

**Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko**

**PRAKTIČNI VIDIKI UPORABE
GRADNIKOV V SISTEMIH
VODENJA**

**Janko Petrovčič
Juš Kocijan**

Ljubljana 2002

Predgovor

Praktični vidiki uporabe gradnikov v sistemih vodenja je delo, ki ima dvojni namen. Po eni strani predstavlja dopolnilo knjigi Riharda Karbe Gradniki sistemov vodenja [1] in sicer praktične poglede na namestitve izbranih gradnikov namenjenih avtomatizaciji predvsem v procesni industriji. Po drugi strani pa je delo namenjeno tudi študentom, ki poleg praktičnih nasvetov najdejo pri vsakem poglavju tudi naloge, ki jim služijo za utrjevanje pridobljenega znanja.

Knjiga je razdeljena na sedem poglavij, ki opisujejo nekatera področja zanimiva predvsem, vendar ne izključno, za vodenje sistemov v procesni industriji, ki v naši praksi vodenja sistemov prevladuje. Prvo poglavje je uvodno in obravnava splošni pogled na gradnike sistemov računalniške avtomatizacije. V drugem poglavju najdemo stopenjska bližinska tipala, ki so uporabljana tako v sistemih fleksibilne avtomatizacije, kot tudi za alarmiranje, signaliziranje in druge funkcije v procesnem vodenju. O merjenju temperature govori tretje poglavje, medtem ko sta merjenji tlaka in pretoka opisani v četrtem in petem poglavju. Šesto poglavje je edino namenjeno izvršnim sistemom in sicer opisuje kratek vodnik po postopku izbire regulacijskih ventilov. Sedmo poglavje je namenjeno za namestitev gradnikov še posebno pomembnem vprašanju, to je prenosu signalov med gradniki.

Poudariti je treba, da knjiga ne zajema vseh gradnikov, ki se uporabljajo v procesni industriji, ampak sva se avtorja omejila le na izbrane in prepustila opis manjkajočih prihodnosti. Kljub temu pa upava, da bo predstavljeno gradivo koristno dopolnilo k [1].

Glede na to, da je večina praktičnih vidikov uporabe gradnikov vodenja v tem delu povezana s problematiko vodenja v procesni industriji, sva uporabila poleg osnovnih in izpeljanih enot merskega sistema SI tudi "posebna dovoljena imena in znake dekadnih množilnih in dellnih enot", ki jih dovoljuje Zakon o meroslovju (Odredba o merskih enotah, Uradni list RS 2/1996). To so: enota za tlak bar (1 bar = 100000 Pa), za maso tona (1 tona = 1000 kg) in za prostornino liter (1 liter = 0.001 m³).

Avtorja bi se rada zahvalila prof. dr. Rihardu Karbi, ki je s svojimi nasveti pomembno prispeval k vsebini dela. Prav tako bi se rada zahvalila sodelavcem na Odseku za računalniško avtomatizacijo in regulacije na Inštitutu Jožef Stefan ter v Laboratoriju za modeliranje, simulacije in vodenje in Laboratoriju za avto-

matizacijo in informatizacijo procesov na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, ki so s svojimi nasveti prispevali h končni vsebini dela.

Posebej pa se zahvaljujeva Miroslavu Štrublju, ki je zaslužen za grafično podobo knjige.

