iz dveh delov, ki ju vstavimo v cev cevovoda, privarimo in izvrtamo odprtini za odjem tlaka. Prikaz Dallove cevi je na sliki 5.57. Dallove cevi so po natančnosti, ceni, zapletenosti izvedbe in po



Slika 5.57: Prikaz Dallove cevi:  $\Phi$  – pretok,  $p_1$  – odjem tlaka pred oviro,  $p_2$  – odjem tlaka na oviri

stopnji ovire v pretoku nekje med ploščami z odprtino in Venturijevimi cevmi. Glede na te parametre se tudi odločamo za njihovo uporabo.

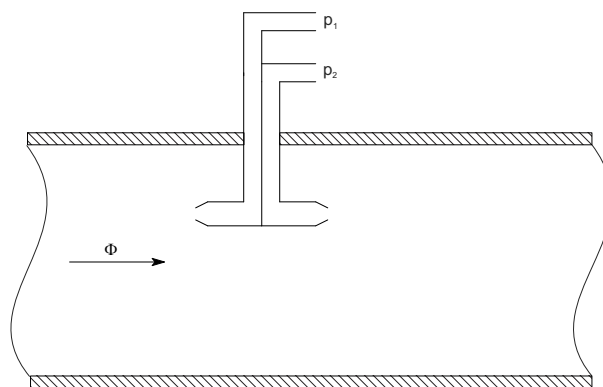
**Šobe (ang. flow nozzle).** Šobe so zelo podobne ploščam z odprtino, tako po oviri, ki jo povzročajo v pretoku, kot po načinu montaže. Izdelava merilnika je bolj zahtevna kot izdelava plošče. Prikaz šobe je na sliki 5.58. Šobe uporabljamo za pretoke tekočin visokih hitrosti,



Slika 5.58: Prikaz šobe:  $\Phi$  – pretok,  $p_1$  – odjem tlaka pred oviro,  $p_2$  – odjem tlaka za oviro

ki imajo veliko abrazivno moč, kjer pa potrebujemo veliko natančnost meritve. Plošče z odprtino v takšnih primerih niso učinkovite, ker potrebujejo prepogosto umerjanje, šobe pa abrazijo bolje prenašajo, ker nimajo ostrih robov. Natančnost je primerljiva z natančnostjo plošč z odprtino, cena pa je višja.

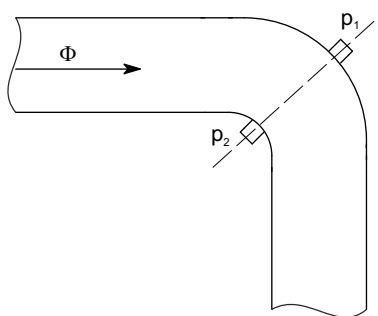
**Pitotova cev (ang. Pitot tube).** Pitotova cev je točkovni merilnik hitrosti tekočin. Ker je bistveno manjši od cevi v kateri merimo pretok, ne meri povprečne hitrosti tekočine v cevovodu ampak hitrost na točno določenem mestu glede na presek cevovoda. Zato moramo biti pazljivi, kako merilnik namestimo znotraj cevi. Prikaz merilnika je na sliki 5.59. Merilnik



Slika 5.59: Prikaz Pitotove cevi:  $\Phi$  – pretok,  $p_1$  – dinamični tlak,  $p_2$  – zastojni tlak

navadno poskušamo montirati tako, da meri hitrost, ki je najbližje povprečni hitrosti pretoka. Bernoullijeva enačba za ta merilnik zelo dobro velja in z njim lahko dosegamo velike natančnosti meritve hitrosti, problematičen pa je prehod iz meritve hitrosti v pretok, kjer izgubimo natančnost meritve pretoka.

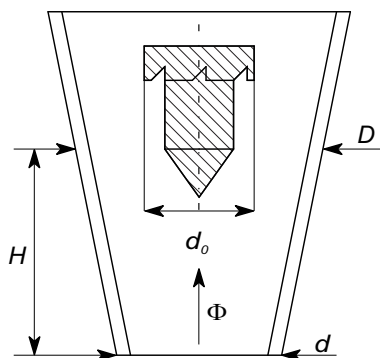
**Centrifugalni merilnik (ang. elbow-tap meter).** Centrifugalni merilnik izkorišča kolena v cevovodih za merjenje pretoka. Na zunanji in notranji strani kolena izvrtamo odprtini za zajem tlaka in na osnovi diferencialnega tlaka določimo pretok v cevi. Prikaz merilnika je na sliki 5.60. Za določanje pretoka ne uporabljamo Bernoullijevih enačb pač pa lahko določimo izhod iz enačb za rotacijo po krožnici, ki ima radij enak krivinskemu radiju kolena. V praksi merilnik raje neposredno umerimo ob vgradnji, meritev pa sodi med manj natančne.



Slika 5.60: Prikaz centrifugalnega merilnika:  $\Phi$  – pretok,  $p_1$  – odjem višjega tlaka na zunanji strani in  $p_2$  – odjem nižjega tlaka na notranji strani kolena

**Merilnik z vrati (ang. variable gate flow meter).** Merilnik z vrati ne določa pretoka iz razlike tlakov, pač pa ima servo sistem, ki skrbi za to, da je padec tlaka na vratih vedno enak, ne glede na pretok. Vrata namreč lahko sukamo okoli svoje osi in s tem odpiramo ali zapiramo pretok. Informacijo o pretoku zato nosi kot zasuka vrat. Z manjšo modifikacijo, ko spremljamo kot odprtosti vrat in spremembe v diferencialnem tlaku je ta princip možno uporabiti za meritve pretoka neposredno na ventilu, če imamo dobro izmerjeno karakteristiko.

**Rotameter (ang. rotameter).** Rotameter je zelo priljubljen merilnik pretoka v primerih ko ne potrebujemo električnega izhoda. Merilnik pretvarja pretok v silo, silo pa v pomik. Izdelan je iz prozorne cevi, ki je rahlo stožčaste oblike in plovca, ki ima večjo gostoto od gostote tekočine. Plovec je oblikovan tako, da se v pretoku vrti okoli lastne osi in se zato vedno pozicionira na sredino pretoka. Od tod je tudi dobil ime. Prikaz merilnika je na sliki 5.61. Rotameter mora biti obvezno postavljen navpično, sicer plovec nima pravilno usmerjene



Slika 5.61: Prikaz rotametra:  $\Phi$  – pretok,  $H$  – pozicija plovca,  $d_0$  – presek plovca,  $D$  – presek cevi na poziciji plovca,  $d$  – minimalni presek cevi

sile teže, da bi uravnotežila silo pretoka. Pozicijo plovca  $H$  lahko določimo iz geometrije prozorne cevi, plovca in pretoka:

$$F + \rho_t \cdot V_p \cdot g = \rho_p \cdot V_p \cdot g, \quad (5.22)$$

kjer je  $F$  sila zaradi pretoka,  $\rho_t$  gostota tekočina,  $V_p$  volumen plovca,  $g$  - težnostni pospešek in  $\rho_p$  gostota plovca. Silo zaradi pretoka tekočine lahko zapišemo kot:

$$F = C_V \cdot A_p \cdot \rho_t \frac{\bar{v}_t^2}{2}, \quad (5.23)$$

kjer je  $C_V$  koeficient upora plovca, ki je odvisen od oblike in viskoznosti tekočine,  $A_p$  efektivna površina plovca in  $\bar{v}_t$  povprečna hitrost tekočine. Iz enačb 5.22 in 5.23 lahko izrazimo hitrost tekočine  $\bar{v}_t$ , ki jo potrebujemo za izračun pretoka tekočine:

$$\bar{v}_t = \sqrt{\frac{2g \cdot V_p}{C_V \cdot A_p} \left( \frac{\rho_p}{\rho_m} - 1 \right)}. \quad (5.24)$$

Tekočina lahko teče le v prostoru okrog plovca, ki ima obročast presek in površino  $A$  določeno kot:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_0^2), \quad (5.25)$$

pri čemer velja:

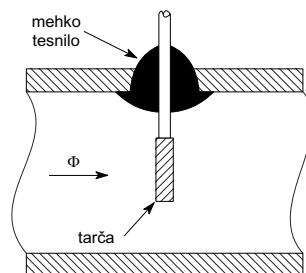
$$D = d + k_c \cdot H. \quad (5.26)$$

Pomen oznak je naslednji:  $D$  – premer cevi na višini  $H$ ,  $d_0$  – premer plovca,  $d$  – minimalni premer cevi in  $k_c$  – koeficient naklona sten cevi. Če sedaj združimo enačbe 5.24, 5.25 in 5.26, dobimo povezavo med pretokom in pozicijo plovca znotraj cevi:

$$\Phi = A \cdot \bar{v}_t = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2g \cdot V_p}{C_V \cdot A_p} \left( \frac{\rho_p}{\rho_m} - 1 \right)} \left( (d + k_c \cdot H)^2 - d_0^2 \right). \quad (5.27)$$

Merilnik ima dobro natančnost, vendar postane plovec nestabilen pri pretokih manjših o 10% maksimalnega pretoka. Avtomatsko odčitavanje moramo izvesti z optičnim sistemom, kjer plovec prekinja žarke in s tem signalizira velikost pretoka.

**Merilnik s tarčo (ang. target flow meter).** Merilnik s tarčo pretvarja pretok v vibracije. Sila pretoka deluje na objekt, ki je pritrjen na palici, le-ta pa je elastično pritrjena na cev. Zaradi delovanja sile in elastične pritrditve pride do nihanj objekta, kar lahko zajamemo z elektromagnetom ali reed-kontaktnikom. Prikaz merilnika je sliki 5.62. Merilnik daje na



Slika 5.62: Prikaz merilnika pretoka s tarčo:  $\Phi$  – pretok

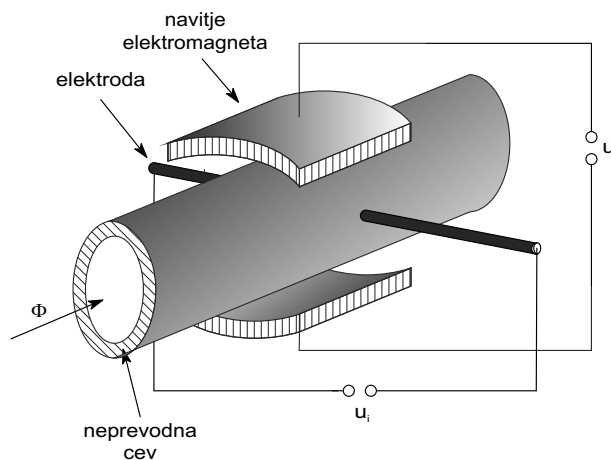
izhodu napetostne impulze, kar lahko pretvorimo v frekvenco ali periodo, zato ta merilnik lahko meri tudi nizke frekvence oscilacij zaradi pretoka. Merilnik je namenjen merjenju

pretoka najbolj umazanih in agresivnih tekočin.

### 5.11.3 Pretvorba pretoka v električne veličine

Pri pretvorbi pretoka neposredno v električne veličine imamo samo eno izbiro in sicer elektromagnetni merilnik.

**Elektromagnetni merilnik pretoka (ang. electromagnetic flow meter).** Elektromagnetni merilnik pretoka ustvarja magnetno polje z referenčno tuljavo. Zaradi pretoka tekočine skozi magnetno polje se v prevodni tekočini inducira napetost, ki jo lahko merimo z elektrodami. Prikaz merilnika je na sliki 5.63. Idejo za elektromagnetni merilnik je dal že Michael Faraday



Slika 5.63: Prikaz elektromagnetnega merilnika pretoka:  $\Phi$  – pretok,  $u$  – vzbujalna napetost,  $u_i$  – inducirana napetost

in z njim hotel izmeriti pretok Temze skozi London. Na obeh bregovih je postavil elektrodi, za magnetno polje pa je uporabil magnetno polje zemlje. Vendar je dobil premalo signala, da bi ga lahko ločil od napetosti galvanskega člena, ki ga je dobil z reko in obema elektrodama. Tudi današnje izvedbe merilnikov dobijo na elektrodah nekaj mikrovoltov napetosti, zato potrebujemo zelo dobre ojačevalnike in filtre, da dobimo na izhodu primeren signal. Da eliminiramo galvanske vplive elektrod moramo sistem vzbujati z izmeničnim magnetnim poljem. Princip zahteva minimalno prevodnost tekočine nekaj mS, da lahko deluje. Napetost na elektrodah je določena kot:

$$u_i = v \cdot l \cdot B, \quad (5.28)$$

kjer je  $u_i$  napetost na elektrodah,  $v$  hitrost tekočine,  $l$  razdalja med elektrodama in  $B$  gostota magnetnega polja. Merilnik je zaradi pogojev prevodnosti uporaben le za merjenje kapljev. Je zelo robusten, ker nima nobenih gibljivih delov in ne predstavlja nobene ovire v pretoku. Edini del merilnika, ki je v stiku s kapljevino so elektrode, ki so navadno platinaste, da so odporne na agresivne medije.

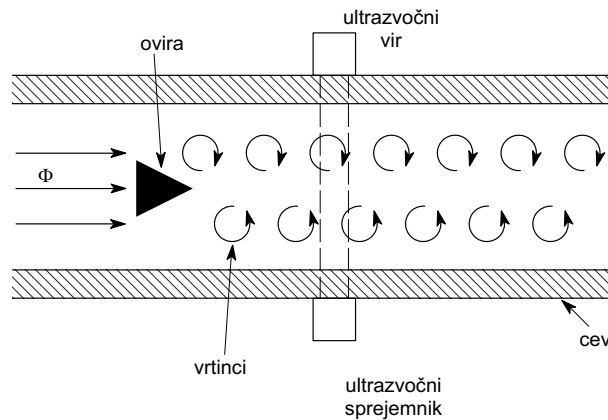
### 5.11.4 Pretvorba pretoka v vrtince

Zelo zanimiv princip merjenja pretoka je pretvorba v vrtince. Čeprav so vrtinci značilni za turbulentne pojave, ki so po naravi nestabilni, pa je shema vrtincev vrtinčnega merilnika



pretoka zelo stabilna.

**Vrtinčni merilnik pretoka (ang. vortex meter).** Vrtinčni merilnik je sestavljen iz majhne ovire, ki povzroča vrtince, in detektorja vrtincev. Prikaz merilnika je na sliki 5.64. Ovira



Slika 5.64: Prikaz vrtinčnega merilnika pretoka:  $\Phi$  – pretok

predstavlja zelo majhen dodatni upor pretoka, povzroča pa zelo stabilno vrtinčno shemo, ko se na eni strani ovire naredi vrtinec in mu nato sledi vrtinec na drugi strani ovire. Takšno oviro imenujemo von Karmannova vrtinčna shema. Iz frekvence pojavljanja vrtincev lahko sklepamo na pretok tekočine skozi merilnik tako, da določimo hitrost tekočine in jo pomnožimo s presekom merilnika. Hitrost pretoka  $v_t$  je od frekvence pojavljanja vrtincev  $f_v$  odvisna takole:

$$v_t = \frac{h_z}{S} f_v, \quad (5.29)$$

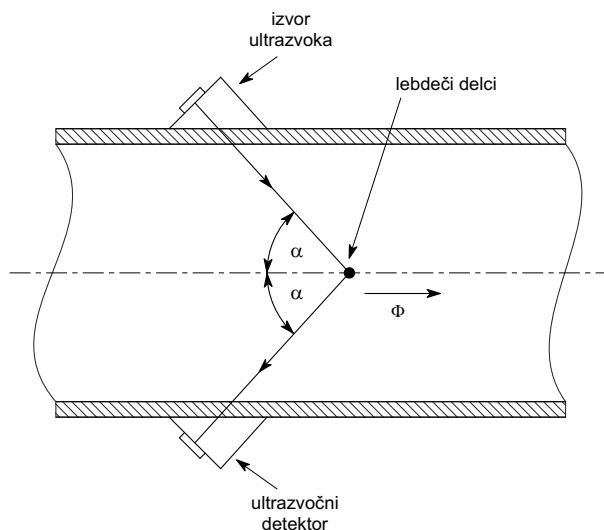
kjer sta  $h_z$  višina čela ovire in  $S$  Strouhalovo število, ki je konstanta. Izhod merilnika je tako neodvisen od lastnosti tekočine, katere pretok merimo. Merilnik ima široko področje uporabe od plinov do kapljev in ima zelo dobro natančnost. Frekvenco vrtincev lahko določamo na različne načine. Najenostavneje to naredimo mehansko, ko imamo za oviro nihalo, ki ga vrtinci odklanjajo. Odklone nihala pa štejemo preko magnetnega ali kapacitivnega stika. Za detekcijo lahko uporabimo tudi merilnik tlaka ali pa ultrazvočni merilnik, ker vrtinci vplivajo tako na lokalne spremembe tlaka kot na prevajanje zvoka skozi tekočino.

### 5.11.5 Vpliv pretoka na prevajanje zvoka

Prevajanje zvoka po tekočinah je odvisno od smeri in hitrosti njihovega gibanja, ker se zvočno valovanje neposredno širi po materiji in torej tudi potuje skupaj z njo. Prednost ultrazvočnih merilnikov je, da jih lahko namestimo na zunanjo stran cev, kar pomeni, da jih lahko uporabljamo kot prenosne merilnike. Slaba stran pa je, da potrebujejo zelo laminaren pretok za dobro meritev, kar pomeni, da potrebujemo vsaj 10 premerov ravne cevi pred merilno pozicijo, kar ni vedno možno izvesti.

**Dopplerjev ultrazvočni merilnik (ang. Doppler ultrasonic flowmeter).** Dopplerjev ultrazvočni merilnik pretoka izkorišča delce ali mehurčke v tekočini in iz razlike oddane frekvence in frekvence signala, ki se odbije od delcev določi hitrost gibanja tekočine. To pomeni,

da se morajo delci gibati z enako hitrostjo kot tekočina, sicer je meritev napačna. Prikaz merilnika je na sliki 5.65. Merilnik ima sicer zelo dobro natančnost, a je odvisna tudi od enako-



Slika 5.65: Prikaz Dopplerjevega ultrazvočnega merilnika pretoka:  $\Phi$  – pretok,  $\alpha$  – vpadni kot žarka

mernosti debeline cevi na mestu montaže in enakomernosti porazdelitve lebdečih delcev. V nekaterih primerih celo načrtno vpihavamo mehurčke plina v kapljevine, da merilnik lahko deluje. Hitrost gibanja tekočine  $v_t$  je definirana kot:

$$v_t = \frac{c(f_t - f_r)}{2f_t \cos(\alpha)}, \quad (5.30)$$

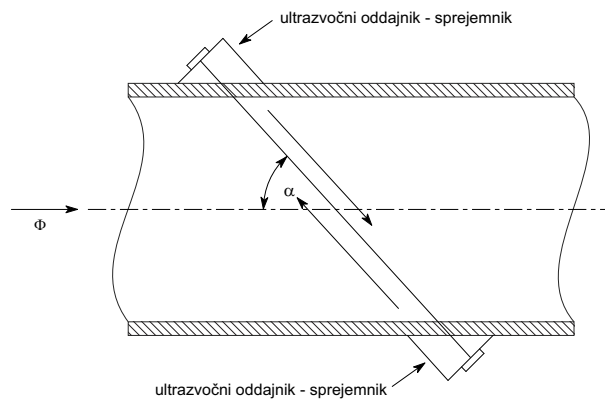
kjer je  $c$  hitrost razširjenja valovanja v tekočini,  $f_t$  frekvenca oddanega valovanja,  $f_r$  frekvenca odbitega valovanja in  $\alpha$  vpadni kot žarka.

#### Ultrazvočni merilnik z merjenjem časa preleta (ang. transit-time ultrasonic flow meter).

Kadar imamo opravka s tekočinami, ki nimajo delcev in katerim plina zaradi procesnih zahtev ne smemo dodajati lahko uporabimo merilnik na osnovi časa preleta. Merilnik ima dve oddajno sprejemni glavi nameščeni tako, da oddajata in sprejemata signal druga od druge. Na osnovi razlik v časih preleta signala v smeri pretoka in v nasprotni smeri lahko določimo hitrost gibanja tekočine. Prikaz merilnika je na sliki 5.66. Merilnik je občutljiv na enakomernost debeline cevi na mestu montaže sicer pa ima dobro natančnost. Oba sprejemnika/oddajnika sta narejena tako, da oddata signal takoj ko nasprotni sprejemnik sprejme njun signal. Zaradi različnih hitrosti razširjanja signala z in proti toku dobimo na sprejemnikih vlaka pulzov z različnima frekvenca. Iz razlike med frekvenca  $\Delta f$  obeh signalov dobimo hitrost pretoka  $v_t$  z naslednjo enačbo:

$$v_t = \frac{L \cdot \Delta f}{2 \cos(\alpha)}, \quad (5.31)$$

kjer je  $\alpha$  vpadni kot ultrazvočnih žarkov. Natančnost lahko izboljšamo tako, da pot žarka skozi tekočino podaljšamo z več odboji od sten cevi.



Slika 5.66: Prikaz ultrazvočnega merilnika pretoka na osnovi časa preleta:  $\Phi$  – pretok,  $\alpha$  – vpadni kot žarka

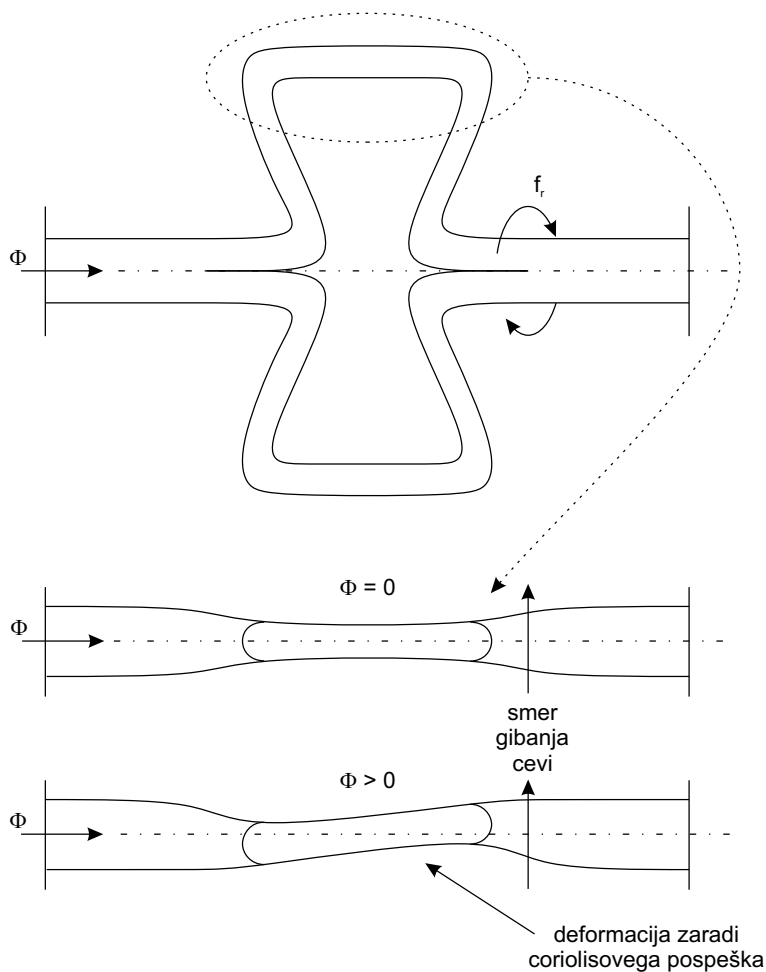
**Korelacijski merilnik (ang. cross-correlation ultrasonic flow meter).** Najnatančnejši in najbolj robusten merilnik pretoka na osnovi razširjanja zvočnega valovanja je korelacijski merilnik. Merilnik je sestavljen iz dveh enakih ultrazvočnih merilnikov, ki sta lahko Dopplerjeva ali na principu časa preleta, ki merita isti pretok na različnih pozicijah. Pred obema merilnikoma potrebujemo neko oviro, ki je lahko tudi koleno na cevovodu. Ovira vnaša spremenljive motnje v laminarni pretok, ki se širijo od enega do drugega merilnika. Ker motnje povzročajo spremembe v hitrosti medija, lahko te spremembe zaznamo na obeh merilnikih in hkrati izračunavamo korelacijsko funkcijo med obema signaloma. Zakasnitev  $\tau_{max}$  pri kateri dobimo maksimalno vrednost korelacijske funkcije je enaka času, ki ga motnja potrebuje, da pride od enega merilnika do drugega. Ker razdaljo  $d$  med merilnikoma poznamo, lahko določimo hitrost gibanja tekočine  $v_t$ :

$$v_t = \frac{d}{\tau_{max}} \quad (5.32)$$

### 5.11.6 Vpliv pretoka na prevajanje vibracij po cevovodu

Kombinacija vibracij ali kroženja, ki je pravokotno na smer gibanja nekega telesa povzroči deformacije na telesu, ki pa niso enakomerne. Silo, ki povzroča deformacije pa imenujemo Coriolisova sila. Coriolisovo silo čutimo tudi na površju zemlje, kadarkoli se pomikamo. Sila je sicer majhna, a vpliva na naš ravnotežni organ, zato v odprtem prostoru, kjer se ne moremo orientirati na neke očitne referenčne točke, krožimo po prostoru.

**Coriolisov merilnik (ang. Coriolis flow meter).** Coriolisov merilnik pretoka je sestavljen iz dveh cevi po katerih speljemo enotni pretok, ki teče skozi merilnik. Cevi pa nato vrtimo ali vibriramo vzporedno z osjo pretoka. Kadar pretoka v ceveh ni, obe cevi nihata ali rotirata kot togo telo. Takoj ko se tekočina v cevi začne premikati pa pride do zelo rahlega zvijanja cevi, ki ga detektiramo s senzorji raztezka, kot so uporovni lističi. Prikaz merilnika je na sliki 5.67. Coriolisov merilnik meri masni pretok, kar ga loči od ostalih merilnikov pretoka, ki večinoma merijo volumski pretok. Kadar je bolj kot volumen pomembna masa tekočine, in se gostota tekočine zelo spreminja glede na razmere v okolju, kot na primer pri plinastih gorivih, za merjenje pretokov ne smemo uporabljati merilnikov volumskega pretoka. Ma-



Slika 5.67: Prikaz delovanja Coriolisovega merilnika pretoka:  $\Phi$  – pretok,  $f_r$  – frekvenca rotacije ali vibracij

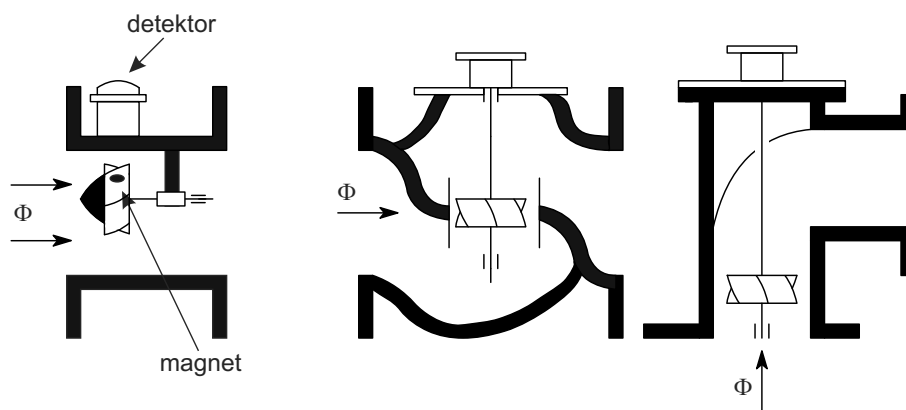
sni pretok, ki ga v takšnih razmerah izračunamo iz izmerjenega volumskega pretoka, lahko zelo odstopa od dejanske vrednosti kar ima lahko tudi znatne finančne posledice. Ker so deformacije zaradi Coriolisovega pospeška zelo majhne, potrebujemo zelo natančne merilnike raztezkov. Merilnik je zelo zanesljiv a tudi dokaj drag, ker zahteva precej obdelave podatkov, da dobimo vrednost pretoka. Merilnik je zanimiv tudi zato, ker v stik s tekočino pridejo le cevi, zato lahko z njim merimo tudi pretoke agresivnih snovi, podobno kot pri ultrazvočnih merilnikih.

### 5.11.7 Pretvorba pretoka v vrtenje

Obravnava pretvorbe pretoka v vrtenje je teoretično zelo zahtevna. Za pretvorbo potrebujemo propeler ali turbino, ki jo pozicioniramo nekje v pretoku, slednji pa deluje na lopatice in vrtil os. Hitrost vrtenja osi je odvisna tako od kota kot od oblike lopatic in jo ne moremo določiti na enostaven način. Predvsem je problematičen vpliv oblike na učinkovitost vrtenja in na karakteristiko merilnika. Čeprav je teoretična obravnava zahtevna, pa so merilniki tega tipa precej razširjeni in jih uporabljamo kot alternativo volumetričnim merilnikom. Me-

rilnike, ki izkoriščajo tak princip merjenja pretoka imenujemo turbinski merilniki.

**Turbinski merilnik (ang. turbine flow meter).** Turbinski merilniki navadno zasedejo le del celotnega pretoka in se vrtijo proporcionalno glede na hitrost pretoka. Izdelava je problematična pri postopku določanja oblike lopatic, ki morajo zagotoviti čim bolj linearno karakteristiko pretok– hitrost vrtenja, medtem ko je serijska izdelava poceni. Merilnik je sestavljen iz turbine, ki je pritrjena na os, ki vrtilni merilnik kotne hitrosti. Ker se merilnik nahaja znotraj cevi, je izbira in namestitev merilnika zahtevna. Najpogosteje imamo na turbini nameščene magnetne ali feromagnetne vložke, katerih gibanje nato detektiramo zunaj cevi, da ne pride do problemov s kratkimi stiki in puščanjem. Prikazi različnih izvedb merilnika so na sliki 5.68. Merilnik je precej razširjen, ker lahko dobimo dobro natančnost s ceneni kompo-



Slika 5.68: Prikazi različnih načinov namestitve turbinskega merilnika:  $\Phi$  – pretok

nentami. Izhodni signal je večinoma pulzni, lahko pa dobimo tudi zvezni enosmerni signal. Merilnik predstavlja majhno oviro v pretoku, ležaji pa morajo biti izvedeni zelo robustno, da zdržijo obremenitve, kadar merilnik uporabljamo za merjenje pretoka kapljev. Merilnik je najpogosteje v uporabi za merjenje pretoka plinov, ker imamo v takšnih razmerah manj problemov z mazanjem ležajev. Za natančne meritve zahteva skrbno umerjanje, namenjeni pa so za merjenje pretokov tekočin z majhnimi viskoznostmi in pri velikih hitrostih, pri majhnih hitrostih pa je natančnost slaba.

### 5.11.8 Pretvorba pretoka v toplotne izgube grelnih teles

Pretok tekočine ima zelo velik učinek na hlajenje grelnih teles. Večji kot je masni pretok tekočine bolj se znižuje temperatura grelnega telesa, ki ga grejemo s konstantno močjo. Ker so mase, ki se pretakajo okoli grelnih teles velike napram masam grelnih teles imajo tovrstni merilniki zelo hiter odziv in so primerni za merjenje hitro spreminjajočih se pretokov, kot so npr. pretoki zraka na vhodu v eksplozijske motorje.

**Termični anemometer (ang. thermal anemometer, thermal mass-flow sensor).** Termični anemometer je merilnik, ki je sestavljen iz uporovne žice ali polprevodnika z izrazito spremembo upornosti v odvisnosti od temperature. Skozi uporovni element teče tok, ki ga greje, medtem ko ga pretok tekočine hladi. Z merjenjem upornosti uporovnega elementa lahko

določimo masni pretok skozi merilnik. Ker so procesi konvekcije in sevanja, s katerimi upovrovni element oddaja energijo zapleteni, tovrstne merilnike umerjamo na znane pretoke.

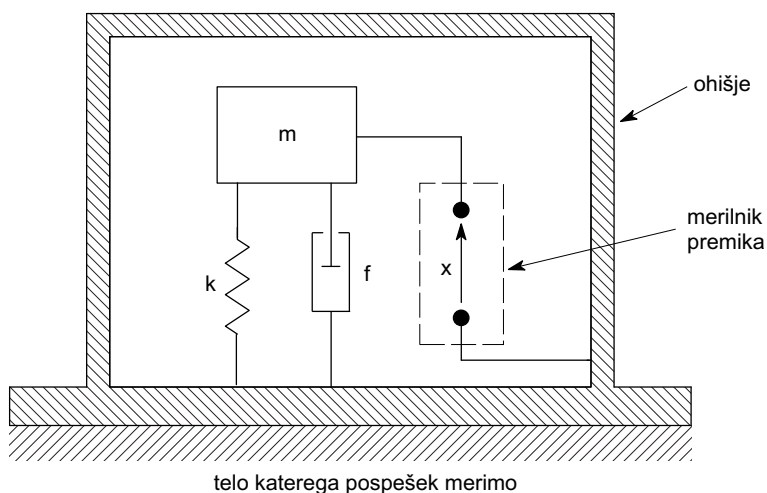
## 5.12 Merjenje pretoka sipkih materialov

Merjenje pretoka sipkih materialov je definirano kot masni pretok, zato ga merimo v kg/s. Za merjenje pretoka sipkih materialov imamo poleg prenašanja končnih volumnov ali mas na voljo le tehtanje določenega odseka na tekočem traku. Merilnik sile postavimo tako, da meri silo na določenih podpornih točkah tekočega traku in iz hitrosti traku in mase sklepamo na masni pretok snovi. Merilna metoda ni preveč natančna in daje le oceno pretoka.

## 5.13 Merjenje linearnega pospeška

Linearni pospešek je definiran kot sprememba hitrosti na časovno enoto. Merimo ga v enotah metri na sekundo kvadrat ( $m/s^2$ ). Linearni pospešek je pomembna veličina za razne procese. Pri vozilih in letalih moramo paziti, da ne prekoračimo določenih vrednosti, ker bi bila sicer ogrožena življenja. Tudi elektronske naprave imajo lahko omejitve glede pospeškov, ki jih prenesejo. Magnitudo potresov ravno tako merimo preko pospeškov. Izbira merilnikov je majhna običajno pa gre pri vseh za sistem mase, vzmeti in dušilnika.

**Merilnik s potresno maso (ang. accelerometer).** Merilnik s potresno maso je standardni merilnik pospeška, ki pa ima izjemno veliko izvedb. Osnovna zgradba je masa, ki se lahko giblje, pripeta pa je na sistem vzmeti in dušilnika, da se primerno hitro izniha. Prikaz sistema je na sliki 5.69. Območje pospeškov, ki jih lahko merimo je odvisno od merilnika pomika.



Slika 5.69: Prikaz merilnika na potresno maso:  $x$  – pomik

Za zmerne pospeške uporabljamo lahko potenciometre ali diferencialne transformatorje, pri masah okrog 1 kg. Za večje pospeške navadno zvečamo togost vzmeti, pomik mase pa izmerimo z upovrovnimi lističi. Za še večje pospeške uporabljamo piezoelektrični kristal namesto vzmeti in dušilnika, pospeški na maso pa deformirajo kristal kar proizvede električno

napetost. Takšni merilniki so uporabni tudi v najbolj zahtevnih razmerah, ko preizkušajo meje vzdržljivosti elektronskih komponent za delovanje v vesolju. Danes so zelo popularni pospeškometri izvedeni na integriranem vezju. Masa merilnika je skoncentrirana v eni elektrodi kondenzatorja, ki ga izvedejo na silicijevi ploščici. Ker je elektroda vezana na substrat z elastičnimi strukturami, se lahko pomika in s tem spreminja kapacitivnost kondenzatorja. V enem integriranem vezju dobimo pospeškometre za vse tri dimenzije zato lahko z njim ugotovljamo orientacijo sistema v prostoru glede na smer težnostnega pospeška. Cenenost in zanesljivost merilnika sta povzročili zelo razširjeno uporabo od mobilnih telefonov do avtomobilov.

## 5.14 Merjenje rotacijskega pospeška

Rotacijski pospešek je definiran kot sprememba hitrosti na enoto časa in ga merimo v radianih na sekundo kvadrat ( $\text{rad/s}^2$ ) ali obratih na sekundo kvadrat ( $\text{obr/s}^2$ ). Za merjenje rotacijskega pospeška imamo še manjšo izbiro merilnikov kot za merjenje linearnega pospeška. Uporabljamo lahko merilnike kotne hitrosti in diferenciramo signal pospeška, za kar so večinoma primerni samo merilniki z impulznim izhodom, sicer dobimo preveč visokofrekvenčnega šuma. Lahko pa uporabimo izmenični tahogenerator pod posebnimi pogoji.

**Izmenični tahogenerator (ang. AC tachogenerator).** Izmenični tahogenerator potrebuje za vzburjanje izmenično napetost. Če pa uporabimo za vzburjanje enosmerno napetost, dobimo na izhodni tuljavi signal samo v primeru, če se rotor tahogeneratorja giblje pospešeno. Izhodni signal ima nizke nivoje a zadostuje za oceno pospeška.

## 5.15 Merjenje mase

Masa je definirana kot lastnost snovi. Merimo jo v gramih (g) ali kilogramih (kg), ter z izpeljanimi enotami. Merjenje mase je ravno tako pomembno kot merjenje pretoka, saj je neposredno povezano z denarjem. Večinoma za merjenje mase izkoriščamo težnostni pospešek tako, da prevedemo maso v silo teže.

**Tehtnice (ang. scales).** Tehtnice izkoriščajo vpliv težnostnega pospeška na maso. Merjenje sile teže lahko izvedemo s kakršnim koli merilnikom sile, ali pa uporabimo ravnotežno metodo, kjer na nasprotnih koncih gredi delujemo z nasprotnima silama in gred uravnotežimo v vodoravnem položaju. Takšna oblika merjenja je najstarejša in zelo precizna, žal pa tudi zamudna, kadar jo izvajamo tako, da neznanu maso skušamo uravnotežiti z znanimi diskretnimi etaloni mase. Bolj ugodno za sprotno meritev je, če neznanu maso uravnotežimo z neko elektromagnetno silo.

**Lastna frekvenca vzmetnega nihala v breztežnem stanju.** V breztežnem stanju tehtnic ne moremo uporabljati, lahko pa se zatečemo k pospešku, ki ga sami ustvarjamo. Neznanu maso pritrdimo na vzmet, medtem ko ima sistem zanemarljivo trenje (dušenje). Maso zanihamo in izmerimo lastno frekvenco nihanja sistema  $f$ . Ker velja:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (5.33)$$

kjer je  $m$  masa sistema in  $k$  koeficient vzmeti, lahko izračunamo maso kot:

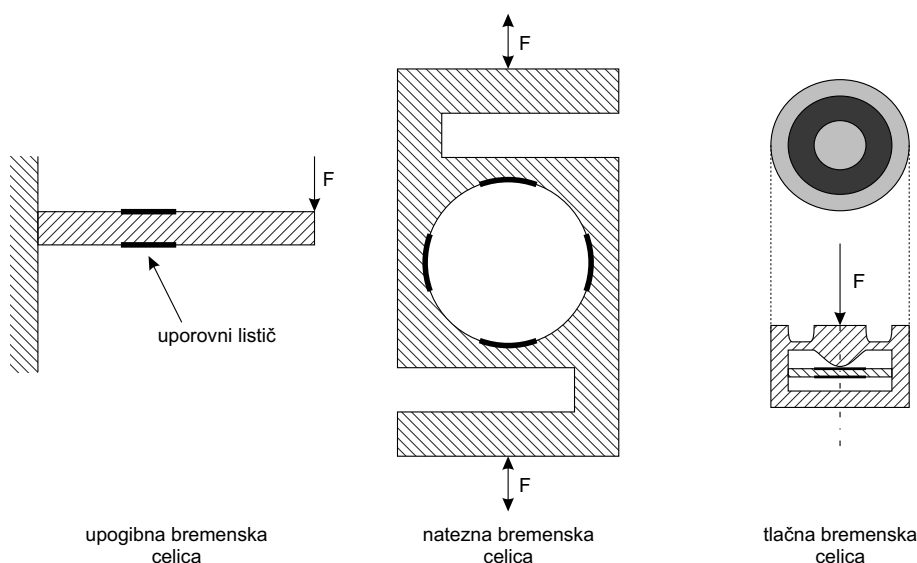
$$m = \frac{k}{4\pi^2 f^2} \quad (5.34)$$

Kvadratna odvisnost mase od frekvence pa pomeni, da moramo frekvenco meriti zelo natančno, sicer naredimo veliko napako pri masi.

## 5.16 Merjenje sile

Sila je definirana kot veličina, ki deluje na objekt tako, da ga pospešuje. Enota je Newton (N), ki je definiran kot sila, ki objekt mase 1 kg pospešuje s pospeškom  $1 \text{ m/s}^2$ . Merjenje sile uporabljamo v raznih procesih, včasih pa je to tudi primarni merilnik za merjenje drugih veličin, kot na primer mase. Silo navadno prevedemo v deformacijo neke elastične snovi, katere raztezek merimo, lahko pa jo prevedemo tudi na meritev tlaka.

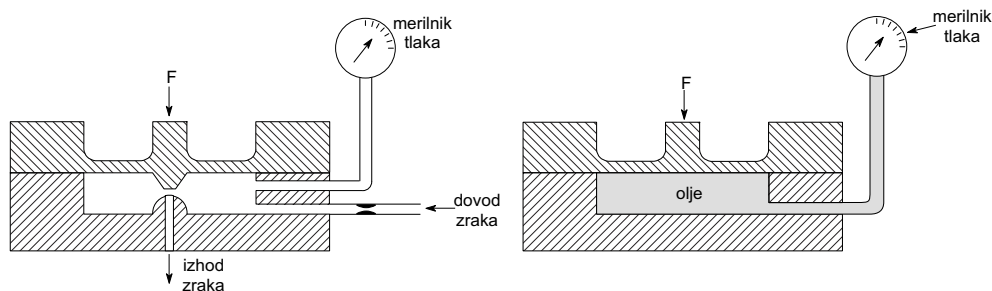
**Merilne (bremenske) celice (ang. load cells).** Merilnike za merjenje sile imenujemo bremenske ali merilne celice. Najbolj pogoste bremenske celice prevajajo silo v elastično deformacijo, ki jo merimo z uporovnimi lističi ali pa neposredno s piezokristalom. Nekaj tipov bremenskih celic je prikazanih na sliki 5.70. Različne oblike bremenskih celic so namenjene



Slika 5.70: Nekaj različnih tipov bremenskih celic:  $F$  – sila

merjenju različno delujočih sil. Natezne celice so namenjene merjenju sil, ki delujejo v nasprotnih smereh, upogibne celice so namenjene merjenju sil napram nepremičnim objektom (tehtanje), tlačne bremenske celice pa so namenjene točkasto delujočim silam, ki delujejo napram podlagi (tehtanje, merjenje sil potisnih reakcijskih in raketnih motorjev). Kot že rečeno, lahko izvedemo tudi pretvorbo v tlak. V tem primeru lahko merimo tlak zraka ali pa olja. Primera zračnih in oljnih tlačnih bremenskih celic sta na sliki 5.71. Vse bremenske celice je potrebno pred uporabo umeriti, ker so deformacije pri raznih oblikah preveč kompleksne,



Slika 5.71: Pnevmatška in oljna bremenska celica:  $F$  – sila

da bi relacijo med izhodnim signalom in silo lahko določili računsko. Na trgu obstajajo bremenske celice, ki lahko merijo sile od najmanjših pa do največjih znanih sil. Umerjamo jih z etaloni mase.

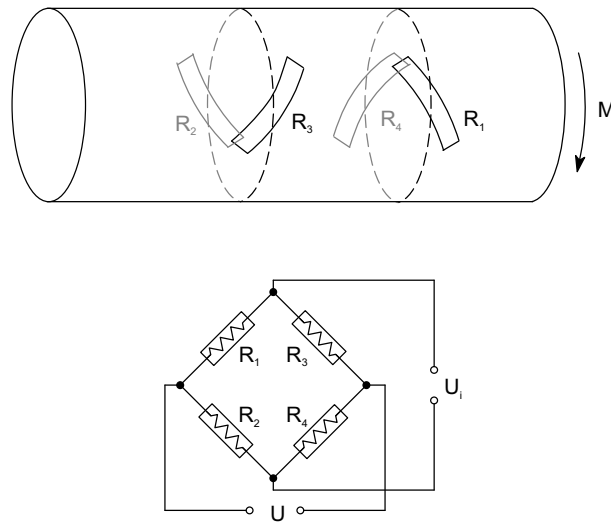
## 5.17 Merjenje navora

Navor je sila, ki deluje na ročico. Merimo ga v Newton–metrih (Nm). Ena od metod uporablja kar definicijo navora, ki pa je uporabna le kadar merimo navor na gredi, ki miruje. Za merjenje navora na vrtečih se gredeh pa merimo torzijo kot posledico delovanja navora. Za merjenje navora si moramo merilnik običajno narediti sami, ker so to vedno izvedbe po naročilu.

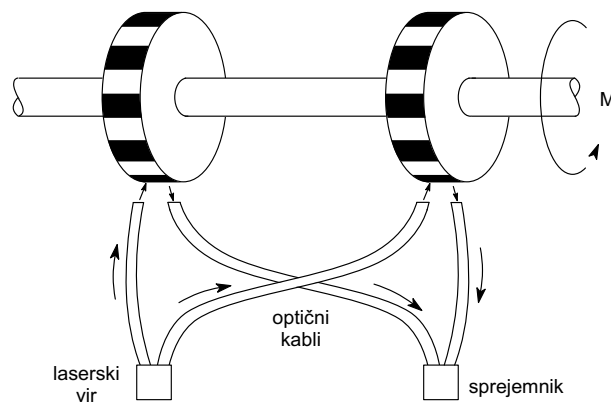
**Merilnik z uporovnimi lističi.** Za merjenje navora najpogosteje uporabljamo uporovne lističe. Potrebujemo štiri uporovne lističe, ki jih na površino okrogle gredi namestimo pod kotom glede na smer rotacije, paroma na nasprotnih straneh. Lističe povežemo v Wheatstonov mostič, signal pa peljemo preko kratkostičnih obročev, magnetnega stika ali radijske komunikacije od gredi do sistema za zajem podatkov. Prikaz sistema je na sliki 5.72. Natančnost merilnika je predvsem odvisna od kvalitete lepljenja uporovnih lističev in od lastnosti materiala gredi.

**Optični merilnik.** Zelo podoben merilniku z uporovnimi lističi je optični merilnik. Ravno tako merimo torzijo gredi, le da v tem primeru pritrdimo na gred kolesa s periodičnimi črtnimi vzorci na obodu. Na mirujočo podlago pa pritrdimo optična merilnika, ki črna vzorca pretvorita v vlaka pulzov. Ko je gred neobremenjena vlaka impulzov nista zamaknjena, z obremenitvijo pa se začne kot zamika spreminjati. Prikaz merilnika je na sliki 5.73. Merilnik je manj občutljiv za montažo kot uporovni lističi, paziti pa moramo, ker je izhod merilnika periodičen, kar lahko vnese veliko napako v merjenje navora.