Ljubljana, julij 2002

Janko Petrovčič in Juš Kocijan

Kazalo

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Gradniki sistemov računalniške avtomatizacije | 1 |
| 1.1. | Najpomembnejši elementi sistemov računalniške avtomatizacije | 2 |
| 1.2. | Tipala in merilni pretvorniki | 3 |
| 1.3. | Aktuatorji in izvršni členi | 7 |
| 1.4. | Regulatorji, krmilniki in procesni računalniški sistemi | 10 |
| 1.5. | Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje | 13 |
| 2 | Stopenjska bližinska tipala | 29 |
| 2.1. | Lastnosti posameznih vrst bližinskih tipal | 31 |
| 2.1.1. | Induktivna tipala | 31 |
| 2.1.2. | Kapacitivna tipala | 31 |
| 2.1.3. | Optična tipala | 32 |
| 2.1.4. | Magnetna tipala | 34 |
| 2.1.5. | Ultrazvočna tipala | 34 |
| 2.1.6. | Pnevmatična tipala | 34 |
| 2.2. | Na kaj moramo paziti pri izbiri bližinskih tipal | 35 |
| 2.3. | Primeri uporabe | 37 |
| 3 | Merjenje temperature v procesni industriji | 49 |
| 3.1. | Pogosto uporabljena tipala za temperaturo | 49 |
| 3.2. | Nekateri problemi pri merjenju temperature s Pt uporovnimi tipali | 53 |
| 3.3. | Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni | 58 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Merjenje tlaka v procesni industriji | 75 |
| 4.1. | Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju | 77 |
| 5 | Merjenje pretoka v procesni industriji | 89 |
| 5.1. | Splošno o merjenju pretokov | 90 |
| 5.1.1. | Volumski in masni pretok | 90 |
| 5.1.2. | Laminarni in turbulentni pretok | 91 |
| 5.2. | Merilniki pretoka na osnovi diferencialnega tlaka | 92 |
| 5.3. | Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka | 98 |
| 5.3.1. | Osnovna ideja | 98 |
| 5.3.2. | Izmenično vzbujanje | 100 |
| 5.3.3. | Impulzno vzbujanje | 102 |
| 5.3.4. | Izboljšano impulzno vzbujanje | 104 |
| 5.3.5. | Prednosti in slabosti elektromagnetnega induktivnega merilnika pretoka | 105 |
| 5.4. | Vrtinčni merilnik (Vortex) | 106 |
| 5.4.1. | Obdelava električnega signala | 107 |
| 5.4.2. | Merilno območje | 108 |
| 5.4.3. | Posebnosti montaže | 108 |
| 5.4.4. | Prednosti in slabosti | 109 |
| 5.5. | Coriolisov merilnik pretoka | 110 |
| 5.5.1. | Posebnosti "Coriolisovih" merilnikov pretoka | 113 |
| 5.5.2. | Prednosti in slabosti "Coriolisovih" merilnikov pretokov . | 113 |
| 5.6. | Termični-masni merilniki pretoka | 114 |
| 5.6.1. | Prednosti in slabosti termičnega-masnega merilnika pretoka | 116 |

KAZALO

| | |
|---|------------|
| 6 O izbiri in dimenzioniranju regulacijskih ventilov | 121 |
| 6.1. Postopek izbire in dimezioniranje ventila | 124 |
| 6.1.1. Zbiranje potrebnih informacij | 126 |
| 6.1.2. Določitev kriterijev in zahtev | 127 |
| 6.1.3. Okvirna izbira vrste ventila | 128 |
| 6.1.4. Izračun in izbira vrednosti koeficienta pretoka, dimenzij in karakteristike ventila | 128 |
| 6.2. Optimiranje šuma in kavitacije | 132 |
| 6.2.1. Izbira materiala | 133 |
| 6.2.2. Določitev varnostno-tehničnih zahtev | 134 |
| 6.2.3. Specifikacija, naročilo in prevzem regulacijskega ventila . | 136 |
| 6.3. Dimenzioniranje in izbira ventila s programskimi paketi | 136 |
| 7 Signali in prenos podatkov v sistemih vodenja industrijskih procesov | 137 |
| 7.1. Dvožična vezava merilnih pretvornikov | 156 |
| 7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave | 161 |
| 7.2.1. O izvoriš elektromagnetnih motenj | 161 |
| 7.2.2. O elektromagnetni združljivosti | 162 |
| 7.2.3. O ozemljevanju | 163 |
| 7.2.4. Tipični primeri motilnih povezav v sistemih procesnega vodenja | 164 |
| Literatura | 177 |

1.

Gradniki sistemov računalniške avtomatizacije

Sodobna računalniška avtomatizacija industrijskih procesov pokriva oziroma sodeluje pri številnih tehničnih procesih, postopkih, napravah. Nekatere specifične lastnosti teh procesov, postopkov, naprav vplivajo tudi na izvedbo sistemov avtomatizacije, na lastnosti in obliko njenih gradnikov, na postopke implementacije, uporabe in vzdrževanja. Zaradi zelo širokega spektra in različnih problemov je vsebina tega dela omejena na nekatere segmente kemične procesne industrije. Zaradi tega nekaterih zaključkov ni mogoče nekritično prenesti na vsa ostala tehnična področja.

Poglavje 1 je zasnovano kot uvodni pregled gradnikov, ki jih pri gradnji sodobne računalniške avtomatizacije najpogosteje potrebujemo. Možnih rešitev je zelo veliko; nekatere so v praksi pogosto uporabljene, nekatere redko. Tudi za to bi bilo mogoče naštetih vrsto tehniških in netehniških kriterijev, ki pa jih v okviru tega dela ne bomo zajeli.