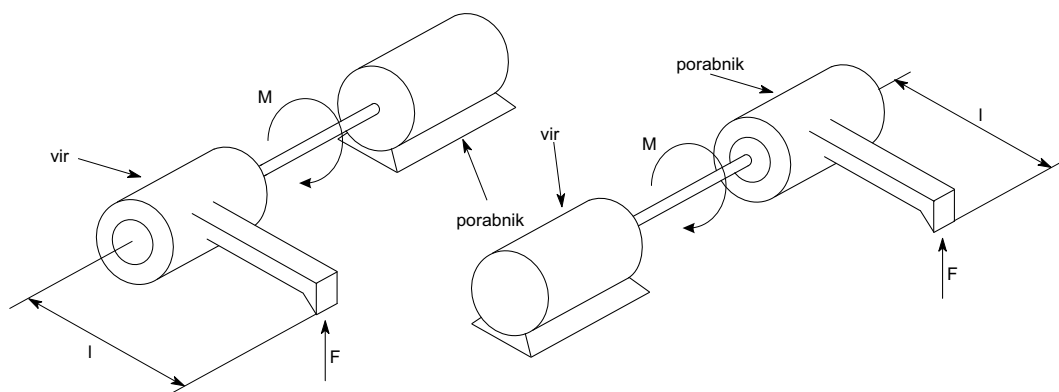
**Merjenje sile na ročici.** Merjenje sile na ročici je uporabno samo za gredi, ki se ne vrtijo ali pa za merjenje navora motorjev na ohišju. Merilnik je sestavljen iz ročice, ki je na eni strani pritrdjena na merjeno gred ali ohišje motorja, na drugi strani pa je podprta na merilnik sile. Prikaz merilnika je na sliki 5.74. Pri tem merilniku je potrebno paziti, da se merjena gred ali ohišje opira le na merilno ročico, sicer navor, ki ga izmerimo ni edini navor, ki deluje na merjeni objekt.



Slika 5.72: Merilnik navora z uporovnimi lističi:  $M$  – navor,  $R_1$  do  $R_4$  – uporovni lističi,  $U$  – napajalna napetost,  $U_i$  – izhodna napetost



Slika 5.73: Optični merilnik navora:  $M$  – navor



Slika 5.74: Merilnik navora z ročico:  $M$  – navor,  $F$  – sila

## 5.18 Merjenje tlaka

Merjenje tlaka je zelo pomembna meritev v procesni industriji. Tlak je običajno definiran samo za tekočine. Predno se lotimo opisovanja merilnikov pa moramo definirati nekaj pojmov, ki natančneje določajo pomen izmerjenih tlakov.

- Absolutni tlak ( $p_a$ ) je merjen glede na absolutno vrednost tlaka 0, ki ga lahko dobimo samo v prostoru, kjer ni materije ali pa je temperatura prostora enaka absolutni ničli (0 K).
- Diferencialni tlak ( $p_d$ ) je razlika dveh merjenih tlakov.
- Relativni tlak ( $p_r$ ) je poseben primer diferencialnega tlaka, kjer je atmosferski tlak ( $p_{atm}$ ) uporabljen kot referenčna veličina.
- Nadtlak je pozitiven relativni tlak.
- Vakuum je negativen relativni tlak.

Tlak je definiran kot sila, ki deluje na neko površino in ga merimo v Pascalih (Pa). Obstajajo pa še druge enote, kot so bar, mmH<sub>2</sub>O in mmHg ali torr, ki jih mednarodni standard še dopušča. Pretvorniki med njimi pa so naslednji:

- 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa = 100 kPa – približno enako tlaku na morski gladini pri temperaturi 0°C.
- 1 mmH<sub>2</sub>O = 0,981 Pa.
- 1 mmHg = 1 torr = 131,579 Pa, ali 100 kPa = 760 mmHg.

Pri tem velja pripomniti, da so tako milimetri vodnega stolpca kot milimetri stolpca živega srebra posledica načina meritve in ne prava enota za tlak. V tlak ju preračunamo preko enačbe:

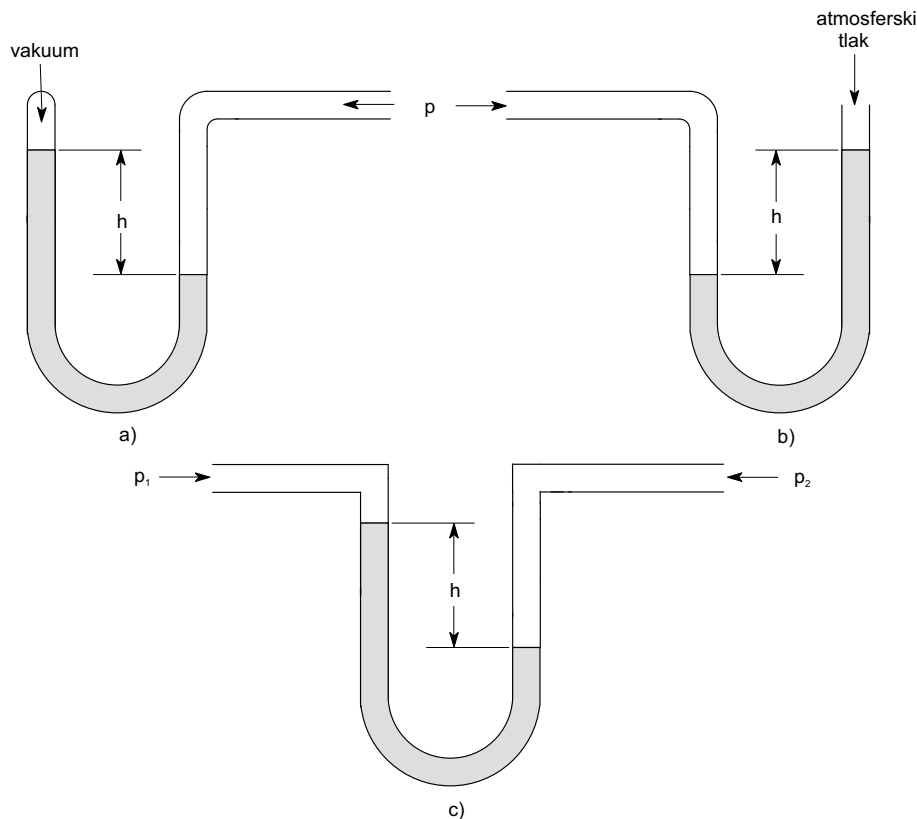
$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (5.35)$$

kjer je  $\rho$  gostota kapljevine,  $g$  težnostni pospešek in  $h$  višina stolpca. Temperatura ima velik vpliv na tlak, kar je posebno očitno pri plinih. Vpliv je celo tako velik, da lahko meritev tlaka in temperature jemljemo kot zamenljivi meritvi. Poleg vpliva na natančnost meritve pa temperatura lahko vpliva na delovanje merilnika, zato moramo pri izbiri merilnikov vedno upoštevati njihovo temperaturno območje delovanja. Območje tlakov v tehniki lahko razdelimo na: ultra nizko področje (visoki in ultra visoki vakuum), ki zajema območje od 100 pPa do 100 mPa, nizko področje (srednji vakuum), ki zajema območje od 100 mPa do 3 kPa, srednje področje, ki zajema območje od 3 kPa do 100 MPa in visoko področje, ki zajema tlake nad 100 MPa. Vsako od teh področij zahteva svoj tip merilnikov.

### 5.18.1 Merjenje srednjih tlakov

Področje srednjih tlakov zavzema vrednosti od 3 kPa pa do 100 MPa. To je glavno področje, ki ga uporabljamo v procesni industriji, zato je tudi najboljše pokrito z različnimi merilniki.

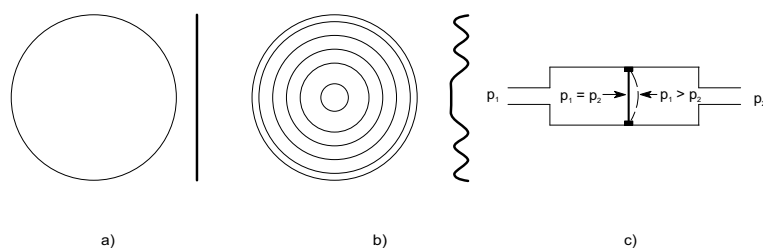
**Manometer (ang. U-tube manometer).** Najstarejši merilniki tlaka so tekočinski manometri. Priljubljeni so zato, ker ne potrebujejo referenčnega merilnika za umerjanje, pač pa jo lahko zelo dobro izvedemo kar računsko, preko pretvorbe tlaka in nivoja stolpca kapljevine (enačba (5.35)). Sestavljeni so iz prozorne (največkrat steklene) cevi, ki je zavita v obliki črke U. V cevi se nahaja kapljevina, ki je največkrat živo srebro. Merilnik nato pretvarja tlak tekočine v pomik nivoja kapljevine. Prikaz merilnikov za merjenje različnih tlakov je na sliki 5.75. Manometri slabo pokrivajo višje vrednosti srednjega področja, ker takrat dobimo pre-



Slika 5.75: Manometer: a) merjenje absolutnega tlaka, b) merjenje relativnega tlaka, c) merjenje diferencialnega tlaka,  $p$  – merjeni tlak,  $p_1$  in  $p_2$  – merjena tlaka in  $h$  – razlika nivojev

velike pomike nivoja, poleg tega potrebujejo stalno navpično orientacijo, zato niso primerni za uporabo v mobilnih sistemih. Problematičen je tudi električen izhod merilnika, ker moramo po cevi napeljati uporovno žico za detekcijo nivoja, medtem ko živo srebro prevzame vlogo drsnika. Takšne rešitve se danes redko uporabljajo, ker imamo na voljo bolj primerne merilnike tlaka.

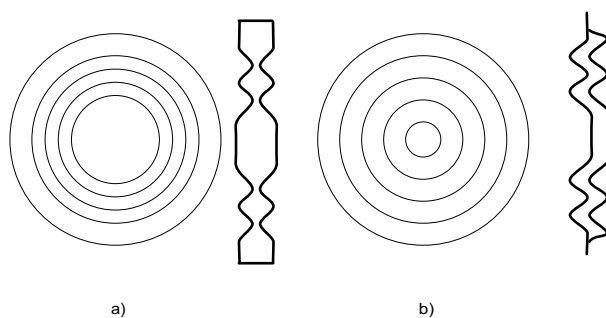
**Opne (ang. diaphragms).** Opne so mehanski merilniki, ki pretvarjajo tlak v pomik oz. deformacijo. Narejene so iz obstojnih in elastičnih kovinskih materialov ter gume, najlona, teflona, ipd. Opne so na robovih vpete v nosilno konstrukcijo, tlak pa deformira osrednji del. Deformacije lahko merimo z merilniki pomika, zelo pogosta je uporaba uporovnih lističev. Prikaz različnih tipov open in njihovega delovanja je na sliki 5.76. Opna ima poleg naloge pretvorbe tlaka v pomik lahko tudi zaščitno vlogo, saj preprečuje izlitje kaplje-



Slika 5.76: Opne: a) gladka opna, b) nagubana opna, c) delovanje opne,  $p_1$  in  $p_2$  – merjena tlaka

vin v notranjost merilnika. Opne zato lahko uporabljamo za merjenje tlakov agresivnih in strupenih tekočin, karakteristike pa določamo z različno nagubanostjo, ki hkrati zmanjšuje občutljivost merilnika. Paziti pa moramo, da ne prekoračimo maksimalnega dovoljenega tlaka. Prekoračitev lahko poškoduje merilnik ali toliko deformira opno, da je potrebno ponovno umerjanje. Merilnike umerjamo z znanimi tlaki, glede na debelino, lastnosti materiala in obliko pa imajo lahko zelo nelinearne karakteristike.

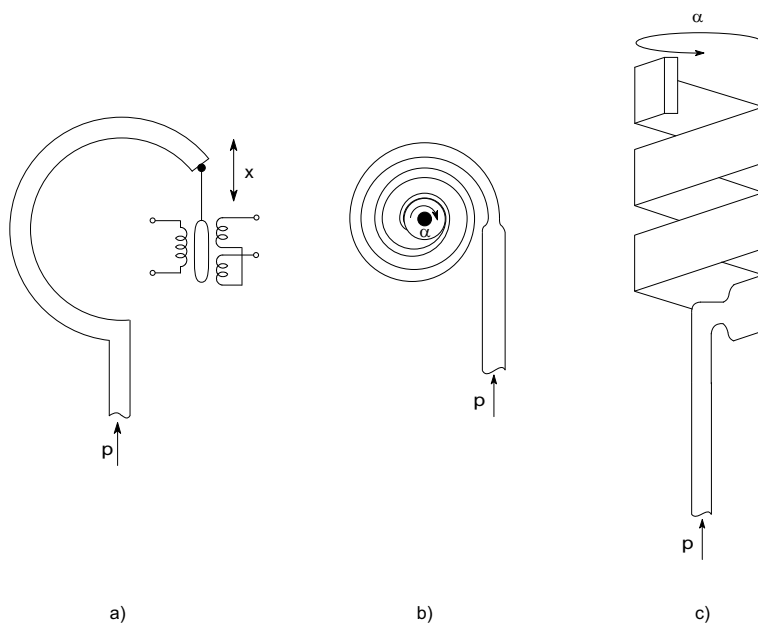
**Kapsule (ang. capsules, aneroid gauges).** Kapsule so v resnici dvoslojne opne. Merilnik je sestavljen iz dveh open, ki sta na robu zavarjeni, med njima pa je ujet plin pod nekim znanim tlakom. Kapsula se zato širi ali krči glede na zunanji tlak. Prikaz dveh izvedb kapsul je na sliki 5.77. Za ojačitev signala pomika navadno uporabljamo več kapsul, ki jih namestimo



Slika 5.77: Kapsule: a) lečasti tip, b) ugnezdjeni tip

drugo na drugo. Spodnja kapsula leži na podlagi, pomik pa merim na zgornji kapsuli. Za merjenje pomika lahko uporabimo poljuben merilnik pomika, ki lahko meri pomike reda nekaj deset milimetrov. Tipičen primer uporabe je klasični letalski višinomer. Narejene so iz podobnih materialov kot opne a se običajno uporabljajo le za merjenje zračnih tlakov.

**Bourdonove cevi (ang. Bourdon tubes).** Zelo pogosti klasični merilniki tlaka so Bourdonove cevi. Izkoriščajo vpliv tlaka na zavito cev, ki je na enem koncu zaprta. Tlak poskuša cev izravnati, zato se zaprti konec cevi pomika v odvisnosti od tlaka. Prikazi treh tipičnih izvedb merilnikov so na sliki 5.78. Bourdonove cevi zelo dobro pokrivajo srednje območje tlakov in dajejo dovolj velike pomike ali zasuke na tem področju. Slabši odziv imajo le v spodnjem delu srednjega področja, na zgornjem delu področja pa pokrivajo deloma tudi merjenje visokih tlakov. Za merjenje diferencialnih tlakov potrebujemo dva merilnika. Izkazujejo opazno mehansko histerezo, zato je ponovljivost nekoliko slabša. So problematični za

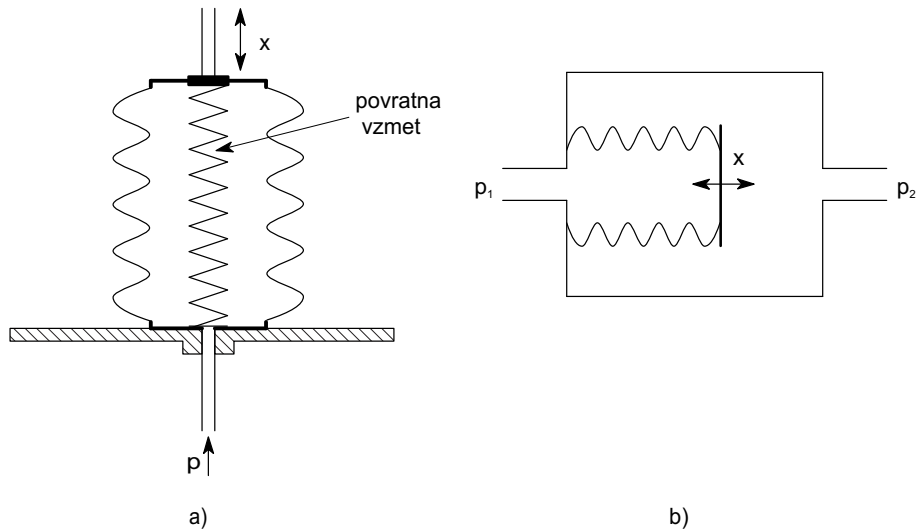


Slika 5.78: Bourdonove cevi: a) oblika C, b) spiralna oblika, c) vijačna oblika,  $p$  – tlak,  $x$  – pomik,  $\alpha$  – zasuk

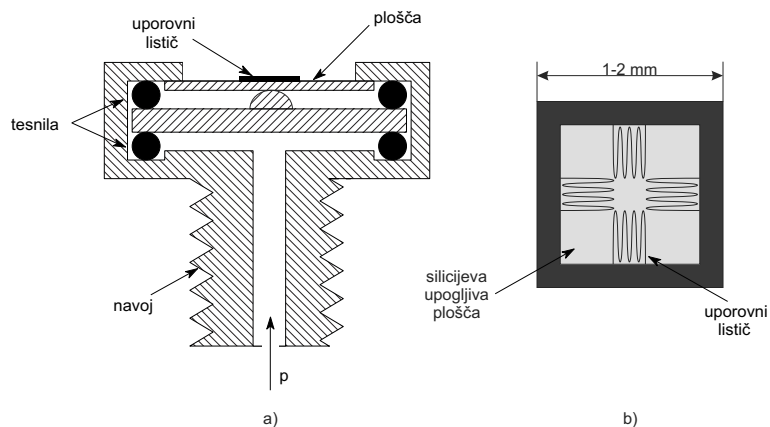
umerjanje, še posebno, kadar merimo tlak kapljev in so zelo občutljivi na udarce in temperaturo. Če prekoračimo maksimalni dovoljeni tlak merilnika pride lahko do resnih poškodb, v najboljšem primeru je potrebna ponovna umerjanje. Narejeni so iz kovinskih zlitin, ki so dovolj elastične in dovolj obstojne, da lahko merilniki brez vzdrževanja dolgo delujejo.

**Mehovi (ang. Bellows).** Mehovi spadajo v isti razred kot Bourdonove cevi in dobro pokrivajo srednje področje tlakov. So natančnejši od Bourdonovih cevi, a nimajo tako velikega območja. To so kovinski cilindri, ki imajo plašč oblikovan tako, da se lahko vzdolžno krčijo in raztegujejo kot meh. Na eni strani so zaprti, na drugi strani pa nanje priklopimo merjeni tlak. Za referenco skrbi vzmet, ki se nahaja znotraj meha. Prikaz merilnika je na sliki 5.79. Z merilnikom lahko merimo tako absolutne kot diferencialne tlake, so obstojni, a občutljivi na udarce, temperaturo in prekoračitve maksimalnih tlakov.

**Merilnik z upogljivo ploščo (ang. flexing plate sensor, piezoresistive pressure gauge).** Danes je najpogostejši merilnik tlaka merilnik z upogljivo ploščo. Obstaja veliko izvedb, od katerih so najnovejše v celoti izdelane na silicijevem substratu podobno kot polprevodniški elementi. Merilnik ima za osnovo ploščo, na kateri so pritrjeni ali vdelani uporovni lističi. Plošča je ščitena še z opno, ki prenaša silo merjenega tlaka na ploščo. Pri silicijevih merilnikih opne navadno ni. Prikaza osnovne in silicijeve izvedbe merilnika sta na sliki 5.80. Ta tip merilnika dobro pokriva srednje območje tlakov, njegova največja prednost pred ostalimi pa je električni izhod, pri silicijevi izvedbi pa še velikost. Osnovna varianta merilnika je zelo robustna, saj je izdelan iz materialov, ki so odporni na korozijo, zato lahko z njim merimo tako kapljevine kot pline. Silicijev merilnik pa je bolj občutljiv in navadno ni varovan z membrano. Namenjen je merjenju tlakov plinov, medtem ko mora imeti za merjenje kapljev posebno zaščito. Merilnik je tudi temperaturno omejen do  $150^{\circ}\text{C}$ , ker sicer pride



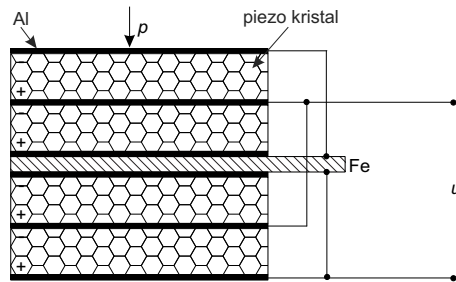
Slika 5.79: Mehovi: a) merjenje absolutnega tlaka, b) merjenje relativnega tlaka,  $p$  – merjeni tlak,  $p_1$  in  $p_2$  – merjena tlaka in  $x$  – pomik



Slika 5.80: Merilnik tlaka z upogljivo ploščo: a) osnovna izvedba, b) izvedba na silicijevi osnovi,  $p$  – merjeni tlak

do porušitve kristalne strukture stika P-N.

**Piezoelektrični merilnik tlaka (ang. piezoelectric pressure gauge).** Piezoelektrični merilnik je sestavljen iz sklada štirih piezokristalov, ki so med seboj ločeni z aluminijasto folijo, na sredini pa še dodatno z železno ploščico. Prikaz merilnika je na sliki 5.81. Za tovrstne merilnike uporabljajo večinoma Turmalinov kristal. Ker Piezoelektrični efekt s časom izzzveni, je merilnik primeren samo za merjenje hitro spreminjajočih se signalov. Merilnik je lahko zelo majhen, podoba kot silicijev merilnik z upogljivo ploščo, dobro pa pokriva zgornji del srednjega območja tlakov in sega tudi v visoke tlake. Zgornjo temperaturo ima omejeno na okoli  $300^{\circ}\text{C}$ , sicer pride do porušitve kristalne mreže.

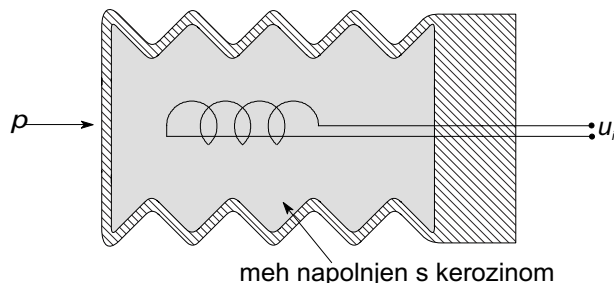


Slika 5.81: Piezoelektrični merilnik tlaka:  $p$  – merjeni tlak, Fe – železna ploščica in Al – aluminijasta folija

### 5.18.2 Merjenje visokih tlakov

Merjenje visokih tlakov, torej tlakov nad 100 MPa zahteva posebne merilnike. Nekaj merilnikov za srednje področje tlakov navadno zdrži do nekaj 100 MPa, pri višjih tlakih pa pride že do tako velikih deformacij merilnih elementov, da pridemo v plastično področje materiala. Potrebujemo torej merilnik, ki bo imel merljive deformacije šele nad 100 MPa, s tem pa se odpovemo možnosti, da bi z njim lahko merili tlake v srednjem območju.

**Uporovni merilnik tlaka (ang. Bridgman gauge).** Uporovni merilnik tlaka je sestavljen iz močnega kovinskega meha, ki je napolnjen s kerozinom. V kerozinu pa imamo uporovno žico iz manganina. Prikaz merilnika je na sliki 5.82. Pri zelo visokih tlakih pride do rever-



Slika 5.82: Uporovni merilnik tlaka:  $p$  – merjeni tlak,  $u_i$  – izhod merilnika

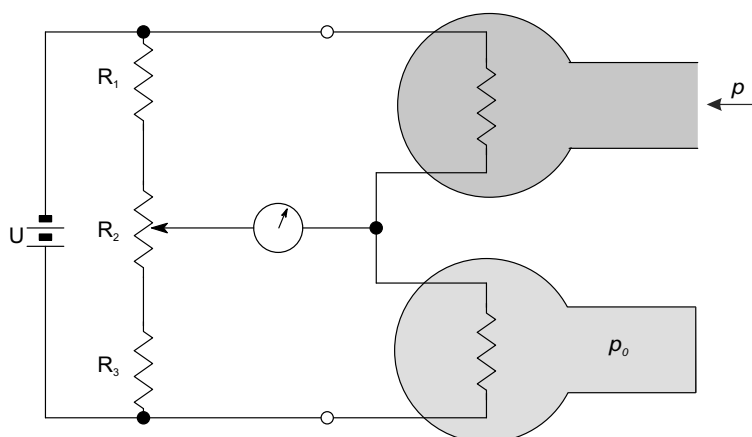
zibilnih sprememb na kristalni mreži manganina, ki spreminjajo upornost žice. Merilnik tako napajamo z električnim virom in merimo upornost. Efekt ni merljiv pod 100 MPa, merimo pa lahko tlake v področju GPa in sunke celo do TPa. Zaradi hitrega odziva tovrstne merilnike uporabljajo za merjenje prehodnih pojavov pri najvišjih tlakih.

### 5.18.3 Merjenje nizkih tlakov (srednjega vakuuma)

Problem merjenja nizkih tlakov ali srednjega vakuuma (od 100 mPa do 3 kPa) je, da ima tekočina premalo energije, da bi lahko povzročila merljivo deformacijo materiala, zato moramo poseči po drugih principih. Za merjenje nizkih tlakov izkoriščamo vpliv tlaka na konvekcijsko hlajenje uporovne žice.



**Piranijev merilnik (ang. Pirani gauge).** Piranijev merilnik je sestavljen iz uporovne žice, ki je speljana skozi stekleno bučko v kateri imamo merjeni plin. Ker so vplivi hlajenja na upornost uporovne žice pri nizkih tlakih majhni, moramo merilnik vezati v mostično vezavo, kjer imamo dva referenčna upora in dva Piranijava merilnika, od katerih je eden napolnjen z merjenim plinom pri referenčnem tlaku, drugi pa je odprt napram plinu katerega tlak merimo. Prikaz merilnika je na sliki 5.83. Merilnik moramo umeriti za vsak plin pose-



Slika 5.83: Piranijev merilnik tlaka:  $p$  – merjeni tlak,  $p_0$  – referenčni tlak

bej, pokriva pa območje od 10 mPa do 100 Pa, pri višjih tlakih je vpliv spremembe tlaka na spremembo konvekcijskega ohlajanja premajhen, da bi ga lahko merili.

#### 5.18.4 Merjenje ultra nizkih tlakov (visokega in ultra visokega vakuuma)

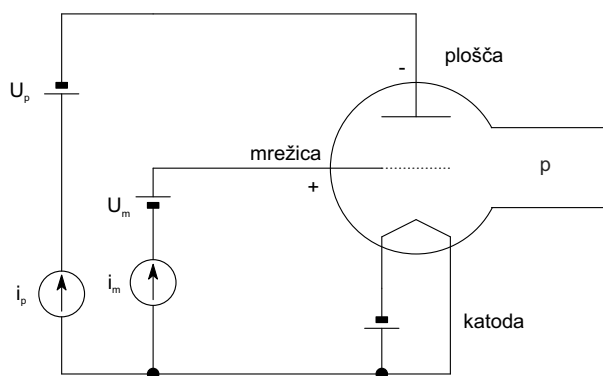
Za merjenje ultra nizkih tlakov (100 mPa – 100 pPa) potrebujemo spet drugačen princip merjenja. Število molekul plina v volumnu je že tako majhno, da konvekcijskega ohlajanja skoraj ni več, še vedno pa jih je dovolj, da jih lahko ioniziramo in merimo tok, ki ga s tem povzročimo.

**Ionizacijski merilnik (ang. ionisation gauge).** Ionizacijski merilnik uporablja hitre elektrone za ionizacijo merjenega plina. V osnovi je to trioda, ki ima cev odprto napram merjenemu plinu. Prikaz merilnika je na sliki 5.84. Za delovanje merilnika potrebujemo relativno visoke napetosti, na plošči imamo običajno 30 V, na mrežici pa kar nekaj 100 V. Iz vroče katode sevajo elektroni, ki jih pospešimo proti mrežici. Na poti zadevajo v molekule plina in jih ionizirajo, ione pa potem pritegneta plošča in mrežica in tako dobimo tokova skozi mrežico  $i_m$  in skozi ploščo  $i_p$ . Iz merjenih tokov izračunamo tlak plina po enačbi:

$$p = \frac{1}{S} \frac{i_p}{i_m}, \quad (5.36)$$

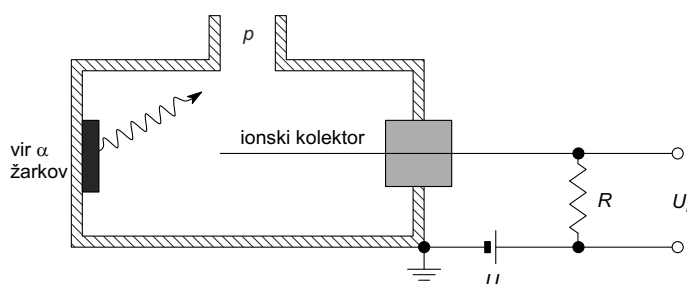
kjer je  $S$  konstanta merilnika, ki je odvisna od plina. Merilnik je namenjen samo za zelo nizke tlake, pri višjih tlakih pa zaradi velikih tokov pregori katoda.

**Alfatron (ang. alphanatron).** Alfatron je zelo podoben ionizacijskemu merilniku, le da imamo drugačen princip ionizacije. Za ionizacijo merjenega plina uporabljamo radioaktivne ele-



Slika 5.84: Ionizacijski merilnik tlaka:  $p$  – merjeni tlak,  $U_p$  – napetost na plošči,  $U_m$  napetost na mrežici,  $i_p$  – tok skozi ploščo,  $i_m$  – tok skozi mrežico

mente, ki pri svojem razpadu oddajajo v glavnem helijeva jedra ali alfa delce. Ostali del merilnika je enak kot pri ionizacijskem merilniku. Prikaz merilnika je na sliki 5.85. Merilnik



Slika 5.85: Alfatron:  $p$  – merjeni tlak,  $U_i$  – izhodna napetost,  $U$  – napajalna napetost,  $R$  – merilni upor

je namenjen zelo nizkim tlakom, a vseeno ne dosega najnižjih tlakov, ki jih lahko merimo z ionizacijskimi merilniki. Merilnik pa deluje do višjih tlakov, saj ni nevarnosti uničenja ionizatorja plina. Ko je koncentracija molekul plina dovolj visoka pride merilnik v nasičenje in nadaljnega višanja tlaka z merilnikom ne zaznamo več. Maksimalni tlak je tako določen z intenzivnostjo vira alfa delcev. Za natančne meritve moramo merilnik občasno umeriti zaradi slabljenja vira.

## 5.19 Merjenje temperature

Temperatura je veličina, ki označuje notranjo energijo materije. Ker notranja energija materije pomeni gibanje ali vibracijo molekul snovi, je absolutna ničla temperature definirana s stanjem, ko vse molekule snovi obmirujejo. Za merjenje temperature uporabljamo veliko različnih skal. V pogostejši uporabi najdemo tri skale, od katerih pa je samo ena sprejeta v mednarodni sistem enot SI in to je skala, ki meri temperaturo v Kelvinih (K). Skala ima vrednost nič postavljeno v točko absolutne ničle, 1 K pa je določen z eno stotino območja med trojno točko čiste vode in njenim vreliščem. Zelo podobna ji je Celzijeva skala, ki ima 1 °C enako definirano kot Kelvinova 1 K, razlika pa je v tem, da ima skala izhodišče v trojni

točki vode, zato je Celzijeva skala premaknjena za 273,15 stopinj napram Kelvinovi skali. Celzijeva skala se tradicionalno uporablja skoraj povsod po svetu razen v ZDA. V ZDA pa uporabljajo še Fahrenheitovo skalo, ki je precej drugačna in ima za osnovo tri točke. Izhodišče skale je definirano kot temperatura, ki jo ima mešanica vode, ledu in amonijevega klorida v enakih razmerjih. Naslednja točka je temperatura mešanice ledu in vode, zadnja pa telesna temperatura. Originalno je Fahrenheit drugo točko določil kot 30 stopinj, tretjo pa kot 90 stopinj. Zaradi enostavnosti zarisovanja skale pa je to kasneje spremenil in temperaturo mešanice vode in ledu določil kot 32 stopinj, telesno temperaturo pa kot 96 stopinj, tako je lahko vmesne stopinje dobil z enostavnim deljenjem razdalj na polovico. Današnja skala pa je še nekoliko popravljena in sicer tako, da ima vrelišče vode z definicijo postavljeno na 212 stopinj, tako je sedaj telesna temperatura 98 stopinj. Uporablja se še četrta skala, ki je imenovana po Rankineu, ki ima enako delitev na stopinje kot Fahrenheitova skala, le da je izhodišče postavljeno v absolutno ničlo. Enačba, s katero pretvarjamo stopinje Fahrenheita ( $^{\circ}F$ ) v Kelvine se glasi:

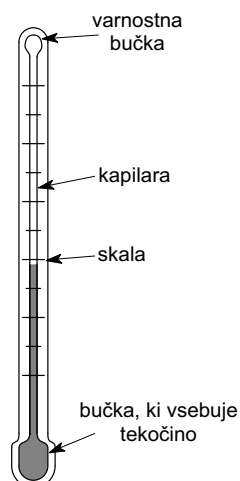
$$[K] = ([^{\circ}F] + 459.67) \cdot \frac{5}{9}. \quad (5.37)$$

Vsak merilnik temperature moramo vedno umeriti v nekaj točkah preden je uporaben za natančne meritve. Umerjanje izvedemo z mešanici staljenega in trdnega materiala ter s točkami vrelišč materialov. Merjenje temperature je možno izvesti zelo natančno, paziti pa moramo, v kakšnem območju se nahajamo. Merjenje izredno nizkih temperatur okoli absolutne ničle je problematično, ker se gibanje atomov v snovi skoraj ustavi in so zelo redki sistemi, ki v takšnih temperaturah še lahko delujejo. Navkljub težavam je možno meriti temperature malo nad 1 K. Drugo problematično področje pa so temperature, kjer se snovi, iz katerih izdelujemo merilnike, talijo. V teh področjih pa moramo uporabiti brezkontaktno meritve. Pri brezkontaktnih meritvah ne pridemo v stik z vročim medijem ampak na temperaturo sklepamo glede na sevanje, ki ga merjeni medij oddaja. Poglejmo si nekaj najpogostejših merilnikov temperature.

### 5.19.1 Kontaktne metode merjenja

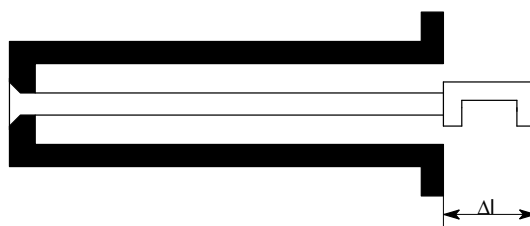
Pri kontaktnih metodah merjenja moramo paziti, da merilnik pride v ravnovesje s temperaturo merjenega objekta. Ker imajo merilniki določeno maso, tudi čas, ki ga potrebujejo, da pridejo v temperaturno ravnovesje z merjenim objektom ni zanemarljiv in ga moramo pri meritvah upoštevati.

**Tekočinski raztezni termometer (ang. liquid thermometer).** Najstarejši merilnik temperature je tekočinski raztezni termometer. V stekleni cevki imamo kapljevino, običajno sta to živo srebro ali alkohol, ki se s povečevanjem temperature razteza in se zato po cevki dviguje navzgor. Ker so temperaturni raztezki razmeroma majhni, speljemo kapljevino iz bučke, ki služi za rezervoar po kapilari ven. Povečanje volumna tekočine zaradi segrevanja postane v kapilari zelo očitno. Prikaz merilnika je na sliki 5.86. Območje merilnika je omejeno s točkama ledišča in vrelišča, pa tudi z dolžino kapilare. Če merilnik pregrejemo, navadno bučka počne in merilnik je uničen. Merilnik nima električnega izhoda, ga je pa možno dodelati, kar pa ni pogosta rešitev, saj obstajajo bolj primerni termometri, ki že imajo električni izhod.



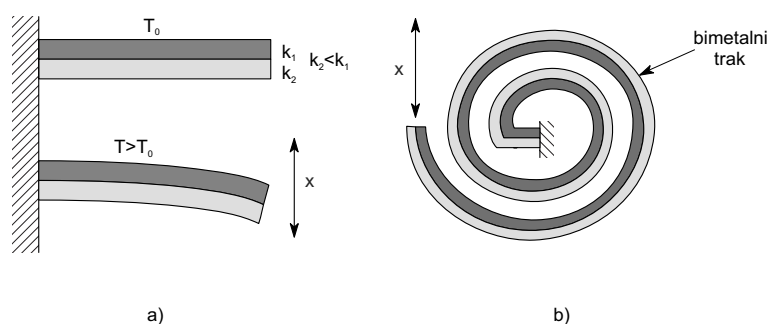
Slika 5.86: Tekočinski raztezni termometer

**Paličasti raztezni termometer (ang. metal thermometer).** Paličasti raztezni termometer je trdna izvedba razteznega termometra, ki ima precej manjše raztezke kot tekočinski termometer, zato pa raztezek proizvaja toliko večjo silo. Narejen iz ohišja, ki mora imeti čim večji razteznostni koeficient (kovina) in jedra, ki mora biti temperaturno čim manj občutljivo (keramika). Prikaz merilnika je na sliki 5.87. Zunanji del merilnika pride v neposredni kontakt

Slika 5.87: Paličasti raztezni termometer:  $\Delta l$  – temperaturni raztezek

s temperaturo merjenega objekta, kar raztegne ohišje, medtem ko palica ostane skoraj enako dolga in zato lahko potegne vzvod ali kakšen merilnik pomika. Omejitev merilnika predstavljajo minimalni merljivi pomiki, kar določa minimalno merjeno temperaturo in temperaturna obstojnost materiala, kar določa maksimalno merjeno temperaturo. Natančnost merilnika je slabša od tekočinskega razteznega termometra, primeren pa je za merjene velikih temperaturnih razlik pri visokih temperaturah.

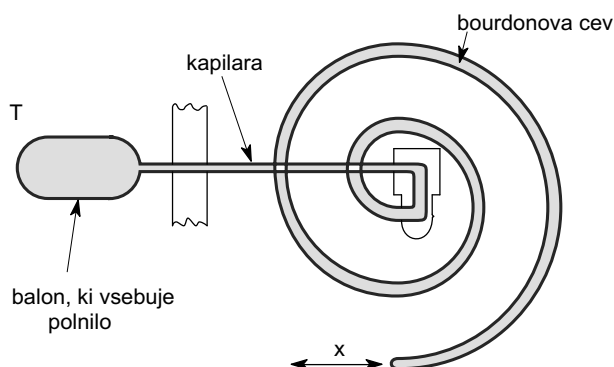
**Bimetalni termometer (ang. bi-metal thermometer).** Bimetalni termometer izkorišča raztezke dveh kovinskih materialov z različnima temperaturnima koeficientoma. S tem dobimo bistveno večje pomike kot pri paličastem razteznem termometru. Merilnik je sestavljen iz dveh zvarjenih kovinskih trakov, ki sta lahko ravna ali zavita v spiralo. Segrevanje ali ohlajanje trak deformira tako, da ga krivi v eno ali drugo stran. Prikaz merilnika je na sliki 5.88. Bimetalni termometri so pogosto uporabljeni kot termostati, kjer bimetalni trak uporabimo kot kontakt, ki ob sklenitvi povzroči neko akcijo. Območje je omejeno na temperaturno obstojnost pri visokih temperaturah in na merljivost učinka pri nizkih temperaturah, kar pa je



Slika 5.88: Bimetalni termometer: a) trak, b) spirala,  $x$  – pomik,  $T_0$  – referenčna temperatura,  $T$  – merjena temperatura,  $k_1$  in  $k_2$  – temperaturna razteznozna koeficienta

odvisno od izvedbe.

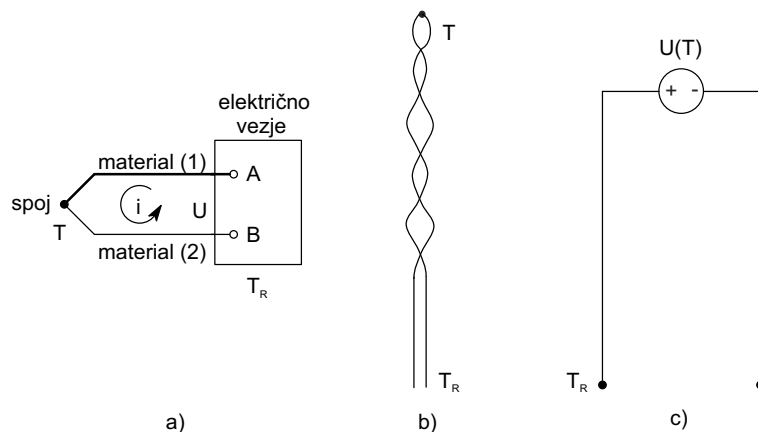
**Tlačni termometer (ang. Bourdon tube thermometer).** Tlačni termometri so Bourdonove cevi, ki so napolnjene s plinom, kapljevino ali paro in na eni strani zaprte, na drugi strani pa so podaljšane s kapilaro in balonom. Balon je hkrati shranjevalnik tekočine in temperaturna sonda. Ko se tekočina v balonu segreje, raztezek dvigne tlak v sistemu in Bourdonova cev se raztegne, kar je merilo za temperaturo. Prikaz sistema je na sliki 5.89. Območje merilnika je



Slika 5.89: Tlačni termometer:  $T$  – merjena temperatura,  $x$  – pomik

pogojeno z lastnostmi polnila. Maksimalna temperatura kapljevinskih merilnikov je odvisna od temperature uparjanja kapljevine, minimalna pa od ledišča. Pri plinskih merilnikih je zgornja meja omejena z materialom balona, spodnja pa s prehodom v kapljevinsko stanje, kar je podobno kot pri parnih merilnikih. Merilnik je občutljiv na udarce in ima opazno mehansko histerezo, zato je ponovljivost slaba.