1.1. Najpomembnejši elementi sistemov računalniške avtomatizacije

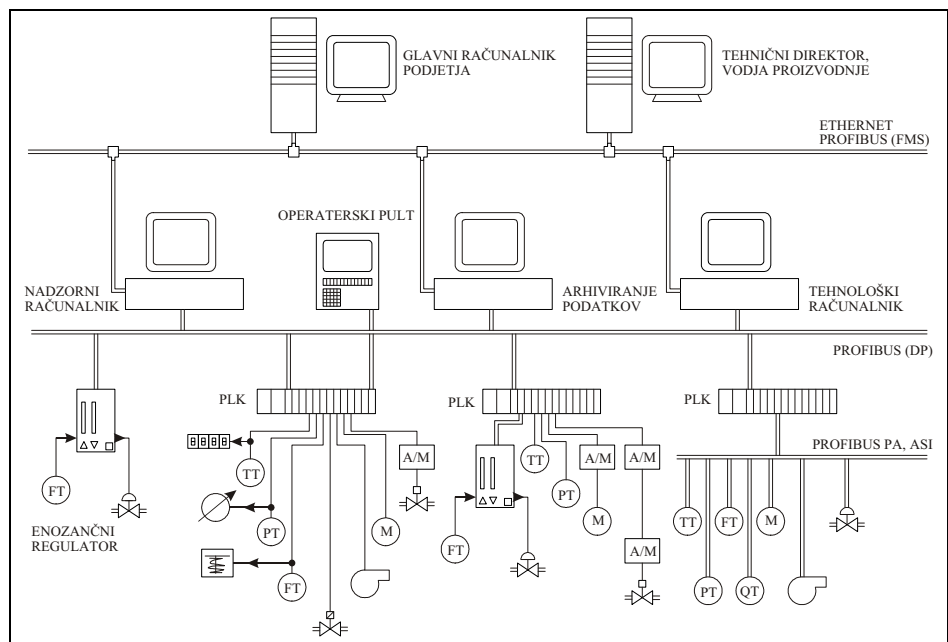
Najpogosteje naletimo na zmotno mišljenje, da je najpomembnejši element računalniškega sistema za vodenje računalnik. Nasprotno, le težko bi našli tak primer, ko bi bila izvedba sistema za vodenje brez računalniškega sistema nemogoča. Računalnik, računalniški sistem ali distribuirani računalniški sistem je običajno le eden izmed gradnikov sistema za vodenje, ki zaradi svojih računskih, logičnih, algoritmičnih in komunikacijskih zmožnosti opravlja večino informacijske obdelave signalov, rezultate obdelav pa posreduje procesnim aktuatorjem, operaterju in drugam. V sistemih računalniške avtomatizacije so tako običajno zastopani naslednji gradniki:

- tipala (senzorji),
- merilni pretvorniki,
- aktuatorji (pogonski elementi, pozicionerji, močnostni vmesniki),
- izvršni členi,
- signalne povezave,
- enote za prikaz procesnih vrednosti (kazalčni in digitalni instrumenti),
- sistem za ročno posredovanje,
- samostojni eno- ali večzračni regulatorji,
- relejska logika,
- programirljivi logični krmilniki - PLK (kompaktni, modularni),
- računalniški sistem (centralni ali distribuirani) s programsko opremo,
- (inteligentni) vmesniki človek-stroj, npr. operatorski pulti,
- računalniške periferne enote (tipkovnica, zaslon, tiskalnik, komunikacijski vmesnik itd.)

1.2. Tipala in merilni pretvorniki

- dokumentacija (procesne opreme, merilno-regulacijske opreme, instalacij, programske opreme, posebnih algoritmov vodenja),
- sistem vzdrževanja in zaloga rezervnih elementov.

Primer povezave naštetih elementov prikazuje slika 1.1. V primeru na tej sliki je regulacija "zaupana" samostojnim regulatorjem, sekvenčno krmiljenje programirljivemu logičnemu krmilniku, procesni računalnik pa služi kot "stranski opazovalec" dogajanja.