**Termočleni (ang. thermocouples).** Termočleni so termometri, ki pokrivajo največje temperaturno območje med kontaktnimi merilniki. Sestavljeni so iz dveh žic različnih materialov, ki sta zvarjeni skupaj. Na zvaru pride, zaradi razlik v Fermijevih nivojih obeh materialov, do napetosti reda velikosti mikrovoltov, ki se spreminja v odvisnosti od temperature zvara, kar imenujemo Seebeckov pojav. Ker je pojav odvisen od lastnosti materiala na atomskem nivoju, je možno s temi merilniki meriti temperature skoraj do absolutne ničle. Prikaz merilnika je na sliki 5.90. V resnici je dovolj že stik med dvema kovinama, da pride to termona-



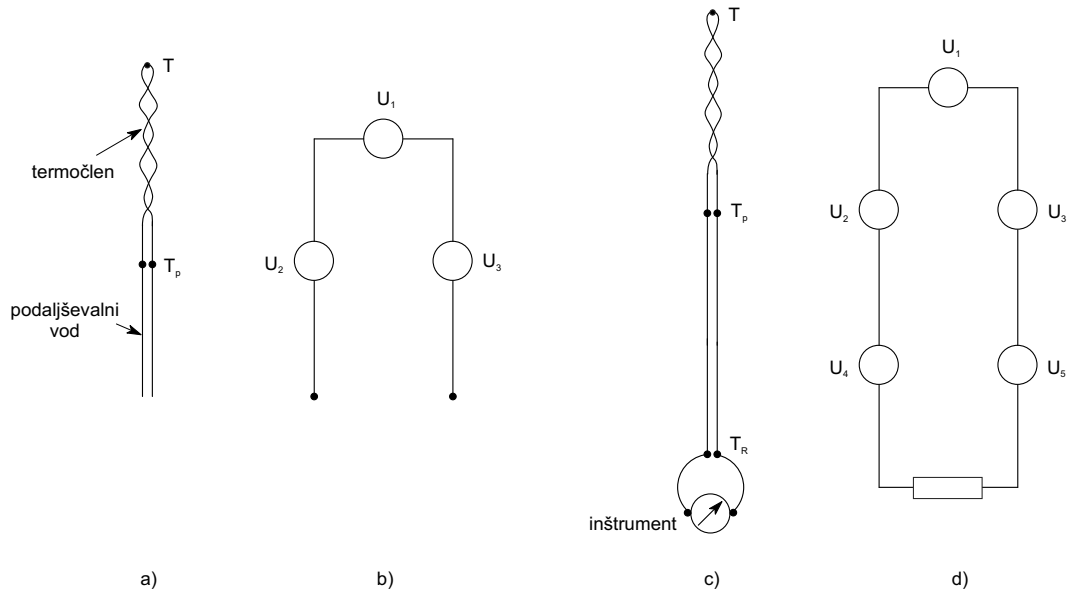
Slika 5.90: Termočlen: a) električna shema vezave termočlena, b) izgled termočlena, c) nado-mestna shema termočlena,  $T$  – merjena temperatura,  $T_R$  – referenčna temperatura,  $U(T)$  – termo napetost

petosti. To pomeni, da na sponkah, kjer termočlen priključimo na voltmeter ali ojačevalnik, pride do dveh dodatnih termočlenov, ki motita signal iz merilnega termočlena. Če žici iz različnih materialov zvarimo skupaj na obeh koncih in sta oba zvara na isti temperaturi potem v takšni zanki ne more teči tok, ker bi sicer to pomenilo, da lahko ustvarjamo energijo iz nič. Na obeh zvarih se ustvarita termonapetosti, ki sta po absolutni vrednosti enaki, po predznaku pa nasprotni in se uravnovesita. Ne glede na to, koliko termočlenov imamo v tokokrogu, so torej njihove napetosti v ravnovesju, kadar so vsi termočleni na isti temperaturi. Če le en zvar segrejemo, pa tok po zanki steče in sicer tako, da ohlaja zvar na višji temperaturi in segreva zvar na nižji temperaturi, kar imenujemo Peltierov pojav. Če torej ohranimo vse termočlene, razen merilnega, na isti temperaturi, lahko izmerimo napetost, ki je razlika termonapetosti merilnega termočlena in termočlenov na referenčni temperaturi. Pri vezavah termočlenov moramo biti torej zelo previdni, da vsak kontakt izvedemo na izotermnih sponkah, tako da so vsi vmesni termočleni na istih temperaturah. V vsakem primeru se trudimo, da je vmesnih termočlenov čim manj. Najbolje je, če lahko termočlen priključimo neposredno na ojačevalnik. Tako dobimo samo dva dodatna termočlena, ki ju vzdržujemo na isti znani temperaturi, nato pa ojačeni signal peljemo do vozlišča signalov vodenja. Vendar pa to ni možno. Ker termočleni prenesajo bistveno višje temperature kot elektronski ojačevalniki, moramo žice termočlena podaljšati, da so ojačevalniki na varnem mestu. To izvedemo s podaljševalnimi vodi, ki so iz žic enakega materiala kot sta žici termočlena, le da so materiali manj čisti kot tisti, ki jih uporabljamo za izdelavo termočlenov in zato tudi cenejši. Tako sicer na spojih ustvarimo termočlena, ki pa ustvarjata zelo majhni napetosti, ki ju lahko zanemarimo, če sta oba spoja na isti temperaturi. Primer realnih vezav termočlenov je na sliki 5.91. Glede na sliko 5.91 vidimo, da je napetost na inštrumentu  $U$  v resnici enaka:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5. \quad (5.38)$$

Če držimo temperature vmesnih vozlišč na stalni vrednosti, postanejo  $U_2$  do  $U_5$  konstantne napetosti, ki jih lahko računsko kompenziramo:

$$U = U_1 + C. \quad (5.39)$$



Slika 5.91: Realne razmere pri uporabi: a) vezava podaljševalnih vodov termočlena, b) nadomestno vezje vezave podaljševalnih vodov termočlena, c) vezava termočlena na inštrument, d) nadomestna shema vezave termočlena na inštrument,  $T$  – merjena temperatura,  $T_R$  – referenčna temperatura,  $T_p$  – temperatura podaljševalnih sponk,  $U_1$  do  $U_5$  – termoelektrične napetosti termočlenov

Navkljub kompenzaciji vmesnih termočlenov, pa lahko pride še do drugih napak. Če se žici med merilnim zvarom in sponkami stikata, se napetosti merilnega zvara in stika kompenzirata med seboj, na merilnih kontaktih pa dobimo napetost, ki je odvisna od temperature vmesnega stika. Takšnim neželenim stikom se izognemo tako, da žici termočlena izoliramo. Napake v merjenju vnaša tudi Peltierov pojav, ker ohlaja merilni termočlen, kar pa lahko omejimo, če dovolimo le majhne tokove skozi termočlen. Obstaja pa še Thomsonov pojav, ki ravno tako moti napetostni signal meritve. Thomsonov pojav je podoben Peltierovemu pojavu, le da je odvisen od gradienta temperature na vsaki posamezni žici in odvaja ali dovaja toploto sistemu odvisno od tega, ali teče tok v smeri temperaturnega gradienta ali nasproti. Tudi ta motilni pojav lahko obvladujemo z majhnimi tokovi skozi termočlen. Izhodna napetost  $U$  je približno linearno odvisna od temperature  $T$ :

$$U = \alpha T, \quad (5.40)$$

kjer je  $\alpha$  Seebeckov koeficient, ki ga podajamo v  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Za zelo precizne izračune pa uporabljamo polinomsko funkcijo temperature  $T$  desetega reda:

$$U = \sum_{i=1}^{10} \alpha_i T^i. \quad (5.41)$$

Na trgu obstajajo namenski ojačevalniki za termočlene, ki imajo izotermne sponke z integriranim Peltierovim členom za regulacijo temperature in merilnikom temperature. Izhod

ojačevalnikov pa je eden izmed standardnih signalov, ki se uporabljajo v sistemih vodenja. Obstaja pa tudi velika izbira standardnih termočlenov, ki so označeni s črkami. V tabeli 5.1 so zbrani vsi standardni termočleni, ki jih lahko dobimo na trgu. Izven serijsko obstaja še en

Tabela 5.1: Tabela standardnih termočlenov:  $T_c$  – Curiejeva temperatura

tip	pozitivni člen	negativni člen	$\alpha(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	območje ( $\text{K}(^\circ\text{C})$ )	opombe
B	Pt + 30% Rh	Pt + 6% Rh	10	323–2073 (50–1800)	—
C	W + 5% Re	W + 26% Re	15	273–2593 (0–2320)	za atmosfere brez $\text{O}_2$
E	kromel	konstantan	68	73–1173 (-200–900)	—
J	Fe	konstantan	55	233–1023 (-40–750)	$T_c = 1043 \text{ K}$
K	kromel	alumel	41	73–1623 (-200–1350)	$T_c = 627 \text{ K}$
N	nikrosil	nisil	39	3–1573 (-270–1300)	—
R	Pt	Pt + 13% Rh	10	273–1723 (0–1450)	—
S	Pt	Pt + 10% Rh	10	273–1723 (0–1450)	—
T	Cu	konstantan	43	73–623 (-200–350)	—

termočlen, ki je namenjen merjenju izjemno nizkih temperatur (tabela 5.2). Vsi termočleni so

Tabela 5.2: Tabela posebnih termočlenov

tip	pozitivni člen	negativni člen	$\alpha(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	območje ( $\text{K}(^\circ\text{C})$ )	opombe
–	kromel	Au + 0,03–0,15% Fe	15	1,2–600 (-271,8–327)	—

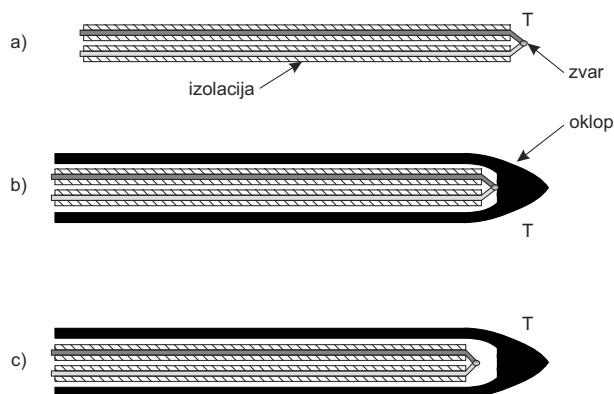
izvedeni v dveh natančnostih, ki sta odvisni od čistosti uporabljenih materialov. Pri tem pa velja omeniti še vpliv Curiejeve temperatur  $T_c$ , ki povzroči skok v karakteristiki termočlena. Sestava zlitin, ki jih uporabljamo v termočlenih je navedena v tabeli 5.3. Ker so termočleni

Tabela 5.3: Zlitine termočlenov

ime	sestava
alumel	95% Ni, 2% Mn, 2% Al, 1% Si
konstantan	55% Cu, 45% Ni
kromel	90% Ni, 10% Cr
nikrosil	84,5% Ni, 14% Cr, 1,5% Si
nisil	95,4% Ni, 4,5% Si, 0,1% Mg

zaradi uporabljenih materialov precej podvrženi koroziji in ker se zaradi visoke notranje upornosti merilnika ali ojačevalnika obnašajo kot antene, jih pogosto zaščitimo z oklopom. Oklop pa ima poleg zaščite pred agresivnim okoljem in elektromagnetnim valovanjem še neprijetno lastnost, da precej poveča časovno konstanto odziva merilnika. Tako poznamo tri možne variante montaže termočlenov, nezaščitene, oklopljene in ozemljene na oklop in oklopljene in neozemljene. Nezaščiteni imajo hiter odziv a so izpostavljeni elektromagnetnim motnjam in agresivni okolici. Oklopljeni in ozemljeni na oklop imajo nekoliko podaljšan čas odziva solidno zaščito pred elektromagnetnim valovanjem in so popolnoma zaščiteni pred vplivi okolja. Oklopljeni in neozemljeni pa imajo najdaljši odzivni čas a so dobro zaščiteni pred elektromagnetnimi motnjami in okoljem. Na sliki 5.92 so prikazane variante montaže

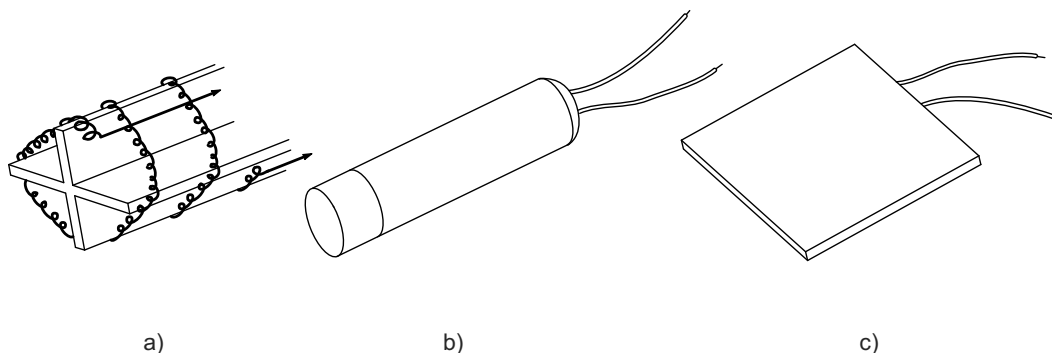




Slika 5.92: Načini montaže termočlenov: a) nezaščiten termočlen, b) oklopljen in ozemljen na oklop, c) oklopljen in neozemljen termočlen,  $T$  – merjena temperatura

termočlenov. Termočleni imajo zelo široko področje uporabe in dobro natančnost, če pravilno izvedemo priključke in ojačenje signalov. Vrednosti temperatur preračunavamo iz napetosti preko tabel, kjer moramo vedno upoštevati, da dobimo na izhodu merilnika napetost, ki je razlika merjene in referenčne temperature merilnika.

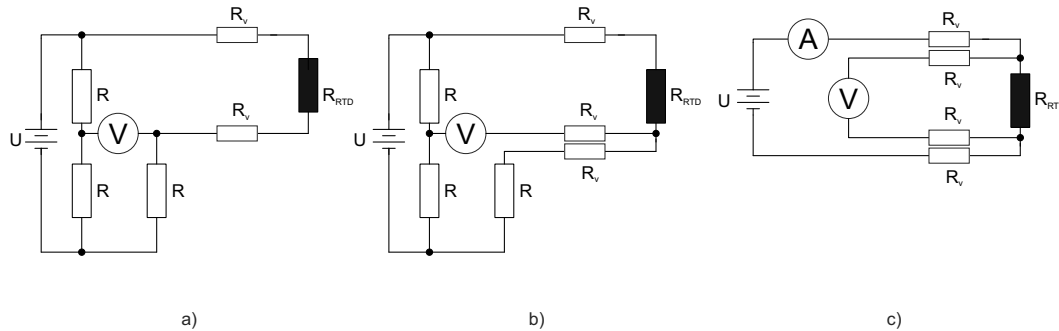
**Uporovni merilniki temperature (ang. resistance thermometers).** Uporovni termometri so merilniki, ki so izvedeni iz prevodnih materialov, ki so naviti ali neparjeni na keramično osnovo. S temperaturo se spreminja upornost materiala, ker pa so spremembe upornosti majhne, jih moramo detektirati z vezavo merilnika v mostič. Prikaz izvedbe merilnika je na sliki 5.93. Za merjenje upornosti uporabljamo tri različne vezave. Najenostavnejša je



Slika 5.93: Uporovni merilnik temperature: a) navitje uporovnega merilnika, b) valjasta izvedba, c) ploščna izvedba

dvožična vezava, kjer imamo uporovni merilnik vezan kot en krak Wheatstonovega mostiča tako, da imamo isto napajalno in merilno ožičenje (slika 5.94a). Ta vezava ni učinkovita pri daljših razdaljah med merilnikom in mostičem, ker upornosti povezovalnih žic doprinejajo pomemben padec napetosti. Boljša možnost je trižična vezava v tako imenovani mostič RTD. V tem primeru uporabimo za priklop na voltmeter drugo žico kot za povezavo do naslednjega upora v mostiču. S tem razdelimo upornost povezovalnih vodov tako, da je en del prištet k merilniku, drug pa k referenčnemu uporu in se zato kompenzirata (slika 5.94b).

Obstaja pa še varianta s štirimi žicami. V tem primeru merilnik ni vezan v mostič, ampak upornost merimo neposredno na merilnem uporu. Po dveh žicah napajamo upor, po drugih dveh pa merimo napetost. Tudi tako se znebimo vpliva upornosti povezovalnega voda na napetostni signal (slika 5.94c). Merilnik lahko po potrebi tudi zaščitimo z oklopom, s tem pa



Slika 5.94: Vezave uporovnega merilnika temperature: a) dvožična vezava, b) trižična vezava v mostič RTD, c) štirižična vezava

mu precej upočasnimo odziv.

Merilniki so narejeni iz različnih materialov, najpogosteje pa iz platine (Pt), bakra (Cu) in niklja (Ni), občasno pa tudi iz zlata (Au), srebra (Ag) in germanija (Ge). Najpogostejši material je Pt in sicer v izvedbah Pt-100 in Pt-1000, kar pomeni, da imata 100 oz. 1000  $\Omega$  upornosti pri temperaturi  $0^{\circ}\text{C}$ . Odvisnost upornosti merilnika  $R$  od temperature  $T$  opisuje Callendar – van Dusenova enačba:

$$R = R_0 + R_0\alpha \left( T - \delta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \frac{T}{100} - \beta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \frac{T^3}{100} \right), \quad (5.42)$$

kjer je  $\alpha$  konstanta odvisna od materiala,  $R_0$  - upornost pri  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $\beta$  konstanta odvisna od temperaturnega območja ( $0$  za  $T > 0^{\circ}\text{C}$  in  $0,1$  za  $T < 0^{\circ}\text{C}$ ) in  $\delta$  konstanta z vrednostjo 1,49. Temperaturo v enačbi podajamo v  $^{\circ}\text{C}$ , konstante pa določimo za vsak primer posebej, kadar želimo točno napoved modela. V tabeli 5.4 so zbrana območja in vrednosti konstante  $\alpha$  za najpogostejše materiale. Merilniki so zelo preprosti za uporabo, paziti pa moramo, da

Tabela 5.4: Območja in vrednosti konstant za uporovne merilnike temperature

material	$\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	območje (K( $^{\circ}\text{C}$ ))
Pt	0,0039	3–923(-270–650)
Cu	0,0067	73–593(-200–320)
Ni	0,0038	73–533(-200–260)

skoznje ne teče prevelik tok, sicer dobimo napako zaradi segrevanja upora.

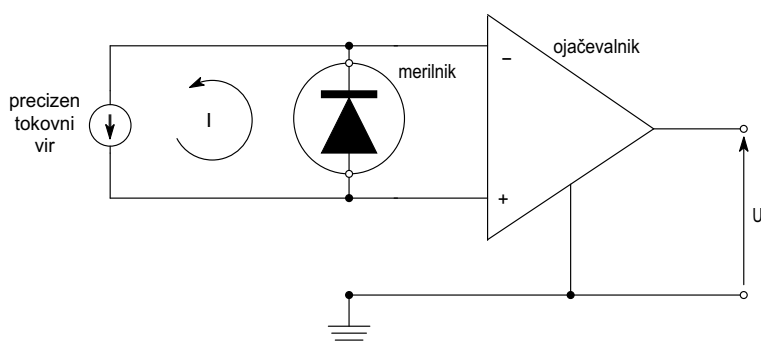
**Termistorji (ang. thermistors).** Termistorji so polprevodniški upori, ki jih uporabljamo podobno kot uporovne merilnike temperature, le da imajo drugačne lastnosti. Sestavljeni so iz kosa polprevodniškega materiala, ki ima zelo izrazito temperaturno občutljivost. Pred vplivi okolja so zaščiteni s steklom ali z epoksidno smolo. Obstajata varianti z negativnim (NTC) in pozitivnim (PTC) temperaturnim koeficientom. Posebno zanimivi so termistorji NTC, pri

katerih upornost s temperaturo pada in jih zato lahko uporabimo za temperaturno kompenzacijo v električnih vezjih. Pokrivajo območje meritev od 213 K (-60 °C) pa do 573 K (300 °C), pri tem pa se upornost spremeni za nekaj dekad. Odvisnost upornosti  $R$  od temperatur  $T$  opisuje enačba:

$$R = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}, \quad (5.43)$$

kjer je  $R_0$  referenčna upornost pri referenčni temperaturi  $T_0$  in  $\beta$  koeficient, ki se odvisno od uporabljenega materiala giblje med 3500 in 4600 K. Merilnik je zaradi velikih sprememb upornosti zelo priljubljen, ker ne potrebuje dodatnega ojačevanja signala. Za zelo agresivna okolja ga lahko zaščitimo z oklopom.

**Polprevodniški merilnik temperature (ang. silicon bandgap temperature sensor).** Temperaturo integriranih vezij najpogosteje merimo s polprevodniškim merilnikom temperature. Merilnik izkorišča lastnost polprevodniških elementov s stikom P-N, kjer je padec napetosti na stiku P-N v prevodni smeri odvisen od temperature. Osnova delovanja je podobna termočlenom, le da so električne lastnosti uporabljenih materialov precej drugačne. Merilnik običajno vežemo na vhod operacijskega ojačevalnika. Prikaz vezave merilnika je prikazana na sliki 5.95. Ker so ti merilniki polprevodniški elementi, jih lahko izdelamo kot



Slika 5.95: Vezava polprevodniškega merilnika temperature:  $I$  – tok skozi merilnik,  $U_i$  – izhodna napetost.

del integriranih vezij. Pogosto se uporabljajo kot merilniki temperature mikroprocesorjev. Njihovo temperaturno območje je vezano na delovanje stika P-N in je omejeno področje od 218 K do 423 K (-55 °C – 150 °C).

**Kvarčni merilnik temperature (ang. quartz thermometer).** Najobčutljivejši merilnik temperature je zagotovo kvarčni merilnik. Ena od lastnosti kvarčnega kristala je ta, da ima zelo izrazito lastno frekvenco nihanja električnega signala, zato ga uporabljamo kot referenčni element v vezjih, kjer je potrebno natančno določanje lastne frekvence nihajnih krogov. Kot vsi polprevodniški elementi je tudi kvarčni kristal zelo temperaturno občutljiv. Lastna frekvenca kristala se spremeni kar za 100 Hz pri spremembi temperature za 1 K, zato lahko merimo temperaturo na območju od 233 K do 503 K (-40 °C do 230 °C) z občutljivostjo  $10^{-3}$  °C.

### 5.19.2 Brezkontaktne metode merjenja

Za merjenje visokih temperatur ali tam, kjer ne moremo priti v stik z merjenim materialom uporabljamo brezkontaktne metode merjenja. Metode temeljijo na Štefanovem zakonu, ki pravi, da je gostota energijskega toka  $j$ , ki ga črno telo izseva, proporcionalna četrti potenci temperature telesa  $T$ :

$$j = \sigma T^4, \quad (5.44)$$

kjer je  $\sigma$  Štefanova konstanta, ki ima vrednost  $5,6710^{-8} \text{Js}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$ . Z merilnikom prestrežemo energijski tok, ki ga telo izseva in tako določimo njegovo temperaturo. Pri tem pa moramo paziti na nekaj virov napak. Največkrat je vir merilne napake napačna ocena emisivnosti. Črno telo izseva vso energijo v obliki sevanja, niso pa vsa telesa takšna. Črno telo ima zelo neodbojno površino, zato tudi absorbira vso energijo sevanja, ki pade nanj. Siva telesa pa absorbirajo samo del vpadne energije sevanja, del pa jo odbijejo. Štefanov zakon moramo za siva telesa deloma popraviti:

$$j = \epsilon \sigma T^4, \quad (5.45)$$

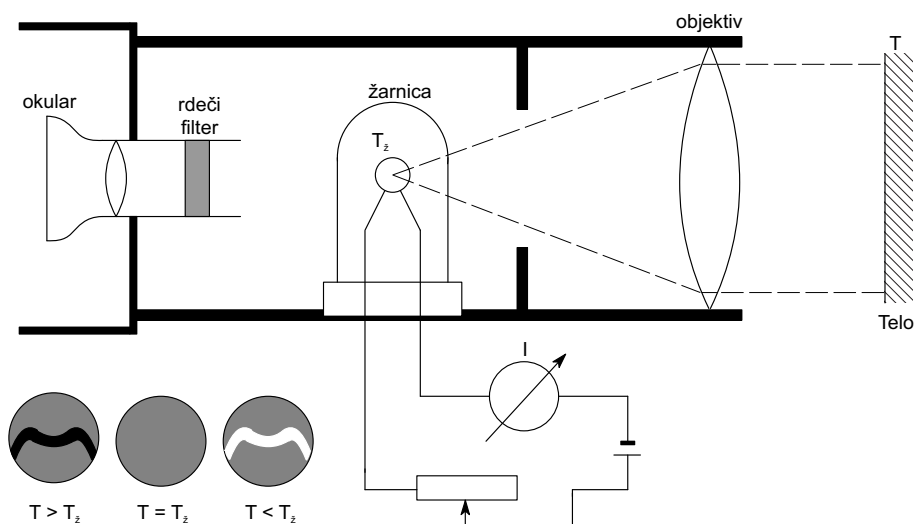
kjer je  $\epsilon$  emisivnost telesa. Za črna telesa velja, da je  $\epsilon = 1$ , za belo telo pa  $\epsilon = 0$ . Ob napačni oceni emisivnosti torej napačno ocenimo temperaturo telesa. Zavedati se moramo tudi tega, da s sevalnimi merilniki v resnici merimo temperaturo površine telesa in ne njegove notranjosti. Pri telesih, ki imajo zelo nizke emisivnosti pa v resnici ne izmerimo temperature površine telesa ampak temperaturo teles, katerih energijski tok se odbije od površine merjenega telesa. Telesa z emisivnostjo blizu 0 so torej zrcala za sevalno energijo. Problem predstavlja tudi materija, ki se nahaja na poti energijskega toka. Vsak material ima frekvenčno odvisnost prepustnosti energijskega toka elektromagnetnega sevanja. Večina merilnikov deluje v infra rdečem frekvenčnem področju ( $0,74\text{--}300\mu\text{m}$ ), zato moramo dobro poznati lastnosti leč in atmosfere v tem področju, da lahko pravilno ocenimo izgube v teh medijih in s tem temperaturo merjenega objekta. V infra rdečem (IR) področju je v zemljini atmosferi možno meriti v naslednjih področjih: bližnje IR področje (NIR) ( $0,7\text{--}10\mu\text{m}$ ), kratkovalovno IR področje (SWIR) ( $1\text{--}3\mu\text{m}$ ), srednje valovno IR področje (MWIR) ( $3\text{--}5\mu\text{m}$ ), dolgovalovno IR področje (LWIR) ( $7\text{--}14\mu\text{m}$ ), in zelo dolgovalovno IR področje (VLWIR) ( $14\text{--}30\mu\text{m}$ ). Za višje temperature pa uporabljamo svetlobo izsevano v vidnem delu spektra. Paziti pa moramo, kadar je med merjenim objektom in merilnikom visoka vlaga, ker voda precej absorbira sevanje v teh področjih.

#### Pirometri (ang. pyrometers)

Pirometri so merilniki za merjenje visokih temperatur. Obstajata dve varianti, optična in sevalna. Tradicionalno so bili razviti za merjenje zelo visokih temperatur, danes pa se vse pogosteje uporabljajo tudi za merjenje temperatur do nekaj stopinj pod ničlo, posebno kadar gre za temperature objektov, ki se prosto gibljejo.

**Optični pirometer (ang. optical pyrometer).** Merilnik za najvišje temperature je optični pirometer. Skozi okular in navadno še rdeči filter opazujemo barvo svetlobe, ki jo oddaja merjeni objekt in jo primerjamo z barvo žarilne nitke referenčne žarnice. Tok skozi žarnico spreminjamo toliko časa, dokler odtenka nitke in merjenega objekta nista enaka. Iz toka skozi nitko žarnice lahko izračunamo temperaturo nitke in s tem tudi temperaturo površine telesa.

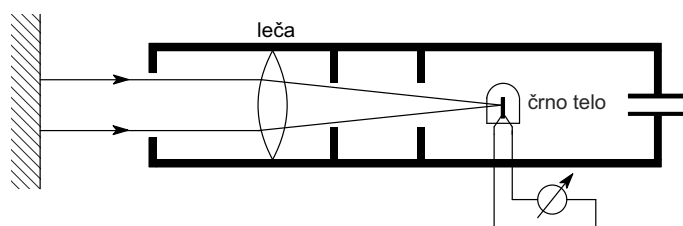
Prikaz merilnika je na sliki 5.96. Merilniki zajemajo področje meritev od 900 K (600 °C) in



Slika 5.96: Prikaz optičnega pirometra:  $I$  – tok skozi žarnico,  $T$  – temperatura merjenega objekta,  $T_z$  – temperatura žarnice

navzgor do najvišjih temperatur.

**Sevalni pirometer (ang. infrared pyrometer).** Za nižje temperaturno območje uporabljamo sevalne pirometre. Sevalni pirometer je sestavljen iz leče objektiva, ki zbira izsevane energije v IR področju in jo koncentrira na črno telo v merilniku. Temperaturo črnega telesa merilnika nato izmerimo s termočlenom ali podobnim merilnikom. Prikaz merilnika je na sliki 5.97. Merilnik je uporaben za področja od 273 K do 4300 K (0 °C–4000 °C), je pa zelo



Slika 5.97: Prikaz sevalnega pirometra

občutljiv na pravilno določitev emisivnosti. Določanju emisivnosti se lahko izognemo tako, da izmerimo temperaturo v dveh frekvenčnih območjih in s primerjavo rezultatov določimo pravo temperaturo. Tako izvedbo imenujemo dvobarvni pirometer.

**Termovizijska kamera (ang. thermal imaging cameras).** Najnovejši brezkontaktni merilniki so termovizijske kamere. Delujejo v bližnjem IR področju (NIR) in v dolgovalovnem IR področju (LWIR) z uporabo matrike foto diod ali foto tranzistorjev. Za merjenje lahko uporabljamo običajne senzorje, ki so vgrajeni v video kamerah ali foto aparatih. Tovrstni senzorji so poleg vidne svetlobe občutljivi še v področju NIR in lahko merijo temperature od 500 K

(320 °C) navzgor z omejeno natančnostjo. Bistveno bolj natančne pa so termovizijske kamere, ki imajo specializirane senzorje in delujejo v področju LWIR. Tovrstni merilniki lahko merijo temperature od 220 K (-50 °K) navzgor. Bistvena prednost termovizijskih kamer pred ostalimi metodami brezkontaktnega merjenja je, da na merjenem objektu vidimo, kako je temperatura porazdeljena po njem in ne le neko povprečno vrednost. Tako lahko zelo hitro ugotovimo, kateri deli se pregrevajo, ali kje izgubljam energijo. Seveda pa moramo paziti na vse pasti brezkontaktnega merjenja, če hočemo natančno meritev temperature.

## 5.20 Merjenje gostote

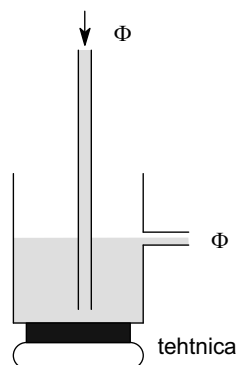
Merjenje gostote je pomembna meritev za kontrolo kvalitete proizvodov. Običajno ni sprotna metoda, obstajajo pa variante, da jo kot tako uporabimo. Gostota je definirana kot masa na enoto volumna in ima osnovno enoto kilogram na kubični meter ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Ločiti pa moramo metode za kapljevine, pline in trdne snovi.

### 5.20.1 Merjenje gostote kapljev in

Največ metod obstaja za merjenje gostote kapljev in, ker je kritična pri mnogih procesih mešanja kapljev in v končnih proizvodih. Pri merjenju gostote moramo biti zelo pozorni na temperaturo pri kateri meritev izvajamo, saj je gostota močno odvisna od temperature.

**Gravivolumetrična metoda (ang. gravivolumetric method).** Najosnovnejša metoda je gravivolumetrična metoda. Kapljevino zajamemo v posodo znanega volumna, jo stehamo, odštejemo maso posode in izračunamo gostoto. Metoda ni zahtevna upoštevati pa moramo tako variabilnost volumna merjene posode zaradi temperature kot tudi negotovost merjenja mase.

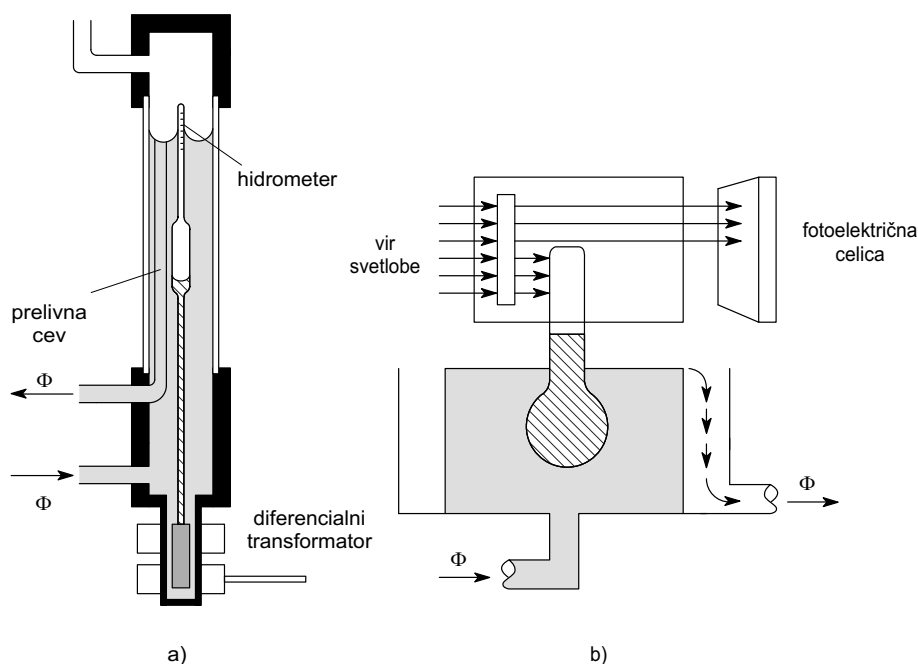
**Pretočni merilnik (ang. in-line gravivolumetric method)** Pretočni merilnik je sprotna gravivolumetrična metoda. Merilnik je sestavljen iz posode skozi katero teče merjena kapljevina, ki ima na vrhu preliv, ki skrbi, da je v posodi ves čas enak volumen tekočine. Posoda je postavljena na bremenskih celicah in tako lahko sprotno merimo maso in izračunavamo gostoto. Prikaz merilnika je na sliki 5.98. Pri pretočnem merilniku moramo paziti, da pravilno



Slika 5.98: Pretočni merilnik gostote:  $\Phi$  – pretok

obravnavamo silo, ki jo generira pretok, sicer lahko pride do velikih napak pri meritvi.

**Hidrometer (ang. hydrometer).** Hidrometer je steklen plovec z natančno umerjeno povprečno gostoto. Merilnik je umerjen za točno določeno količino in lahko meri manjša odstopanja od nominalne gostote. Spremembo gostote določimo z globino potopitve plovca, ki ima na palici, ki gleda iz kapljevine, narisano skalo. Skalo lahko odčitamo, možno pa je tudi avtomatsko optično ali elektromagnetno odčitavanje, če plovec ustrezno priredimo. Prikaz dveh možnih izvedb merilnika je na sliki 5.99. Hidrometer lahko uporabljamo tudi



Slika 5.99: Hidrometer: a) merjenje pomika hidrometra z diferencialnim transformatorjem, b) merjenje pomika hidrometra s foto detektorjem,  $\Phi$  – pretok kapljevine

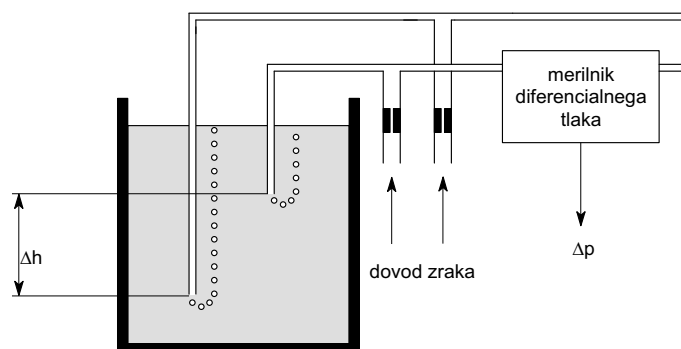
za določanje sestave raztopin, ker le-ta precej vpliva na njihovo gostoto.

**Tlačna metoda (ang. dual pressure density measurement)** Tlačna metoda uporablja dva mehurčna merilnika, ki imata cevi za izhod mehurčkov postavljene na različnih globinah. Iz razlike tlakov na znani razliki globine lahko določimo gostoto kapljevine. Prikaz merilnika je na sliki 5.100. Iz razlik tlakov  $\Delta p$  in znanih razlik nivoja merilnikov  $\Delta h$ , lahko izračunamo gostoto  $\rho$  kot:

$$\rho = \frac{1}{g} \frac{\Delta p}{\Delta h}, \quad (5.46)$$

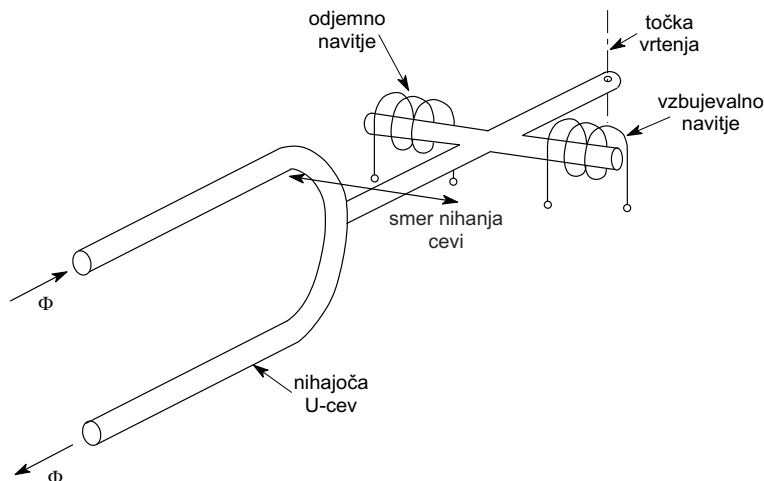
kjer je  $g$  težnostni pospešek. Merilnik lahko deluje tudi kot sprotni merilnik.

**Nihajoča U-cev (ang. oscillating U-tube).** Merilnik je narejen na principu merilnika mase, ki določa maso preko lastne frekvence nihanja sistema masa–vzmet. Sestavljen je iz steklene U-cevi, ki jo napolnimo z merjeno kapljevino. Z elektromagnetom vzbujaemo vzdolžne vibracije na U-cevi tako, da dobimo stojno valovanje v ravnini, ki jo določa U zavite cevi. Poiščemo pa najnižjo možno frekvenco stojnega valovanja, z odjemnim navitjem pa merimo nihanje cevi. Za meritev je pomembno le to, da je cev polna od zavoja U pa do prvega vozla



Slika 5.100: Tlačni merilnik gostote

valovanja, tekočina v ostalem delu cevi ne vpliva na meritev, zato lahko s tem merilnikom izvedemo tudi sprotne meritve. Merilnik torej določi maso, iz volumna kapljevine pa nato določimo gostoto. Prikaz merilnika je na sliki 5.101. Gostoto  $\rho$  določimo iz frekvence nihanja



Slika 5.101: Prikaz nihajoče U-cevi

$f$  po enačbi:

$$\rho = A \frac{1}{f^2} - B, \quad (5.47)$$

kjer sta  $A$  in  $B$  konstanti merilnika. To je eden najbolj natančnih merilnikov gostote.

### 5.20.2 Merjenje gostote plinov

Ker je gostota plinov zelo majhna, jo je zelo težko natančno izmeriti. Nabor metod je torej precej manjši kot pri merjenju kapljev.

**Hidrometer (ang. hydrometer).** Za merjenje gostote plinov lahko uporabimo hidrometer, le da je metoda ravno obratna od metode za merjenje kapljev. Plovec napolnimo z merjenim plinom in ga potopimo v tekočino znane gostote. Iz potopitve plovca lahko izračunamo gostoto.



**Nihajoča U-cev (ang. oscillating U-tube).** Za merjenje gostote plinov uporabljamo tudi nihajočo U-cev. Merilnik je popolnoma enak merilniku za kapljevine.

### 5.20.3 Merjenje gostote trdnih snovi

Tudi pri merjenju gostote trdnih snovi smo precej omejeni. V resnici lahko določamo maso znanega volumna vzorca s tehtanjem ali nihajnimi metodami, uporabna pa je tudi metoda slabljenja ali odboja visokoenergetskih žarkov.

**Gravivolumetrična metoda (ang. gravivolumetric method).** Gravivolumetrična metoda ugotavlja gostoto s tehtanjem vzorca znanega volumna. Pri tem je največji problem natančna določitev volumna vzorca.

**Radioskopska metoda (ang. x-ray/beta/gamma backscatter sensor).** Radioskopska metoda uporablja izvor visokoenergetskih žarkov, ki je lahko radioaktivna snov ali elektromagnetni izvor hitrih delcev. Na nasprotni strani pa merimo količino sevanja, ki pride čez merjeni objekt. Merilnik je sicer uporaben tudi za kapljevine, a se tam redkeje uporablja, ker imamo na voljo več drugih metod.

## 5.21 Merjenje viskoznosti

Viskoznost je pomembna lastnost tekočin, ki se posebno preverja pri oljih in lakih in je zelo odvisna od temperature. Viskoznost kapljevin s temperaturo pada medtem ko pri plinih narašča. Viskoznost določa notranje trenje v tekočinah in onemogoča poljubne hitrosti pretoka. Viskoznost je določena kot koeficient med strižno napetostjo  $\frac{dF}{dS}$  in gradientom hitrosti po preseku  $\frac{dv}{dx}$ :

$$\frac{dF}{dS} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (5.48)$$

Tekočine, za katere ta enačba velja so Newtonske tekočine z laminarnim pretokom. Koeficient  $\eta$  pa imenujemo dinamična viskoznost in ga merimo v enotah Pascal sekundah (Pas) oziroma Poise-ih (P). Pretvorba med obema enotama je  $1 \text{ Pas} = 10 \text{ P}$ . Voda ima pri  $20^\circ\text{C}$  viskoznost  $10^{-2} \text{ P}$ , olja pa nekaj P, odvisno od vrste olja. V praksi uporabljamo tudi kinematično viskoznost  $\nu$ , ki je definirana kot dinamična viskoznost na enoto gostote  $\rho$ :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (5.49)$$

Enota za kinematično viskoznost so kvadratni metri na sekundo ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) in Stokes-i (S) med enotama pa velja pretvorba  $1 \text{ S} = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$ . Ker je S velika enota, navadno uporabljamo centistokes (cS). Za kinematično viskoznost uporabljamo še enoto z različnimi imeni: Saybolt Universal Viscosity (SUV), Saybolt Seconds Universal (SSU) in podobno. Za merjenje viskoznosti lahko uporabljamo pretakanje skozi kapilaro, merjenje navora na mešalih in vpliv na resonančno frekvenco resonatorja. Ločiti pa moramo metode za merjenje kapljevin in plinov, ker so njihove viskoznosti toliko različne, da ne moremo za oboje uporabljati iste opreme.

### 5.21.1 Viskoznost kapljev in

Merjenje viskoznosti kapljev in je dokaj enostavno, ker so sile notranjega trenja dovolj velike, da jih lahko izmerimo z razmeroma ceneni merilniki.

**Laboratorijski kapilarni viskozimeter (ang. laboratory capillary viscometer).** Najbolj osnovni natančni merilnik je laboratorijski kapilarni viskozimeter. Sestavljen je iz dveh shranjevalnikov in kapilare, ki ju povezuje. V zgornjem shranjevalniku mora biti celoten čas meritve isti nivo merjene kapljevine, ki izteka preko kapilare v spodnji shranjevalnik. Pred začetkom meritve pustimo, da kapljevina teče skozi kapilaro mimo spodnjega shranjevalnika, nato pa na začetku meritve podstavimo spodnji shranjevalnik in začnemo meriti čas. Ko se v spodnji shranjevalnik nateče določen volumen kapljevine, uro ustavimo. Iz izmerjenega časa  $t$  in znanega volumna kapljevine  $V$  lahko po Hagen-Poiseuillovi enačbi izračunamo dinamično viskoznost:

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot t}{8 \cdot V \cdot l}. \quad (5.50)$$

V enačbi 5.50 imajo simboli naslednji pomen:  $r$  je polmer kapilare,  $\rho$  je gostota kapljevine,  $g$  je težnostni pospešek,  $h$  je razdalja od nivoja v zgornjem shranjevalniku do konca kapilare in  $l$  je dolžina kapilare. Delo z merilnikom je zamudno, daje pa dobre rezultate.

**Sayboltov viskozimeter (ang. Saybolt viscometer).** Sayboltov merilnik viskoznosti je poenostavljen laboratorijski viskozimeter, ki uporablja konstanten tlak pod katerim izprazni znani volumen po kapilari in meri čas, ki je za to potreben. Merilnik meri kinematično viskoznost, ki jo iz meritve časa  $t$  določimo kot

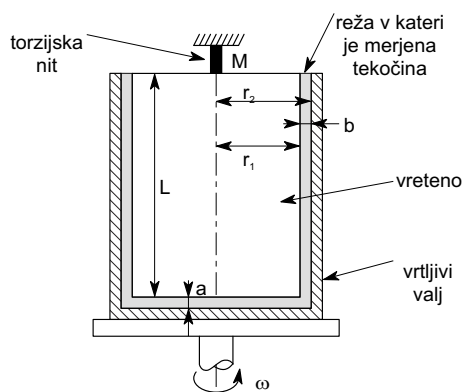
$$v = C_1 t + \frac{C_2}{t}, \quad (5.51)$$

kjer sta  $C_1$  in  $C_2$  konstanti merilnika.

**Vibracijski viskozimeter (ang. vibrational viscometer).** Vibracijski viskozimetri merijo dušenje mehanskih vibracij v merjeni kapljevini. Vibracije običajno generiramo s torzijo ali longitudinalnimi deformacijami vibracijske sonde. Sonda je lahko oblikovana kot mešalo, ki ga rotacijsko vibriramo ali kot glasbene vilice, merimo pa lahko moč, ki jo je potrebno dovajati za vibracije konstantne amplitude, čas umiritve resonatorja ali pa frekvenco pri kateri dosežemo želeno fazno razliko med vzbujanjem in dejanskim gibanjem vibracijske sonde.

**Rotacijski viskozimeter ali viskozimeter z vrtljivim valjem (ang. rotational viscometers (Couette, Searle, Stabinger types), cup and bob viscometer).** Rotacijski viskozimetri merijo navor, s katerim moramo vrteti disk ali vreteno pri neki definirani hitrosti. Prikaz merilnika je na sliki 5.102. Iz geometrije na sliki 5.102 lahko izračunamo dinamično viskoznost kot:

$$\eta = \frac{M}{\pi \omega r_1^2 \left( \frac{r_2^2}{2a} + \frac{2Lr_2}{b} \right)} \quad (5.52)$$



Slika 5.102: Viskozimeter z vrtljivim valjem:  $M$  – merjeni navor,  $\omega$  – hitrost vrtenja,  $L$  – višina vretena,  $r_1$  – radij vretena,  $r_2$  – notranji radij valja,  $b$  - radialna reža med vretenom in valjem,  $a$  osna reža med vretenom in valjem

Tipa Couette in Searle se med seboj ločita samo po tem, ali vrtimo disk ali pa valj s kapljevino. Oba merilnika imata razmeroma veliko trenje v ležajih, zato sta primerna samo za merjenje kapljev. Tip Stabinger pa je novejši in uporablja za vreteno lahek prevoden cilindar, ki plava na kapljevini, vrtimo pa ga s pomočjo elektromagnetnega polja in vrtilnih tokov, ki se v njem inducirajo. Ta tip merilnika ima resolucijo navora 50 pNm in lahko meri viskoznost v razponu od 0,2 do 20000 mPas.

**Metoda padajoče krogle (ang. falling sphere viscometer).** Metoda padajoče krogle ali dvigajočega se mehurčka je tudi nesprotna metoda merjenja viskoznosti. Za meritev potrebujemo merilni valj, ki ga napolnimo z merjeno kapljevino in kroglo z večjo gostoto od kapljevine. Kroglo spustimo v valj in izmerimo njeno hitrost  $v$ , ko le-ta ustali. Predpostavljamo linearni zakon upora, zato viskoznost  $\eta$  določimo kot:

$$\eta = \frac{k(\rho_k - \rho_f)}{v}, \quad (5.53)$$

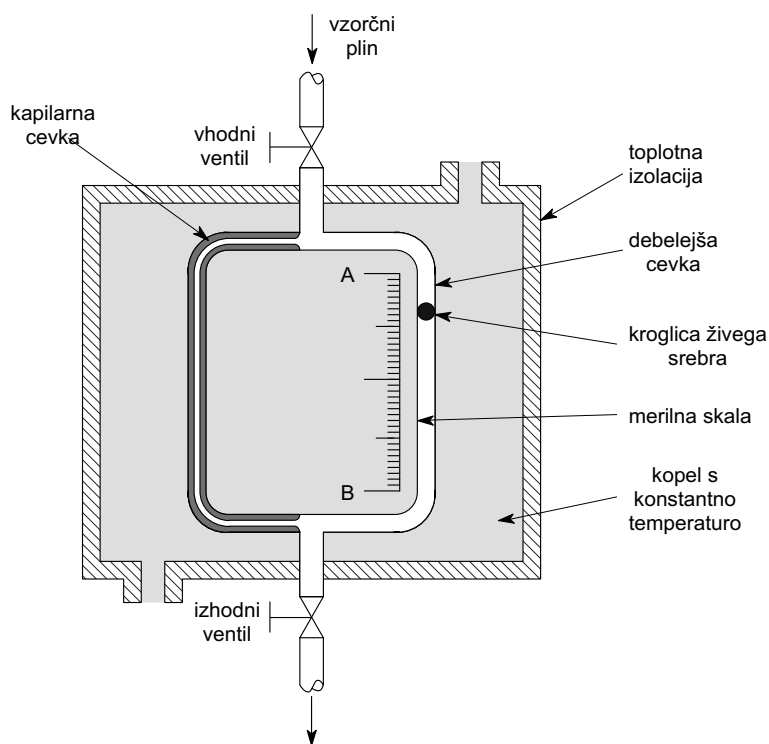
kjer sta  $\rho_k$  in  $\rho_f$  gostoti krogle in kapljevine ter  $k$  konstanta krogle, ki jo najnatančneje določimo z umerjanjem. Povsem enaka je metoda z dvigajočim se mehurčkom. Metodo z mehurčkom uporabljamo za merjenje viskoznosti prozornih lakov.

**Merilnik s padajočim batom (ang. falling piston viscometer, Norcross viscometer).** Enakovredna metoda padajoči krogli je metoda s padajočim batom, le da imamo v tem primeru opravka z merilnikom, ki je dostopen na trgu, medtem ko si merilnik s padajočo kroglo večinoma sestavimo sami. Merilnik s padajočim batom je občutljiv merilnik kinematične viskoznosti, ki ga uporabljamo za merjenje viskoznosti tiskarskih črnih. Merilnik lahko deluje tudi kot sprotni merilnik. Sestavljen je iz valja in bata, ki se v valj dobro prilega tako, da je med njima le ozka reža. Sistem potopimo v merjeno kapljevino, nato pa se bat dviguje in spušča. Pri spuščanju merimo čas, ki ga valj zaradi lastne sile teže potrebuje med dvema točkama. Čas je karakterističen za viskoznost kapljevine.