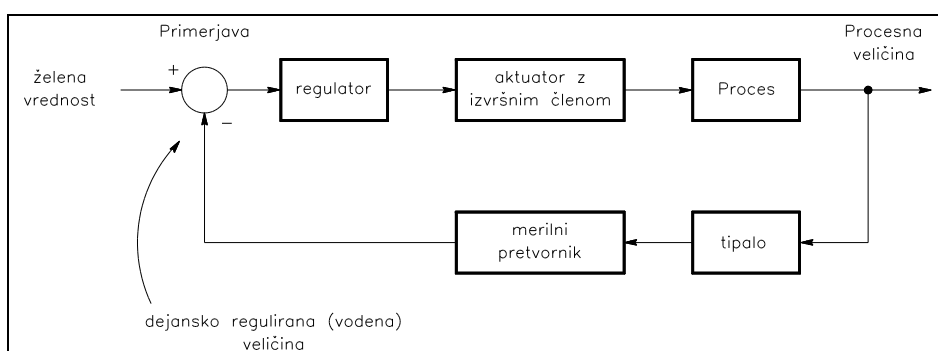


Slika 1.1: Prikaz primera povezave nekaterih elementov sistema računalniške avtomatizacije

1.2. Tipala in merilni pretvorniki

Tipala s pripadajočimi merilnimi pretvorniki predstavljajo osnovo avtomatiziranega vodenja procesov. Procesno veličino, ki jo kvalitetno merimo, lahko v večini

primerov tudi uspešno reguliramo, vodimo; le v **izjemnih primerih** lahko slabo in nezanesljivo meritev nadomesti posebna računalniška obdelava signalov. Regulacijska zanka (slika 1.2) ima sicer čudovito lastnost, da s pribitkom ojačenja odprte zanke nadomešča oziroma kompenzira neidealnosti elementov regulacijske zanke in vplive motenj, ne more pa zmanjšati npr. dolgoročnega odstopanja izhodne vrednosti **tipala**, njegove nelinearnosti, dolge zakasnitve, neponovljivosti itd. brez bistvenega vpliva na dinamične lastnosti regulacijske zanke. Najbolj kritično mesto vsake regulacijske zanke je namreč mesto primerjave med želeno in dejansko vrednostjo procesne spremenljivke. Regulator ne vodi dodeljene procesne spremenljivke, pač pa signal na mestu primerjave z želeno vrednostjo! Če med signalom na mestu primerjave in pripadajočo procesno veličino ni dobre povezave, potem je proces voden slabo.



Slika 1.2: Regulacijska zanka "skrbi" za signal na mestu primerjave in ne za izhodno procesno veličino!

Procesna tipala bi lahko razvrstili v različne razrede. Z vidika signalnih povezav v sistemih računalniškega vodenja izrazito prevladujejo tipala z električno obliko izhoda (spremembe napetosti, toka, upornosti, kapacitivnosti, frekvence itd.), ker električni signalni sistemi izpodrivajo (oziroma so skoraj v popolnosti izpodrinili) pnevmatske, hidravlične in mehanske prenosne sisteme.

Tipala lahko razdelimo na proporcionalna in stopenjska (ON-OFF). Za regulacijo potrebujemo predvsem proporcionalna tipala. Stopenjska tipala (npr. končna stikala, tlačna stikala, nivojska stikala, "gama detektorji", fotocelice za detekcijo plamena, pretočna stikala itd.) uporabljamo v različne namene:

1.2. Tipala in merilni pretvorniki

- za alarmiranje,
- za označevanje začetkov in koncev šarž (polnosti, praznosti shranjevalnikov itd.),
- za preprečevanje nevarnih situacij v primeru izpada regulacije (prelivi, tlačne in termične preobremenitve, prisotnost eksplozivne mešanice itd.),
- za signalizacijo stanja procesa,
- za sekvenčno (logično) vodenje šaržnih in semišaržnih procesov.

Od stopenjskih tipal najpogosteje pričakujemo zanesljivost preklonov. Ker ponavadi posebnih merilnih (električnih) pretvornikov ne potrebujejo ali so le-ti sorazmerno enostavni, to zanesljivost tehnološko zlahka dosežemo. Če ta stikala služijo kot del varnostnega sistema ("blokada"), mora biti njihova zanesljivost zelo visoka, vsekakor pa večja od zanesljivosti pripadajočih proporcionalnih tipal in pretvornikov.

Na posebne probleme naletimo, ko želimo stopenjska stikala povezati z računalniškim sistemom za vodenje, z digitalnim regulatorjem ali programirljivim logičnim krmilnikom. Veliko stopenjskih stikal posreduje svoje stanje v obliki mehanskega kontakta (stikalo, rele). Mehanski kontakti pri preklonih odskakujejo, povzročajo kratkotrajni električni oblok, med dolgotrajnim obratovanjem pa so pogosto izpostavljeni koroziji. Pri klasični uporabi stikal ti problemi niso zelo izraziti zaradi visokih delovnih napetosti ali induktivnega značaja bremen (npr. navitja relejev, kontaktorjev). Pri uporabi stikal v računalniških sistemih za vodenje pa običajno nimamo možnosti uporabe visokih delovnih napetosti, digitalni vhodi računalniških sistemov pa tudi nimajo induktivnega značaja, ki bi omogočal avto-regeneracijo kontaktov ob izklopih. Zaradi tega moramo biti pri uporabi stikal v teh sistemih zelo pozorni in zagotoviti:

- delovne napetosti 24V ali višje,
- delovne tokove 20 mA ali višje,
- pozlačene kontakte (10 μ m zlate prevleke na ustrezni podlagi na kontaktu),
- zaščito kontaktov pred korozivno atmosfero,

ali nadomestiti tipala z mehanskim kontaktom s tipali s pretvornikom in tranzistoriskim izhodom.

Pri proporcionalnih tipalih pogosto potrebujemo merilne pretvornike, ki šibke električne signale tipal pretvorijo v standardni prenosni signal (npr. 4-20mA) ali omogočajo digitalno komunikacijo z računalniškim sistemom. Pnevmatiski prenos signalov tipal za nove sisteme računalniškega vodenja praktično ni več smiseln. Nekatera tipala je mogoče neposredno povezati na vhode računalniških sistemov za vodenje ali elektronskih regulatorjev, npr. uporovna tipala, termočlene, potenciometre, merilne mostiče za silo in težo. Ta vezava je primerna le za krajše razdalje in cenovno kritične sisteme brez nevarnosti korozijske atmosfere. V bližini tudi ne sme biti izvorov močnejših elektromagnetnih motenj (za laboratorijske naprave, pilotne naprave itd.). V nasprotnem je uporaba tipal skupaj z merilnimi pretvorniki nujna oziroma priporočljiva.

Proporcionalna tipala s pretvorniki lahko razvrstimo med osnovne in zahtevnejše. Med osnovne smemo uvrstiti tipala za temperaturo, tlak, nivo, pretok, težo. Zanje velja, da jih zelo pogosto in množično uporabljamo, da lahko na trgu najdemo celo paleto izpopolnjenih in zanesljivih merilnih pretvornikov, predvsem pa, da pri uporabi ne povzročajo posebnih težav. Slednje pomeni, da so postopki instalacije, merjenja, kalibracije in vzdrževanja enostavni, jasni, dobro dokumentirani in znani širšemu krogu uporabnikov (od kemijskega tehnologa do tehnika - vzdrževalca).

Med zahtevnejša tipala oziroma procesne merilne sisteme sodijo merilniki za pH, gostoto, prevodnost, koncentracije (O_2 , CO , CO_2 , SO_2 , NO_x itd.), spektrometri, merilniki vlažnosti itd. Zahtevnosti ne smemo soditi samo po zahtevnosti izdelave tipala ali merilnega pretvornika, saj so nekateri izmed naštetih merilnih sistemov zelo enostavni. V sistemih vodenja moramo zahtevnost soditi predvsem po zahtevnosti uporabe, kalibracije in vzdrževanja. Tako sta na primer pH sonda in ustrezní merilni pretvornik za današnji nivo tehnologije zelo enostavna, naletimo pa lahko na strahovite probleme pri merjenju pH v zelo čisti vodi, v gostih suspenzijah, v elektromagnetno motenem okolju, itd. Nekateri merilni postopki so problematični tudi zato, ker ne potekajo zvezno: snov je potrebno vzorčiti, vzorce avtomatsko izmeriti; rezultati so na voljo le v diskretnih časovnih trenutkih.

Pri načrtovanju sodobnih tehnoloških postopkov se zahtevnejšim tipalom in merilnim pretvornikom pogosto ne moremo izogniti. Še več - nekatere nove kemijske in druge tehnologije so ključno odvisne od novih specialnih merilnih sistemov. V

1.3. Aktuatorji in izvršni členi

teh primerih se moramo zavedati, da uspeh pri uvajanju nove tehnologije lahko prinese že dobro obvladovanje posebne merilne metode. Pri načrtovanju novih tehnologij in njim ustreznih računalniških sistemov za vodenje moramo zelo paziti na izbor merilne opreme. Kot vodilo naj velja, da poskušamo uporabiti čimveč osnovnih tipal: če je mogoče, tudi kot nadomestilo za zahtevnejše. Lastnosti vmesnih produktov pogosto lahko vzdržujemo z dobro regulacijo temperature in tlaka, šele končni produkt pa nato analiziramo z zahtevnim merilnim sistemom.

1.3. Aktuatorji in izvršni členi

Tehnološke procese vodimo preko izvršnih členov. Najpogostejši so ventili, lopute, motorji z reduktorji, črpalke, ventilatorji, grelniki. Njih izbor spada k načrtovanju tehnoloških naprav, pogosto pa ga je treba uskladiti tudi z zahtevami sistema za vodenje. Tu je potrebno posebej paziti na širino uporabnega območja delovanja, linearnost oz. skladnost s statično karakteristiko vodenega procesa, širino mrtvega hoda, stopnjo povratnega vpliva procesnega medija.

Izvršne člene poganjamo s pomočjo aktuatorjev. Najbolj razširjeni so elektromotorni, elektropnevmatski, elektrohidravlični in pnevmatski pogoni, zelo pogosta je tudi napetostno-frekvenčna regulacija hitrosti asinhronih motorjev. Elektromotorni pogoni so primerni za manjše in srednje navori (do pribl. 1000 Nm). Krmilimo jih tropoložajno (premik v levo - stoji - premik v desno). So relativno ceneni, vzdrževanje je enostavno, težje pa z njimi realiziramo kvalitetno zvezno regulacijo. Tropoložajni način krmiljenja povzroča hitro izrabo kontaktov krmilnih kontaktorjev ter precejšnje motnje v napajalnem omrežju. Dodatno ročno krmiljenje je enostavno in zanesljivo. Take pogone lahko uporabimo za cenene rešitve vodenja, pri katerih kvaliteta regulacije ni izrazito pomembna. Njihova posebna prednost je v tem, da pri izpadu električne energije praviloma ohranjajo zadnji položaj, zato jih pogosto uporabljamo pri vodenju parnih kotlov.

Najkvalitetnejše krmiljenje ventilov in loput dosežemo z elektropnevmatskimi in pnevmatskimi aktuatorji. Pri uporabi pnevmatskih aktuatorjev izhodni tokovni signal iz sistema za vodenje ali iz samostojnega elektronskega regulatorja s pomočjo I/p pretvornika pretvorimo v tlačni signal, ki ga nato vodimo do aktuatorja. Ta pnevmatski signal lahko deluje neposredno na membrano aktuatorja, lahko pa krmili pnevmatski pozicioner, ki nato s pomočjo napajalnega zraka uravnava položaj

aktuatorja v razmerju do krmilnega tlačnega signala. Varianta brez pozicionerja je enostavna in cenena saj ne potrebuje pozicionerja in pomožnega tlačnega napajanja. Primerna je le za manjše površine membran (do 400cm²) in manjše pomike, saj bi bila zakasnitev odziva pri večjih membranah zaradi polnjenja membranskega prostora s signalnim zrakom prevelika.

Pri elektropnevmatskih pogonih je mehanizem I/p pretvornika združen z mehanizmom pozicionerja. Prenos signala poteka električno (kar moramo upoštevati pri uporabi v korozivni ali eksplozivni atmosferi), energijo za premikanje izvršnega člena pa dovaja napajalni zrak s tlakom 4 do 16 barov. Izvedbe na tej osnovi so tehnološko zanesljive in sodobne, za regulacijske namene pa zelo ugodne.

Z elektrohidravličnimi pogoni lahko dosežemo največje napore ali premične sile ter zelo hitre odzive, zato so pogosto primerni tudi v robotiki in avioniki. V kemični procesni industriji so zastopani manj pogosto kot elektropnevmatski, ker je distribucija hidravlične energije zahtevnejša od pnevmatske. Elektrohidravlični aktuatorji za procesno industrijo imajo zato prigradjeno samostojno hidravlično črpalko, pri "kompaktnih" strojih pa hidravlični tlak ustvarja centralni agregat.

Napetostno-frekvenčna regulacija hitrosti asinhronskih električnih motorjev je zelo primeren način krmiljenja motorjev za pogon ventilatorjev, črpalk in transportnih trakov. Rešitve so postale cenovno ustrezne zaradi pomembnih dosežkov pri razvoju močnih elektronskih komponent (tiristorjev, bipolarnih tranzistorjev in močnih MOSFET tranzistorjev). Tak način krmiljenja motorjev omogoča manjše toplotne izgube na motorjih, ki so zato lahko manjši. Namesto z loputami lahko pretok zraka uravnavamo s spreminjanjem vrtljajev ventilatorja, tlak tekočine uravnavamo s spreminjanjem hitrosti centrifugalne črpalke itd. Krmiljenje je lahko zelo natančno, kvaliteta regulacijskih zank pa zelo dobra. Med slabostmi moramo navesti visok nivo visokofrekvenčnih motenj, ki jih lahko pretvornik povzroča v okolici in visok nivo višjeharmoničnega onesnaževanja električnega napajalnega omrežja.