### 5.21.2 Viskoznost plinov

Ker je viskoznost plinov za nekaj dekad manjša od viskoznosti kapljev, potrebujemo drugačne naprave za merjenje, še vedno pa merimo čas prehoda skozi kapilaro ali navor zaradi upora, ki ga povzroča viskoznost.

**Kapilarni merilnik viskoznosti (ang. capillary gas viscometer).** Najbolj standardni laboratorijski merilnik za viskoznost plinov je kapilarni merilnik. Sestavljen je iz steklene cevi, ki se razdvoji na dva dela, od katerega je eden zelo ozka kapilara, drugi pa cevka normalnega preseka. Cevki se potem spet združita v eno. Pred in za cepitvijo cevi sta ventila, s katerima lahko ločimo razcepljeni del od ostalega dela sistema. Sistem napolnimo s plinom, nato pa ventila zapremo. Nad zgornji ventil vbrizgamo kapljico živega srebra in jo z ventilom spustimo v razcepljeni del in ventil zapremo. Kapljica živega srebra potuje po normalno cevki, plin pa iztiska skozi kapilaro. Če zmerimo ustaljeno hitrost padanja kapljice, lahko določimo viskoznost plina. Merilnik je prikazan na sliki 5.103.



Slika 5.103: Kapilarni merilnik viskoznosti

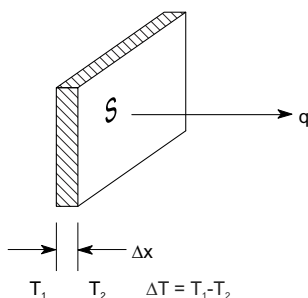
**Viskozimeter s koncentričnimi valji (ang. concentric cylinder viscometer).** Viskozimeter s koncentričnimi valji je izvedba kapljevinskih merilnikov z vrtljivim valjem. Ker je upor plina toliko manjši, ustvarimo večjo površino tako, da imamo več koncentričnih valjev, vreteno pa je tudi oblikovano iz več koncentričnih elementov, ki se prilegajo obliki valjev.

## 5.22 Toplotna prevodnost

Poznavanje toplotne prevodnosti je med drugim pomembno v gradbeništvu. Če poznamo lastnosti uporabljenih materialov, lahko že v naprej izračunamo kakšne debeline sten potrebujemo, da bomo imeli še sprejemljive izgube energije pozimi in čim manjše ogrevanje notranjosti poleti. Toplotna prevodnost  $\lambda$  je podobno kot električna prevodnost definirana kot energijski tok  $q$ , ki teče skozi material podane debeline  $\Delta x$  in preseka  $S$  pri dani temperaturni razliki  $\Delta T$ :

$$q = \lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.54)$$

Prikaz tako poenostavljenega modela je na sliki 5.104. Enota za merjenje toplotne prevodno-



Slika 5.104: Prikaz poenostavljenega modela toplotne prevodnosti

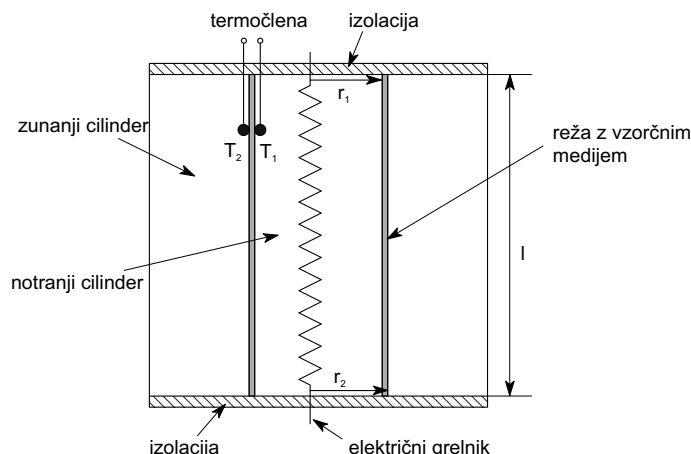
sti so Watti na meter Kelvin ( $W/mK$ ). Za merjenje obstajajo samo laboratorijski merilniki, ki jih uporabljamo za končno kontrolo izdelkov. Ločiti pa moramo merilnike za merjenje tekočin in trdnih snovi, trdne snovi pa so lahko toplotni prevodniki ali toplotni izolatorji. Za vsakega od naštetih tipov materialov potrebujemo svojo metodo. Paziti pa moramo, ker je za nekatere materiale toplotna prevodnost funkcija temperature.

### 5.22.1 Toplotna prevodnost tekočin

Tekočine, še posebno plini, imajo dobre izolacijske lastnosti. Toplotno prevodnost zato lahko merimo z merilnikom, ki upošteva poenostavljeno definicijo toplotne prevodnosti. Problem merjenja tekočin je, da moramo ločiti toplotno prevodnost od sevanja in konvekcije, ki sta pojava, ki ravno tako prenašata energijski tok, nista pa vezana na toplotno prevodnost.

**Koncentrični merilnik toplotne prevodnosti (ang. coaxial cylinder cell).** Za merjenje toplotne prevodnosti tekočin uporabljamo koncentrični merilnik toplotne prevodnosti. Sestavljen je iz osrednjega cilindra, ki je električni grelnik, iz koncentrične komore okoli osrednjega cilindra, ki je dovolj ozka, da ne pride do konvekcijskih tokov in zunanega cilindra, ki je toplotni izolator. Temperaturo merimo na zunanjem robu notranjega cilindra in na notranjem robu zunanega cilindra, merilnik pa mora biti izveden tako, da gre večina toplotnega toka preko merjenega plina. Prikaz merilnika je sliki 5.105. Merilnik je uporaben tako za merjenje toplotne prevodnosti plinov kot kapljevin. Iz izmerjenih temperatur lahko določimo toplotno prevodnost zaradi koaksialne oblike kot:

$$\lambda = \frac{q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi l (T_1 - T_2)}, \quad (5.55)$$



Slika 5.105: Prikaz koaksialnega merilnika toplotne prevodnosti:  $r_1$ ,  $r_2$  – notranji in zunanji radij merilne komore,  $l$  – višina cilindra,  $T_1$ ,  $T_2$  – temperaturi na notranjem in zunanjem robu merilne komore

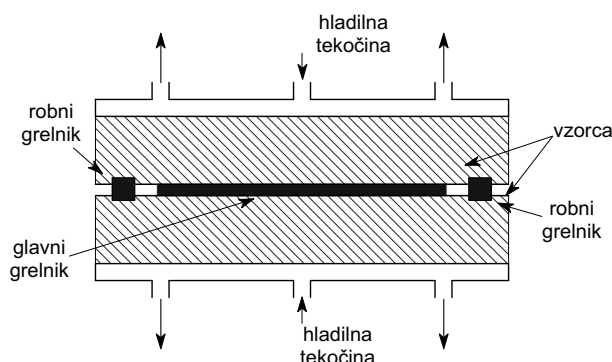
kjer sta  $r_1$  in  $r_2$  notranji in zunanji radij merilne komore ter  $l$  višina cilindra.

### 5.22.2 Toplotna prevodnost izolacijskih trdnih snovi

Merjenje toplotne prevodnosti trdnih izolacijskih snovi je pomembno kot končna kontrola izolacijskih materialov, da ugotovimo, ali ustrezajo specifikacijam. Ker že majhni toplotni tokovi povzročajo velike temperaturne razlike, lahko merimo temperaturo s cenejšimi merilniki, zato so sistemi za merjenje toplotne prevodnosti izolatorjev razmeroma enostavno izvedljivi.

**Neposredna metoda za merjenje toplotne prevodnosti izolatorjev.** Osnovna metoda potrebuje toplotni vir, dva merilnika temperature in dva toplotna ponora. Običajno uporabimo električni toplotni vir (grelnik), ker je njegova moč približno enaka toplotnemu toku. Grelnik mora biti ploščat, malo manjše površine kot merjeni material. Merilnik iz obeh strani obložimo z merjenim materialom, za oba kosa merjenega materiala pa damo dva toplotna ponora (hladilnika). Merimo temperaturo grelnika in temperaturo na hladnih straneh materiala. Če je stik med grelnikom, materialom in hladilnikom dovolj dober, lahko predpostavimo, da gre večina toplotnega toka čez merjeni material. V resnici ga nekaj teče tudi pravokotno na to smer, kar omejuje natančnost metode. V ustaljenem stanju izmerimo obe temperaturi in, glede na geometrijo in in moč grelnika, določimo toplotno prevodnost. Obstaja veliko izvedb, od katerih je dokaj znana metoda Leejevih diskov (ang. Lee's disk apparatus), ki za določitev toplotne prevodnosti ne uporablja ustaljenega stanja ampak prehodni pojav segrevanja in ohlajanja s tem, da potrebuje le en vzorec materiala in upošteva samo en del toplotnega toka grelnika.

**Metoda z robnimi grelniki.** Za izboljšanje natančnosti neposredne metode uporabljamo metodo z robnimi grelniki. Na robovih glavnega grelnika v pravokotnih smereh na glavno smer toplotnega toka damo grelnike, ki naj kompenzirajo toplotni tok, ki ne gre skozi merjeni material. Prikaz merilnika je na sliki 5.106. Da kompenziramo robni toplotno tok moramo



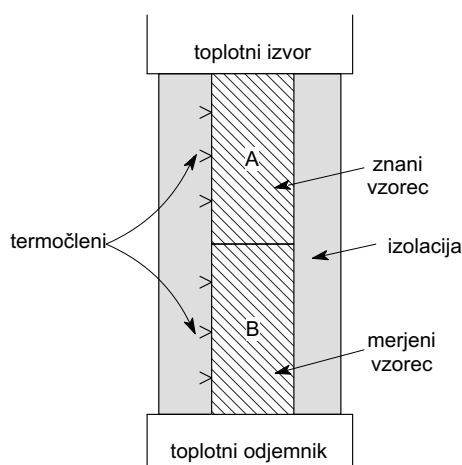
Slika 5.106: Prikaz merilnika za neposredno merjenje toplotne prevodnosti z robnimi grelniki

doseči na zunanji strani robnega grelnika enako temperaturo kot na notranji strani. Tako so vse toplotne izgube pokrite s strani robnih grelnikov, glavni toplotni tok skozi material pa ustvarja glavni grelnik.

### 5.22.3 Toplotna prevodnost prevodnih trdnih snovi

Pri toplotnih prevodnikih neposredne metode ne moremo uporabiti, ker je temperaturni gradient tako majhen, da ga je težko dovolj natančno meriti.

**Primerjalna metoda za merjenje toplotne prevodnosti (ang. Searle's bar method).** Za merjenje toplotnih prevodnikov uporabljamo primerjalno metodo. Uporabimo merjeni in referenčni vzorec z znano prevodnostjo in ju zaporedno namestimo med grelnik in hladilnik, nato pa merimo temperaturni gradient po obeh vzorcih. Prikaz meritve je na sliki 5.107. Toplotno prevodnost materiala B ( $\lambda_B$ ) dobimo iz primerjave temperaturnih gradientov na



Slika 5.107: Prikaz primerjalne metode merjenja toplotne prevodnosti

materialih A in B ter iz znane toplotne prevodnosti materiala A ( $\lambda_A$ ), medtem ko skozi oba

vzorca teče isti toplotni tok pri istem preseku:

$$\lambda_B = \lambda_A \frac{\frac{dT_A}{dx_A}}{\frac{dT_B}{dx_B}}, \quad (5.56)$$

kjer sta  $\frac{dT_A}{dx_A}$  temperaturni gradient materiala A in  $\frac{dT_B}{dx_B}$  temperaturni gradient materiala B.

## 5.23 Merjenje vlage

Vlažnost je definirana kot vsebnost vode v plinu ali trdni snovi. Pri trdnih snoveh govorimo o mokrosti, medtem ko za pline uporabljamo termin vlažnost. Velikokrat pa za merjenje mokrosti uporabljamo metode, ki merijo vlažnost okoliškega plina. Vlažnost ali mokrost sta zelo pomembna kazalca stanja nekega procesa, posebno pa vlažnost spremljamo pri bolj zahtevni klimatizaciji prostorov. Merilnike vlage pogosto srečamo v papirni, lesni in tobačni industriji.

### 5.23.1 Vlažnost plinov

Za pline sta definirana tako absolutna  $v_a$  kot relativna vlažnost  $\phi$ . Absolutna vlažnost je definirana kot masa vodne pare  $m_v$  v volumnu plina  $V_p$ :

$$v_a = \frac{m_v}{V_p}. \quad (5.57)$$

Absolutno vlažnost merimo v  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Relativna vlažnost pa je definirana kot razmerje absolutne vlažnosti  $v_a$  in absolutne vlažnosti nasičenega plina  $v_{an}$ :

$$\phi = \frac{v_a}{v_{an}}. \quad (5.58)$$

Relativno vlažnost podajamo v %. Plin lahko namreč sprejme le določeno količino vodne pare predno se začnejo izločati kapljice. To maksimalno vlažnost imenujemo vlažnost nasičenega plina. Koliko vlage lahko plin sprejme pa je odvisno tudi od temperature plina. Če plinu, ki je nasičen z vlago, znižamo temperaturo, se iz njega začnejo izločati kapljice. Temperaturo pri kateri dosežemo nasičeno vlažnost plina imenujemo temperatura rosišča  $T_r$ . Uporabljamo tudi izraz specifična vlažnost  $\chi$ , ki je definirana z razmerjem mase vode in mase suhega plina  $m_p$ :

$$\chi = \frac{m_v}{m_p}. \quad (5.59)$$

Za idealne pline lahko računanje vlažnosti prevedemo tudi na parcialne tlake. Parcialni tlak plina je tlak, ki bi ga dani plin imel, če bi sam zasedal celoten volumen mešanice, totalni tlak mešanice pa je vsota parcialnih tlakov. Vodno paro in suhi plin lahko obravnavamo kot idealne pline, zato lahko računamo vlažnost preko parcialnih tlakov obeh komponent. Maso plina ali pare lahko s plinsko enačbo določimo kot:

$$m = \frac{pV}{RT}, \quad (5.60)$$



kjer je  $p$  parcialni tlak plina,  $V$  volumen plina,  $R$  plinska konstanta plina in  $T$  temperatura plina. Če enačbo 5.60 vstavimo v enačbi 5.57 in 5.58 dobimo naslednje rezultate, ki so odvisni od parcialnega tlaka plina:

$$v_a = \frac{p_v}{R_v T}, \quad (5.61)$$

kjer indeks  $v$  pomeni vodno paro in:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vn}}, \quad (5.62)$$

kjer indeks  $vn$  pomeni nasičenost z vodno paro. Specifična vlažnost pa je s parcialnim tlakom definirana kot:

$$\chi = \frac{p_v R_p}{R_v p_p}, \quad (5.63)$$

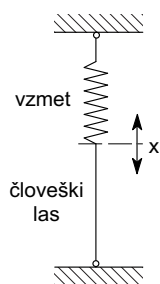
kjer indeks  $p$  pomeni suhi plin. Prednost računanja s parcialnimi tlaki je, da njihove vrednosti lahko določimo iz znanih lastnosti plinov in par. Merilniki vlažnosti pa vedno merijo relativno vlažnost, ker vežejo nase vlago iz okolice, dokler ne pridejo v ravnovesje, pri tem pa je tako volumen kot totalna količina vodne pare neznana.

**Gravimetrična metoda (ang. gravimetric humidity measurement).** Najbolj natančna a tudi najbolj zamudna metoda je gravimetrična metoda. Metoda potrebuje snov, ki kemijsko veže vlago. Najprej stehamo popolnoma osušeno snov, nato pa stehamo še snov, ki je bila na mestu meritve dovolj dolgo, da je prišla v ravnovesje z vlago plina. S to metodo ne moremo sprotno meriti vlage, ima pa zelo dobro natančnost na celotnem področju relativne vlage.

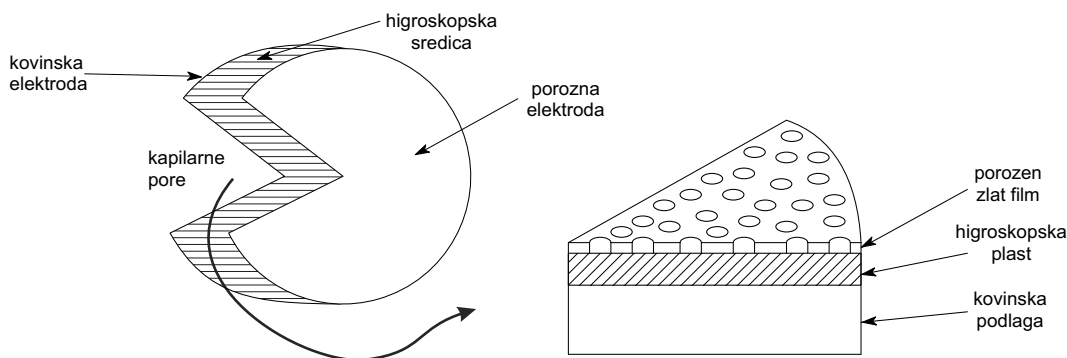
**Merilnik vlage s kovinsko–papirno tuljavo (ang. metal/pulp coil hygrometer).** Standardni merilnik vlage v prostorih je bil dolgo časa merilnik s kovinsko–papirno tuljavo. Merilnik je zgrajen iz kovinskega traku zvitega v tuljavo, ki ima na eni strani po celi dolžini nalepljen papirnat trak, ki je bil impregniran v soli, ki kemično veže vlago. Glede na količino vlage v zraku se papir krči ali razteguje, kar ima podoben učinek kot pri bimetalnem traku. En konec tuljave je pritrjen na ohišje vlagomera, drugi pa na kazalec. Merilnik je uporaben le kot indikacijski inštrument, ker ima preslabo natančnost, posebno pri relativni vlagi pod 50%.

**Merilnik vlage na živalske dlake (ang. hair tension hygrometer).** Merilnik vlage na živalske dlake je zelo podoben merilniku na kovinsko–papirno tuljavo. Vezava vlage na živalske dlake spremeni njihove fizikalne lastnosti, predvsem pa njihovo elastičnost. Prikaz merilnika je na sliki 5.108. Žal pa tudi ta merilnik nima dobre natančnosti in je njegova uporabnost danes v glavnem vezana na tradicionalne vremenske hišice. Merilnik ima uporabno območje od 50 – 100% vlažnosti.

**Kapacitivni merilnik vlage (ang. capacitive humidity sensor).** Kapacitivni merilnik vlage je sestavljen iz poroznega keramičnega materiala, ki ga uporabimo za dielektrik merilnega kondenzatorja. Glede na količino vlage v dielektriku se spreminja kapacitivnost merilnika, kar lahko zaznamo z mostično vezavo ali s pomočjo lastne frekvence nihajnega tokokroga. Prikaz merilnika je na sliki 5.109. Zaradi lažje izdelave je merilnik narejen tako, da je ena od obeh elektrod kondenzatorja porozna, da lahko vlaga pride do higroskopske sredice in jo



Slika 5.108: Prikaz merilnika vlage na živalske dlake.



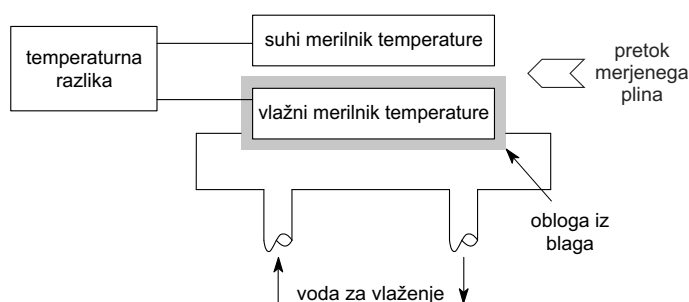
Slika 5.109: Prikaz kapacitivnega merilnika vlage

spet zapusti. Merilnik je lahko izveden zelo miniaturno kot tabletko, ki je velika nekaj mm. Merilnik ima dobro natančnost in neposredni električni izhod. Vлага pa ne vpliva samo na kapacitivnost kondenzatorja ampak tudi na upornost. Da dobimo prevladujoč vpliv spremembe vlage na spremembo kapacitivnosti mora biti porozna plast med elektrodama čim tanjša.

**Uporovni merilnik vlage (ang. resistive humidity sensor).** Uporovni merilnik je po sestavi zelo podoben kapacitivnemu merilniku vlage, le da ima izvedba bolj poudarjene uporovne lastnosti. Predvsem debelina porozne sredice je bistveno večja, zato je kapacitivnost merilnika manjša. Merilnik je enako zanesljiv kot kapacitivni merilnik in ima podobno natančnost.

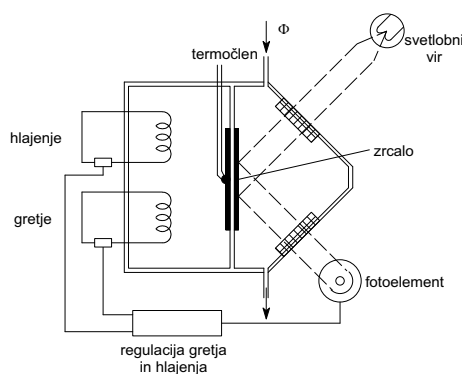
**Psihrometer (ang. psychrometer).** Psihrometer je merilnik, ki izkorišča vpliv odvajanja toplote pri izhlapevanju vode. Če plin ni nasičeno vlažen, iz vlažnega materiala izhlapeva voda, kar občutno zniža temperaturo materiala. Če merimo temperaturi suhega in vlažnega materiala lahko iz razlike temperatur določimo vlažnost plina. Prikaz merilnika je na sliki 5.110. Delovanje merilnika je omejeno na temperaturno področje od 0 do 100 °C zaradi problemov z vlaženjem. Tudi pretok merjenega plina mora biti dovolj velik, da je razlika v temperaturah res odvisna v glavnem od vlažnosti plina in ne toliko od dejanske temperature prostora. Paziti pa je potrebno, da temperature vlažilne vode ne vpliva na meritev.

**Rosiščna metoda (ang. chilled mirror dewpoint hygrometer).** Za zelo natančne sprotne meritve vlage uporabljamo merilnik z rosiščno metodo. Merilnik je sestavljen iz zrcala, ki



Slika 5.110: Prikaz psihrometra

mu lahko natančno reguliramo temperaturo, izvora svetlobe in svetlobnega detektorja. S svetlobnim virom svetimo na zrcalo, odboj pa detektiramo z detektorjem. Ko se zrcalo zarosi smo na zrcalu dosegli temperaturo rosišča plina. Prikaz merilnika je na sliki 5.111. Temperaturo zrcala moramo v okolici rosišča ves čas spreminjati, da vidimo, kaj se dogaja

Slika 5.111: Prikaz merilnika z rosiščno metodo:  $\Phi$  – pretok merjenega plina

z vlažnostjo, kajti samo prehod iz rose v čisto zrcalo in nazaj nosi informacijo o trenutni temperaturi rosišča in s tem tudi o relativni vlažnosti plina.

### 5.23.2 Mokrost trdne snovi

Za opisovanje količine vlage v trdnih snoveh uporabljamo izraz mokrost. Tako kot za vlažnost imamo tudi tu definirano absolutno  $\Psi_a$  in relativno  $\Psi_r$  mokrost:

$$\Psi_a = \frac{m_v}{m_s}, \quad (5.64)$$

kjer je  $m_v$  masa vode in  $m_s$  masa suhe snovi. Relativna mokrost pa je definirana kot:

$$\Psi_r = \frac{m_v}{m_v + m_s}. \quad (5.65)$$

Obe veličini podajamo v procentih (%). V primeru mokrosti lahko določimo tako relativno kot absolutno vlažnost, saj je volumen materiala dobro določen. Ker je merjenje mokrosti težavno pa velikokrat merimo vlažnost zraka okoli merjenja.

**Gravimetrična metoda (ang. gravimetric method).** Gravimetrična metoda uporablja tehtanje mokrega in suhega vzorca. Do problemov pa pride pri sušenju vzorcev, ker s tem vzorec velikokrat uničimo, ohrani se le njegova masa. Metoda daje dobre rezultate.

**Kapacitivna metoda (ang. capacitive humidity sensor).** Kapacitivna metoda uporablja merjeni material kot dielektrik kondenzatorja. Za izvedbo metode potrebujemo razmeroma tanke vzorce, da je kapacitivnost merilnika merljiva. Problem predstavlja stik elektrode in materiala, ker lahko kaj hitro dobimo opazno ohmsko uporovno komponento, ki kviri meritev.

**Uporovna metoda (ang. resistive humidity sensor).** Podobno kot za kapacitivno metodo lahko vzorec materiala uporabimo kot uporovni material, ki ima upornost odvisno od količine vlage v njem. Problem spet predstavlja stik elektrode in materiala, ki lahko odločilno vpliva na celotno upornost merilnika.

**Spektroskopska metoda (ang. absorption spectroscopy).** Spektroskopska metoda temelji na merjenju absorpcije elektromagnetnega valovanja valovne dolžine  $1,93 \mu\text{m}$ , ki jo voda najbolj absorbira. Iz absorpcije lahko določimo površinsko mokrost materiala. Če material ni v celoti v ravnovesju, je lahko ta ocena precej zavajajoča.

## 5.24 Merjenje bioelektričnih signalov

Merjenje bioelektričnih signalov je že nekaj časa pomembno s stališča gradnje vmesnikov človek–stroj. Tipkovnice, miške in podobne naprave ne ponujajo ravno najbolj naravnega načina komunikacije, zato iščemo načine, kako komunikacijo izboljšati. Vse celice v telesu imajo nek lasten električni potencial, a živčne celice so tiste, ki svoj potencial izrazito spreminjajo ob prevajanju informacije. Tovrstne potenciale lahko izmerimo na koži, glavni generatorji pa so živčna vlakna, ki dovajajo krmilne signale mišicam in živčne celice v možganih. Oboji potenciali so merljivi, problem pa je njihova interpretacija. Danes je na osnovi mišičnih signalov možno zelo zanesljivo pošiljati ukaze strojem, ker so to razmeroma enostavni signali, električna možganska dejavnost pa je bolj nepredvidljiva.

**Elektroencefalografija (ang. electroencephalography – EEG).** Elektroencefalografija (EEG) meri potenciale na skalpu, ki so posledica delovanja možgan. Na skalp pritrdimo elektrode, ki jih s kožo povežemo s posebnim prevodnim gelom. Elektrode so običajno narejene iz srebrovega klorida. Standardni merilniki imajo signal po žicah speljan do ojačevalnikov, od tam pa naprej v računalnik. Naprednejši merilniki pa imajo ojačevalnike zgrajene neposredno okoli elektrod, ki jih zato imenujemo aktivne elektrode. V tem primeru dobimo bistveno manj pošumljen signal kot pri klasičnih elektrodah. Signal, ki izvira iz možganske aktivnosti ima vrednosti napetosti v območju  $\mu\text{V}$ , ki jih zajemamo z visoko ohmskimi ojačevalniki, kar pomeni, da so elektrode odlične antene za elektromagnetne motnje, od katerih je najbolj pogosta motnja električnega omrežja. Elektrode na glavo pritrdimo po standardiziranih shemah od 20 do 256 elektrod. Elektrode so montirane na posebne kape tako, da je njihova medsebojna lega točno določena. Poleg merilnih elektrod pa na glavo pritrdimo še referenčno in ozemljitveno elektrodo, napram katerima definiramo vrednosti izmerjenih nape-

tosti. Danes smatramo, da je uporabni signal EEG frekvenčno omejen na razmeroma nizke frekvence do 100 Hz. Ta meja pa se z razvojem boljših ojačevalnikov počasi pomika proti višjim frekvencam.

**Elektromiografija (ang. electromiography – EMG).** Električne signale aktivacije mišic merimo z elektromiografijo (EMG). Merilnik je običajno sestavljen iz dveh elektrod, ki ju prilepimo na kožo blizu mišice. Signal elektrod nato ojačimo in pošljemo naprej. Nivoji signalov so v območju mV, sila mišice pa je kodirana s frekvenčno modulacijo. Poseben primer merjenja EMG sta elektrookulogram (EOG) in elektrokardiogram (EKG), ki merita aktivnost očesnih in srčne mišice.

## 5.25 Neinvazivno merjenje notranje zgradbe predmetov

Za končno kontrolo kvalitete velikokrat potrebujemo sliko notranje zgradbe sistema, ne da bi sistem s tem poškodovali. Takšne pristope uporabljamo pri kontroli zvarov na kritičnih mestih. Še pogosteje pa takšne merilnike uporabljamo v zdravstvu in biotehnologiji.

**Jedrsko magnetna resonanca (ang. magnetic resonance imaging – MRI).** Jedrska magnetna resonanca uporablja elektromagnete, da proizvede referenčno magnetno polje visokih poljskih gostot, ki gredo tudi do 7 T in več. Tako visoke gostote magnetnih polj pa lahko proizvedemo samo s supra prevodnimi tuljavami. Ob zagonu merilnika navitje magnetna shladimo do temperature, ko doseže supra prevodnost, nato pa skozi navitje spustimo velik tok in tuljavo zavarimo v kratek stik. Po tuljavi sedaj brez izgub teče velikanski tok in ustvarja magnetno polje, poskrbeti moramo samo za stalno ohlajanje žic. Magnetno polje tega magnetna poravnava spine atomskih jeder v slikanem objektu. Nato pa s kratkimi magnetnimi pulzi, ki izvirajo iz merilnih anten naprave, jedra desinhronizira. Ko se jedra spet vrnejo v osnovno smer oddajo merljiv elektromagnetni signal, ki je odvisen od lastnosti jedra. Ker imamo dve sprejemni anteni, ki sta postavljeni na pravokotnih oseh skozi magnet, dobimo z izsevanim signalom informacijo o koncentraciji določenih atomov na določenem mestu. Če material pomikamo v osi tuljave pa dobimo še tretjo dimenzijo slike. Merilnik ima odlično prostorsko ločljivost, časovna ločljivost pa je razmeroma slaba. Ob pravilni interpretaciji signala je s takšnim merilnikom možno tudi snemanje možganske aktivnosti.

**Pozitronska tomografija (ang. positron emission tomography – PET).** Pozitronska tomografija je detektor gama žarkov, ki so posledica razpada radioaktivne snovi. Pri beta razpadu pride do nastanka pozitrona in elektrona, ki se kmalu medsebojno izničita tako, da izsevata dva fotona, ki se gibljeta v isti osi, a stran drug od drugega. Ko takšna para priletita na detektor lahko detektiramo os na kateri se nahaja izvor. Ker je takih dogodkov veliko tam, kjer je veliko radioaktivne snovi in ker se fotoni ne gibljejo v istih oseh, lahko si presečišča takih osi določimo izvore. Merilnik je torej sestavljen iz obročastega detektorja, objekt pa lahko pomikamo v osi detektorja in tako dobimo tridimenzionalno sliko. Pogoj za uporabo sistema je, da so v merjenem objektu radioaktivni elementi, ki so smiselno vezani na lastnosti delovanja sistema, ki nas ta trenutek zanimajo. V zdravstvu meritve izvajajo tako, da človeku vbrizgajo snov, ki seva pozitrone in nato spremljajo njeno porazdelitev po telesu in iz tega sklepajo na probleme v delovanju sistema. Merilnik včasih kombiniramo še z rentgenskim tomografom, ki iz rentgenskih slik sestavi tridimenzionalno sliko tkiva.

**Rentgen (ang. X-ray imaging).** Rentgenski merilniki so že zelo uveljavljena tehnologija za slikanje notranjosti materialov. Merilnik je sestavljen iz vira žarkov in nasproti nameščenega detektorja, ki v resnici meri gostoto materiala. Ker pa uporabljamo kot detektor polje detektorjev žarkov, dobimo kot rezultat sliko nehomogenosti gostote. Če merilnik še sukamo koli svoje osi, lahko iz rezultatov rekonstruiramo tridimenzionalno sliko notranjosti objekta. Tak princip imenujemo računalniška tomografija (ang. computed tomography – CT). Problem merilnika so relativno visoke energije merilnega žarka, ki lahko poškoduje biološki material. Merilnik je danes nepogrešljiv za preverjanje zvarov na kritičnih mestih strojev. Uporabljamo jih tudi za varnostno pregledovanje prtljage potnikov na letališčih.

## 5.26 Merjenje električne prevodnosti, faktorja pH in redoks potenciala kapljev in

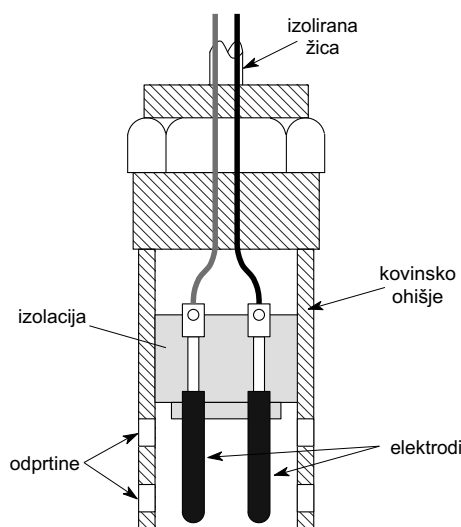
Električne in kemijske lastnosti kapljev in nosijo mnogokrat pomembno informacijo o poteku procesov obdelave le-teh, zato obstajajo merilniki, ki te lastnosti lahko merijo. Prevodnost tekočin je dober pokazatelj stopnje ionizacije molekul v tekočini. Posebno pri obdelavi odpadnih voda je visoka stopnja ionizacije nezaželena, ker kaže na določeno agresivnost snovi v vodi. Enota za električno prevodnost kapljev in je Siemens (S). Bolj specifično merilo pa je faktor pH. Faktor pH je definiran kot logaritem koncentracije vodikovih ionov in govori o kislosti ali bazičnosti kapljev in:

$$pH = -\log_{10} c_{H^+} \quad (5.66)$$

Vrednost faktorja pH 7 pomeni nevtralne kapljev in, manjše vrednosti pomenijo kisle kapljev in, večje pa bazične. Vrednost faktorja se lahko nahaja med 1 in 14. Ker koncentracija ionov neposredno vpliva na električne lastnosti kapljev in, lahko faktor merimo z električnimi postopki. Zelo pogosta meritev je tudi merjenje redoks potenciala. Redoks potencial je definiran kot privlačnost kemične snovi za elektrone in ga merimo v voltih (V), uporabljamo pa ga za ocenjevanj stopnje oksidacije, ki jo kemijska snov lahko povzroči. Za vse tri veličine pa velja, da so zelo odvisne od temperature.

**Merilnik električne prevodnosti kapljev in (ang. electrical conductivity meter).** Zasnova merilnika je zelo preprosta. Sestavljen je iz dveh kovinskih elektrod, ki sta navadno iz zelo obstojnih materialov. Na elektrodi priključimo enosmerno napetost in merimo tok. Prikaz merilnika je na sliki 5.112. Pri sprotnih meritvah moramo paziti na pojav elektrolize in nabiranja naslag na elektrodah, zato sistem običajno napajamo z vlakom bipolarnih pulzov.

**Merilnik pH (ang. pH meter).** Za merjenje pH obstaja nekaj metod, za najbolj uporabno pa velja metoda s stekleno elektrodo. Bistvo merilnika je celica s tanko stekleno steno. Uporabljeno steklo je zaradi dodanih snovi občutljiva le za točno določene ione. Obstajajo torej elektrode za detekcijo različnih ionov, a najpogosteje le za ione z enojnim nabojem. Za merjenje pH potrebujemo stekleno celico, ki je občutljiva na vodikove ione. Če ločimo s takšnim steklom dve kapljev in z različnim pH lahko med njima izmerimo napetost, ki je proporcionalna razliki vrednosti pH kapljev in. V idealnih okoliščinah bi s takšno elektrodo, ki jo imenujemo tudi merna celica, lahko izmerili pH kapljev in, ker pa imamo lahko mnogo motečih faktorjev, ki tudi vplivajo na razliko potencialov med dvema tekočinama, potrebujemo še referenčno celico, ki v idealnih pogojih daje stalno enako napetost, ne glede na



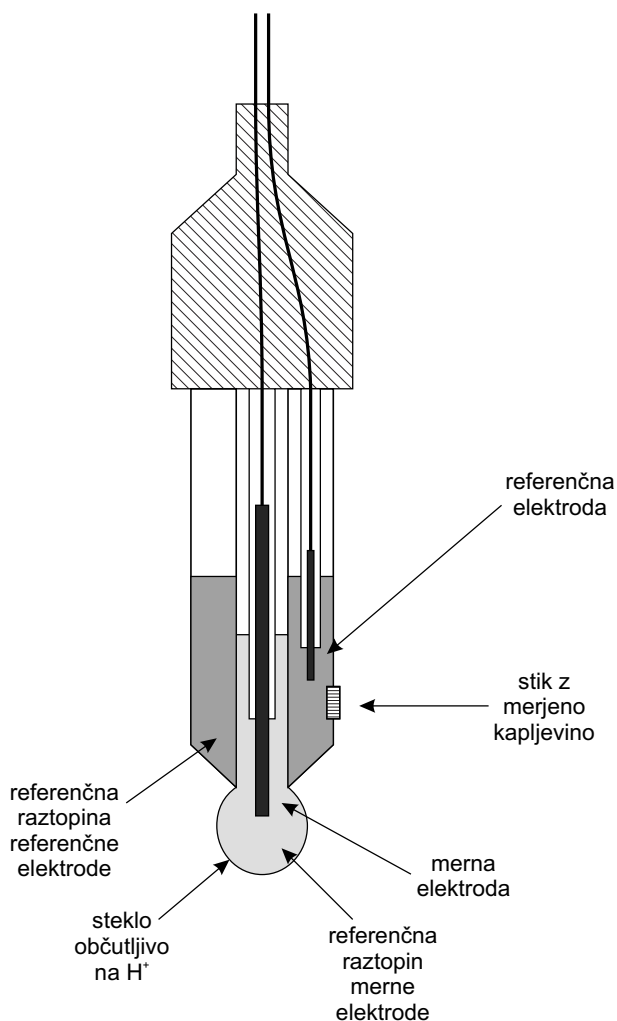
Slika 5.112: Prikaz merilnika za merjenje prevodnosti kapljev

pH merjene tekočine. V realnih pogojih moramo izhod merilnika kompenzirati z vrednostjo napetosti na referenčni celici. Prikaz merilnika je na sliki 5.113, kjer gre za rešitev, ko sta obe celici združeni v enotno merilno sondo. Elektrodi obeh celic sta narejeni iz srebrovega klorida in potopljene v referenčni raztopini s pH 7, ki je običajno 0,1 M raztopina Kalijevega Klorida (KCl). Merna elektroda je od merjene kapljevine ločena s steklom, ki je občutljivo na vodikove ione, medtem ko je referenčna elektroda povezana z merjeno kapljevino preko poroznega elementa, ki služi kot solni most za prenašanje naboja med obema elektrodama tako, da ne potrebujemo dodatnih elektrod, ki bi morale biti nameščene neposredno v merjeni kapljevini. Sonde merilnika pH imajo zelo visoke upornosti reda 50 do 500 M $\Omega$  in dajejo napetostni signal reda nekaj 10 mV, potrebujejo pa stalno kontrolo temperature.

**Merilnik redoks potenciala (ang. redox meter).** Ker je merjenje absolutnih potencialov težavno, uporabimo za merjenje redoks potenciala dve elektrodi. Referenčna elektroda je vodikova elektroda, ki ima po definiciji redoks potencial 0 V. Ker pa je ta elektroda zelo krhka, raje uporabljamo elektrode iz srebra in srebrovega klorida (Ag/AgCl) v vodni raztopini KCl ali kalumela (Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) v vodni raztopini natrijevega klorida (NaCl). Za merilno elektrodo uporabljamo platino (Pt) ali zlato (Au), ker sta inertni kovini in zato v merjeni kapljevini ne oksidirata. Elektrodi sta med seboj povezani z merjeno kapljevino, ki izmenjuje elektrone z referenčno elektrodo preko solnega mostu ali porozne keramike. Ker za referenčno elektrodo ne uporabljamo vodikove elektrode, moramo izmerjeni potencial kompenzirati za redoks potencial referenčne elektrode. Redoks potencial elektrode Ag/AgCl se giblje okoli 200 mV, potencial kalumelne elektrode pa okoli 400 mV, odvisno od referenčne raztopine in temperature.

## 5.27 Merjenje molekularne sestave snovi

Čeprav informacijo o molekularni sestavi snovi šele v zadnjem času uporabljamo tudi v ožjem smislu vodenja sistemov, pa je pomembna npr. pri optimalnem doziranju zdravil. Do-



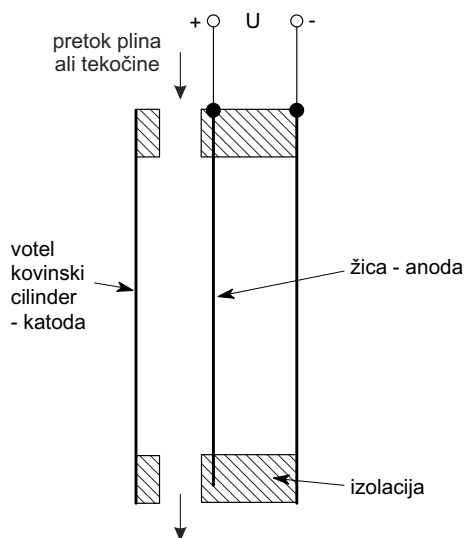
Slika 5.113: Sonda merilnika faktorja pH

ziranje zdravil je poseben primer vodenja sistemov, kjer dozo in vrsto zdravila prilagajamo glede na učinke in potrebe. Informacijo, ki jo z merjenjem dobimo pa lahko uporabljamo tako v smislu regulacije, kadar gre za zelo resne primere bolezni, kjer je potrebno hitro in pravilno ukrepanje, ali v smislu krmiljenja, kadar prilagajamo doziranje pri kroničnih boleznih. Z metodami, ki jih imamo na voljo lahko ugotovljamo koncentracijo, ne pa tudi količin, ker so volumni, ki jih snovi lahko zavzemajo nedefinirani. Standardne metode zajemajo kromatografijo in masno spektrometrijo, s katerimi določamo koncentracije manjših molekul, novejša metode pa se posvečajo merjenju koncentracij večjih organskih molekul, kot so proteini, deoksiribonukleinska kislina (DNK) in ribonukleinska kislina (RNK).

**Ionski detektor (ang. ion detector).** Čeprav ionski detektorji niso neposredno vezani na merjenje molekularne sestave snovi, pa so pomemben del teh merilnikov, zato jih omenimo na tem mestu. V osnovi so to kondenzatorji, ki so priključeni na visoko napetost in z zrakom kot izolatorjem. Vstop ionov v dielektrik povzroči tok skozi kondenzator, ki nosi informacijo o številu in naboju ioniziranih molekul, ki so vstopile v detektor. Prikaz tipičnega ionskega



detektorja je na sliki 5.114. Obstaja veliko različnih izvedb detektorjev, od katerih so eni na-



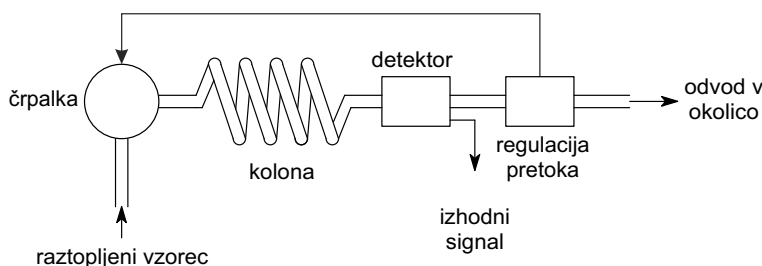
Slika 5.114: Prikaz ionskega detektorja

menjeni za detekcijo fotonov visokih energij (Geiger-Müllerjeva celica), drugi pa neposredno za detekcijo ionov.

### 5.27.1 Kromatografija

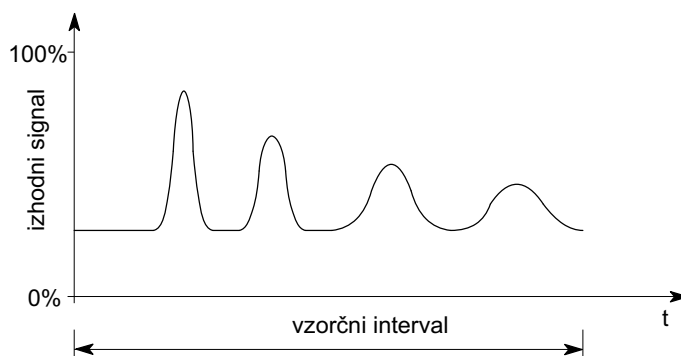
Kromatografija je skupno ime za postopke, kjer vzorce snovi primerjamo glede na hitrost potovanja skozi neko referenčno snov. Merilnik potrebuje dve fazi, mobilno in stacionarno. Vzorec snovi je lahko del mobilne ali stacionarne faze, pomembno pa je to, da se ob prehodu mobilne skozi stacionarno fazo različne molekule med seboj ločijo glede na sposobnost gibanja v danih razmerah. Princip delovanja kromatografije lahko lepo opazujemo z uporabo papirja kot stacionarne faze in vode kot mobilne faze, ko hočemo ločiti komponente črnila. Na suh papir narišemo črto črnila in papir namočimo v vodo tako, da je črta črnila nad gladino nato pa opazujemo, kako kapilarni vlek vleče vodo v papir. Sila, ki povzroča premikanje delcev je torej sila zaradi kapilarnega vleka, ki s pomočjo molekul vode nosi s seboj molekule črnila. Ker vse molekule ne morejo enako hitro potovati skozi papir, kar je odvisno od njihove polarnosti in velikosti molekule, dobimo iz enobarvne črte črnila razvlečeno sled, kjer se pokažejo različne barve. Sčasoma vse molekule preidejo neko razdaljo, z merjenjem časa prehoda pa lahko molekule ločimo glede na njihove lastnosti. Za zapletene in natančne meritve pa v praksi uporabljamo plinske in tekočinske kromatografe.