Proizvajalci regulacijske opreme izdelujejo tudi t.i. inteligentne aktuatorje. Stavni del teh aktuatorjev je tudi mikrokrmilnik, ki lahko nadomesti del klasične elektronike pozicionerja, kompenzira nepopolnosti aktuatorskega mehanizma, poleg tega pa omogoča tudi izvedbo lokalne regulacijske zanke (npr. pretoka, tlaka, temperature). Inteligentni aktuatorji so primerni predvsem za oddaljene samostojne regulacijske zanke (v obsežnih tehnoloških sistemih), pri katerih ročno posredovanje operaterja ali prikaz v komandni sobi nista nujno potrebna.

1.3. Aktuatorji in izvršni členi

Pomembno vprašanje, ki si ga moramo pri načrtovanju tehnoloških sistemov in sistemov računalniškega vodenja postaviti, je vprašanje zanesljivosti krmiljenja aktuatorjev oziroma izvršnih členov. V procesni industriji pogosto krmilimo velike pretoke energije, surovin in nevarnih (strupenih, eksplozivnih, gorljivih) snovi. Dobro načrtovanje tehnološkega sistema in sistema za vodenje mora vsebovati tudi natančen pregled možnih hazardnih situacij in načrtovanje varnostnih sistemov. Varnostni sistem mora biti zanesljiv in večnivojski. Procesne varovalke na spodnjem nivoju (električne varovalke, tlačne varovalke, varnostni ventili itd.) zagotovijo zaščito pred večjimi poškodbami naprav. Njihova aktivacija običajno prekine tehnološki proces. Zaščito na višjem nivoju zagotavlja sistem varnostnih tipal v povezavi z relejsko logiko. Zaščite so kompleksnejše, varujejo lahko tudi pred nastopom "vezanih" problemov. Ni nujno, da njih aktivacija povzroči prekinitev tehnološkega postopka. Relejsko logiko lahko v nekaterih primerih nadomesti poseben logični krmilnik.

Računalniškemu sistemu za vodenje ne smemo zaupati osnovnih in višjenivojskih varovalnih funkcij. Računske natančnosti digitalnih računalnikov ne smemo enačiti z zanesljivostjo. Računalniški sistem je sestavljen iz bistabilnih pomnilniških celic, katerih vsebino lahko naključno spremeni skrita programska napaka, močna elektromagnetna motnja, radioaktivni ali kozmični žarek. Za razliko od analogne elektronske tehnike, kjer taka motnja hitro izzveni, bipolarna celica digitalnega sistema motnjo ojači in si jo zapomni kot spremembo vsebine. Posledica motnje ne izzveni in lahko bistveno spremeni potek programa.

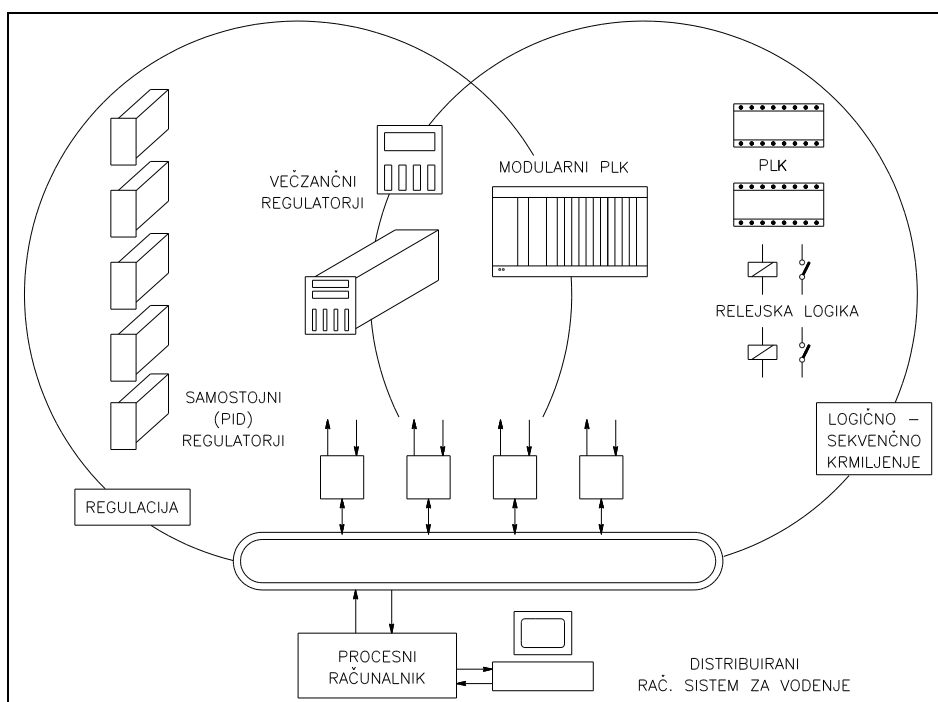
Računalniški sistem za vodenje pripravimo (programiramo) za izvajanje osnovnega tehnološkega postopka ter včasih za vodenje nekaterih posebnih situacij (zagon, zaustavitev itd.). Težko pa predvidimo vse možne situacije, ki lahko pri proizvodnji nastopijo (prekinitev dovoda energije, surovin, okvare procesnih napeljav, neustrezne surovine, neustrezni tlaki, napetosti, pretoki itd.). V teh primerih je intervencija operaterja nujno potrebna. V nekaterih izjemnih primerih je seveda lahko tudi ta nepravilna ali celo škodljiva, vendar pa izkušeni operaterji z izkušnjami, intuicijo in inovativnostjo uspejo rešiti marsikatero nepredvideno situacijo. Pri načrtovanju vodenja kemijskih in podobnih procesov mora načrtovalec skrbno preučiti, katere procesne aktuatorje naj operater v kritičnih trenutkih vodi tudi ročno in pri katerih to ni potrebno. V procesni industriji ročnega vodenja ne potrebujemo le tam, kjer je lahko delovanje regulacijske zanke popolnoma samostojno, nepravilno delovanje brez posebne škode, vpliv na preostali del tehnološkega postopka pa je zanemarljiv (npr. nivo tekočine v shranjevalniku, če