**Tekočinski kromatograf (ang. liquid chromatography – LC).** Pri tekočinski kromatografiji je stacionarna fazna trdna snov, ki je nameščena v tako imenovani koloni merilnika. Vzorec snovi raztopimo v tekočini, ki je najbolj učinkovita pri topljenju vzorca, ne da bi poškodovala molekule vzorca. Topljenje vzorca loči in/ali polarizira molekule, da jih lahko posamezno detektiramo z ionskim detektorjem ali spektroskopijo. Raztopljeni vzorec vstavimo v komoro kromatografa in ga pod tlakom pošljemo skozi kolono, na drugi strani pa z detektorji detektiramo prehod molekul. Prikaz merilnika je na sliki 5.115. Molekule ločimo med seboj



Slika 5.115: Prikaz tekočinskega kromatografa

glede na čas prehoda kolone, ki je odvisen od priprave vzorca, tlaka in privlačnih sil med molekulami vzorca in stacionarno fazo. Tlak in priprava vzorca sta odvisna od lastnosti vzorca in od ciljev meritve in ju imenujemo protokol meritve. Protokol meritve določimo za vsak vzorec posebej, glede na namen meritve. Določimo ga s predhodnimi poskusi na referenčnih vzorcih. S protokolom meritve določimo čas prehoda molekulam vzorca in s tem določimo resolucijo merilnika. Če so časi prehoda molekul, katerih koncentracijo poskušamo določiti zelo blizu skupaj, protokol spremenimo tako, da se časi prehoda podaljšajo in s tem tudi absolutne razlike med časi signalov detektorja, medtem ko so relativne razlike v času prehodov molekul odvisne izključno od molekularnih sil med vzorcem in stacionarno fazo. Prikaz signala, ki ga dobimo na detektorju je na sliki 5.116. Merilnik moramo ve-

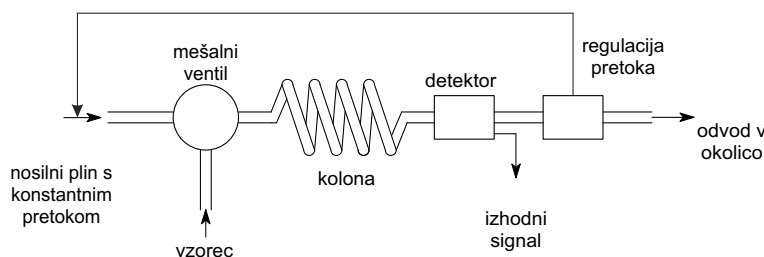


Slika 5.116: Signal tekočinskega kromatografa

dno umeriti z znanimi koncentracijami iskanih molekul, predno lahko iz signala detektorja določimo koncentracije molekul v vzorcu. Glede na tlak pod katerim pošiljamo vzorec skozi kolono, potrebno velikostjo vzorca in dolžino kolone ločimo klasični kromatograf od kromatografa visoke ločljivosti (ang. high-performance liquid chromatography – HPLC). HPLC je namenjen za analizo majhnih vzorcev, kjer potrebujemo visoko ločljivost zaradi podobnih lastnosti molekul vzorca. Natančnost metode je v glavnem odvisna od operaterja, zato rezultatov med različnimi laboratoriji ne smemo primerjati v absolutnem merilu.

**Plinski kromatograf (ang. gas chromatography – GC).** Pri plinski kromatografiji raztopimo vzorce v inertnem plinu (običajno heliju). Merilni sistem je ravno tako kot pri tekočinskem kromatografu sestavljen iz kolone in detektorja, le da sta zaradi različnih viskoznosti vzorcev drugače izvedena. Stacionarna faza je lahko tekoča ali trdna, s tlakom pa uravnavamo pretok skozi kolono. Zaradi med molekularnih sil med vzorcem in stacionarno fazo ločimo različne

molekule med seboj. Prikaz merilnika je na sliki 5.117. Vzorec pošljemo pri visokem tlaku in



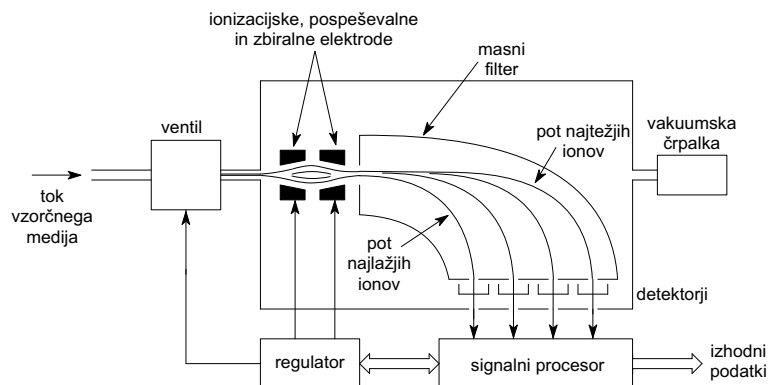
Slika 5.117: Prikaz plinskega kromatografa

visoki temperaturi skozi kolono, ki je običajno kapilara, molekule pa detektiramo na drugi strani. Delo s plinskim kromatografom je podobno delu s tekočinskim kromatografom, le da nista oba primerna za detekcijo enakih tipov molekul.

### 5.27.2 Masna spektrometrija

Masna spektrometrija ravno tako ločuje molekule vzorca med seboj kot kromatografija, le da jih ločuje na osnovi mase molekul.

**Masna spektrometrija (ang. mass spectrometry – MS).** Merilnik je sestavljen iz ionizatorja molekul, pospeševalnika molekul z električnim poljem in ionskega detektorja. Prikaz merilnika je na sliki 5.118. Vzorec vstavimo v komoro in ga z vakuumsko črpalko posrkamo do



Slika 5.118: Prikaz masnega spektrometra

ionizatorja, kjer ga obstreljujemo s hitrimi elektroni ali fotoni visoke energije, da molekule vzorca razbijemo na ione. Energija ionizacije pa ne sme biti previsoka, da molekule vzorca ne razpadejo na preveč delov, ker jih moramo potem detektirati kot vsoto signalov, kar pa je lahko problematično ali celo nemogoče. Ionizirane molekule vstopajo v pospeševalnik, kjer je močno električno polje, ki molekule pospeši glede na njihov naboj in maso. Ko molekule izstopijo iz pospeševalnika pridejo v magnetno polje, ki je pravokotno na smer njihovega leta, zato jih zavrti po krožnici, ki je odvisna od mase in naboja molekule tako, da priletijo na ionske detektorje. Signal merilnika je podoben signalu kromatografa, ravno tako tudi zahtevnost dela. Takšna oblika masnega spektrometra je primerna za merjenje manjših

molekul, za merjenje večjih organskih molekul, kot so proteini, pa uporabljamo posebno izvedbo masnega spektrometra. Problem osnovne verzije merilnika je ionizacijski postopek, ki velike organske molekule razbije v tako majhne delce, da je njihove signale nemogoče sestaviti v signal prvotne molekule. Vzorec zato raztopimo v polarnem topilu, da dobimo ione, nato pa vzorec kristaliziramo. Vzorec nato uplinimo pri zelo nizkem tlaku tako, da ga segrejemo z laserjem. Ta postopek imenujemo ionizacija v matriksu z lasersko desorpcijo (ang. matrix-assisted laser desorption ionisation – MALDI). Ker lahko pri takšnih molekulah pričakujemo tudi probleme pri rotaciji v magnetnem polju, prestavimo ionske detektorje na izhod pospeševalnika in izmerimo čas prehoda (ang. time of flight – TOF). Takšno verzijo masnega spektrometra s kratico imenujemo MALDI-TOF.

### 5.27.3 Metode za določanje izražave genov in genskega zapisa

Za učinkovito zdravljenje je mnogokrat pomembno poznati genski zapis osebk, ki ga zdravimo, da ne pride do prehudih stranskih učinkov in je zdravljenje čim hitrejše.

**Verižna reakcija s polimerazo (ang. Polymerase chain reaction – PCR).** Za določanje vsebnosti določenih genov v vzorcu uporabljamo verižno reakcijo s polimerazo, bolj znano pod angleško kratico PCR. Vzorec za analizo pripravimo tako, da v merilno epruveto zmešamo vzorec, dodamo encim polimerazo, dovolj veliko količino osnovnih nukleotidov in pa signifikantne začetne in končne oligonukleotide, ki natančno določajo gen, ki ga v vzorcu iščemo. Postopek nato začnemo z denaturacijo molekule DNK tako, da jo segrejemo na 94–98°C za 20–30 s. V tem času se molekula DNK raztopi in preoblikuje iz dvojne vijačnice v enojno. Nato sledi faza ohlajanja, ko vzorec shladimo na 50–65°C za 20–40 s, da se začetni in končni oligonukleotidi lahko z vodikovimi vezmi pritrdijo na enojno verigo na mestih začetka in konca gena. Polimeraza se nato veže na ta mesta in začne postopek izgradnje komplementarnega dela enojne verige DNK. V tej fazi, ki jo imenujemo podaljševanje, dvignemo temperaturo na optimalno vrednost za polimerazo, da postopek čim hitreje poteka. Nato pa spet začnemo z denaturacijo, da dobimo nove enojne verige. Tako postopek ponovimo 20–40 krat. Izkaže se, da je večina molekul na koncu le zapis iskanega gena. Ker so signifikantni oligonukleotidi označeni s fluorescentnimi molekulami, ki se aktivirajo, ko se nukleotidi vežejo v verigo gena, lahko iz intenzitete signala ugotovimo, če je bil iskani gen prisoten v vzorcu ali ne. Za določanje koncentracije genov pa potrebujemo varianto verižne reakcije s polimerazo v realnem času (ang. real-time PCR, RT PCR), ki obravnava intenziteto fluorescence glede na število ciklov in iz tega sklepa na začetno koncentracijo gena. Metodo lahko uporabimo tudi za merjenje koncentracije RNK, ki je vedno omejena le na zapis enega gena in je interpretacija rezultatov čista. Koncentracija RNK določenega gena kaže na njegovo aktivnost in nosi informacijo o stopnji aktivnosti procesov v telesu. V vzorcu lahko s tem postopkom vedno določimo le vsebnost ali koncentracijo enega gena hkrati.

**Biočipi DNK (ang. DNA microarrays).** Za določanje koncentracije velikega števila aktivnih genov hkrati uporabljamo biočipe DNK. To so steklene prozorne ploščice, ki imajo natisnake vzorce komplementarnih zaporedij genov označenih s fluorescentnimi molekulami, ki postanejo aktivne, ko se RNK iz vzorca veže na natisnake vzorce. Obstaja tudi varianta, ko s fluorescentnimi molekulami označimo molekule vzorca. Vsaka natiskana točka lahko veže nase le točno določene gene iz intenzivnosti svetlobnega signala pa sklepamo na koncentracijo.

cijo aktivnih oz. izraženih genov v vzorcu. Biočipi in čitalniki so dostopni na trgu, možen pa je tudi razvoj lastnih. Z njimi lahko hkrati določimo koncentracije nekaj tisoč genov, imajo pa zelo izrazit šum, zato potrebujejo zahtevno statistično obdelavo signalov.

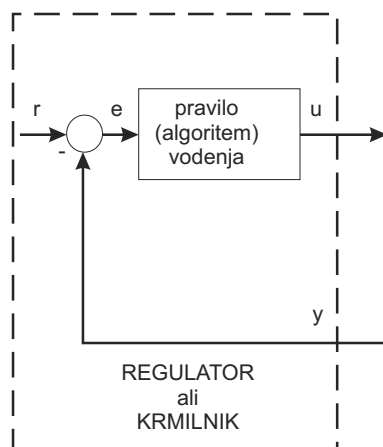
**Sekvenatorji DNK (ang. DNA sequencers).** Za določanje razlik v sestavi genov uporabljamo sekvenatorje DNK. Danes so v uporabi metode, ki lahko obdelajo velike količine podatkov v razmeroma kratkem času. Sekvenator razbije sekvenco gena na osnovne nukleotide tako, da ugotovimo kakšno je bilo njihovo zaporedje v genu, pri čemer za detekcijo nukleotidov uporabljajo tako encime kot tudi radioaktivno ali fluorescentno označevanje. Obstaja veliko principov sekvenciranja, ki so nastali zaradi obsežni genomskih projektov, zahtevnost principov pa presega okvire te knjige. V zdravstvu so tovrstne informacije zelo pomembne s stališča doziranja, saj spremembe v sekvenci gena lahko pomenijo boljši ali slabši metabolizem molekul zdravila in s tem drugačne optimalne doze zdravila. Žal pa so tovrstni merilniki še vedno vezani zgolj na raziskovalni nivo, medtem ko se v kliničnem okolju praviloma še ne uporabljajo.



## 6

# Regulatorji in krmilniki

Regulatorji in krmilniki predstavljajo možgane sistemov vodenja. Vsi podatki od merilnih sistemov se stekajo do njih, od njih pa gredo ukazi na izvršne sisteme (slika 6.1). V zelo



Slika 6.1: Shema regulatorja ali krmilnika:  $r$  – referenca,  $y$  – signal regulirane veličine,  $u$  – signal regulirne veličine.

obsežnih sistemih je lahko na regulator ali krmilnik vezanih tudi nekaj sto signalov. Danes sta obe vrsti zgrajeni okoli mikroprocesorja, njihovo delovanje pa nadzoruje uporabniški program. Čeprav sta s stališča osnovne zgradbe sistema praktično enaka pa ju še vedno ločimo glede na namen uporabe. Regulatorji so prvenstveno namenjeni vodenju sistemov, medtem ko so krmilniki namenjeni sekvenčnemu krmiljenju v izdelčni industriji. Zato imajo regulatorji načeloma manjše število vhodov in izhodov kot krmilniki in krajši čas vzorčenja, da lahko vodijo tudi sisteme s hitro in nestabilno dinamiko.

## 6.1 Industrijski regulatorji

Industrijski regulatorji so se razvili na osnovi principov, ki so jih opazovali že pri mehanskih regulatorjih parnih strojev. V glavnem je šlo takrat za sisteme, ki so preko vzvodov vzpostavljali ravnovesje sil in navorov in s tem vsiljevali reguliranemu sistemu določen način obnašanja (slika 6.2). Kasnejše verzije so mehaniko dopolnile s pnevmatskimi sistemi na

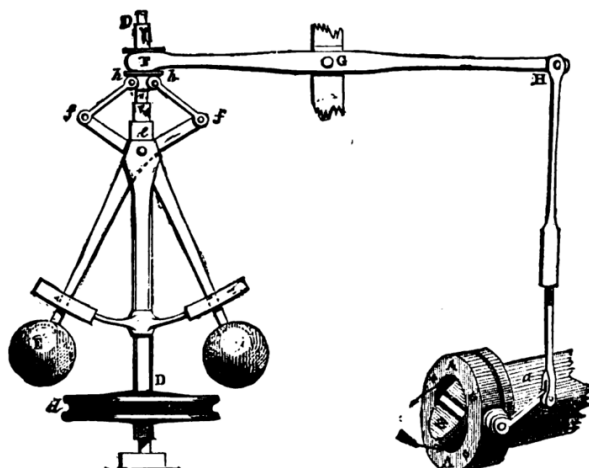


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

Slika 6.2: Originalna risba Wattovega centrifugalnega regulatorja iz knjige: R. Routledge. Discoveries & Inventions of the Nineteenth Century, 13th edition, 1900

principu šoba-zaslon, ki so omogočali bolj natančno vodenje. S prihodom elektronike pa so se regulatorji bistveno spremenili. Z elektronskimi komponentami je bilo možno izvesti skoraj poljubno karakteristiko regulatorja in s tem avtomatizirati veliko več različnih procesov kot z mehanskimi ali pnevmatskimi regulatorji, predvsem pa so postali njihovi odzivni časi bistveno krajši. Tako so za bombnike v II. svetovni vojni razvili prve popolnoma elektronske avtopilote, kot je bil leta 1941 izvedeni Sperryev model A-5 (slika 6.3). Izum pol-



Slika 6.3: Prvi elektronski avtopilot Sperry A-5

prevodniških elementov je spet vplival na regulatorje, saj so postali manjši in bolj robustni, predvsem pa cenejši. Do uvedbe mikroprocesorja so prevladovali regulatorji izvedeni z operacijskimi ojačevalniki. Pri vseh regulatorjih, od mehanskih do analognih elektronskih je bilo



značilno to, da je bilo nastavitve regulatorja dokaj enostavno spreminjati, algoritem delovanja pa je bil neposredno odvisen od električnih povezav oz. ožičenja. Menjava algoritma je tako zahtevala popolno rekonstrukcijo regulatorja ali pa izgradnjo novega sistema. Uporaba mikroprocesorja za izvedbo regulatorja je omogočila, da je bilo možno tudi algoritem regulacije zelo enostavno spreminjati, ker je le-ta samo program, ki teče na splošni strojni opremi. Za izgradnjo modernega regulatorja je torej potrebno imeti sistem, ki vsebuje mikroprocesor s spominskimi enotami, analogno–digitalne (AD) pretvornike, digitalno–analogne (DA) pretvornike in nekaj digitalnih vhodov in izhodov, vse ostalo je izvedeno programsko. V današnjih verzijah industrijskih regulatorjev sta še vedno ostali dve omejitvi, ki jih narekuje združljivost s starejšimi napravami. Prva je ta, da je število zank, ki jih regulator lahko vzporedno vodi precej omejeno (običajno dve). Druga je izgled prednje plošče, ki naj vsebuje prikazovalnik reference, prikazovalnik pogreška in tipke ali gumbе za spreminjanje nastavitvev regulatorja in preklop ročno avtomatsko (slika 6.4). Podrobneje so regulatorji definirani s standardom IEC 60546. Programiranje regulatorjev izvajamo na osebnih računalnikih s po-



Slika 6.4: Izgled sprednje plošče regulatorja

sebno za to namenjeno programsko opremo proizvajalca, nato pa ga preko protokola, ki ga določi proizvajalec, prenesemo na regulator. Do nedavnega je prenos in komunikacija med regulatorjem in osebnim računalnikom potekala preko serijske povezave RS-232 ali RS-485, danes pa komunikacija poteka preko povezave USB ali pa ethernet. Strojna izvedba regulatorjev mora biti izvedena tako, da zagotavlja izjemno robustnost in zanesljivost, obstajajo pa tudi izvedbe po sistemu “fail-safe”, ki ob okvari sistem varno zaustavijo oz. ga pustijo v nekem stabilnem stanju, v katerem ne more priti do okvar ali nevarnosti za okolico.

## 6.2 Programirljivi logični krmilniki

Postopke, ki so mešanica seznamov zaporedij opravil in regulacije zveznih veličin vodimo s krmilniki. Tu pravzaprav pridemo v nasprotje, ker se ime tepe z izrazom krmiljenje, ki pomeni odprtozankno vodenje, medtem ko krmilnik sproti dobiva informacije o stanju sistema in nanje reagira v smislu, ki ga predpisuje algoritem in torej največkrat deluje v strukturi imenovani regulacija. Ker so bili krmilniki v osnovi relejna vezja, ki so realizirala logične in spominske funkcije za izvajanje sekvenčnih postopkov, je bila povratna zanka v tem primeru manj poudarjena in drugače obravnavana kot pri regulatorjih, zato je ime do neke mere upravičeno. Razvoj na področju krmilnikov se je začel pri prvih avtomatih v stari Grčiji, kjer je nek diskreten dogodek, kot je bil na primer odložen ustrezen kovanec na pravo mesto v napravi, sprožil niz v naprej določenih operacij. Tak princip so nato uporabili na statvah,

ko so s preluknjanimi trakovi določali tip tkanja, luknje pa so detektirali s pomočjo tlačnih šob. Izum kontaktnika ali releja pa je povzročil pravi razcvet na področju in še danes lahko najdemo delujoče krmilnike z relejno logiko. Problem relejnih izvedb je bil hitro obrabljanje kontaktov in s tem nezanesljivi stiki ter neprilagodljiv način zapisovanja recepta. Ob vsaki večji spremembi naprave ali recepta je bilo potrebno na novo sestaviti in ožičiti krmilnik. Prihod mikroprocesorja je popolnoma spremenil krmilnike, saj so se skoraj čez noč spremenili iz relejnih vezij v programirljive logične krmilnike (PLK). Na nivoju strojne opreme so zelo podobni osebnim računalnikom, le da je strojna oprema izvedena za zanesljivo dolgotrajno delovanje. Bistvena razlika napram industrijskim regulatorjem je neprimerno večje možno število vhodnih in izhodnih signalov na krmilnikih. Čeprav so bili v preteklosti vhodno/izhodni signali večinoma stopenjski, pa so pri PLK-jih uvedli tudi vhode in izhode z AD/DA pretvorbo in s tem smo dobili možnost uporabe zveznih signalov v krmilniku. Krmilnik je zaradi večje raznovrstnosti nabora vhodnih in izhodnih veličin bolj splošno uporaben kot industrijski regulator in ima zato tudi večji tržni delež. Da bi vsaj navzven poenotili PLK-je je bil sprejet standard IEC 61131, ki določa delovanje, teste in postopke za programiranje krmilnikov.

### 6.2.1 Izvedbe krmilnikov

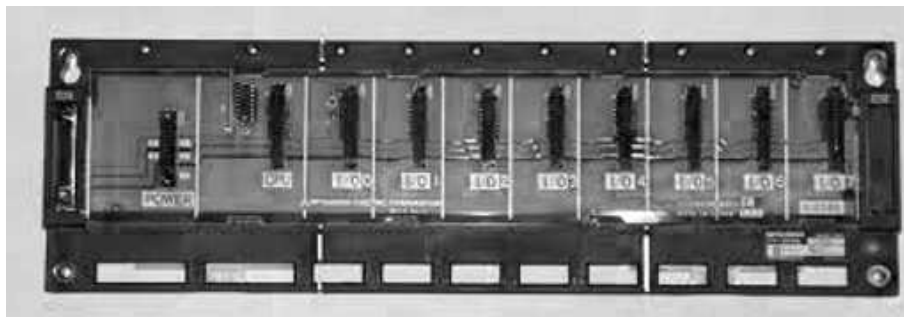
Za vse krmilnike je značilno, da se program izvaja v neskončni zanki, zato je za delo v realnem času zelo pomemben podatek, kako hitro se zanka na krmilniku lahko izvaja, običajno pa se en cikel (ang. scan time, cycle time) izvede v času reda ms ali celo hitreje. Čas cikla je odvisen od zapletenosti programa, števila vhodnih in izhodnih signalov ter zmogljivosti procesorja. Na krmilnike lahko navadno priključimo: digitalne signale, zvezne signale, posebne signale kot so izhodi termočlenov, enkoderjev, itd. V grobem ločimo dve osnovni varianti PLK-jev in sicer kompaktne in modularne izvedbe.

**Kompaktni PLK** je izveden v enem kosu, ki vsebuje centralno procesno enoto, napajalnik, ki omogoča priključitev na omrežno napetost, konektor za programiranje in/ali priklop na omrežje ter priklope za vhodno–izhodne signale. Izbiramo lahko med različnimi konfiguracijami, a le tistimi, ki jih je predvidel proizvajalec. Namenjeni so manj zahtevnim sistemom vodenja z manjšim številom signalov in bolj enostavnimi algoritmi vodenja, zato so omejeni tako s številom priključkov zunanjih signalov kot s količino spomina, pa tudi izvajanje programa je navadno počasnejše. Primer kompaktnega PLK-ja je na sliki 6.5.

**Modularni PLK** je namenjen najzahtevnejšim sistemom vodenja. Njegova največja prednost pa je, da ga uporabnik lahko sestavi glede na svoje potrebe. Sestavljen je iz osnovne plošče, ki je vodilo za komunikacijo med moduli krmilnika in fizični nosilec modulov. Obstajajo različne velikosti osnovnih plošč, zato moramo vnaprej vedeti, koliko modulov nameravamo uporabiti za sistem vodenja. Primer osnovne plošče krmilnika je na sliki 6.6. Obvezno potrebujemo napajalnik, ki mora pokrivati porabo modulov in modul s centralno procesno enoto. Nato pa izberemo ostale module glede na potrebno število in tip vhodno/izhodnih signalov. V primeru, da največja osnovna plošča ne zadosti potrebam po številu vhodov in izhodov, lahko sistemu dodamo še razširitevno ploščo in jo povežemo z osnovno ploščo. Vrste in organizacija možnih modulov je odvisna od posameznega proizvajalca, načeloma pa so moduli organizirani tako, da obstajajo posebni moduli za vhodne in izhodne signale ter



Slika 6.5: Primer kompaktnega PLK-ja (Mitsubishi serija FX)



Slika 6.6: Primer osnovne plošče PLK-ja

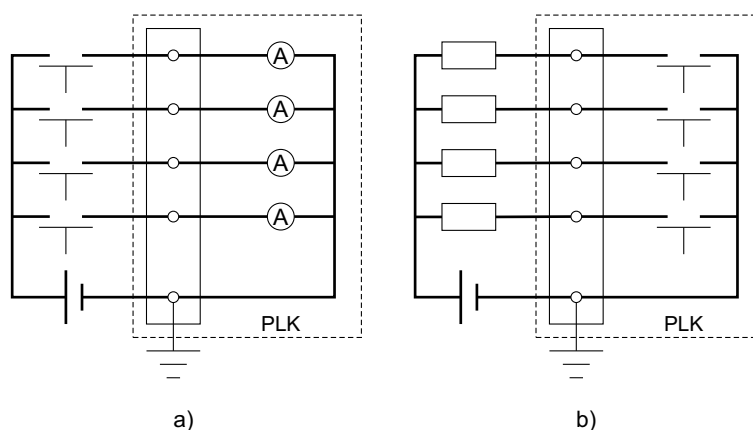
omogočajo priključitev  $2^n$  signalov, kjer je  $n$  odvisen od potreb uporabnika. Navadno pa ni večji od 5 zaradi fizičnih omejitev dimenzij priključkov.

### 6.2.2 Vezave stopenjskih merilnih in izvršnih sistemov na PLK

Zaradi večje učinkovitosti, glede na število uporabljenih vodnikov za povezavo stopenjskih merilnih in izvršnih sistemov na PLK, uporabljamo vezavo s skupno maso. Običajno so digitalni vhodi in izhodi izvedeni tako, da imajo mase od več priključkov vezanih skupaj. Tako potrebujemo samo en masni vodnik za nekaj merilnikov ali aktuatorjev. Poleg skupne mase pa nujno potrebujemo še zunanje napajanje za prenos signala. Primer vezave vhodov in izhodov s štirimi vhodi ali izhodi s skupno maso je prikazan na sliki 6.7.

### 6.2.3 Programiranje krmilnikov

Ker je privajanje novi programski opravi dolgotrajen postopek, so se proizvajalci PLK-jev odločili za standardizacijo postopkov programiranja. Tako je bil postavljen standard IEC 61131-3. Standard predvideva pet postopkov programiranja: lestvični diagram (ang. ladder diagram, LD), funkcijski bločni diagram (ang. function block diagram, FBD), strukturirani tekst (ang. structured text, ST), listo ukazov (ang. instruction list, IL) in sekvenčni funkcijski diagram (ang. sequential function chart, SFC). Vsak proizvajalec sicer še vedno izdeluje svoje programske orodje za programiranje krmilnikov a delo z njimi je zaradi standarda precej poenoteno, zato je prehajanje med PLK-ji različnih proizvajalcev lažje.



Slika 6.7: Primer vezave stopenjskih merilnih (a) in izvršnih sistemov (b) na PLK

### 6.3 Osebni računalniki v kombinaciji z vmesniškimi karticami za zajem podatkov

Za vodenje sistemov, kjer imamo opravka z algoritmi, ki jih niti na najzmogljivejših PLK-jih ne moremo realizirati, uporabljamo osebne računalnike, ki komunicirajo z ostalimi gradniki sistema vodenja preko vmesniških kartic. Takšno varianto imenujemo tudi SoftPLK. Tako izveden krmilnik ali regulator je izjemno prilagodljiv, ima pa tudi svoje slabosti. Večina operacijskih sistemov je več opravičnih in več uporabniških, kar pa ne omogoča enostavne izvedbe komunikacije v realnem času. Operacijska sistema Microsoft Windows in Linux imata zato razvitih več variant, ki omogočata delovanje sistema v realnem času. Za izvedbo krmilnika ali regulatorja potrebuje gonilnike za vmesniške kartice, algoritem vodenja pa lahko izvedemo v poljubnem programskem orodju, ki omogoča komunikacijo z gonilniki. Zaradi nezanesljivosti strojne opreme osebnih računalnikov pa takšnih sistemov ne moremo uporabljati za rutinsko vodenje industrijskih sistemov, kjer bi odpoved krmilnika lahko povzročila nevarnost ali škodo.

### 6.4 Mikrokrmilniki

Mikrokrmilniki so cenene in izredno zmogljive naprave, ki jih lahko uporabimo kot regulatorje ali krmilnike. V uporabi jih najdemo tako v igračah kot tudi v visoko profesionalnih sistemih in jih imenujemo tudi vgradni sistemi. Glede robustnosti se sicer ne morejo primerjati z industrijskimi regulatorji ali PLK-ji, so pa zato bistveno cenejši, manjši in porabijo bistveno manj energije za napajanje. Obstaja nekaj specializiranih proizvajalcev mikrokrmilnikov (ATMEL, ARM, Microchip, Texas Instruments, ...), poleg njih pa jih proizvajajo tudi vsi večji proizvajalci mikroprocesorjev za računalniške sisteme. Mikrokrmilnik je sistem, ki je izveden na eni ploščici tiskanega vezja in navadno vsebuje: mikroprocesor, spominske enote (EEPROM, ROM, RAM, ...), zmogljive časovnike, pretvornike AD/DA, sisteme za serijsko komunikacijo (UART) ter generator signala pulzno-širinske modulacije. V osnovi je to računalnik z manjšo količino spominskega prostora in posebnimi sistemi za komunikacijo s perifernimi napravami. Za zagon potrebujemo le napajalnik in namenski program. Z razvojem se nabor vgrajenih podsistemov mikrokrmilnika samo še povečuje, medtem ko se

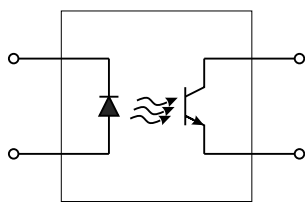
njegova velikost in poraba manjšata. Danes že dobimo verzije na katerih tečejo celo operacijski sistemi Microsoft Windows ali Linux. Programiramo jih s pomočjo programske opreme, ki pa ni nujno od proizvajalca mikrokrmilnika. Obstaja cel spekter podjetij, ki se ukvarjajo z izdelavo programskih orodij za programiranje mikrokrmilnikov. Danes jih najdemo v uporabi skoraj povsod, od mobilnih telefonov do satelitov in so zato danes najbolj razširjen tip regulatorja oz. krmilnika. Na sliki 6.8 je prikazan primer mikrokrmilnika š-arm, ki je za pedagoške namene v uporabi na Fakulteti za elektrotehniko.



Slika 6.8: Mikrokrmilnik š-arm

## 6.5 Sistemi za varovanje krmilnikov in regulatorjev pred napetostnimi in tokovnimi udari

Krmilniki in regulatorji so lahko med obratovanjem v industrijskem okolju izpostavljeni različnim tokovnim in napetostnim udarom, kar je lahko za njih usodno. Da zagotovimo zanesljivo delovanje sistema vodenja, je smiselno krmilnike in regulatorje posebej zaščititi. Zaščito pred tokovnimi udari predstavljajo varovalke in hitra odklopna stikala, ki krmilnik ali regulator dovolj hitro odklopita od preostalega sistema, da ne pride do poškodb. Res pa je, da je tovrstna nevarnost razmeroma majhna. Mnogo bolj pogosta nevarnost so napetostni udari, ki so lahko posledica okvarjene močnostne opreme ali bližnjega udarca strele. Za prenapetostno zaščito so sicer na vseh vhodih in izhodih krmilnika že vgrajene določene zaščite, kot so Zenerjeve diode. Žal pa je pri hudih napetostnih udarih takšna zaščita premalo. Najboljša zaščita so vsekakor optični sklopniki, ki galvansko povsem ločijo tokokroge zunaj in znotraj krmilnikov in regulatorjev. Shema optičnega sklopnika je na sliki 6.9. Ob napetostnem udarcu pregori svetleča dioda, napetostni sunek pa ne more potovati naprej, ker je edina sklopitev preko svetlobnega signala. V takem primeru je optični sklopnik sicer uničen, a krmilnik ali regulator sta ostala nepoškodovana, kar je s stališča velikosti škode bistveno bolj ugodno. Na trgu obstajajo moduli za krmilnike, ki že imajo izvedeno optično ločitev signalov.



Slika 6.9: Shema optičnega sklopnika

## 6.6 Operaterski paneli

Ker je komunikacija med krmilniki ali regulatorji ter uporabnikom zelo omejena in težavna, so razvili operaterske panele. Izvedeni so tako, da omogočajo čim enostavnejše poseganje operaterja v delovanje sistema. Običajno prikazujejo shemo delovanja procesa in njegovo trenutno stanje ter dovoljujejo pooblaščenim osebam preklope med ročnim in avtomatskim načinom vodenja ter razne manjše posege v sistem med delovanjem. S krmilnikom ali regulatorjem komunicirajo preko omrežja ali posebne povezave tako, da dostopajo do vsebin njihovih spominskih celic. Z branjem vsebin določenih spominskih naslovov lahko prikazujejo trenutna stanja sistema, z vpisovanjem vrednosti pa omogočajo poseganje v proces. Izdelava zaslonских slik in izvedba posegov v vodenje je prepuščena dogovoru med razvijalcem in naročnikom. Na trgu najdemo različne panele, od barvnih z visoko ločljivostjo in z zaslonom občutljivim na dotik, pa do panelov, ki imajo samo nekaj tipk in lahko prikažejo le par vrstic teksta. Osnova panela je mikrokrmilnik, ki ima razmeroma majhno količino spomina in nadzoruje zaslon. Za komunikacijo z okolico imajo navadno na voljo nekaj standardnih komunikacijskih protokolov.

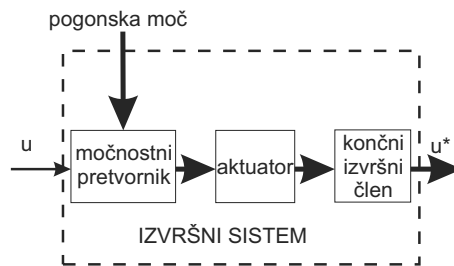
## 6.7 Nadzorni sistem

Nadzorni sistem deluje na višjem nivoju vodenja in navadno povezuje vse krmilnike in regulatorje v enoten proces. Običajno ga označujemo s kratico SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) in vsebuje tako zajemanje in skladiščenje podatkov o delovanju procesa, kot tudi njihovo analizo s stališča pravilnega poteka procesnih parametrov. Če katero koli stanje sistema prestopi tolerančni pas sistema SCADA javi alarm, ki se zabeleži v zgodovino delovanja procesa. Nadzorni sistem je program, ki teče na osebnih računalnikih ne spada med časovno ali zanesljivostno kritične dele sistema vodenja, ker lahko nižji nivoji delujejo povsem neodvisno od nadzornega sistema. Za delovanje potrebuje strežnik, na katerem teče glavni program in podatkovna baza. Poleg strežnika pa imamo lahko več delovnih postaj, iz katerih lahko nadzorujemo delovanje procesa in vanj tudi posegamo. Ker nadzorne sisteme večinoma proizvajajo proizvajalci krmilnikov in regulatorjev, lahko preko nadzornega sistema izvajamo tudi nalaganje novih programov na vse krmilnike in regulatorje, ki so vključeni v nadzorni sistem. Takšna rešitev je zelo uporabna, posebno pri sistemih, ki se razprostirajo po velikem področju, skriva pa v sebi past, da lahko že ob manjši nepazljivosti pošljemo program napačnemu krmilniku in s tem povzročimo veliko problemov. Nadzorni sistem pošilja poročila o delovanju procesa višjim nivojem vodenja, ki pa jih na tem mestu ne bomo obravnavali.

# 7

## Izvršni sistemi

Izvršni sistemi dovajajo ali odvijajo energijo reguliranemu ali krmiljenemu sistemu glede na ukaze krmilnika ali operaterja (slika 7.1). Za prenos energije med izvorom/ponorom in



Slika 7.1: Zgradba izvršnega sistema:  $u$  – signal regulirne veličine,  $u^*$  – regulirna veličina

vodenim sistemom uporabljamo večinoma naslednje načine:

- prenos preko električnih poti,
- prenos preko stisnjene zraka (pnevmatika) in
- prenos preko hidravlične tekočine (hidravlika).

Glede načinov prenosa energije so torej bolj raznoliki kot merilni sistemi ter regulatorji in krmilniki. V primerjavi z merilnimi sistemi je izbira različnih gradnikov precej omejena. V glavnem vsi izvršni sistemi pretvarjajo različne oblike energije v kinetično ali potencialno energijo, lahko pa tudi v toplotno. So edini del sistema vodenja, ki ima velike potrebe po energiji, zato si najprej pogledamo izvore energije za posamezen način prenosa.

### 7.1 Izvori energije

V sistemih vodenja v glavnem srečamo izvršne sisteme, ki uporabljajo elektriko, stisnjen zrak ali hidravlično tekočino za svoj pogon, zato si bomo pogledali izvore energije, ki za prenos energije uporabljajo navedene medije.

### 7.1.1 Električna

Najbolj razširjen medij prenosa energije je električna. Dokaj enostavno jo lahko prenašamo na velike razdalje ob majhnih izgubah. Manjše količine energije lahko tudi uskladiščimo, vendar so tu še vedno problem slaba učinkovitost in razmeroma kratka življenjska doba sistemov za skladiščenje.

**Baterije (ang. primary battery).** Za manjše izvršne sisteme lahko pridobimo pogonsko energijo iz baterij. Baterije so galvanski členi, kar pomeni, da so kemijski shranjevalniki energije. Značilnost baterij je, da lahko kemijska reakcija poteka samo v eno smer in so zato samo za enkratno uporabo. Ko na baterijo priključimo porabnik, začne v bateriji teči kemijska reakcija, ki poganja električni tok. Dobra stran je, da je napetost natančno definirana, žal pa zaradi velike notranje upornosti z obremenitvijo upada. Občutljive so tudi na nizke in visoke temperature, ki vplivajo na potek reakcije. Obstaja veliko tipov baterij, ki se med seboj v glavnem ločijo glede na uporabljene kemikalije in glede na napetosti, ki jih proizvajajo. Najbolj razširjene so mangan–dioksidne (alkalne) baterije in cink–ogljikove baterije ter litijeve baterije, ki so namenjene za pogon manjših naprav, ki zahtevajo zelo zanesljivo napajanje. Litijeve baterije namreč lahko zdržijo tudi do 15 let, zato jih uporabljamo tudi za pogon implantatov. Problem baterij je, da medij za prenos ionov zaradi svoje agresivnosti s časom toliko poškoduje shranjevalnik, da se razlije po napravi, kjer lahko povzroči precejšnjo škodo. Ko so baterije izrabljene, jih je potrebno ustrezno odstraniti, ker predstavljajo precejšnjo obremenitev okolja zaradi lastnosti uporabljenih kemikalij. Podatki o bateriji, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- nazivno napetost,
- kapaciteto (običajno od nekaj 100 mAh do nekaj 1000 mAh),
- rok uporabnosti,
- karakteristiko napetost–tok in
- temperaturno območje delovanja in shranjevanja.

**Akumulatorji (ang. secondary, rechargeable battery).** Akumulatorji so galvanski členi, pri katerih lahko s spremembo smeri toka kemijsko reakcijo obrnemo in s tem ponovno napolnimo akumulator z električno energijo. Glede na izvedbo imajo zelo različne kapacitete shranjevanja energije in različne notranje upornosti.

Najpogostejši so svinčevi akumulatorji, kjer imamo dve svinčevi elektrodi (ena iz čistega svinca, druga iz svinčevega oksida), vmes pa mešanico žveplove (VI) kisline in vode. Svinčevi akumulatorji imajo majhno notranjo upornost in lahko ob kratkem stiku proizvedejo zelo velik tok. Energija, ki jo iz svinčevih baterij lahko dobimo je odvisna od hitrosti praznjenja. Tako lahko pri velikem praznilnem toku navidez spraznimo baterijo, a po nekem času mirovanja spet lahko pridobi nazaj nazivno napetost. Njihov problem pa je velika teža, izjemna jedkost medija za prenos ionov in obremenitev okolja pri izdelavi in ob uničenju, ko se iztrošijo. Dobra stran pa je, da jih je možno učinkovito reciklirati.

Konkurenčni tip akumulatorja so nikelj–kadmijevi (NiCd) akumulatorji. To so majhni in lahki akumulatorji z razmeroma veliko kapaciteto shranjevanja električne energije. Imajo pa



opazen spominski efekt, če jih polnimo v rednih intervalih. To so opazili pri uporabi na satelitih, ko so zaradi lastnosti kroženja okoli zemlje v rednih intervalih polnili akumulatorje s sončnimi celicami. Pri spominskem efektu pride do upada maksimalne napetosti na bateriji, če jo stalno polnimo in praznimo med istima vrednostma napetosti. Spominski efekt ni pretirano velik in se velikokrat preveč poudarja. Drug problem je tvorjenje dendritnih struktur, ki lahko tvorijo kratke stike med elektrodama, kar se zgodi, če jih dolgo ne uporabljamo. Akumulatorji NiCd imajo nizko notranjo upornost, zato lahko proizvedejo velike tokovne konice, dosežejo pa gostoto energije 210 kJ/kg. So temperaturno občutljivi. Pri izdelavi in razgradnji so obremenjujoči za okolje zaradi visoke vsebnosti kadmija.

Akumulatorji nikelj–metal hidrid (NiMH) so glede kapacitete precej boljši kot NiCd. Gostota energije doseže 270 kJ/kg, vendar imajo razmeroma velik tok samopraznjenja, zato niso primerni za dolgotrajno uporabo pri majhni obremenitvi. So tudi precej občutljivi na način polnjenja, saj jih lahko hitro preveč napolnimo in s tem trajno poškodujemo. Za polnjenje akumulatorjev NiMH potrebujemo posebne polnilnike in jih ne smemo polniti s polnilniki za akumulatorje NiCd.

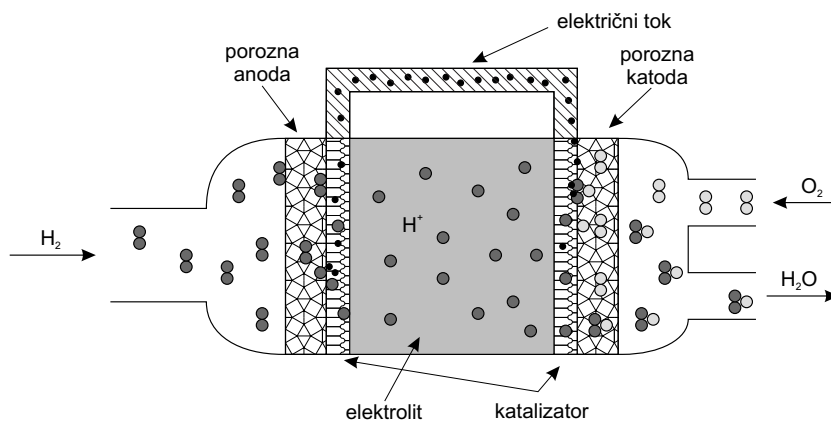
Litij–ionski (Li-ion) akumulatorji imajo še boljšo kapaciteto, saj dosegajo celo do 900 kJ/kg. S tem precej prekašajo prej omenjene tipe. Imajo pa tudi par slabosti. Pri polnjenju se tvorijo snovi, ki počasi zmanjšujejo njihovo kapaciteto, imajo tudi visoko notranjo upornost, kar zmanjša največji možen tok praznjenja. Problematični so tudi za polnjenje. Če jih preveč napolnimo ali pregrejmo, lahko pride celo do eksplozije, zato imajo vgrajena vezja, ki stalno spremljajo temperaturo in napetost akumulatorja. Poleg tega imajo vgrajeno tudi mehansko zaščito, ki pri prevelikem tlaku znotraj akumulatorja odpre ventil in spusti nastali vodik v okolico. Polnimo jih s konstantnim tokom, dokler ne dosežemo nazivne napetosti, nato pa tok zmanjšujemo tako, da napetost ves čas ostaja enaka. Ko tok dovolj upade s polnjenjem prenehamo.

Najnovejši tip akumulatorjev so litij–polimerni (Li-Po) akumulatorji. Shranijo lahko zelo veliko energije na maso akumulatorja in sicer 720 kJ/kg. Ne potrebujejo togega ohišja, ker v njih ni tekočine. Z uporabo nekaj časa pridobivajo na kapaciteti, potem pa le ta pada hitreje kot pri litij–ionskih akumulatorjih. Načeloma zdržijo okoli 1000 polnjenj in praznjenj. Polnimo jih s konstantnim tokom, dokler ne dosežemo konstantne nazivne napetosti nato pa tok zmanjšujemo tako, da napetost ves čas ostaja enaka. Ko tok dovolj upade s polnjenjem prenehamo. Hranimo jih lahko napolnjene do 3 mesece. Če jih hranimo dlje je dobro, če jih spraznimo do polovice ali celo damo v hladilnik, ne smemo pa jih zmrzniti. Za dobro delovanje potrebujejo elektronski nadzor. Ta skrbi, da se vse celice praznijo tako, da so vse stalno na isti napetosti, sicer lahko pride do velikih tokov med celicami.

Podatki o akumulatorju, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- nazivno napetost,
- kapaciteto (običajno od nekaj 100 mAh do nekaj 1000mAh),
- rok uporabnosti,
- maksimalno število ciklov polnjenja,
- karakteristiko napetost–tok in
- temperaturno območje delovanja in shranjevanja.

**Gorivne celice (ang. fuel cell).** Gorivne celice v resnici niso nova tehnologija. Princip delovanja je leta 1838 odkril nemški znanstvenik Christian Friedrich Schönbein, ki je odkritje tudi objavil v eni izmed takratnih znanstvenih revij. Praktično izvedbo prve gorivne celice je leto pozneje izvedel Sir William Robert Grove. NASA je s firmo General Electric razvila prvo gorivno celico, ki so jo v letih 1965 in 1966 uporabili v projektu Gemini. Tehnologija gorivnih celic je v zadnjem desetletju močno napredovala, saj je vedno večja potreba po virih energije, ki so neodvisni od fosilnih goriv in ne onesnažujejo okolja oz. imajo minimalne emisije strupenih plinov. Obstaja več tipov gorivnih celic kot so: alkalne gorivne celice (GC), polimerne (PEM – Proton Exchange Membrane ali Polymer Electrolyte Membrane), GC s fosforno kislino, GC s staljenim karbonatom, itd. Bistvo delovanja gorivne celice je oksidacija vodika v vodo v posebnih razmerah. V normalnih razmerah tvorita vodik in kisik eksplozijsko mešanico, ki ob vžigu sprosti veliko količino energije, kot rezultat pa nastane voda. V gorivni celici pa vodik s katalizatorjem ioniziramo tako, da proton potuje preko elektrolita elektroni pa po žici. Na drugi strani celice dovajamo kisik. Ko vodikovi protoni pridejo preko elektrolita do nasprotne elektrode celice, kjer s katalizatorjem ioniziramo kisik, se zopet združijo z elektroni, ki so potovali po žici ter z atomi kisika in tvorijo vodo. Sistem je torej neke vrste galvanski člen, ki je po delovanju podoben merilnikom pH ali redoks potenciala. Bistvena razlika med galvanskim členom in gorivno celico pa je ta, da je izvor elektronov v celici vodik, ki sproti doteka, medtem ko je pri galvanskem členu to neka končna masa negativne elektrode. Če na žico, ki prenaša elektrone priklopimo porabnik, se na njem troši proizvedena energija. Maksimalna napetost, ki jo iz ene takšne celice lahko dobimo je definirana z redoks potencialom kisika napram vodiku in znaša 0,7 V, zato v glavnem uporabljamo več zaporedno vezanih celic. Princip delovanja gorivne celice prikazuje slika 7.2. Glede na to, da je pridobivanje in shranjevanje vodika problematično pa gorivne celice



Slika 7.2: Princip delovanja gorivne celice

štejemo za sekundarni vir električne energije podobno kot baterije. Lahko pa kot vir elektronov uporabljamo tudi druge snovi, pomembno je le, da na celici poteka redoks reakcija, pri kateri material elektrod ne porablja ampak lahko sodeluje le kot katalizator in znižuje potrebno energijo za začetek reakcije. Poleg vodikovih celic danes najdemo tudi takšne, ki porabljajo metanol, etanol, fosforno kislino, ipd. Glede na vedno boljše lastnosti sistemov gorivnih celic lahko pričakujemo še precejšnje izboljšanje njihove učinkovitosti. Podatki o gorivni celici, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- nazivno napetost,
- nazivno moč,
- karakteristiko napetost–tok in
- temperaturno območje delovanja.

**Dizelski ali bencinski generatorji (ang. diesel or petrol generator).** Dizelski ali bencinski generatorji so klasični sekundarni vir električne energije. Navadno jih uporabljamo ob prekinitvah dobave električne energije po omrežju ali kot primarni vir na območjih, kjer ni električnega omrežja. Glede na visoko gostoto energije v gorivu lahko zelo učinkovito zagotavljajo električno energijo sistemom, so pa hrupni in precej onesnažujejo okolico. Podatki o generatorju, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- nazivno napetost,
- nazivno moč,
- frekvenco,
- število faz in
- temperaturno območje delovanja.

**Električno omrežje.** Najbolj uporaben vir električne energije za izvršne sisteme vodenja je omrežje. Električno omrežje zagotavlja zelo stabilno in zanesljivo preskrbo z izmeničnim tokom velikih moči. Sestavljeno je iz velikih električnih generatorjev in distribucijskega omrežja. Če je le dosegljivo, je to najbolj učinkovit izvor električne energije, tako glede enostavnosti izvedbe napajanja kot tudi glede izkoristkov pri pridelavi električne energije. Velikost elektroenergetskega sistema pa zagotavlja zanesljivo preskrbo z energijo, tudi ob izpadih posameznih generatorjev omrežja. Podatki o omrežnem priključku, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- nazivno napetost,
- maksimalni tok,
- frekvenco in
- število faz.

**Brezprekinitveno napajanje (ang. uninterruptible power supply (source) – UPS).** Za zelo zahtevne porabnike, kjer nikakor ne smemo ostati brez vira energije pa uporabljamo brezprekinitvena napajanja (UPS). To so sistemi, ki združujejo več zgoraj omenjenih virov električne energije v celoto, ki zagotavlja, da lahko ob izgubi primarnega vira napajanja takoj preklopimo na sekundarni vir, ne da bi vmes prišlo do padca napetosti ali toka. Primarni vir energije je največkrat omrežje, ki vzporedno napaja porabnik in akumulator preko usmernika. Ob izpadu primarnega vira sistem vodenja UPS preklopi porabnik na akumulator, ki porabnik napaja preko inverterja, ki iz enosmerne napetosti proizvaja izmenično napetost.

Preklop mora biti tako hiter, da porabnik tega ne zazna. Take izvedbe UPS uporabljamo takrat, kadar porabniki potrebujejo neko zaustavitveno proceduro za varen izklop. Obstajajo pa tudi sistemi UPS, ki stalno dovajajo energijo porabnikom preko akumulatorjev in s tem ščitijo porabnike pred napetostnimi konicami na omrežju. Sistem UPS mora biti načrtan tako, da zagotavlja dovolj energije za varno zaustavitev porabnikov. Če pa želimo, da porabnik še naprej obratuje, moramo takšnemu sistemu dodati nek generator, ki lahko zagotavlja energijo za celoten čas izpada primarnega vira, kot so dizelski ali bencinski generatorji ali gorivne celice. V tem primeru akumulatorji pokrijejo samo čas od izpada primarnega vira in vklopa sekundarnega vira. Na trgu obstajajo sistemi UPS, ki so namenjeni za napajanje porabnikov z močmi od nekaj 100W pa do nekaj 10 kW. Podatki o sistemu UPS, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

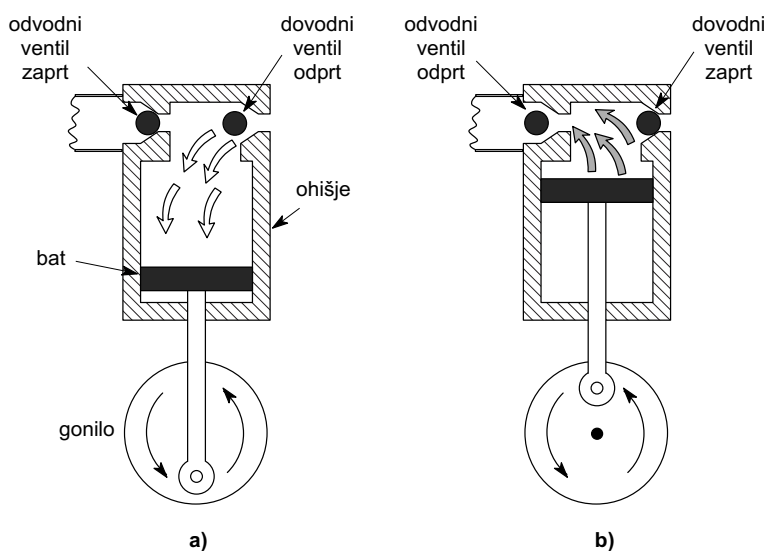
- nazivno napetost,
- maksimalna moč,
- čas napajanja ob izpadu,
- način delovanja (stalno, ob izpadu primarnega vira),
- temperaturno območje delovanja,
- življenjska doba akumulatorjev,
- frekvenco in
- število faz.

Na tržišču pa poleg sistemov z akumulatorji obstajajo tudi drugi, kot so sistemi z generatorjem na vztrajnik, ki hrani energijo v vrtenju vztrajnika.

### 7.1.2 Stisnjen zrak

Pnevmatski sistemi so kot aktuatorji še vedno močno prisotni v industriji. Za izvajanje linearnih pomikov so še vedno bolj pogosto uporabljani kot električni pogoni, zato si pogledjmo, kako lahko pridemo do stisnjenega zraka, ki prenaša energijo do aktuatorjev. Sisteme za proizvodnjo stisnjenega zraka imenujemo kompresorje, ki pa obstajajo v več različnih izvedbah. Kompresorji delujejo v okviru kompresorske postaje, ki zagotavlja ustrezno kvaliteto in tlak zraka. Obrat ali tovarna načeloma potrebuje eno kompresorsko postajo, ki preko napeljave oskrbuje vse porabnike. Ker je viskoznost zraka majhna, je tako centralizirana proizvodnja najbolj učinkovita. Največji problem pnevmatskih napeljav pa je puščanje. Zaradi tega prihaja do velikih izgub energije in s tem tudi do velikih stroškov. Žal pa je puščanje napeljave v praksi bolj pravilo kot izjema. Dobra stran puščanja je preprečevanje zamrzovanja napeljave, kadar imamo v stisnjenem zraku visoko vsebnost vlage. Takrat puščanje ustvarja umetno porabo zraka, ki preprečuje, da bi se zrak v napeljavi dovolj shladil, in bi prišlo do zamrzovanja. Standardni tlaki v napeljavi so do 1 MPa oz. 1,3 MPa.

**Batni in membranski kompresorji (ang. reciprocating compressor.)** Najpogostejši kompresorji so batni in membranski. Po ustroju so zelo podobni Ottovemu eksplozijskemu motorju, le da jih poganjamo z električnim ali eksplozijskim motorjem. Prikaz batnega kompresorja je na sliki 7.3. Razlika med batnim in membranskim kompresorjem je le ta, da je pri membranskem kompresorju namesto bata membrana, ki jo gonilnik razteguje in krči tako, da s tem ustvarja črpanje. Pri batnih in membranskih kompresorjih ločimo dva takta in sicer se-

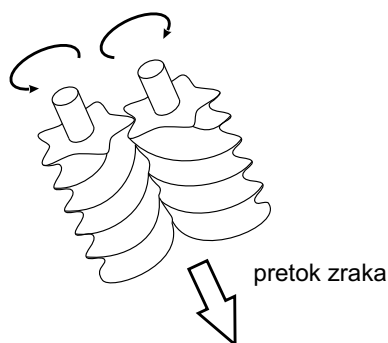


Slika 7.3: Prikaz batnega kompresorja: a) sesalni takt, b) takt stiskanja zraka

salni takt in pa takt stiskanja zraka. Učinkoviti so pri stalnih porabah zraka do 1000 l/min in pri tlakih do 180 MPa. Obstajajo eno ali večstopenjski kompresorji, kjer potuje zrak od nizko k visokotlačnim cilindrom do shranjevalnika. Večstopenjski so bolj učinkoviti za višje tlake. Med delovanjem so zaradi zračnih udarov pri odpiranju izhodnega ventila zelo glasni, glasnost pa z velikostjo kompresorja hitro narašča.

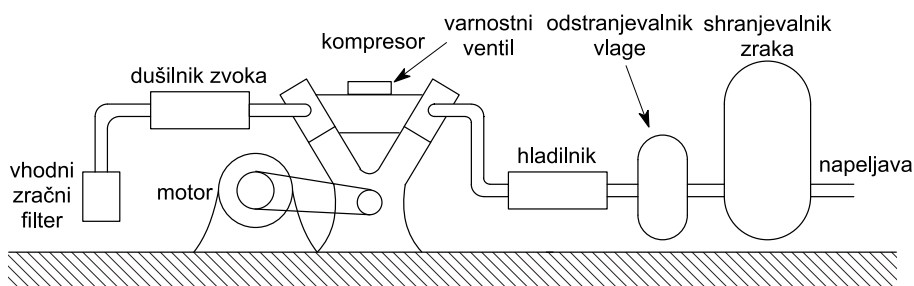
**Vijačni kompresorji (ang. rotary screw compressor).** Za velike porabe stisnjene zraka pri zmernem tlaku uporabljamo vijačne kompresorje. Zračni tlak v tem primeru ustvarjata dva vijaka, ki se vrtita drug ob drugem, vsak v svojo smer in pri tem na eni strani sesata zrak, na drugi strani pa ga iztiskata v shranjevalnik. Prikaz kompresorja je na sliki 7.4. Vijačni kompresorji lahko dosegajo velike pretoke, vendar pa je maksimalni tlak, ki ga lahko dosežejo le 8,3 MPa. Vijačni kompresorji potrebujejo dobro mazanje obeh vijakov, da ne pride do prevelikih mehanskih obrab in segrevanja.

**Kompresorska postaja in omrežje (ang. compressed air system).** Ker prihaja zrak iz kompresorjev v pulzih oz. izhodnega tlaka ne moremo dobro nadzorovati in ker so trenutne potrebe po zraku lahko večje od zmogljivosti kompresorja, je potrebno med kompresor in napeljavo postaviti še shranjevalno posodo. Shranjevalna posoda filtrira pulze na izhodu kompresorja in skrbi za zmanjševanje nihanja tlaka v napeljavi. Shranjevalnik pa ima še en namen. Ker kompresor lahko dviguje tlak v sistemu toliko časa, dokler razmerje med zunanjim tlakom in posodo ne doseže njegovega kompresijskega razmerja, kar je običajno



Slika 7.4: Prikaz vijčnega kompresorja

precej previsoko glede na potrebe v industriji, je potrebno izvesti povratno zanko za regulacijo tlaka v sistemu. To je izvedeno tako, da merimo tlak v shranjevalniku, nato pa na različne načine vodimo pogon kompresorja. Najenostavnejša možnost je dvopoložajno vodenje, kjer kompresor ugasnemo, ko dosežemo zgornjo mejo tlaka in vklopimo, ko tlak pade pod spodnjo mejo. Tak način vodenja je ugoden, ker dovoljuje, da se kompresor med vklopi lahko hladi in je običajno uporabljen pri batnih in membranskih kompresorjih. Bolj energetsko učinkovit pa je sistem vodenja, ki zvezno spreminja obrate kompresorja glede na nihanje tlaka v shranjevalniku. Lahko pa je v kompresorski postaji tudi več kot samo en kompresor. V tem primeru je shema vodenja bolj zahtevna, saj mora izbirati med vklopi posameznih kompresorjev glede na njihove karakteristike. Poleg shranjevalne posode pa izvor stisnjenega zraka potrebuje še nekaj dodatnih sistemov, ki skrbijo, da je kvaliteta zraka v napeljavi ustrezna. Celotno shemo kompresorske postaje prikazuje slika 7.5. Ker zrak pri



Slika 7.5: Prikaz kompresorske postaje

komprimiranju vlage ne oddaja, ampak jo zaradi dviga temperature lahko veže celo več, se ta vlaga odlaga v rezervoarju in napeljavi, zato je potrebno celoten sistem izvesti tako, da je na najnižjih točkah napeljave in rezervoarja možen izpust vode, sicer voda v sistemu lahko začne povzročati težave. Za razvod stisnjenega zraka po obratu skrbi cevna napeljava s priključki. Tudi na vsakem priključku je dobro poskrbeti za odvajanje vode, ker se zrak v napeljavi navadno dodatno ohladi in izloči še nekaj vlage.

Podatki o kompresorjih, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

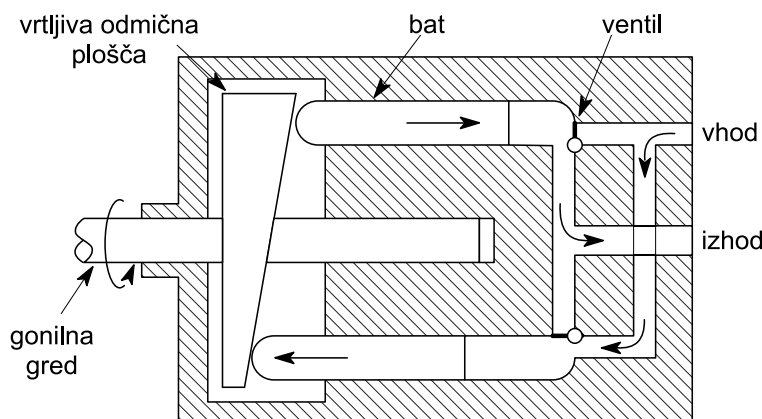
- območje tlakov,
- maksimalni stalni in trenutni pretok zraka in

- temperaturno območje delovanja.

### 7.1.3 Hidravlična tekočina

Za doseganje velikih sil in pospeškov še vedno uporabljamo hidravlične sisteme. Za ustvarjanje pogonske energije pa skrbijo hidravlične črpalke. Ker ima olje razmeroma veliko viskoznost, ga lahko učinkovito distribuiramo le na kratke razdalje. To v praksi pomeni, da potrebuje vsak stroj svojo hidravlično črpalko. V hidravličnih sistemih navadno dosegamo tlake nekaj 10 MPa, zato lahko že pri najmanjših netesnostih pride do puščanja. Hidravlični sistemi so zato problematični s stališča varovanja okolja, ker lahko pride do razlitja hidravlične tekočine.

**Hidravlične črpalke (ang. hydraulic pump).** Obstaja veliko različnih tipov hidravličnih črpalk a se v zaprtih hidravličnih sistemih uporabljajo v glavnem osne batne črpalke. Ta tip črpalk je razmeroma enostaven. Glavno os poganja električni ali motor z notranjim izgorevanjem. Na glavni osi je plošča, ki ni pravokotna na os vrtenja. Kot naklona glede na os vrtenja povzroči, da se rob plošče med vrtenjem osno premika in s tem poganja bate, ki črpajo in potiskajo hidravlično tekočino v sistem. Prikaz črpalke je na sliki 7.6. Pri nekaterih črpalkah



Slika 7.6: Prikaz osne batne črpalke

je možno kot naklona plošče nastavljati glede na potrebe po tlaku in pretoku. Črpalka je pri hidravličnih sistemih nameščena na shranjevalnik hidravlične tekočine tako, da je na sesalni in na izhodni strani stalno pod tlakom. V obratovanju sistema se črpalka ves čas vrti, ne glede na porabo olja. Ker bi se črpalka lahko v razmerah, ko ni pretoka olja, pregrela, je na sistemu izveden poseben obvod, ki se vklopi pri dovolj visokem tlaku in omogoča pretok olja preko črpalke tudi takrat, ko porabniki olja ne potrebujejo.

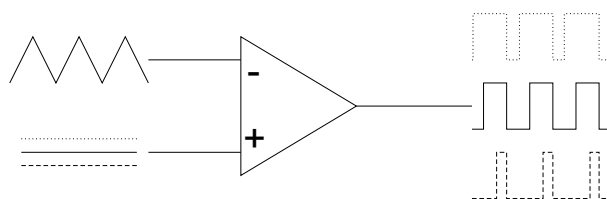
Podatki o hidravličnih črpalkah, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- območje tlakov,
- maksimalni stalni in trenutni pretok hidravlične tekočine in
- temperaturno območje delovanja.

## 7.2 Močnostni pretvorniki

Regulirni signali iz krmilnika ali regulatorja so precej prešibki, da bi lahko neposredno vplivali na aktuatorje. Naloga aktuatorjev je poseganje v delovanje sistema, za kar potrebujejo toliko moči, da njihov poseg v sprejemljivo kratkem času spremeni vrednost stanja sistema na želeno vrednost. Najenostavneje je, če imamo opravka z električnimi aktuatorji, ker v tem primeru potrebujemo samo ojačevalnik signala, kot so različne vrste tranzistorjev, triaki, ti-ristorji, releji, ipd. Ojačevalnik v resnici ne počne nič drugega, kot da dovaja porabniku moč od izvora pogonske moči glede na krmilni signal, kar pomeni, da so to v resnici le neke vrste električni ventili. Poleg že omenjenih pretvornikov obstajajo za vodenje električnih aktuatorjev tudi bolj zapleteni pretvorniki, ki poleg ojačenja signala izvedejo tudi pretvorbo oblike signala. Poglejmo si nekaj pomembnejših močnostnih pretvornikov bolj podrobno.

**Pulzno širinski modulator (ang. pulse-wide modulator).** Pulzno širinska modulacija je sodoben način vodenja hitrosti oz. moči enosmernih motorjev. V resnici je to šele prva stopnja pretvornika, kot končna stopnja pa nastopa tranzistor, ki dovaja moč do aktuatorja. Ker se tranzistor skozi katerega teče velik tok, obenem pa je na njem znaten padec napetosti, precej greje, je to zelo neučinkovito. Velik delež moči se tako troši na tranzistorju in se spreminja v toplotno energijo. Če uporabimo tranzistor tako, da je vedno, ali popolnoma zaprt ali pa popolnoma odprt, se na njem moč skoraj ne troši. Če hočemo na tak način voditi zvezne sisteme, lahko to storimo tako, da na tranzistor pošljemo pulzni krmilni signal in računamo moč, ki jo tranzistor dovaja aktuatorju kot srednjo vrednosti pulzirajoče moči. Dovedeno moč spreminjamo tako, da spreminjamo razmerje med časom trajanja visoke in nizke vrednosti pulzov, kar imenujemo pulzno širinska modulacija. Način, kako iz zveznega signala izvedemo pulzno širinsko modulirani signal prikazuje slika 7.7. Za izvedbo potrebujemo

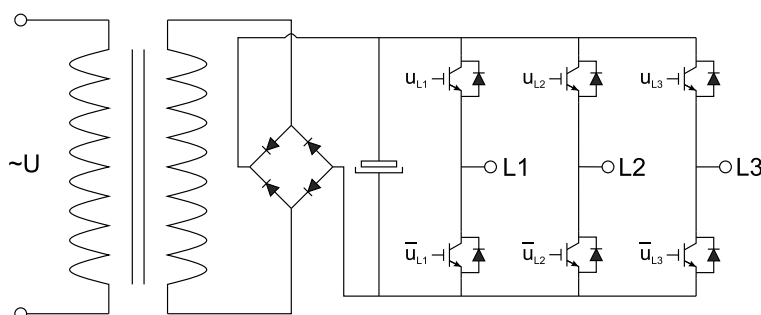


Slika 7.7: Vežje za pretvorbo zveznega signala v pulzno–širinsko modulirani signal

operacijski ojačevalnik, ki mu na invertirajoči (–) vhod pripeljemo žagasto napetost želene frekvence in območja vrednosti, ki naj bo večja od območja vrednosti krmilnega signala, ki ga pripeljemo na neinvertirajoči (+) vhod. Kadar je napetost na neinvertirajočem vhodu večja od napetosti na invertirajočem signalu je izhod operacijskega ojačevalnika zaradi visokega ojačenje ojačevalnika ( $\approx 10^6$ ) v nasičenju na maksimalni pozitivni vrednosti. Ko je situacija obrnjena je tudi izhod na minimalni vrednosti ojačevalnika. Maksimalno in minimalno napetost izhoda pa določata napajalni napetosti operacijskega ojačevalnika. Žagasti signal daje frekvenco izhodnem pulznem signalu, krmilni signal pa določa razmerje med trajanjem visokega in nizkega stanja izhodnega signala. Frekvenco žage določimo glede na dinamične lastnosti aktuatorja tako, da le-ta v tem frekvenčnem območju močno duši signal, in zato ne pride do nezaželenih vibracij. Danes obstajajo tudi posebna integrirana vezja za izvedbo pulzno širinske modulacije, kjer z izbiro vrednosti kondenzatorja določimo frekvenco žagastega signala. Pulzno širinsko modulacijo pa lahko izvedemo tudi na krmilniku.



**Frekvenčni pretvorniki (ang. variable-frequency drive).** Frekvenčni pretvorniki so najpomembnejše naprave za vodenje izmeničnih električnih motorjev in so pomenili preporod v uporabi asinhronskih motorjev. Frekvenčni pretvornik omogoča zelo precizno hitrostno in pozicijsko vodenje asinhronskih motorjev, poleg tega pa mehke zagone, kar je pri večjih motorjih zelo pomembno. Tako ne obremenjujemo vira moči s tokovnimi konicami po nepotrebem. Bistvo delovanja frekvenčnega pretvornika je prikazano na sliki 7.8. Prvi del

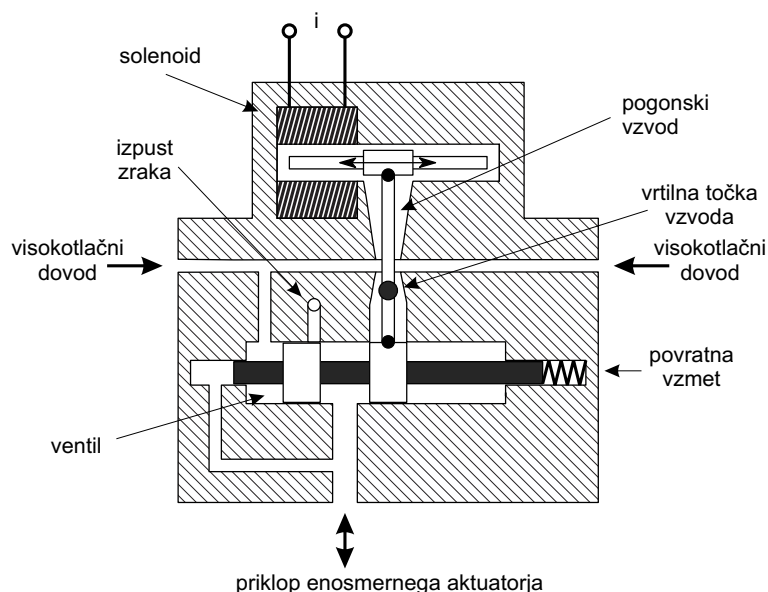


Slika 7.8: Veze frekvenčnega pretvornika:  $U$  – napajalna napetost,  $L1$  – faza 1,  $L2$  – faza 2,  $L3$  – faza 3,  $u_{L1}$ ,  $\bar{u}_{L1}$  – signal in njegov komplement za krmiljenje faze  $L1$ ,  $u_{L2}$ ,  $\bar{u}_{L2}$  – signal in njegov komplement za krmiljenje faze  $L2$ ,  $u_{L3}$ ,  $\bar{u}_{L3}$  – signal in njegov komplement za krmiljenje faze  $L3$

pretvornika je usmernik ali inverter, ki izmenično napetost spremeni v enosmerno, le-ta pa z močjo napaja tri pare močnostnih tranzistorjev. Vsak par tranzistorjev predstavlja eno fazo izhoda frekvenčnega pretvornika. Krmilne napetosti ( $u_{L1}$  do  $\bar{u}_{L3}$ ) določajo frekvenco izhodnega signala. Krmilne napetosti  $u_{L1}$  do  $u_{L3}$  so med seboj električno zamaknjene za  $120^\circ$ . Krmilni napetosti iste faze  $u_{LN}$  in  $\bar{u}_{LN}$ , kjer je  $N$  številka faze pa imata nasprotno fazo. Poznamo dva načina vodenja aktuatorjev, eden je pulzno širinski drugi pa je z diskretizirano sinusno napetostjo. Ker so aktuatorji, katerim je krmilnik večinoma namenjen, izmenični elektromotorji, ki imajo tako električno (navitja) kot tudi mehansko (vrtilni moment) vztrajnost ne potrebujemo gladke sinusne napetosti na izhodu ampak jo aktuator zgladi sam. Podatki o frekvenčnih pretvornikih, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- maksimalno moč priključenega aktuatorja,
- način priključitve napajanja,
- območje spreminjanja frekvence in
- temperaturno območje delovanja.

**Elektropnevmatski ventil (ang. electropneumatic valve).** Pri uporabi pnevmatskih aktuatorjev potrebujemo poleg ojačenja regulirnega signala še pretvorbo v drug medij prenosa moči. Za to skrbijo elektropnevmatski ventili. Skica elektropnevmatskega ventila za pogon enosmerne pnevmatskega pogona je na sliki 7.9. Obstajata dva tipa elektropnevmatskih ventilov in sicer zvezno in stopenjsko delujoči. Pri stopenjsko delujočih priključimo na tuljavo solenoida največkrat enosmerno napetost 24 V, ki požene skozi navitje dovolj velik toka, da se kotva do konca odkloni in s tem spremeni lego ventila iz ene skrajne lege v drugo.



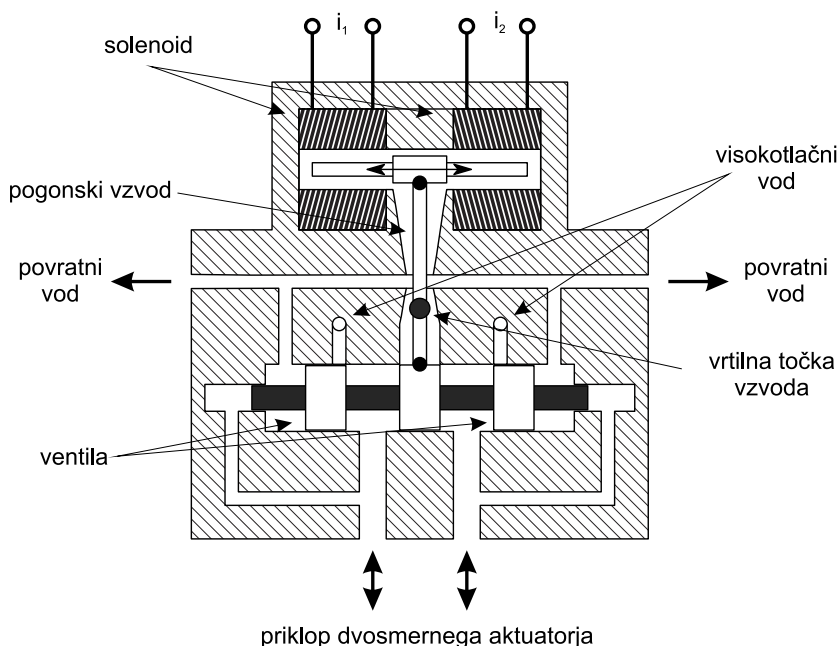
Slika 7.9: Prikaz elektropnevmatskega ventila za enosmerne aktuatorje, i – krmilni tok

Pri zvezno delujočih ventilih pa je tok skozi tuljavo veličina s katero zvezno spreminjamo pozicijo ventila, s tem pa tudi pretok zraka do aktuatorja. Najpogosteje srečamo v pnevmatskih sistemih stopenjsko delujoče ventile. Ventil na sliki 7.9 označujemo tudi kot ventil 2/1, kar pomeni, da ima ventil dve možni poti za pretok zraka, od katerih je hkrati aktivna samo ena. Takšen ventil zadostuje za dovajanje zraka do aktuatorja in, po preklopu, za odvajanje zraka iz aktuatorja v okolico, kar pomeni, da lahko z njim vplivamo samo na gibanje aktuatorja v eno smer, nato pa aktuator obmiruje ali pa ga povratna vzmet vrne v izhodiščni položaj. Za vodenje aktuatorja v obeh smereh potrebujemo ventil tipa 3/2, kar pomeni, da ima možne tri poti pretoka zraka, od katerih sta hkrati odprti dve. Tako imamo eno stran pogona vedno vezano na visok tlak, drugo pa odprto v okolico, z ventilom pa lahko izbiramo strani. Ventil se od ventila na sliki 7.9 loči po tem, da ima na desni strani zrcalno sliko zgradbe na levi. Če gre za zvezni ventil imamo namesto povratnega ventila še eno navitje na solenoidu in razmerje tokov skozi navitji določa lego ventila. Ker so elektropnevmatski ventili mehanske naprave z gibljivimi deli je potrebno poskrbeti za mazanje. Večinoma imamo danes izvedbe, ki imajo ob izdelavi izvedeno doživljenjsko mazanje. V takem primeru zraka v napeljavi ne smemo dodatno naoljiti, ker spere mazivo in ventili lahko blokirajo. Starejši sistemi pa so zahtevali oljenje zraka, ker niso imeli lastnega mazanja, zato je potrebno pred uporabo pogledati, kakšno izvedbo imamo in kako je obdelan zrak v kompresorski postaji, da ne pride do poškodb ali uničenja opreme. Podatki o elektropnevmatskih ventilih, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- maksimalni pretok zraka,
- karakteristiko padec tlaka na ventilu – pretok,
- napetost napajanja navitja,
- moč napajanja navitja v mirovanju in v delovanju,

- število zračnih poti, ki jih ventil obvladuje in
- temperaturno območje delovanja.

**Elektrohidravlični ventil (ang. electrohydraulic valve).** Za pretvorbo električnega regulirnega signala v hidravlični močnostni signal potrebujemo elektrohidravlični ventil. Za razliko od elektropnevmatskih ventilov imamo na razpolago samo dvosmerno delujoče akuatorje brez povratnih vzmeti, zato potrebujemo ventile, ki omogočajo delovanje v obeh smereh. Na sliki 7.10 je prikazana zgradba elektrohidravličnega ventila. Večinoma obstajajo



Slika 7.10: Prikaz elektrohidravličnega ventila:  $i_1$ ,  $i_2$  – krmilna tokova

samo zvezne izvedbe ventilov, ki jih imenujemo tudi servokrmilniki, uporabljamo pa jih za pozicijsko in hitrostno vodenje hidravličnih pogonov. Delovanje sistema je zelo podobno delovanju elektropnevmatskega ventila, le da hidravlične tekočine ne izpuščamo v okolico ampak ga po povratnem vodu peljemo nazaj v rezervoar. Mazanje sistema ni problematično, ker je ventil dimenzioniran tako, da so mazalne lastnosti hidravlične tekočine dovolj za mazanje sistema med delovanjem. Ker lahko tečejo skozi elektrohidravlične ventile veliki pretoki razmeroma viskozne tekočine, se le ti lahko med delovanjem precej segrevajo. Paziti moramo samo, da ne pride do temperatur pri katerih hidravlična tekočina zavre, saj se pri tem tvorijo mehurčki, ki zvečajo stisljivost tekočine in s tem popolnoma spremenijo lastnosti sistema. Podatki o elektrohidravličnih ventilih, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- maksimalni pretok hidravlične tekočine,
- karakteristiko padec tlaka na ventilu – pretok,
- napetost napajanja navitja,

- moč napajanja navitja v mirovanju in v delovanju,
- temperaturno območje delovanja.

### 7.3 Aktuatorji in končni izvršni členi

Končni izvršni sistemi so neposredno vgrajeni v proces, ki ga reguliramo. Pravzaprav so njihov bistveni del, ki omogoča da proces sploh pravilno deluje. Poganjajo jih aktuatorji, včasih pa so aktuatorji hkrati tudi končni izvršni členi. Večinoma posegajo v proces z ustvarjanjem neke sile ali navora, ki jo potem izkoristimo za premik, transport ali spremembo upornosti pretoka. Najbolj raznolika je izbira električnih aktuatorjev in končnih izvršnih členov, ki imajo tudi največje izkoristke.

#### 7.3.1 Električni aktuatorji in končni izvršni členi

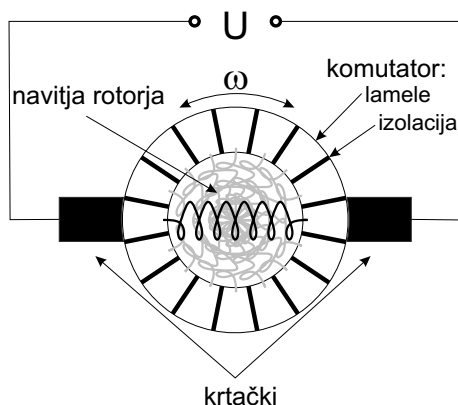
Večina električnih aktuatorjev in končnih izvršnih členov deluje na proces s povzročanjem navora in vrtenjem, v zadnjem času pa so se razvili tudi električni motorji, ki neposredno povzročajo sile in linearne premike. Podatki o električnih motorjih, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vođenja vsebujejo:

- nazivno napetost,
- nazivno moč,
- karakteristiko moči v odvisnosti od hitrosti,
- karakteristiko navora ali sile v odvisnosti od hitrosti in
- temperaturno območje delovanja.

#### Enosmerni rotacijski motorji

Najstarejši tip električnega stroja je enosmerni elektromotor s komutatorjem, ki ga je razvil William Sturgeon že leta 1832. To so bili prvi motorji, ki so omogočali izkoriščanje električne energije za pogon strojev.

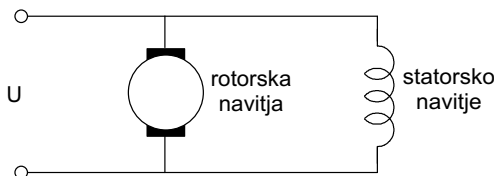
**Enosmerni motor s komutatorjem (ang. direct current (DC) motor).** Motor sestavljajo navitje na statorju (vzbujalno navitje) in navitja na rotorju (armaturno navitje), ki so preko komutatorja vezana na napajalno napetost. V nekaterih izvedbah pa lahko navitje statorja nadomestimo s permanentnim magnetom, vendar v tem primeru motorja ne moremo več priključiti na izmenično napetost, kar je pri izvedbah s statorsko tuljavo možno. Nas sliki 7.11 je prikazana shema komutatorja. Komutator in krtački skrbita za prenos električne moči na rotorske tuljave, ker pa sistem hitro preklaplja med tuljavami, se pojavljajo napetostne konicice in s tem iskrenje na komutatorju. Komutator vedno priklopi tisto rotorsko navitje, ki je v smeri vrtenja naslednje na vrsti, da se poravnava s smerjo statorskega polja in jo odklopi, ko je že skoraj poravnana s statorskim poljem. Taka lega krtačk omogoča, da na rotor vedno deluje maksimalni možni navor. Območje kota v katerem so navitja rotorja napajana pa določa širina krtačk in lamel komutatorja. Smer vrtenja motorja spreminjamo tako, da spremenimo



Slika 7.11: Prikaz komutatorja:  $U$  – napajalna napetost,  $\omega$  – hitrost vrtenja motorja

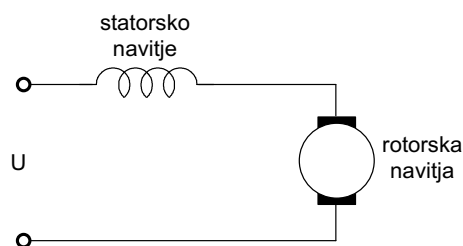
lego (kot) krtačk glede na magnetno os statorja. Rotor se namreč vedno obrača v smeri, ki zmanjšuje kot med magnetnim poljem statorja in magnetnim poljem rotorja po najkrajši poti. S spreminjanjem lege krtačk glede na stator tako določamo navor, hitrost in, ob premiku lege preko mrtve točke, ko sta magnetni osi poravnani, tudi smer vrtenja. S stališča vodenja sistemov torej predstavlja lega krtačk referenco za območje kota med magnetno osjo rotorskih in statorskega navitja. Enosmerni motor ima preko komutatorja sklenjeno regulacijsko zanko, ki vzdržuje stalen kot med magnetnim poljem rotorja in statorja ne glede na hitrost vrtenja motorja. S tem zagotavlja maksimalne možne napore ne glede na hitrost vrtenja. Hitrost vrtenja navadno spreminjamo s spreminjanjem priključene napetosti. Lamelle komutatorja so navadno iz bakra, medtem ko sta krtački ogljeni. Pri velikih obremenitvah je moč iskrenja dovolj velika, da pride do površinskih poškodb na komutatorju in krtačkah, kar iskrenje še poslabša. Problem komutatorja je tudi razmeroma velika upornost stika krtačka–lamela. Če motor dalj časa stoji, ali če pride na stično površino prah, motorja največkrat ne moremo zagnati in je potrebno temeljito čiščenje površin komutatorja in krtačk. Obnova komutatorja poteka tako, da ga enostavno postružimo in zamenjamo krtačke. Okvare na rotorskih navitjih opazimo kot izrazito hudo iskrenje na komutatorju.

Poznamo več izvedb komutatorskih motorjev. Najbolj pogosta je izvedba z vzporedno vezavo statorske in rotorskih tuljav (slika 7.12). Vzoredni ali paralelni tip enosmernega



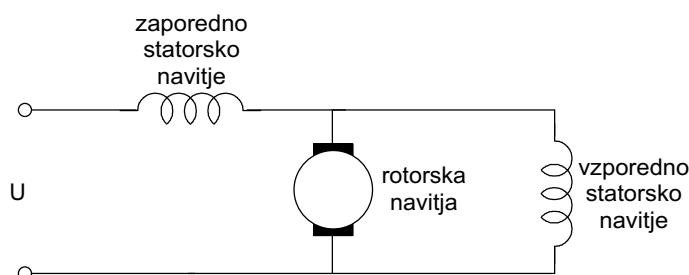
Slika 7.12: Vzoredni komutatorski motor:  $U$  – napajalna napetost

motorja najdemo povsod tam, kjer je želimo sistem voditi s spreminjanjem obratov motorja. Največkrat jih najdemo kot pogone pri raznih orodjih. Vzoredna vezava rotorskih in statorske tuljave daje veliko stabilnost hitrosti vrtenja, ne glede na obremenitev, ima pa nekoliko manjši zagnanski navor kot zaporedni ali serijski motor. Serijski motor ima navitje statorja vezano zaporedno z navitji rotorja (slika 7.13). Takšna vezava omogoča zelo velike štartne



Slika 7.13: Zaporedni komutatorski motor:  $U$  – napajalna napetost

navore a hkrati tudi veliko spremenljivost hitrosti v odvisnosti od obremenitve. Ta vrsta enosmernega motorja je zlasti problematična pri obratovanju brez obremenitve, ko obrati motorja pobegnejo in lahko pride do uničenja motorja. Zaradi velikega štartnega navora je pogosto uporabljan v lokomotivah in dvigalih. Zaradi prednosti in slabosti obeh že opisanih tipov so razvili kombinirani ali compoundni motor. Le-ta ima statorsko navitje razdeljeno v dva dela. En del je vezan zaporedno k rotorskim navitjem, drugi del pa vzporedno (slika 7.14). S takšno vezavo navitij je nastal motor, ki združuje visok štartni navor serijskega

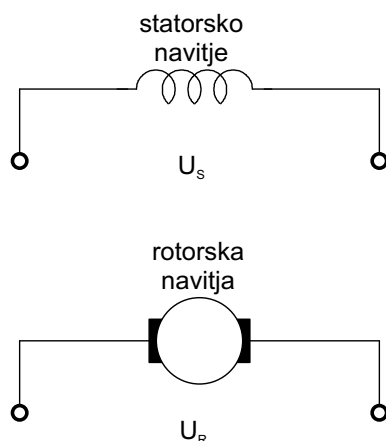


Slika 7.14: Compoundni komutatorski motor:  $U$  – napajalna napetost

motorja z majhno odvisnostjo obratov od obremenitve vzporednega motorja. Z različnimi delitvami deleža vzporednega in zaporednega dela statorskega navitja pa vplivamo na to, katera od lastnosti je bolj poudarjena. Kadar želimo še boljšo kontrolo nad obrati enosmernega motorja, pa se zatečemo k ločenima napajanjema rotorskih in statorskega navitja (slika 7.15). Pri motorju z ločenimi navitji imamo lahko boljši nadzor nad obrati motorja, vendar to plačamo z bolj zapletenim sistemom napajanja motorja. Nelinearna odvisnost obratov motorja od napetosti postane z ločenimi navitji lažje obvladljiva, potrebujemo pa dva neodvisna močnostna pretvornika, ki ju moramo voditi s skupnim sistemom vodenja.

Vodenje enosmernih motorjev je bilo včasih izvedeno izključno preko zaporedno ali vzporedno vezanih uporov, s katerimi je bilo možno spreminjati tok ali napetost na navitjih motorja. Takšen način hitrostne regulacije pa ni pretirano učinkovit, ker pride do velikih izgub na krmilnih uporih. Danes za vodenje enosmernih motorjev uporabljamo izključno pulzno širinsko modulacijo, kjer do omenjenih problemov ne prihaja.

**Brezkrtični motor (ang. brushless DC motor).** Problemi zaradi obrabe in nezanesljivosti komutatorja so silili raziskovalce k razvoju njihovih nadomestkov. Komerčno so postali možni šele v novejšem času (1962). Namesto s komutatorjem izvajamo komutacijo z elektronskim vezjem, potrebujemo pa merilnik kota zasuka rotorja, da ostaja vrtilno polje v



Slika 7.15: Komutatorski motor z ločenim napajanjem statorskega in rotorskih navitij:  $U_s$  – statorska napajalna napetost,  $U_R$  – rotorska napajalna napetost

fazi z vrtenjem rotorja. Rotor brezkrtačnega motorja je permanentni magnet, medtem ko so navitja motorja na statorju. S tem odpadejo vsi problemi prenosa električne energije na rotor, prav tako je statorska navitja lažje hladiti kot rotorska. Stator je izveden z vsaj tremi navitji, ki so električno in fizično zamaknjeni za  $120^\circ$ . Tok skozi tuljave pa je odvisen od kota zasuka rotorja tako, da vrtilno polje statorskih tuljav za nek majhen kot prehiteva polje permanentnega magneta rotorja. Tako dosežemo zelo velik navor na rotor pri razmeroma majhnih tokovih. Kot zaostajanja je neodvisen od obremenitve rotorja, ampak je določen z nastavitvami elektronskega komutatorja. Sistem za komutacijo je v resnici popolnoma enak frekvenčnemu pretvorniku brez inverterja, ker je napajanje enosmerno, in s krmilnimi impulzi, ki so vezani na kot in hitrost vrtenja rotorja. Obstajata dve izvedbi in sicer z notranjim rotorjem (ang. inrunner) in z rotorjem, ki teče na zunanji strani rotorja (ang. outrunner). Motor z zunanjim rotorjem se odlikuje z zelo velikim navorom. Tak tip enosmernega motorja je zelo robusten in praktično ne potrebuje vzdrževanja, edina slaba točka je merilnik kota zasuka, ki precej podraži izvedbo motorja. Danes tovrstne motorje najdemo na najrazličnejših področjih, od motorjev za hlajenje računalniških vezij in mikroprocesorjev pa do pogonov za modele letal, avtomobilov in ladij.

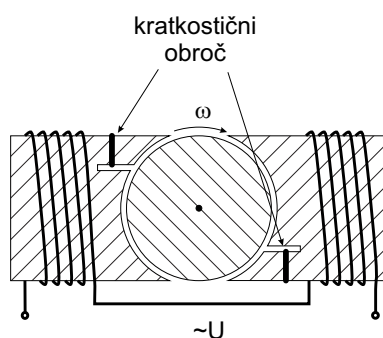
**Brezkrtačni brezsenzorski motor (ang. brushless sensorless DC motor).** Uporaba senzorja kota za delovanje brezkrtačnih motorjev je njihova največja šibka točka, saj ob odpovedi le-tega odpove celoten motor. Obstaja pa način, kako lahko informacijo senzorja kota zasuka nadomestimo z informacijo o tokovih skozi statorska navitja. Tok skozi posamezno navitje statorja je odvisen od napetosti na njem in od trenutne pozicije, hitrosti in obremenitve na rotorju. Če poznamo napetosti in tokove skozi vsa navitja na statorju, je iz tega možno določiti stanja rotorja. Problem pa predstavlja dejstvo, da morajo biti vsi izračuni izvedeni izredno hitro, ker mora vrtilno magnetno polje statorja ves čas za točno določen kot prehitevati magnetno polje rotorja, če hočemo, da se rotor enakomerno vrti. Rešitev problema je uporaba Kalmanovega filtra, ki je v resnici observator stanj sistema, in izračun na zelo hitrem mikroprocesorju. Še večji problem pa je izvedba štarta motorja, ko algoritem detekcije zasuka rotorja lahko zaide v singularne rešitve. Šele s pojavom zelo zmogljivih mikrokrmilnikov je bilo možno te probleme uspešno rešiti, a tovrstni motorji so še vedno razmeroma

dragi. S takšnim sistemom komutacije se sicer znebimo merilnika kota rotorja, a zelo zakompliciramo sistem vodenja. Tovrstni motorji so zaradi razmeroma visoke cene v uporabi le v zelo zahtevnih sistemih, kjer potrebujemo visoko zanesljivost sistema brez vzdrževanja, kot so računalniški diski.

### Izmenični rotacijski motorji

Zaradi težav s komutatorji je Nikola Tesla razvil izmenične motorje že leta 1883. Komutatorju se je izognil tako, da je uporabil izmenične tokove za ustvarjanje vrtilnega polja. Zanimivo je, da s tem pridemo v bistvu do enake konstrukcije motorja kot jo imajo brezkrtačni motorji, le da vrtilno polje izmeničnih motorjev ni sinhronizirano s hitrostjo vrtenja rotorja, ampak rotorju vsiljuje svojo hitrost vrtenja. Lahko torej rečemo, da, v nasprotju z enosmernimi motorji, izmenični motorji delujejo v odprtozančnem načinu.

**Enofazni motor (ang. single-phase alternating current (AC) motor).** Najenostavnejši izmenični motor je enofazni motor z zasenčenimi poli. Motor je sestavljen iz rotorja, ki je kratkostična kletka in statorja, ki ima eno navitje, ki napaja parno število polov (slika 7.16). Za ustvarjanje vrtilnega polja potrebujemo vsaj dve fazi, idealno simetrično vrtilno polje pa



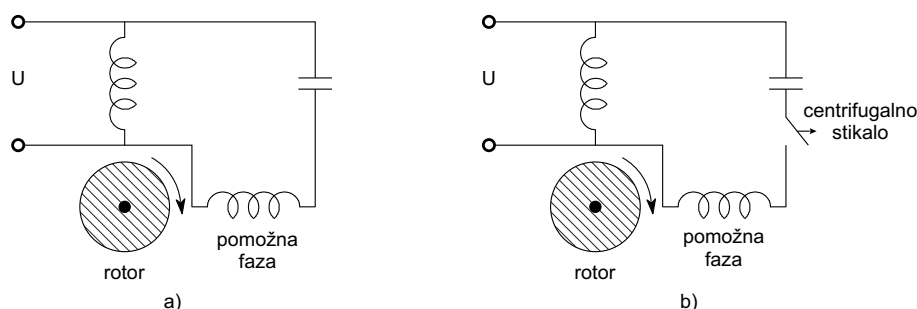
Slika 7.16: Enofazni motor z zasenčenimi poli:  $\omega$  – hitrost vrtenja,  $U$  – napetost napajanja

lahko proizvedemo šele s tremi fazami. Da lahko uporabimo samo eno fazo za pogon rotacijskega motorja, moramo uporabiti trik popačitve magnetnega polja skozi rotor. Ko se rotor vrti, je simetrično polje ene faze dovolj, da ga vzdržuje pri neki lastni hitrosti, problem pa je zagon motorja. Za zagon motorja moramo polje asimetrično popačiti, da pride do navora na rotor. To lahko storimo tako, da pole elektromagneta razdelimo na dva dela in okrog enega dela naredimo kratkostični obroč. Kratkostični obroč zaradi indukcije toka v njem zakasni magnetno polje, kar povzroči dovolj veliko asimetrijo v polju, da se pojavi zaradi vrtilnih tokov v rotorju zadosten navor, in se rotor zavrti. Tovrstni motorji dosegajo moči nekaj 100 W in zaradi nizkega štartnega navora niso primerni za opravila, kjer moramo ob štartu premagati veliko silo ali navor.

**Dvofazni motor (ang. two-phase AC motor).** Druga možnost za ustvarjanje asimetričnega polja skozi rotor je uporaba dveh faz. Ker dvofazni sistem prenosa električne energije ne obstaja in ker so trifazni motorji bistveno bolj učinkoviti, so dvofazni motorji v resnici alternativa enofaznim motorjem. Namen druge faze je dovolj velika popačitev magnetnega polja skozi kratkostični rotor, da dobimo dovolj velik navor za štart motorja. Obstajata varianti s



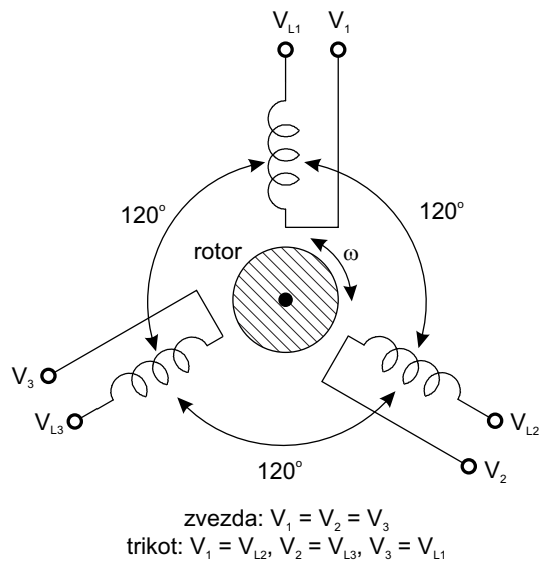
pomožno fazo, ki je aktivna samo ob štartu ali pa, ko je pomožna faza priklopljena ves čas obratovanja. Fazni zamik toka v pomožni fazi generiramo s kondenzatorji (slika 7.17). Na



Slika 7.17: Dvofazni motor: a) s stalno pomožno fazo, b) s pomožno fazo za štart motorja,  $U$  – napetost napajanja

sliki 7.17 vidimo dve izvedbi dvofaznega motorja. Prva izvedba ima pomožno fazo stalno priklopljeno na napajanje, druga pa s centrifugalnim stikalom pomožno fazo odklopi takoj, ko motor dobi dovolj veliko število obratov in naprej deluje kot enofazni motor. Dvofazni motorji so učinkoviti do moči cca. 10 kW, za večje moči pa predstavljajo preveč neenakomerno obremenitev omrežja ter imajo preslab navor. Štejemo jih med motorje s srednjim štartnim navorom in so zato bolj primerni za pogon obdelovalnih strojev, ki jih obremenimo, ko se že vrtijo.

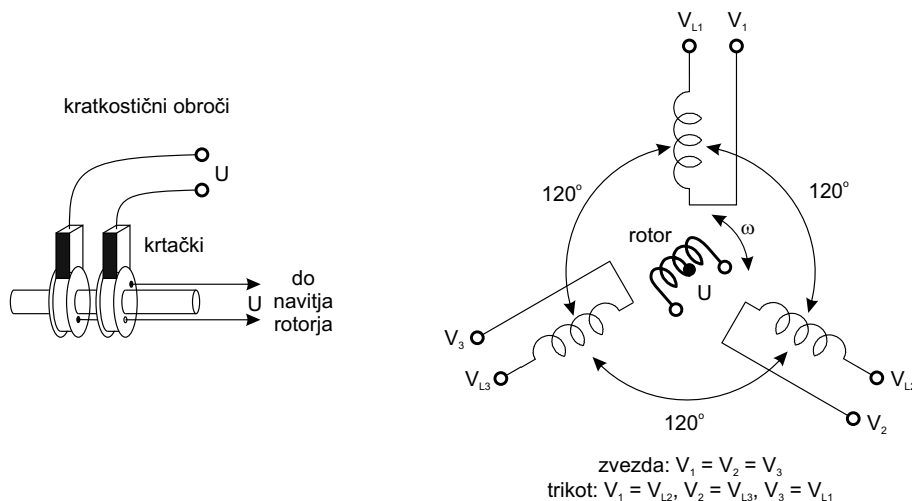
**Asinhronski motor (ang. asynchronous AC motor).** Asinhronski motorji so najbolj razširjeni električni motorji srednjih in velikih moči, od nekaj 100 W pa do 100 MW. Motor se ponaša z izredno enostavno zgradbo. Rotor je kratkostična kletka narejena iz lamel, da ne pride do prevelikih vrtilnih tokov in s tem segrevanja. Navitja motorja so na statorju, njihovo število pa je večkratnik števila tri. Osnovna izvedba ima samo tri navitja organizirana v tri pôle, ki so postavljena po obodu statorja in razmahnjena za  $120^\circ$  (slika 7.18). Navitja proizvajajo vrtilno polje, ki kroži s hitrostjo 3000 obr/min. S številom polov hitrost motorju pada, narašča pa navor. Pri šestih polih (vsaka faza je razdeljena na dve navitji tako, da se zaporedje faz ponavlja) pade hitrost vrtenja polja na 1500 obr/min, pri devetih pa je le še 1000 obr/min. Smer vrtenja motorja obrnemo tako, da spremenimo vrstni red priključenih faz. Edina nevarnost pri delovanju asinhronskega motorja je pregreteje navitij na statorju, sicer pa ne potrebuje nobenega vzdrževanja, niti ob zelo dolgi stalni uporabi. Zaradi načina delovanja moramo upoštevati, da ima motor zdrs (slip), kar pomeni, da se rotor vedno vrti počasneje od vrtilnega polja, razlika hitrosti pa z obremenitvijo narašča, dokler ne pride do tako imenovanega omahnega zdrsa, ko se motor ustavi. Z velikostjo zdrsa je povezan tudi navor in s tem tokovi skozi navitja. To predstavlja velik problem ob zagonu večjih motorjev, ker pride do zelo velikih zagonskih tokov zaradi velikega zdrsa, ko motor stoji. Problem zagona asinhronskega motorja smo v preteklosti reševali s spremembo načina vezave statorskih navitij. Štart motorja je bil izveden v vezavi zvezda, da je bila na navitjih motorja manjša napetost in s tem manjši tok. Ko pa je motor dosegel neko dovolj veliko število obratov, je bilo potrebno stikalo prekloniti v vezavo trikot, s katero je dobil motor na navitja medfazno napetost in s tem polno moč (slika 7.18). Danes tako problem mehkega zagona kot problem spreminjanja obratov pod obremenitvijo rešujemo z uporabo frekvenčnega pretvornika. Tako je postal asinhronski motor uporaben kot motor za pozicioniranje in kot motor



Slika 7.18: Asinhronski motor:  $V_{L1}, V_1$  – potenciala navitja 1,  $V_{L2}, V_2$  – potenciala navitja 2,  $V_{L3}, V_3$  – potenciala navitja 3,  $\omega$  – kotna hitrost rotorja

za pogon vozil, ki potrebujejo velik štartni moment.

**Sinhronski motor (ang. synchronous AC motor).** Sinhronski motor je bil razvit hkrati z asinhronskim in uporablja isti sistem trifaznega napajanja. Statorja obeh motorjev sta enaka, medtem ko je bistvena razlika v rotorju. Rotor sinhronskega motorja je navitje, ki ga napajamo z enosmernim tokom preko dveh kratkostičnih obročev na rotorju (slika 7.19). Ker ima



Slika 7.19: Sinhronski motor:  $V_{L1}, V_1$  – potenciala navitja 1,  $V_{L2}, V_2$  – potenciala navitja 2,  $V_{L3}, V_3$  – potenciala navitja 3,  $\omega$  – kotna hitrost rotorja,  $U$  – napajalna napetost rotorja

rotor lastno magnetno polje, se vrtilno polje statorja in magnetno polje znotraj navitja rotorja poskušata poravnati po smeri. To ima za posledico, da se rotor vrti z isto hitrostjo kot vrtilno polje, le da zaostaja za kot, ki je odvisen od obremenitve motorja. Razpon moči sinhronskih

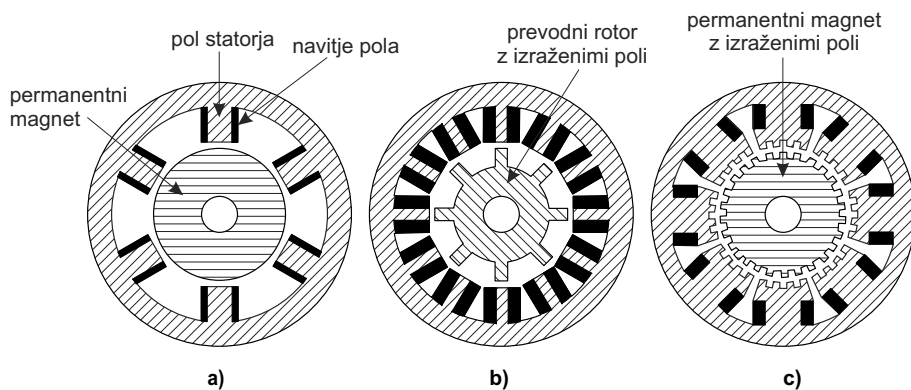
motorjev je še večji kot pri asinhronskih motorjih, saj na trgu obstajajo motorji od nekaj W pa do nekaj 100 MW. Res pa je, da je izbira v področju med 100 W in nekaj 100 kW majhna. Razlog za to so njihova področja uporabe. Sinhronski motorji majhnih moči se uporabljajo kot pogoni urnih mehanizmov za ure, ki so vezane na omrežno napetost. Tovrstne ure so zelo razširjene, ker ima omrežna napetost zelo stabilno frekvenco. Podobno funkcijo imajo sinhronski motorji tudi v programatorjih pralnih strojev. Motorji velikih moči pa se uporabljajo kot generatorji električne energije. S prihodom frekvenčnih pretvornikov pa so velik delež aplikacij na področjih, kjer je bila potrebna natančna hitrost vrtenja, prevzeli asinhronski motorji.

### Rotacijski motorji za namene pozicioniranja

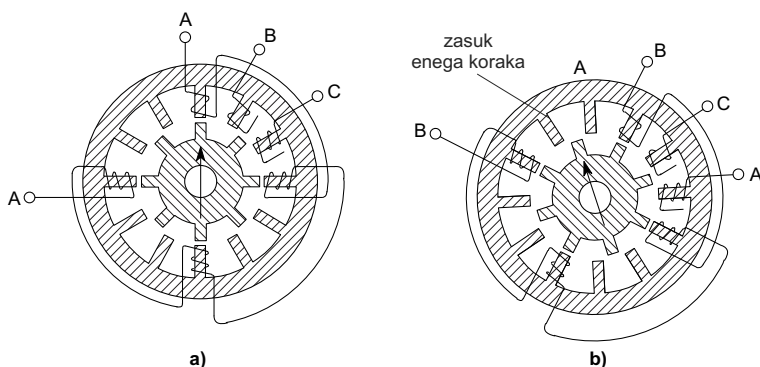
Poleg električnih motorjev, ki jih srečamo kot pogone sistemov, ki se med delovanjem večinoma vrtijo, pa obstajajo tudi motorji, ki so namenjeni drugačni uporabi. To so večinoma motorji za hitro in natančno pozicioniranje raznih mehanskih sklopov v obdelovalnih strojih in robotih.

**Servomotor (ang. servo motor).** Z imenom servomotor označujemo motor, ki vsebuje tudi povratno zanko za regulacijo kota rotorja. Do množične uporabe frekvenčnih pretvornikov so v te namene uporabljali skoraj izključno enosmerne motorje, ker jim je bilo s spreminjanjem napajalne napetosti možno spreminjati hitrost vrtenja. Danes najdemo v tej vlogi praktično vse vrste električnih motorjev. Servomotor je sestavljen iz električnega motorja, senzorja zasuka, merilnikov toka skozi navitja in običajno še elektromagnetne zavore. S priklopom na regulator lahko motor zasukamo za poljubni kot. Območje moči servomotorjev je od nekaj W pa do nekaj 100 kW. Optimizirani so za zelo velike navore, da lahko izvršijo spremembo pozicije v čim krajšem času. Velikokrat so vodno hlajeni, ker hlajenje z ventilatorjem na isti osi ni učinkovito, saj motor večino časa stoji, medtem ko se ob hitrih in kratkih premikih lahko zelo segreje.

**Koračni motor (ang. stepper motor).** Koračni motorji so namenjeni pozicioniranju brez povratne zanke za spremljanje kota rotorja. Zgrajeni so podobno kot brezkrtačni motorji, le da imajo veliko število navitij na izraženih polih rotorja, ki določajo kot zasuka rotorja. Obstaja več izvedb koračnih motorjev glede na izvedbo rotorja in sicer: s permanentnim magnetom, s spremenljivo reluktanco in hibridni motorji. Skice izvedb koračnih motorjev so na sliki 7.20. Vodenje koračnih motorjev izvedemo tako, da na navitja pripeljemo vlak impulzov (določeno kombinacijo visokih in nizkih stanj napajalne napetosti), ki natančno določajo kot zasuka rotorja (glej sliko 7.21). Ker je obračanje motorja za več kot en korak lahko nezanesljivo, kombinacije visokih in nizkih stanj na navitjih obravnavamo kot binarne kode in jih uredimo po naraščajočem kotu. Nato pa iz tega izvedemo pravilo, ki ob prejetem pulzu preskoči na naslednji kot. Tako vodimo koračni motor s samo enim pulznim signalom. Kode pozicij rotorja pa določa izvedba statorskih navitij. Najenostavnejši so dvofazni motorji, ki imajo dve fazi razdeljeni na pole in potrebujejo 200 korakov za en obrat. Število korakov na obrat definira število polov in oblika rotorja. Poznamo dve varianti motorjev glede na vzbujalna navitja in sicer unipolarne in bipolarne motorje. Pri unipolarnih pare nasprotnih polov vzbujamo z dvema navitjema, ki sta naviti vsaka v svojo smer. Hkrati je lahko priključeno le eno navitje, napetost na navitju pa je vedno le pozitivna. Pri bipolarnih motorjih (slika 7.21)



Slika 7.20: Različne izvedbe koračnih motorjev glede na tip rotorja: a) s permanentnim magnetom, b) s spremenljivo reluktanco, c) hibridni tip



Slika 7.21: Zasuk koračnega motorja za en korak: a) pred korakom, b) po koraku

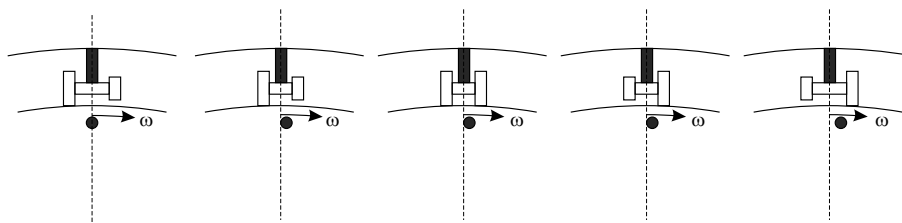
imamo za magnetenje parov nasprotnih polov le eno navitje, zato so možna stanja navitja: pozitivno visoko, nizko in negativno visoko. Glede na potrebe in lastnosti motorjev obstaja veliko načinov vodenja:

- valovni pogon (ang. wave drive) je najbolj osnovni način, pri katerem je v vsakem trenutku priključeno le eno navitje. Ta način zmanjšuje navor rotorja in povzroča vibracije.
- Polnokoračni pogon (ang. full-step drive) premika rotor vedno za polni korak, pri tem pa ga na vsakem koraku držita dve navitji. Tak način daje nazivno natančnost motorja in največji možen navor, ki pa s hitrostjo vrtenja precej upada.
- Polkoračni pogon (ang. half-step drive) dobimo tako, da izmenoma priklapljammo eno in dve navitji. Preciznost koraka se zveča za dvakrat, navor pa niha, ker je v različnih stanjih priklapljenih različno število navitij. Vendar pa s hitrostjo vrtenja povprečni navor manj niha kot pri polnokoračnem pogonu.
- Mikrokoračni pogon (ang. micro-step drive) uporablja različno zakasnjene sinusne signale za pogon motorja. Tak način je najbolj ugoden za vrtenje, poleg tega omogoča zelo majhne premike, saj v praksi lahko dosežemo tudi do 1/10 vrednosti polnega koraka.

Koračni motor zagotavlja ceneno rešitev pozicioniranja, ki pa mora biti glede potrebnega navora motorja, tako zadrževalnega kot premikalnega, dobro dimenzioniran. Lahko se namreč zgodi, da motor navkljub spremembi kode ostane na mestu ali pa ga breme premakne iz mirovne lege. Zavedati se moramo tudi, da pri visoki frekvenci korakov motorju upade navor.

**Piezoelektrični motor (ang. piezoelectric motor).** Obstajajo tudi motorji, ki za svoje delovanje ne izkoriščajo indukcije, ampak deformacijo oblike materiala pod vplivom električnega polja ali napetosti. Obstajajo tako izvedbe za linearni kot rotacijski premik, pri tem pa imamo premikanje lahko izvedeno na dva načina.

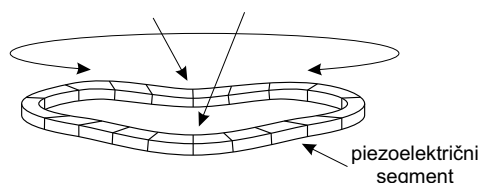
Pri prvem načinu so trije pogonski piezo kristali sestavljeni v obliki črke H. Oba končna elementa pritiskata na rotor, medtem ko povezovalni element zmanjšuje ali povečuje razdaljo med končnima elementoma. Motor deluje kot koračni motor in en korak je sestavljen iz pritiska prvega vertikalnega kristala na rotor, skrčenja srednjega kristala, pritiska drugega vertikalnega kristala na rotor, sprostitve prvega vertikalnega kristala in sprostitve srednjega kristala (slika 7.22). Z določitvijo, kateri od obeh vertikalnih kristalov je prvi določimo tudi smer gibanja. Za izvedbo motorja moramo uporabiti nekaj takih elementov H.



Slika 7.22: Zasuk piezoelektričnega motorja za en korak

Druga varianta pa je obroč, ki je sestavljen iz piezoelektričnih segmentov. Če na segmente priklopimo sinusne napetosti, ki so med seboj zakasnjene glede na pozicijo segmenta v obroču tako, da dobimo na obsegu obroča nek večkratnik valovne dolžine sinusnega signala, se na obroču pojavijo potujoči valovi, ki se krožno premikajo po njem (slika 7.23). Če se tak obroč dotika rotorja, ga valovi potegnejo za seboj. Ker se za vodenje takih motorjev uporabljajo frekvence sinusnega valovanja v območju ultrazvoka, jim pravimo tudi ultrazvočni motorji. Najdemo jih predvsem v optičnih napravah (ostrenje, premikanje kamer, ...).

deformaciji, ki krožita po piezoelektričnem obroču in premikata rotor



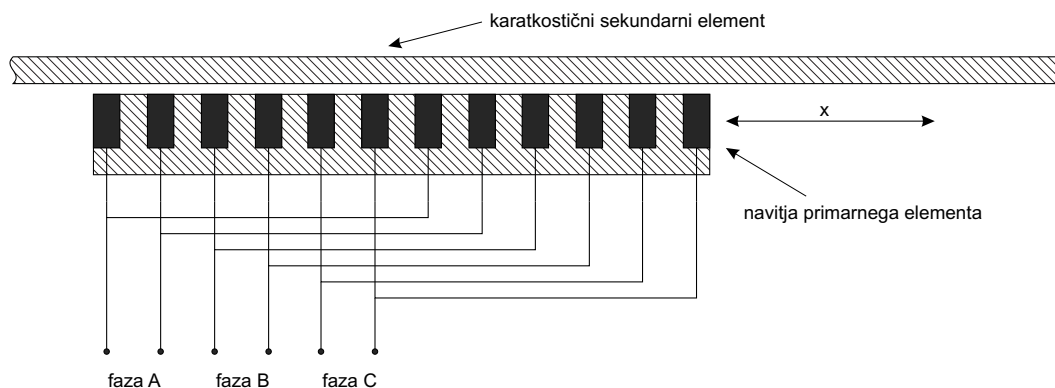
Slika 7.23: Deformacija obročnega piezoelektričnega motorja

Vsi piezoelektrični motorji imajo velike napore že pri majhnih hitrostih, ne morejo pa doseči tako velikih hitrosti kot motorji na osnovi indukcije. Lahko so izredno majhni, ker pogonske mehanizme lahko izdelujemo kot mikroelektronske komponente.

### Električni motorji z linearnim pomikom

Izbor električnih motorjev za linearni premik je bolj omejena. Omenili smo že, da obstajajo tovrstne izvedbe piezoelektričnih motorjev, sedaj si pa pogledjmo še najpogostejše predstavnike, ki delujejo na induktivnem principu.

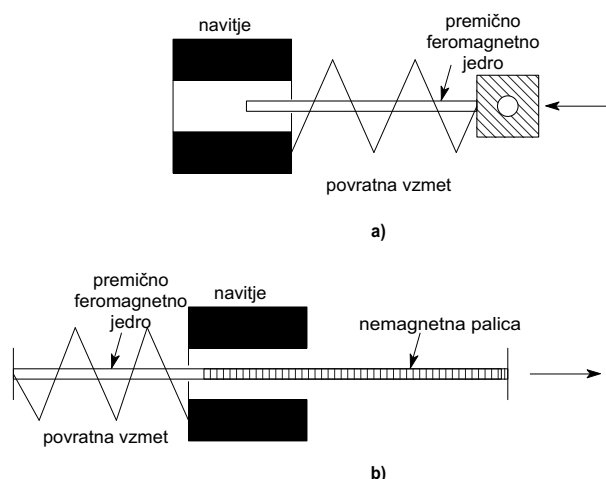
**Linearni indukcijski motor (ang. linear induction motor).** Najnovejši tip linearnih električnih motorjev predstavljajo linearni indukcijski motorji. Tako kot rotacijski motorji je sestavljen iz dveh delov. Primarni element je sestavljen podobno kot stator izmeničnega trifaznega motorja, le da so navitja postavljena v ravnini. Navitja so napajana tako, da sosednja navitja niso nikoli na isti fazi in, da je vrstni red faz v ponavljajočih se navitjih vedno enak. Namesto rotacijskega polja dobimo polje, ki lahko ustvarja silo na vodnik z glavno komponento, ki deluje vzporedno z ravnino statorja. Sekundarni element pa predstavlja permanentni magnet, prevoden trak ali vodnik skozi katerega teče tok. Premaknemo ga lahko v levo ali desno, odvisno od tega, kakšno zaporedje faz vzamemo. Prikaz linearnega indukcijskega motorja je na sliki 7.24. Premičen je največkrat primarni element, poznamo pa tudi izvedbe,



Slika 7.24: Prikaz linearnega indukcijskega motorja

kjer je premičen sekundarni element, še posebno, kadar to ni samo pločevina ampak nek aktiven element. Območje premika motorja je odvisno samo od dolžine nepremičnega dela. Z uporabo dveh primarnih elementov lahko izvedemo motor, ki se lahko poljubno premika v ravnini. Fizično ločitev primarnega in sekundarnega elementa izvedemo z magnetno izvedenim lebdenjem ali z zračno blazino. Linearne indukcijske motorje uporabljamo za pogon vlakov na magnetni blazini, ker v tem primeru nimamo fizičnega stika s podlago, da bi izvedli pogon na osnovi trenja. Poleg pogona ustvarja motor tudi določeno silo lebdenja. Druga možna uporaba je tračni top (ang. rail gun), kjer sta primarni element dve tračnici, ki dovajata tok v prevodni izstrelek. Magnetno polje, ki ga tračnici ustvarjata pa deluje na izstrelek in ga pospeši do nekajkrat višjih hitrosti (po nekaterih podatkih celo preko 7000 m/s), kot to lahko dosežemo na eksplozijski način pri klasičnih topovih (okoli 1200 m/s).

**Solenoid (ang. solenoid).** Solenoidi so enostavni linearni motorji. Sestavljeni so iz navitja in jedra. Prikaz solenoida je na sliki 7.25. Bistvo delovanja je, da na feromagnetno jedro deluje velika sila, ki ga vleče v področje polja z največjo poljsko gostoto, ker je to energijsko najbolj ugodno. S povratno vzmetjo pa to silo uravnovešamo. Obstajajo zvezno in stopen-



Slika 7.25: Prikaz delovanja solenoida: a) vlečenje, b) potiskanje

sko delujoči solenoidi. Uporabljamo jih za pogone relejev ter pnevmatskih in hidravličnih ventilov. Najpogostejši so stopenjski, zvezne pa najdemo v hidravličnih servokrmilnikih.

### 7.3.2 Pnevmatiski aktuatorji in končni izvršni členi

Čprav so sistemi vodenja, ki so temeljili na pnevmatskih logičnih vezjih že del zgodovine, pa so pnevmatski aktuatorji in končni izvršni členi še vedno zelo pogosti, ker imajo posebne lastnosti, ki v določenih okoliščinah pomenijo veliko prednost pred električnimi ali hidravličnimi sistemi. Poglejmo si dobre lastnosti pnevmatskih sistemov:

- dosejajo velike hitrosti,
- dosejajo srednje velike sile oz. navore,
- aktuator ali končni izvršni člen se pri preobremenitvah ne poškoduje,
- ni nevarnosti povzročitve eksplozije ali požara,
- dolga življenjska doba,
- ne obremenjuje okolja,
- primerni za čista okolja.

Seveda pa se moramo zavedati, da to niso idealni sistemi, saj lahko povzročajo tudi težave:

- problem tesnjenja zraka z dolgotrajno uporabo narašča,
- že majhne fizične poškodbe na tesnilnih površinah zahtevajo zamenjavo poškodovanega dela, sicer pride do izgub zraka in manjših sil ali navorov aktuatorja,
- izvedba servosistema je otežena zaradi velike stisljivosti zraka,
- potrebujemo kompresorsko postajo.

Najpogostejši so aktuatorji za linearni pomik, ki obstajajo v dveh izvedbah: batni in membranski. Najdemo pa tudi rotacijske aktuatorje, predvsem kot pogone pnevmatskih ročnih orodij, kot so vrtalniki in vijačniki. Podatki o pnevmatskih aktuatorjih in končnih izvršnih členih, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- območje tlakov,
- nazivno porabo zraka in
- maksimalno silo ali navor.

**Rotacijski pnevmatski motor (ang. rotary pneumatic motors).** Rotacijski pnevmatski motorji obstajajo v veliko izvedbah, a večinoma gre za pretvorbo linearnega premika bata v rotacijo, kar je lahko izvedeno na naslednje načine:

- bat, ki drsi po osi z zelo strmim navojem. Ker se bat v cilindru ne more zasukati, vzdolžni gib po navojni osi zavrti os (omejen kot zasuka).
- Eden ali več batov, ki so vezani na skupno ojnico (enak princip kot pri Ottovem batnem eksplozijskem motorju).
- Dva bata, ki se premikata drug proti drugem in z zobniško letvijo poganjata os preko zobnika.
- Ena ali več vetrnic pritrjenih na os. Zračni tok premika lopute in s tem vrtili os.

Prikaz omenjenih principov je na sliki 7.26. V industriji jih uporabljamo povsod tam, kjer je zahtevana visoka stopnja čistosti, zaščita pred eksplozijo ali kjer pričakujemo občasne preobremenitve, ki bi lahko poškodovale električne stroje. Dosegajo lahko hitrosti vrtenja tudi do 400.000 obr/min.

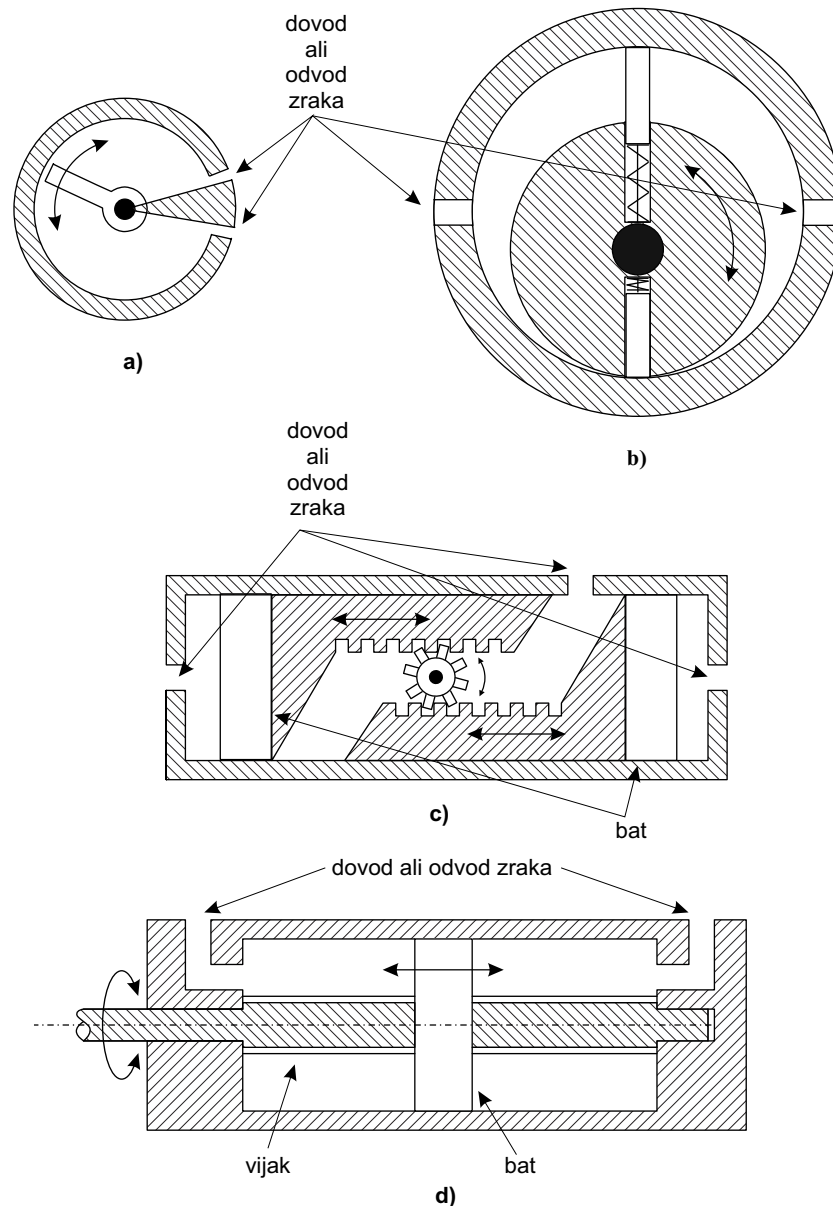
**Pnevmatski cilinder (ang. pneumatic cylinder).** Najpogostejši pnevmatski motorji za linearne premike so pnevmatski cilindri. Obstajajo enosmerni in dvosmerni cilindri, uporabljamo pa jih v glavnem za premike iz ene do druge končne lege. Če sistem za proizvodnjo in distribucijo stisnjene zraka že obstaja, so to najbolj učinkoviti aktuatorji srednjih moči za linearne premike. Prikaz izvedb pnevmatskih cilindrov sta na sliki 7.27.

**Pnevmatska membrana (ang. pneumatic membrane).** Manj pogosti linearni pnevmatski pogoni so membrane. Obstajata dva tipa membran in sicer, enosmerne in dvosmerne. Po načinu delovanja so zelo podobne pnevmatskim cilindrom, le da namesto premikanja bata zrak razteguje membrano. Primer enosmerne pnevmatske membrane je prikazan na sliki 7.28. Najpogosteje jih uporabljamo za pogon regulacijskih ventilov, kot samostojne aktuatorje pa jih redkeje srečamo.

### 7.3.3 Hidravlični aktuatorji in končni izvršni členi

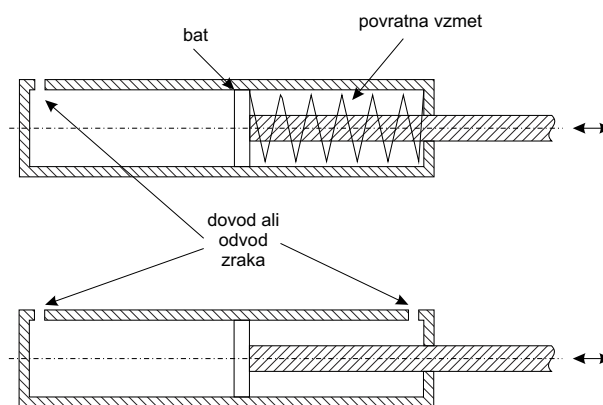
Hidravlični aktuatorji in končni izvršni členi so namenjeni premikanju največjih bremen v zelo neugodnih razmerah. Zaradi visokih tlakov hidravlične tekočine (do 40 MPa) in velikih aktuatorskih površin lahko proizvedejo velike navore in sile. Naj naštejemo nekaj dobrih lastnosti hidravličnih sistemov:



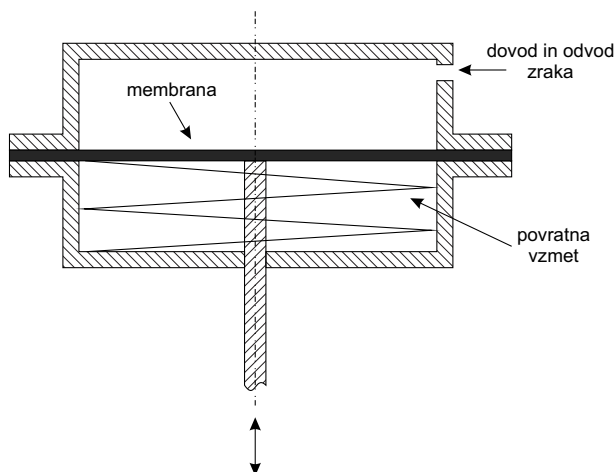


Slika 7.26: Principi delovanja rotacijskih pnevmatskih motorjev: a) motor z vetrnico in omejenim kotom zasuka, b) motor z vetrnico z neomejenim kotom zasuka, c) batni motor z zobniško letvijo, d) batni motor z vijakom

- veliki pospeški,
- srednje hitrosti gibanja,
- majhna obraba gibljivih delov,
- ni poškodb ob preobremenitvi,
- ne morejo povzročiti eksplozije ali vžiga,



Slika 7.27: Izvedbe pnevmatskih cilindrov: enosmerni – zgoraj, dvosmerni – spodaj



Slika 7.28: Enosmerna pnevmatska membrana

- primerni za precizno pozicioniranje,
- visoka gostota moči na maso aktuatorja.

Uporaba olja za prenos moči pa ima tudi slabe strani:

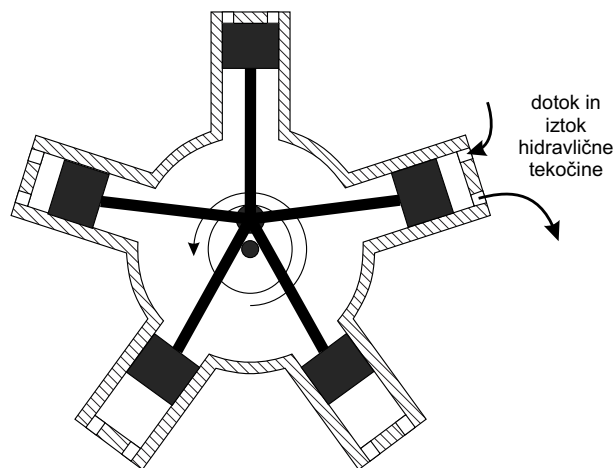
- puščanje lahko povzroči onesnaženje,
- visoka viskoznost hidravlične tekočine onemogoča velike hitrosti premika.

Glavno področje uporabe hidravličnih aktuatorjev in končnih izvršnih členov so procesi, kjer potrebujemo velike sile in navore ob zagonu. Slabost električnih motorjev je, da se pri nizkih hitrostih in velikih obremenitvah zelo grejejo, medtem ko je to idealno območje za uporabo hidravličnih motorjev. Podatki o hidravličnih motorjih, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

- območje tlakov,
- nazivna poraba hidravlične tekočine in
- silo ali navor motorja.

**Rotacijski hidravlični motor (ang. rotary hydraulic motors).** Za vrtenje strojev, ki se veliko ustavljajo in potrebujejo velike zagonske navore uporabljamo rotacijske hidravlične motorje. Obstaja veliko konstrukcij, večinoma pa so zelo podobni pnevmatskim rotacijskim motorjem. Najbolj univerzalen stroj je osni batni motor, ki ima enako zgradbo kot osna batna črpalka (slika 7.6). Razlika s črpalko je le ta, da ima vedno nastavljiv kot osne plošče, ki pretvarja linearno gibanje v rotacijo. S kotom nagiba nastavljamo razmerje navora in hitrosti. Osni batni motorji so najhitrejši hidravlični motorji, saj lahko dosežejo tudi do 14.000 obr/min.

Zelo pogosti so tudi radialni batni motorji (slika 7.29), ki imajo zelo visok startni navor,



Slika 7.29: Radialni batni hidravlični motor

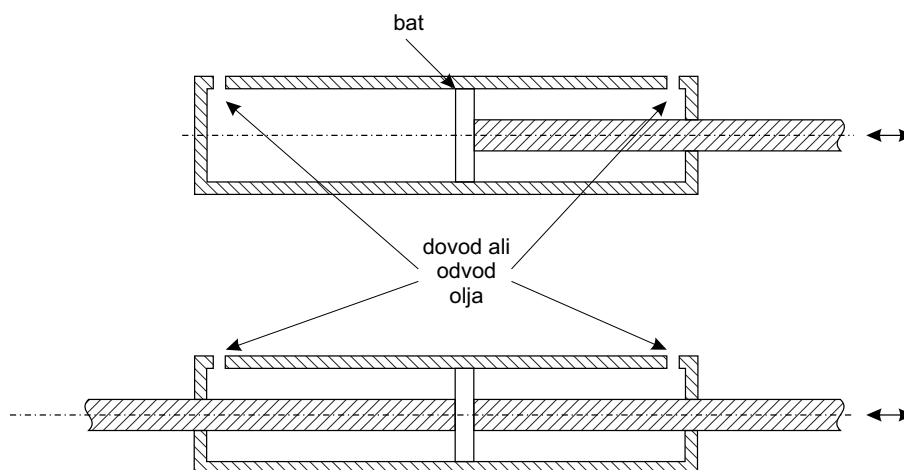
so pa počasnejši kot osni batni motorji.

Poleg že omenjenih obstajajo tudi rotacijski hidravlični motorjih enakih konstrukcije kot pnevmatski rotacijski motorji (slika 7.26), le da so narejeni bolj robustno in za precej višje navore.

**Hidravlični cilindri (ang. hydraulic cylinders)** so standardni aktuatorji povsod tam, kjer potrebujemo velike sile in razmeroma počasne premike. Obvladujejo sisteme na področjih gradbenih strojev, stiskalnic za pločevino in drugih materialov, strojev za krivljenje materialov, itd. Večinoma je v uporabi le dvosmerna verzija hidravličnega cilindra, ki pa je lahko v izvedbi z enostransko ali dvostransko batnico. Obe izvedbi cilindra sta prikazani na sliki 7.30. Pri zveznem pozicioniranju s cilindrom z enostransko batnico moramo paziti, ker ima cilinder dinamiko odvisno od smeri gibanja, zaradi različnih efektivnih površin bata.

#### 7.3.4 Črpalke

V procesni industriji je pogosto potrebno prečrpavanje različnih tekočin med reaktorji, za kar skrbijo črpalke. Črpalke največkrat poganjamo z električnimi motorji, pri zelo kritičnih procesih pa je lahko kot rezervna varianta uporabljena tudi črpalka, ki jo žene eksplozijski motor. Takšne rezervne izvedbe velikokrat najdemo pri črpalkah za črpanje hladilne tekočine v kritičnih procesih, kot so jedrski reaktorji. Ker so črpalke neposredno v stiku s tekočim medijem, ki je lahko tudi zelo agresiven, je pomembno, da povsem ustrezajo vsem



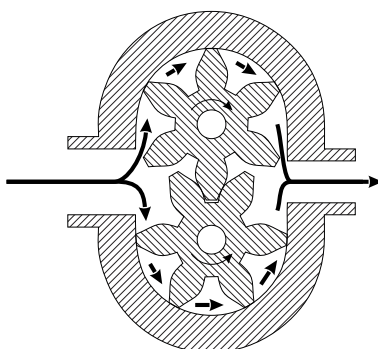
Slika 7.30: Najpogostejši izvedbi hidravličnih cilindrov: cilinder z enostransko batnico zgoraj in cilinder z dvostransko batnico spodaj

pogojem za varno in zanesljivo delovanje. Ker so sestavljene iz gibljivih delov, med daljšim delovanjem lahko pride do puščanja, če niso redno vzdrževane. Zaradi širokega spektra različnih tekočin, ki jih je potrebno prečrpavati, so se razvile razne izvedbe, zato je izbira ustrezne črpalke zahtevno delo. Izdelane so iz obstojnih kovinskih zlitin, nerjavnega jekla ali plastičnih materialov. Podatki o črpalkah, ki so pomembni za dimenzioniranje sistema vodenja vsebujejo:

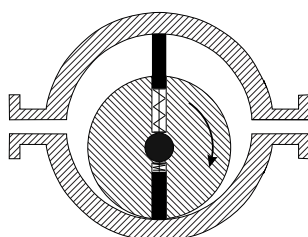
- območje tlakov,
- nazivni pretok,
- nazivno moč in
- karakteristiko tlak–pretok.

**Zobniška črpalka (ang. gear pump).** Zobniške črpalke so zelo pogosto uporabljene pri pretakanju tekočin, posebno tam, kjer črpalka ob štartu ni vedno zalita. Zobniška črpalka namreč lahko na sesalni strani ustvari dovolj podtlaka, da tekočino posesa. Med delovanjem se počasi obrablja, s čemer jim pada učinkovitost. Le redko pa pride do takšnih poškodb, ki bi jih nenadoma ustavile, zato spadajo med najbolj zanesljive črpalke. Obstaja veliko izvedb z raznimi načini ozobljenj in številom zobnikov. Na sliki 7.31 je prikaz zobniške črpalke. Velika prednost zobniške črpalke pred ostalimi tipi je tudi izjemno enostavna zgradba in obdelava, proizvedejo pa lahko razmeroma majhne pretoke. Zaradi problematičnega tesnjenja so namenjene prečrpavanju kapljev.

**Črpalka z vetrnico (ang. rotary vane pump).** Pogosto srečamo tudi črpalke z vetrnico. Njihova glavna prednost je visok tlak delovanja, namenjene pa so velikim pretokom. Z njimi lahko črpamo tako kapljevine kot pline. Prikaz je na sliki 7.32. Črpalka z vetrnico je povsem enaka rotacijskemu motorju z vetrnico, le da je smer vrtenja pri črpalki določena.

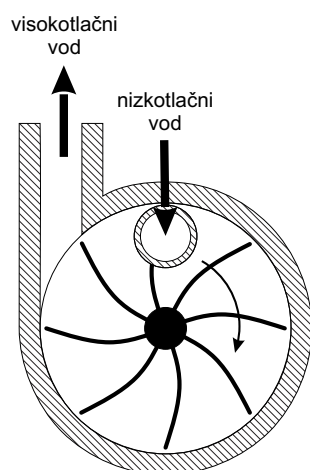


Slika 7.31: Prikaz zobniške črpalke



Slika 7.32: Prikaz črpalke z vetrnico

**Radialna centrifugalna črpalka (ang. radial centrifugal pump).** Radialne centrifugalne črpalke so namenjene velikim pretokom pri zmernih tlakih. Na osi se nahajajo lopatice, ki jih vrti motor. Vzporedno z osjo črpalke je postavljen dotok tekočine (nizkotlačni vod), radialno pa visokotlačni vod iz črpalke. Skupaj z lopaticami se vrti tudi tekočina, ki jo pretakamo in zaradi centrifugalne sile zapusti ohišje črpalke skozi visokotlačni vod. Za črpanje kapljev in mora biti črpalka zalita s kapljevino, ker ne more ustvariti dovolj podtlaka za štart. Prikaz črpalke je na sliki 7.33. Pri velikih razlikah med tlakom nizkotlačnega in visokotlačnega voda

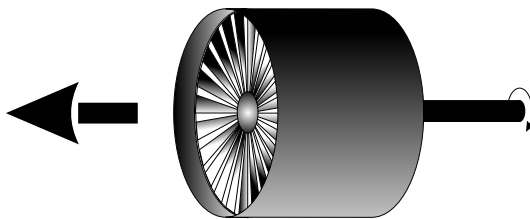


Slika 7.33: Prikaz radialne centrifugalne črpalke

ter pri majhnem pretoku, lahko pride pri tem tipu črpalke do kavitacije. Kavitacija je pojav,

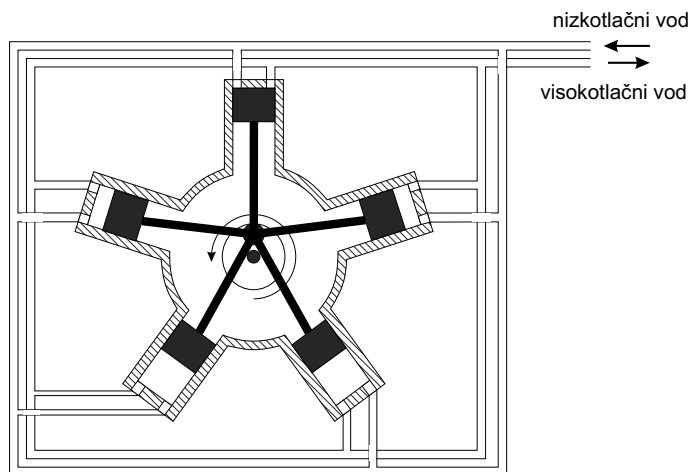
ko se zaradi vrtnčenja tekočine pojavijo lokalna področja tako nizkega tlaka, da kapljevina upari in tako nastane na tem mestu mehurček plina. Ko se mehurček premakne v področje dovolj visokega tlaka, pa implodira. Do implozije največkrat prihaja v bližini lopatic črpalke, kar povzroči veliko abrazijo materiala, podobno kot jo opazimo pri postopku peskanja materiala. Pri zelo hudi kavitaciji lahko uničimo lopatice že v nekaj minutah obratovanja, zato je potrebno ta pojav s pravilno izbiro črpalke odpraviti.

**Osna centrifugalna črpalka (ang. axial centrifugal pump).** Za črpanje plinov z velikimi pretoki uporabljamo osne centrifugalne črpalke. Po zgradbi je to ventilator z velikim številom lopatic, ki potiskajo plin vzdolž osi vrtenja. Če postavimo na os več ventilatorjev, od katerih ima prvi najmanj oster kot lopatic, nato pa kot v smeri pretoka narašča, dobimo osni kompresor, ki ga uporabljajo reakcijski motorji. Prikaz osne centrifugalne črpalke je na sliki 7.34.



Slika 7.34: Prikaz osne centrifugalne črpalke

**Radialna batna črpalka (ang. radial piston pump).** Radialne batne črpalke so povsem enake konstrukcije kot radialni batni pnevmatski in hidravlični motorji, le da jih ženemo z motorjem, na drugi strani pa prečrpavajo tekočine. Problem pri tem tipu črpalke so vibracije, ker gre za pretvorbo iz linearnega gibanja v rotacijo, pri tem pa so mase, ki se gibljejo linearno razmeroma velike. Skica radialne batne črpalke je na sliki 7.35. Na sliki pa niso prikazani



Slika 7.35: Prikaz osne centrifugalne črpalke

ventili, ki v odvisnosti od pozicije bata v cilindru odpirajo in zapirajo priključke posameznih cilindrov na visoko in nizkotlačni vod.

**Osna batna črpalka (ang. axial piston pump).** Osne batne črpalke uporabljamo predvsem v zaprtih hidravličnih sistemih. Delovanje črpalke smo zato že opisali v poglavju o izvorihi pri hidravličnem prenosu energije oz. moči.

**Vakuumske črpalke (ang. vacuum pumps).** Poseben tip črpalk so vakuumske črpalke. Njihov namen ni pretakanje tekočin ampak zniževanje tlaka plina v vakuumski komori. Načrtovane so za doseganje visokih podtlakov ne pa velikih pretokov. Uporabljamo lahko batne črpalke, ki so podobne batnim kompresorjem (slika 7.3), le da je sesalna stran priključena na vakuumsko komoro in ne na zračni tlak. Prav tako lahko uporabljamo posebne izvedbe zobniških črpalk ali impelerjev (ang. roots blower). Uporabljamo tudi turbomolekularne črpalke (ang. turbomolecular pump), ki so posebne izvedbe osnih centrifugalnih črpalk z več stopnjami (osni kompresor). Za ultra visoke vakuume pa uporabljamo ionske črpalke (ang. ion pumps). Bistvo ionske črpalke je, da molekule plina najprej ionizira, nato pa jih z močnim električnim poljem pospeši proti katodi ali anodi in tam zadrži. S tem proste molekule plina odstranimo iz vakuumske komore in vežemo na elektrode črpalke. Plin lahko ioniziramo s hitrimi elektroni ali pa z izvorom  $\alpha$  ali  $\beta$  delcev.

### 7.3.5 Regulacijski ventili

Regulacijski ventili skupaj s črpalkami skrbijo za uravnavanje pretoka v cevovodih. Kadar imamo samo eno vejo cevovoda je uravnavanje pretoka s spreminjanjem hitrosti vrtenja črpalke mnogo bolj učinkovito. Pri razvejanih cevovodih pa to ni možno. Ventil predstavlja oviro v pretoku in s tem zmanjša pretok skozi cevovod, medtem ko se na ventilu pojavi neka tlačna razlika. Ker je lahko tlačna razlika velika, pride v primeru slabega načrtovanja pri kapljevinah do pojava kavitacije. Ventili so lahko najrazličnejših konstrukcij, vsi pa imajo naslednje lastnosti, ki so pomembne za namene načrtovanja vodenja:

- polje karakteristik tlak–pretok–odprtost ventila,
- konstanta ventila  $k_v$  in
- lastnosti medija.

Lastnosti medija so pomembne predvsem za pravilno izbiro območja delovanja ventila, da se lahko izognemo problemom kavitacije. Pri tem so pomembni predvsem gostota in viskoznost tekočine ter hitrost pretoka. Na izbiro ventila pa imajo vpliv tudi lastnosti kot so jedkost in strupenost, ki določajo, kakšen naj bo material delov ventila in kako mora biti pretok ločen od okolice, da ne pride do onesnaženja.

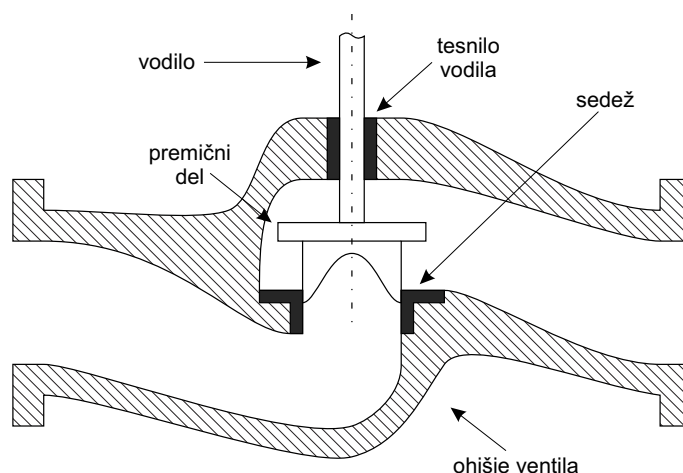
Glede na zelene ali pričakovane pretoke v sistemu moramo izbrati ustrezno konstanto ventila  $k_v$ . Konstanta ventila je definirana pri standardiziranih pogojih delovanja in sicer:

- pretakani medij je voda pri temperaturi med 5°C in 40°C,
- ventil mora biti polno odprt in
- padec tlaka ne ventilu mora znašati 100 kPa.

Pri takih pogojih  $k_v$  pomeni pretok vode v  $\text{m}^3/\text{s}$ .

### Zgradba ventila

Čeprav obstaja veliko različnih izvedb ventilov, pa so v glavnem vsi sestavljeni iz delov z enako funkcijo. Ventil sestavljata telo ventila, ki je montirano na cev in spreminja pretok ter pogon ventila, ki skrbi za delovanje ventila. Zgradba telesa ventila je prikazana na sliki 7.36. Premični del ventila je preko vodila vezan na pogon in se neposredno vpleta v spreminjanje



Slika 7.36: Zgradba telesa ventila

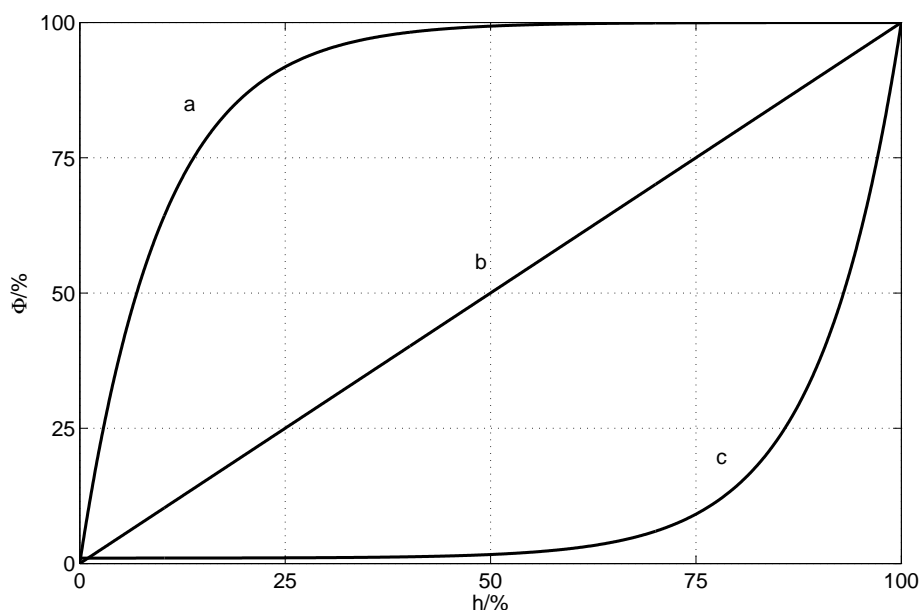
pretoka. Pri popolnoma zaprtem ventilu premični del naleže na sedež ventila in s tem zapre pretok. Stik premičnega dela in sedeža je zato zelo pomemben za pravilno delovanje ventila, a tudi najbolj občutljiv del ventila. Če je ventil ves čas odprt, se na sedežu pogosto nabirajo naslage, ki ustvarijo neravno površino in preprečujejo popolno zaprtje pretoka. Premični del ventila in sedež pa sta podvržena tudi kavitaciji, ki prav tako močno poškoduje tesnilne površine ter s tem zapiranje pretoka in tudi karakteristiko ventila.

### Standardne karakteristike regulacijskih ventilov

Glede na namene regulacije pretoka je odvisno kakšno karakteristiko ventila potrebujemo. Če je regulirna veličina pretok, potem je najugodnejše, da izberemo linearno karakteristiko, ker je s tem občutljivost sistema v celotnem področju enaka. Seveda pa je pretok medija lahko drugotnega pomena in želimo regulirati porabo energije, ki ga medij nosi s seboj ali pa želimo zgolj določen del cevovoda ločiti od ostalega sistema. V takih primerih so bolj ugodne nelinearne karakteristike ventilov. Pri sistemih centralnega ogrevanj, kjer se toplota prenaša z vodo do radiatorjev uporabljamo za regulacijo enakoprocentno karakteristiko. Prenos toplote iz radiatorjev v okolico je nelinearen proces, ki ga enakoprocentna karakteristika kompenzira in s tem olajša regulacijo. Pri ventilih, ki so namenjeni ločevanju delov cevovoda pa želimo zaporno karakteristiko. Prikaz karakteristik standardiziranih na padec tlaka na ventilu na 100kPa je na sliki 7.37. Zaporna karakteristika je narejena tako, da že s 30% odprtostjo ventila lahko dosežemo skoraj polni pretok skozi ventil. Enakoprocentna karakteristika je eksponentna karakteristika, ki jo definira naslednja enačba:

$$\Phi = \Phi_{min} R^h, \quad (7.1)$$





Slika 7.37: Standardne karakteristike regulacijskih ventilov: a – zaporna (on/off) karakteristika, b – linearna karakteristika, c – enakoprocenčna karakteristika

kjer je  $\Phi_{min}$  - minimalni pretok skozi ventil,  $R$  - rangirni faktor in  $h$  procent odprtosti ventila. Iz tega sledi, da ventil z enakoprocenčno karakteristiko pretoka nikoli čisto ne zapre. Rangirni faktor  $R$  pa definira razmerje med minimalnim in maksimalnim pretokom skozi ventil  $\Phi_{max}$ :

$$R = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{min}} \quad (7.2)$$

Linearno, enakoprocenčno in zaporno karakteristiko lahko pri proizvajalcih zelo enostavno naročimo. Poleg že omenjenih karakteristik jemljemo kot standardne karakteristike tudi korenske in hiperbolične, le da so manj pogoste. Z današnjo tehnologijo je možno notranjo obliko ventila, ki vodi pretok, sedež in premični del praktično poljubno oblikovati in s tem izvesti skoraj poljubno karakteristiko pretoka ventila, vendar je to povezano tudi s precej višjo ceno ventila in daljšim časom od naročila do dobave.

### Ventilski aktuatorji

Izbira ventilskih aktuatorjev je razmeroma omejena. Običajno uporabljamo pnevmatske, elektrohidravlične in elektromotorne aktuatorje. Najbolj pogosti so pnevmatski, nato pa sledijo elektrohidravlični in elektromotorni.

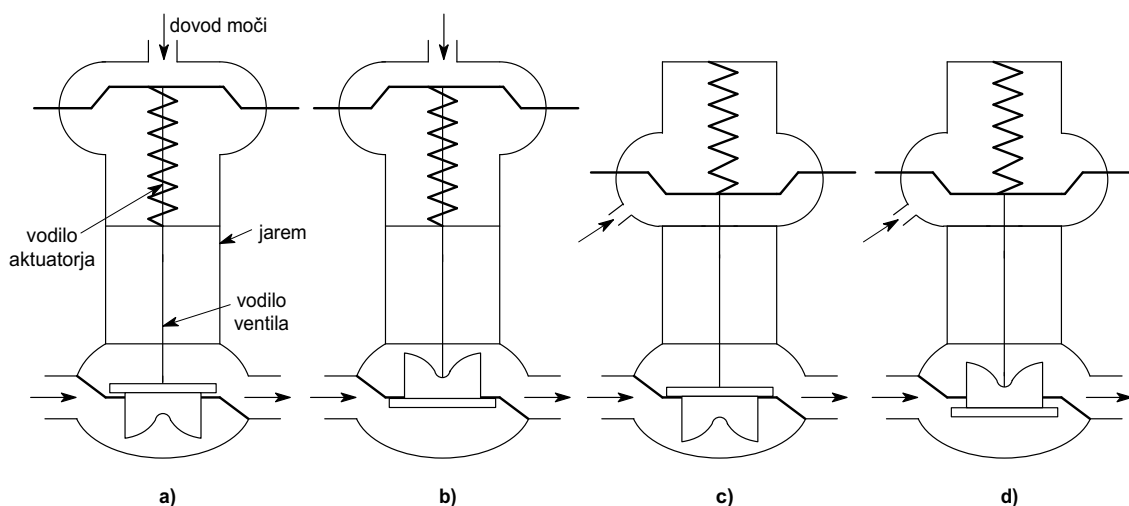
Pnevmatski aktuatorji omogočajo hiter odziv in so neproblematični glede agresivnosti okolja. Tlak, ki ga uporabljamo za pogon ventila namreč lahko uporabimo za vzdrževanje nadtlaka v kritičnih sistemih aktuatorja in s tem zagotovimo, da agresivna ali eksplozijska atmosfera krmilnega dela aktuatorja ne more poškodovati. Varovanje kritičnih podsistemov pogona pa ima tudi slabe lastnosti, saj to zelo poveča porabo zraka, ki lahko znaša tudi

100 l/min, kar je več kot zmorejo manjši delavniški batni kompresorji. Pnevmatški pogon ima lastno povratno zanko, ki pozicionira premični del ventila glede na želeno vrednost, ki jo dobi s krmilnim signalom. Starejše izvedbe so uporabljale pnevmatski pozicioner, novejše pa imajo regulacijo pozicije rešeno elektronsko in porabljajo le do 2% zraka napram pnevmatskim pozicionerjem. Večinoma so izvedeni kot membranski aktuatorji, redkeje kot pnevmatski cilindri. Možni so tudi rotacijski pogoni, če to zahteva izvedba ventila. Linearni pogoni so najpogosteje izvedeni enosmerno, kar pomeni, da imajo za vračanje v mirovno lego povratno vzmet. Zaradi enosmernega delovanja je lega ob izklopu pogonske energije točno določena.

Elektrohidravlični aktuator je kombinacija električno gnane hidravlične črpalke in hidravličnega cilindra ali rotacijskega hidravličnega aktuatorja. Uporabljamo jih povsod tam, kjer potrebujemo velike sile ali navore za premagovanje sil ki delujejo na premični del ventila. Tudi ti pogoni imajo izvedeno interno regulacijsko zanko za pozicioniranje in od sistema vodenja dobivajo le želeno vrednost odprtosti ventila. Zapiranje in odpiranje ventila je večinoma izvedeno aktivno, kar pomeni, da ni povratne vzmeti in ventil ob izklopu energije obmiruje v trenutni poziciji, obstajajo pa tudi enosmerne izvedbe s povratno vzmetjo za linearne pogone.

Elektromotorni aktuatorji so v servomotorji, ki so vodeni z interno pozicijsko regulacijsko zanko, sistem vodenja pošilja samo želeno vrednost odprtosti. Za zvezno regulacijo so v uporabi le rotacijski pogoni, medtem ko je za zaporne ventile možna uporaba solenoidnega pogona.

Po načinu delovanja ločimo normalno zaprt in normalno odprt ventil. Način delovanja govori o tem, kakšno je mirovno stanje ventila. Način odpiranja ventila pa je lahko protitočen (običajno) ali sotočen. Tako dobimo štiri različne kombinacije montaže ventila in pogona. Možni načini delovanja so prikazani na sliki 7.38. Obstaja pa še način, ko ventil v stanju



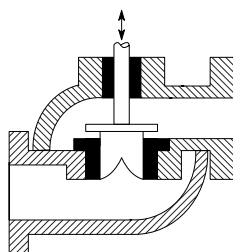
Slika 7.38: Načini delovanja pogonov ventila: a) sotočno odpiranje, normalno odprt, b) protitočno odpiranje, normalno zaprt, c) sotočno odpiranje, normalno zaprt, d) protitočno odpiranje, normalno odprt

mirovanja obmiruje v trenutni poziciji, kar je značilno za ventile, ki imajo rotacijski pogon premičnega dela ventila vezan na elektromotorni pogon.

### Standardne izvedbe regulacijskih ventilov

Poleg standardnih karakteristik poznamo tudi standardne izvedbe ventilov. Izbira izvedb je precej velika, s tem da so posamezne izvedbe bolj ali manj primerne za določeno nalogo.

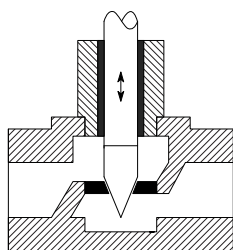
**Ventil s čepom (ang. globe valve).** Ventil s čepom je najbolj pogost regulacijski ventil. Skica ventila je prikazana na sliki 7.39. Ventil s čepom povzroča razmeroma velik upor v pre-



Slika 7.39: Ventil s čepom

toku, je pa enostaven za izdelavo. Tesnjenje ob zaprtosti je zadovoljivo, je pa zelo občutljiv na kavitacijo. Vzdrževanje ni zahtevno, pri večjih poškodbah sedeža pa je potrebno sedež in čep zamenjati. Uporabljamo ga za regulacijo pretoka neagresivnih kapljev, plinov in pare. Ventil potrebuje linearni pogon. Če pa vodilo izvedeno z vijakom je pogon rotacijski.

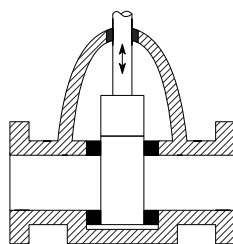
**Iglični ventil (ang. needle valve).** Iglični ventil je najbolj pogost regulacijski ventil za pretok zraka. Skica ventila je prikazana na sliki 7.40. Ventil ima zaradi koničnega sedeža in



Slika 7.40: Iglični ventil

prilegajočega se premičnega dela zelo dobro tesnjenje, ko je zaprt. Oblika premičnega dela ustvarja majhno oviro v pretoku, zato je možnost kavitacije majhna. Pri poškodbah sedeža ali premičnega dela je možno oba dela obnoviti. Ni namenjen agresivnim tekočinam, poganjamo pa ga z linearnim pogonom, razen, kadar ima vodilo navoj.

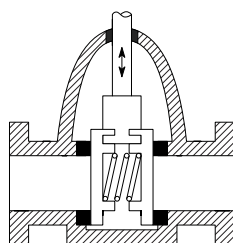
**Ventil z vrati (ang. gate or sluice valve).** Ventil z vrati je najbolj uporaben kot zaporni ventil, ker ustvarja precejšnjo oviro v pretoku, dokler je samo delno odprt. Polno odprt pa skoraj ne ustvarja dodatne ovire. Skica ventila je prikazana na sliki 7.41. Če ga uporabljamo



Slika 7.41: Ventil z vrati

za spreminjanje pretoka kapljev, obstaja možnost obrabe spodnjega dela vrat, kar vpliva na tesnjenje popolnoma zaprtega ventila. Ker so tesnilne površine vzporedne, tesnjenje ventila tudi sicer ni najboljše. Pri večjih poškodbah na tesnilnih površinah je potrebno sedež in premični del zamenjati. Ni namenjen agresivnim tekočinam, poganjamo pa ga z linearnim pogonom, razen, če ima vodilo navoj.

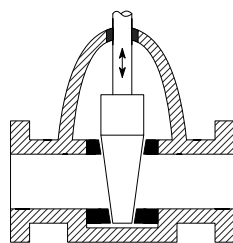
**Drсни ventil (ang. gate or sluice valve).** Drsni ventil je izboljšava ventila z vrati. Skica ventila je prikazana na sliki 7.42. Bistvena izboljšava drsnega ventila je ta, da je premični del



Slika 7.42: Drsni ventil

ventila izveden tako, da je iz dveh polovic, ki ju vzmet pritiska ob tesnilne površine sedeža. S tem je bistveno izboljšano tesnjenje, ko je ventil zaprt. Pri večjih poškodbah na tesnilnih površinah lahko le-te popravimo. Ni namenjen agresivnim tekočinam, poganjamo pa ga z linearnim pogonom, razen, če ima vodilo navoj.

**Klinasti ventil (ang. wedge shaped gate or sluice valve).** Tudi klinasti ventil je izboljšava ventila z vrati. Skica je prikazana na sliki 7.43. Klinasti ventil ima konične tesnilne površine,

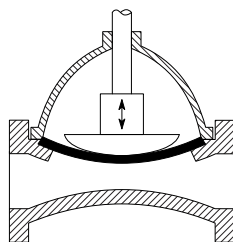


Slika 7.43: Klinasti ventil

kar omogoča zelo dobro tesnjenje, ko je ventil zaprt. Zato je ventil uporaben tudi za regulacijo pretoka plinov. Še vedno pa predstavlja velik upor v pretoku, ko je delno odprt.

Ni namenjen agresivnim tekočinam, poganjamo pa ga z linearnim pogonom, razen, če ima vodilo navoj.

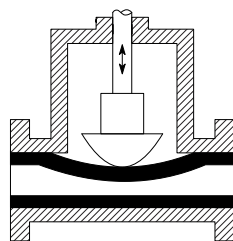
**Membranski ventil (Saunders) (ang. membrane or diaphragm valve).** Membranski ventil, imenovan tudi Saunders, je ventil, ki ima prostor pretoka z membrano popolnoma ločen od preničnega dela. Skica ventila je prikazana na sliki 7.44. Zaradi izvedbe tesnjenja z mem-



Slika 7.44: Membranski ventil (Saunders)

brano ventil ne potrebuje tesnila vodila. Predstavlja zelo majhen upor in zato ni nevarnosti kavitacije. Tesnilne površine so neobčutljive, ker nimajo ostrih robov. Ventil lahko uporabljamo za zelo agresivne in strupene tekočine, ker so popolnoma ločene od preničnega dela ventila. Ventil potrebuje linearni pogon, razen če vodilo ni izvedeno z navojem.

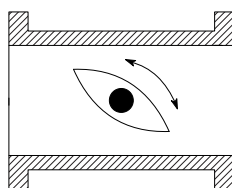
**Stiskalni ventil (ang. pinch valve).** Stiskalni ventil je po delovanju nekoliko podoben membranskemu ventilu. Skica ventila je prikazana na sliki 7.45. Namesto membrane je v



Slika 7.45: Stiskalni ventil

ventil vstavljena gibljiva cev, ki jo prečni del stiska. Del ventila, ki uravnava pretok je s tem popolnoma ločen od preničnega dela. Ventil je zato primeren za agresivne in strupene medije. Upor ventila v pretoku je majhen, zato pojava kavitacije skoraj ni. Tesnilne površine so neobčutljive, ob poškodbi pa gibljivo cev dokaj enostavno zamenjamo. Ventil potrebuje linearni pogon, če vodilo ventila ni izvedeno z navojem.

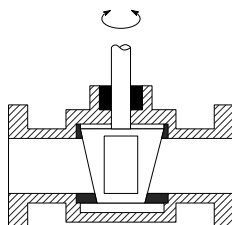
**Metuljasti ventil in loputa (ang. butterfly valve, flap).** Za uravnavanje velikih pretokov največkrat uporabljamo metuljaste ventile. Skica ventila je prikazana na sliki 7.46. Metuljasti ventil predstavlja majhno oviro v pretoku, karakteristika pa je zelo nelinearna, zato je neugoden za regulacijo pretoka. Ni namenjen agresivnim in strupenim tekočinam. Tesnjenje zaprtega ventila ni najboljše, zato ventil ni primeren za ločevanje cevovodov, zato se tudi s tesnilnimi površinami ne ukvarjamo preveč. Običajno stalno naleganje metulja na cev, ko ga



Slika 7.46: Metuljasti ventil

zapremo, povzroči na cevi zareze in s tem celo izboljša tesnjenje ventila. Za delovanje potrebuje rotacijski pogon. Posebna oblika metuljastega ventila so lopute, ki jih uporabljamo za regulacijo velikih pretokov plinov.

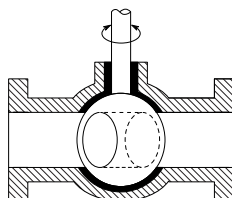
**Stožčasti ventil (ang. plug valve).** Za ločevanje cevovodov, posebno cevovodov za pline, uporabljamo stožčasti ventil. Skica ventila je prikazana na sliki 7.47. Premični del ventila



Slika 7.47: Stožčasti ventil

je prisekani stožec, ki ima pravokotno na os vrtenja izvrtino. Ko izvrtino obrnemo v smer pretoka, ventil predstavlja majhen upor v pretoku. Ko izvrtino stožca obrnemo pravokotno na smer pretoka, je ventil popolnoma zaprt. Koničnost tesnilnih površin omogoča izredno dobro tesnjenje, ki se z uporabo ne zmanjša. Premični del in tesnilne površine se namreč obrabljajo tako, da vedno bolje nalegajo druga na drugo, zato moramo poskrbeti samo zato, da stožec s stalno silo nalega na tesnilne površine sedeža. Za delovanje potrebujemo rotacijski pogon. Agresivne tekočine lahko povzročajo probleme, če material ventila ni ustrezno izbran.

**Krogelni ventil (ang. ball valve).** Z izboljšanimi postopki obdelave kovin, predvsem z uvedbo računalniškega vodenja obdelovalnih strojev, so prišli na trg krogelni ventili. Skica ventila je prikazana na sliki 7.48. Krogelni ventil namesto stožca uporablja kroglo kot premični

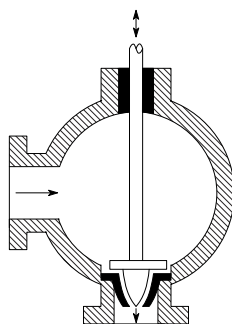


Slika 7.48: Krogelni ventil

del. Prednost pred stožčastim ventilom je ta, da ventil ob polni odprtosti ne predstavlja

nobenega dodatnega upora za pretok, ob zaprtosti pa zelo dobro tesni. Tesnila sedeža so običajno izveden s teflonom, kar jim daje veliko temperaturno odpornost in zahteva majhne sile za premikanje. Slaba stran pa je, da je zaradi teflonskih tesnil sedeža ventil zelo občutljiv na mehanske poškodbe. Ob večjih poškodbah je potrebno ventil zamenjati. Ventil torej ni primeren za uporabo v cevovodih, kjer se pretakajo tekočine z delci ali tekočine, ki odlagajo trde naslage. Za delovanje potrebuje rotacijski pogon.

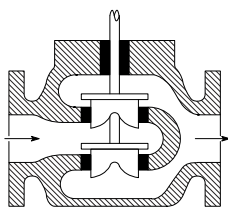
**Kotni ventil (ang. angle globe valve).** Če želimo z ventilom izvesti tudi spremembo smeri cevovoda, uporabimo za ta namen kotni ventil. Skica ventila je prikazana na sliki 7.49. Kotni



Slika 7.49: Kotni ventil

ventil je po zgradbi ventil s čepom, ki pa ima priključka za cevovod postavljena pod kotom, ki je različen od  $180^\circ$ , največkrat pa je kot med priključki  $90^\circ$ .

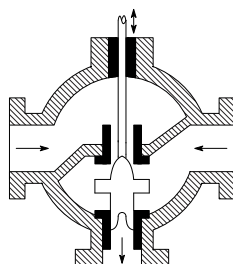
**Dvosedežni ventil (ang. two-seat globe valve).** Posebna izvedba ventila s čepom je tudi dvosedežni ventil. Skica ventila je prikazana na sliki 7.50. Z dvosedežnim ventilom zmanjšu-



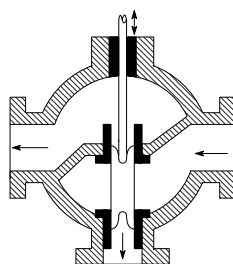
Slika 7.50: Dvosedežni ventil

jemo upor, ki ga v pretoku ustvarja prehod preko sedeža ventila. Z dvojno odprtino zvečamo presek pretoka in zmanjšamo hitrosti tekočine skozi ventil, kar ugodno vpliva na zmanjšanje upora v pretoku.

**Trokraki ventil (ang. three-port globe valve)** Za bolj zahtevne posege v cevovode, kjer prihaja do mešanje in razdeljevanja pretokov po različnih krakih cevovoda uporabljamo trokrake ventile. Za mešanje dveh tekočin različnih lastnosti uporabljamo mešalne ventile. Skica ventila je prikazana na sliki 7.51. Za razdeljevanje pretoka na dve poti pa razdelilni ventil. Skica ventila je prikazana na sliki 7.52. Obe izvedbi trokrakega ventila sta posebni izvedbi ventila s čepom in imata s tem tudi podobne lastnosti kot ventil s čepom.



Slika 7.51: Trokraki mešalni ventil



Slika 7.52: Trokraki razdelilni ventil

### Postopek dimenzioniranja in izbire ventilov

Kot je bilo že nekajkrat omenjeno, je navkljub enostavnosti delovanja ventilov njihovo dimenzioniranje dokaj zahtevno. Poznati moramo pretočne lastnosti, korozivnost, strupenost, možnost nalaganja naslag tekočine, katere pretok naj ventil uravnava, želeno območje pretokov in tlakov, izvedbo ventila, temperaturo tekočine in okolja, agresivnost okolja in še razne druge lastnosti, ki lahko vplivajo na delovanje ventila. Pomembna je tudi smer pretoka, ki naj deluje na premični del tako, da pretok odpira. Največji problem pa je vedno kavitacija, ki nastaja zaradi uparjanja kapljevine ob lokalnem zmanjšanju tlaka v kapljevini na nizkotlačni strani ventila takoj za premičnim delom. Enačba, ki jo večinoma uporabljamo za dimenzioniranje ventilov je:

$$\Phi_v = k_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}. \quad (7.3)$$

V enačbi pomenijo:  $\Phi_v$  - volumski pretok v  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta p$  - padec tlaka na ventilu in  $\rho$  - gostota medija. Enačba je sicer precej poenostavljen zapis dogajanja, a omogoča dovolj dobro oceno za izbiro ustreznega ventila. Ventile običajno dimenzioniramo tako, da z območjem med 30 % in 70 % odprtosti pokrijemo normalno delovanje, medtem ko je ostali del območja namenjen pokrivanju nepredvidljivih situacij. Večinoma vsak večji proizvajalec ventilov uporabniku omogoča dimenzioniranje ventila s prosto dostopnim programskim orodjem, ki ga uporabnik inštalira na svoj računalnik ali preko internetne storitve. Programska orodja so narejena tako, da uporabnik poda lastnosti tekočine, zelene pretoke in želeno karakteristiko, orodje pa predlaga tip ventila, ki je najbolj ugoden za dani namen.

Pomembna je tudi izbira pogona. Pri tem moramo upoštevati dane možnosti napajanja ventila, krmilne signale in način delovanja ventila. Poleg načina delovanja in vrste pogonske moči moramo izbrati pogon, ki ustvarja dovolj velike sile oz. navore, da z njim lahko v



danem območju pretokov in tlakov vedno premaknemo premični del v želeno lego.



## 8

# Izvedbeni problemi sistemov vodenja

Izbira gradnikov in tehnologij za izvedbo nekega projekta s področja vodenja sistemov je, glede na množico enakovrednih gradnikov, zelo težka. Če pri tem pomislimo na to, da so v tej knjigi v glavnem prikazani le najbolj pogosti sistemi in uporabljene tehnologije, hitro postane jasno, da je celovit pregled nad področjem skoraj nemogoč. Po drugi strani moramo upoštevati tudi dokaj hiter razvoj področja, ki izboljšuje kvaliteto sistemov vodenja in znižuje stroške izvedbe. V realni situaciji se seveda specializiramo za neko ožje področje sistemov vodenja in tako lažje spremljamo razvoj gradnikov in tehnologij.

Izvedba pa ni vedno odvisna samo od lastnosti merilnih in izvršnih sistemov ter krmilnikov in regulatorjev, ki so pomembne za teoretično obravnavo sistemov vodenja. Mnogokrat pridejo v ospredje problemi povsem drugačne narave, ki pa v praksi lahko preprečijo izvedbo načrtovanega sistema vodenja. Uspešno izogibanje tovrstnim pastem pa je možno šele po dolgoletnih izkušnjah na področju. Najpogostejše probleme, ki ovirajo uspešno izvedbo sistemov vodenja lahko zberemo v naslednji seznam:

1. nepopolna specifikacija zahtev vodenja,
2. napačna interpretacija zahtev vodenja,
3. preveč zapleteno upravljanje s sistemom,
4. neustrezna izbira gradnikov glede na lastnosti okolja v katerem delujejo (temperatura, agresivna atmosfera, visoki tlaki, ...),
5. neposredno nezdržljivi sistemi prenosa informacije med gradniki,
6. neustrezno napajanje gradnikov,
7. neustrezno ožičenje,
8. nezdržljivi sistemi mehanske pritrditve gradnikov sistema vodenja,
9. neustrezna velikost gradnika glede na razpoložljiv prostor na mestu montaže,
10. neustrezna prostorska orientacija gradnika pri montaži,
11. dostopnost mesta montaže ob vgraditvi gradnika,

12. neustrezni intervali vzdrževalnih postopkov,
13. psihološki vpliv sistema vodenja na ljudi zaposlene v firmi, kjer je sistem postavljen.

Najbolje, da si pogledamo, kako do takšnih problemov pride, kakšne so lahko posledice in kako jih pravočasno odpravimo. Najhujša napaka, ki jo lahko zagrešimo pri izvedbi kakršnega koli projekta je nenatančna definicija zahtev oz. napačna interpretacija le-teh. To brezpogojno vodi v hude probleme pri izvedbi in do slabih končnih rezultatov, v najslabšem primeru pa lahko projekt celo pade. Naročnik takšno napako običajno opazi šele proti koncu izvedbe, ko postane jasno, da je stvar že praktično dokončana, funkcionalnost sistema pa ni takšna, kakršno si je želel. V izogib takšnim situacijam, je potrebno žrtvovati veliko časa na začetku projekta, da skupaj z naročnikom preverimo, če smo pravilno razumeli njegove zahteve in jih po potrebi tudi spremenimo. Redni sestanki med potekom projekta pa potem pomagajo odpravljati sprotne probleme pri izvedbi. V tej fazi izvedbe projekta so možne vse spremembe, ki ne vplivajo bistveno na vrednost projekta. Čas, ki ga za to porabimo je sicer navidezno izgubljen, vrednost takšnega pristopa pa postane jasna, ko tega na nekem projektu ne storimo. S tem rešimo probleme navedene v prvih treh alinejah.

Ko so cilji definirani, se lahko lotimo načrtovanja sistema vodenja. Pri tem moramo definirati naslednje parametre sistema:

- cilje vodenja,
- posebne lastnosti delovanja (eksplozijsko nevarno okolje, posebne zahteve po čistosti prostora, postopki pri okvarah, ...),
- strukturo in algoritem vodenja,
- vhodno-izhodne signale,
- način komunikacije med gradniki,
- napajanje gradnikov (signalni in močnostni del),
- specifični pogoji projekta.

S tem se lahko izognemo problemom navedenim pod točkami 4. – 7.

V naslednjem koraku je potrebno izbrati gradnike, ki ustrezajo izbranim pogojem. Izkaže pa se, da izpolnjevanje teh pogojev še ni dovolj, da bi gradniki popolnoma ustrezali potrebam izvedbe. Pri izbiri merilnega sistema moramo upoštevati še naslednje podatke:

- merjena veličina,
- potrebni doseg merilnika,
- potrebna natančnost,
- pritrditev,
- fizične dimenzije merilnika,
- morebitne omejitve na orientaciji montaže merilnika,

- dovolj prostora za montažo in demontažo merilnika na sistemu.
- vzdrževalni cikel merilnega sistema naj bo sinhroniziran z remontnimi cikli proizvodnega procesa,
- specifični pogoji projekta,
- vpliv okolja (motnje, atmosfera, ...)

Izbira regulatorja ali krmilnika je izvedena na osnovi zahtevnosti algoritma, števila in vrste vhodno-izhodnih signalov, pri tem pa moramo upoštevati, da potrebujemo določeno redundanco sistema za morebitne nadgradnje sistema.

Pri izbiri izvršnih sistemov pa moramo paziti na naslednje parametre izbire:

- ustrezen način delovanja (rotacija ali linearni pomik, ustrezen način delovanja ventila, ...),
- dostopnost ustrezne oblike pogonske energije,
- dovolj velika sila ali navor,
- potrebna natančnost,
- pritrditev,
- fizične dimenzije aktuatorja in končnega izvršnega člena,
- morebitne omejitve na orientaciji montaže aktuatorja in končnega izvršnega člena,
- dovolj prostora za montažo in demontažo aktuatorja in končnega izvršnega člena na sistemu, oz. možnost popravila na sistemu
- vzdrževalni cikel aktuatorja naj bo sinhroniziran z remontnimi cikli proizvodnega procesa,
- specifični pogoji projekta,
- vplivi okolja.

Če vsi gradniki niso zmožni istega tipa komunikacije je potrebno misliti tudi na ustrezne komunikacijske pretvornike. Z izpolnitvijo teh zahtev lahko zmanjšamo nevarnost napak od 8. do 13.

Poleg tehničnih omejitev pa ne smemo pozabiti na vpliv človeškega faktorja pri izvedbi sistemov vodenja. Mnogokrat se lahko izkažejo netehniški problemi celo precej bolj neprijetni kot pa tehniški problemi. Ker pa so težko predvidljivi in zelo raznovrstni, se v tem učbeniku z njimi ne bomo ukvarjali.

Na koncu je potrebno poudariti, da za vsako izvedbo stojijo povsem konkretni ljudje, od katerih je v glavnem odvisna izvedba sistema vodenja. Tudi najboljša oprema ni vedno zagotovilo za kvalitetno izvedeno vodenje. Za uspešno delovanje sistema vodenja je nujno potrebno uravnotežiti kvaliteto na nivoju načrtovanja, opreme in izvedbe pa tudi vse ostale faktorje, saj tovrstnih projektov ne smemo obravnavati izolirano od trenutnih razmer na področju uporabljenih tehnologij in družbe.



# Literatura

- [1] R. Karba. *Gradniki sistemov vodenja*. Založba FE in FRI, Ljubljana, 1994.
- [2] J. Petrovčič, J. Kocijan. *Uporaba gradnikov v sistemih vodenja*. Založba FE in FRI, Ljubljana, 2002.
- [3] S. Strmčnik, urednik. *Celostni pristop k računalniškemu vodenju procesov*. Založba FE in FRI, Ljubljana, 1998.
- [4] B. Zupančič. *Zvezni regulacijski sistemi, I . del*. Založba FE in FRI, Ljubljana, 2010.
- [5] B. Zupančič. *Zvezni regulacijski sistemi, II . del*. Založba FE in FRI, Ljubljana, 2010.
- [6] IP Code. [http://en.wikipedia.org/wiki/IP\\_Code](http://en.wikipedia.org/wiki/IP_Code). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [7] EN 62262. [http://en.wikipedia.org/wiki/EN\\_62262](http://en.wikipedia.org/wiki/EN_62262). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [8] Electrical equipment in hazardous areas. [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_equipment\\_in\\_hazardous\\_areas](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_equipment_in_hazardous_areas). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [9] Fundamentals, System Design, and Setup for the 4 to 20 mA Current Loop. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6940>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [10] List of automation protocols. [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_automation\\_protocols](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_automation_protocols). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [11] D. Donlagić, D. Donlagić. *Merjenja temperatur in tlakov*. Univerza v Mariboru, FER, Maribor, 1995.
- [12] M. Popović. *Senzori i merjenja*. Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1994.
- [13] M. Popović. *Senzori u robotici*. Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1996.
- [14] W. van de Kamp. *The theory and practice of level measurement*. Endress + Hauser, Naarden, 2001.
- [15] J. Fraden. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. AIP Press, Woodbury, New York, 1996.
- [16] P. Hauptmann. *Sensors: principles and applications*. Carl Hanser Verlag, Munich, 1993.

- [17] C. W. de Silva. *Sensors and actuators: control system instrumentation*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2007.
- [18] S. Soloman. *Sensors handbook*. McGraw–Hill, New York, 1990.
- [19] List of sensors. [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_sensors](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_sensors). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [20] Global Positioning System. [http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [21] Gyroscope. <http://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [22] Attitude control (spacecraft). [http://en.wikipedia.org/wiki/Attitude\\_control\\_\(spacecraft\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Attitude_control_(spacecraft)). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [23] Rangefinder. <http://en.wikipedia.org/wiki/Rangefinder>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [24] Position sensor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Position\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/Position_sensor). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [25] Strain gauge. [http://en.wikipedia.org/wiki/Strain\\_gauge](http://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [26] L. K. Baxter. Capacitive Sensors. [www.capsense.com/capsense-wp.pdf](http://www.capsense.com/capsense-wp.pdf). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [27] Linear encoder. [http://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_encoder](http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_encoder). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [28] Rotary encoder. [http://en.wikipedia.org/wiki/Rotary\\_encoder](http://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [29] Renishaw encoders. <http://www.renishaw.com/en/position-encoders--6331>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [30] Michelson-Morleyev interferometer. <http://www.youtube.com/watch?v=P2Dd815Uek0&feature=related>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [31] Level sensor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Level\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/Level_sensor). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [32] Pitot tube. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pitot\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Pitot_tube). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [33] Doppler radar. [http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_radar](http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_radar). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [34] Flow measurement. [http://en.wikipedia.org/wiki/Flow\\_measurement](http://en.wikipedia.org/wiki/Flow_measurement). dostopnost preverjena 3.1.2012.



- [35] Accelerometer. <http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [36] Merilniki in prinipi merjenja podjetja Omega. <http://www.omega.com/products.html>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [37] Pressure measurement. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_measurement](http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_measurement). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [38] Pressure sensor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_sensor). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [39] Temperature measurement. [http://en.wikipedia.org/wiki/Temperature\\_measurement](http://en.wikipedia.org/wiki/Temperature_measurement). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [40] Hydrometer. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrometer>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [41] Rosemount density measurements. <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PMRosemountDocuments/00816-0100-3208.pdf>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [42] Oscillating U-tube. [http://en.wikipedia.org/wiki/Oscillating\\_U-tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Oscillating_U-tube). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [43] L. A. Guildner. Thermal conductivity of gases. I. Coaxial cylinder cell. *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*, 66A(4):333, 1962.
- [44] Viscometer. <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscometer>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [45] Hygrometer. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hygrometer>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [46] Electroencephalography. <http://en.wikipedia.org/wiki/Electroencephalography>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [47] Electromyography. <http://en.wikipedia.org/wiki/Electromyography>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [48] Magnetic resonance imaging. [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_resonance\\_imaging](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_resonance_imaging). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [49] Positron emission tomography. [http://en.wikipedia.org/wiki/Positron\\_emission\\_tomography](http://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [50] pH meter. [http://en.wikipedia.org/wiki/PH\\_meter](http://en.wikipedia.org/wiki/PH_meter). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [51] Reduction potential. [http://en.wikipedia.org/wiki/Reduction\\_potential](http://en.wikipedia.org/wiki/Reduction_potential). dostopnost preverjena 3.1.2012.

- [52] Chromatography. <http://en.wikipedia.org/wiki/Chromatography>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [53] Mass spectrometry. [http://en.wikipedia.org/wiki/Mass\\_spectrometry](http://en.wikipedia.org/wiki/Mass_spectrometry). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [54] Polymerase chain reaction. [http://en.wikipedia.org/wiki/Polymerase\\_chain\\_reaction](http://en.wikipedia.org/wiki/Polymerase_chain_reaction). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [55] DNA microarray. [http://en.wikipedia.org/wiki/DNA\\_microarray](http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_microarray). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [56] DNA sequencer. [http://en.wikipedia.org/wiki/DNA\\_sequencer](http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_sequencer). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [57] J. C. Maxwell. On Governors. V: 16. *Proceedings of the Royal Society of London*, strani 270–283, London, 1868. Royal Society of London.
- [58] Bombsights and autopilots of WWII. [http://www.twinbeech.com/norden\\_bombsight.htm](http://www.twinbeech.com/norden_bombsight.htm). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [59] Microcontroller. <http://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [60] Programmable logic controller. [http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable\\_logic\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [61] D. Donlagić, B. Tovornik. *Krmilni ventili*. Univerza v Mariboru, FERl, Maribor, 1997.
- [62] D. Miljavec, P. Jereb. *Električni stroji - temeljna znanja*. Samozaložba, Ljubljana, 2005.
- [63] R. M. Crowder. *Electric drives and their controls*. Clarendon Press, Oxford, 1995.
- [64] Battery (electricity). [http://en.wikipedia.org/wiki/Battery\\_\(electricity\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_(electricity)). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [65] Fuel cell. [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [66] Gas compressor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Gas\\_compressor](http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_compressor). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [67] Hydraulic pump. [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_pump](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_pump). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [68] Vacuum pump. [http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_pump](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_pump). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [69] Variable-frequency drive. [http://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency\\_drive](http://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency_drive). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [70] Pulse-width modulation. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation). dostopnost preverjena 3.1.2012.

- [71] Valve. <http://en.wikipedia.org/wiki/Valve>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [72] B. Trinkel. Practical knowledge about hydraulic and pneumatic components and systems. <http://www.hydraulicspneumatics.com/200/eBooks/Article/True/67859/>. dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [73] Electric motor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [74] Pneumatic motor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic_motor). dostopnost preverjena 3.1.2012.
- [75] Hydraulic motor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_motor). dostopnost preverjena 3.1.2012.