bistveno odstopanje od želenega nivoja za nadaljnji postopek ni pomembno).

Običajno pripravimo dve mesti za ročno krmiljenje izvršnih členov: servisno krmiljenje neposredno na aktuatorju in ročno krmiljenje v komandni sobi na komandnem pultu. Ročno vodenje sme potekati tudi preko računalniškega sistema, če je možno sočasno ročno vodenje več aktuatorjev in če, zaradi izpada računalniškega sistema, onemogočeno ročno vodenje nima škodljivih posledic.

1.4. Regulatorji, krmilniki in procesni računalniški sistemi

Za vodenje procesov lahko uporabimo več elementov in sistemov, ki jih prikazuje slika 1.3.



Slika 1.3: Nekateri elementi in sistemi vodenja procesov

1.4. Regulatorji, krmilniki in procesni računalniški sistemi

- samostojni enozančni in dvozančni regulatorji,
- večzančni regulatorji in računske enote,
- relejska logika in programirljivi logični krmilniki,
- modularni programirljivi logični krmilniki, razširjeni tudi z analognimi, komunikacijskimi in posebnimi moduli,
- procesni računalniki,
- distribuirani računalniški sistemi za vodenje.

Med naštetimi možnostmi centralizirani procesni računalnik čedalje bolj izgublja svoj pomen, v zahtevnejših primerih je pametno sistem vodenja oblikovati kot distribuirani sistem.

Sodobni sistem vodenja procesov lahko sestavimo kot kombinacijo naštetih gradnikov. Ustrezno kombinacijo izberemo na osnovi številnih kriterijev, kar predstavlja enega izmed pomembnih kreativnih procesov pri načrtovanju sistema za vodenje. Med drugimi upoštevamo naslednje kriterije:

- tip procesa (zvezni, šaržni, semišaržni),
- prostorska razsežnost sistema (zaključena naprava, tehnološko polje itd.),
- zahtevana zanesljivost oz. nevarnosti tehnologije,
- razmerje med zahtevnostjo algoritmov vodenja in pričakovanimi stroški avtomatizacije (cenovni razred),
- kvaliteta vodenja,
- fleksibilnost sistema in pripadajoče tehnologije,
- kompleksnost vzdrževanja,
- sposobnosti in znanja operaterjev itd.

Manjše zvezne procese z relativno neodvisnimi procesnimi spremenljivkami vodimo s pomočjo samostojnih eno- in dvo-zančnih regulatorjev. Relejska logika navadno služi za izvedbo alarmnih in zaščitnih sistemov (blokade).

Manjše šaržne procese lahko vodimo s samostojnimi regulatorji in programirljivimi logičnimi krmilniki.

Manjše zvezne in semišaržne procese vodimo z večzančnimi mikroračunalniškimi regulatorji, ki pa jih uspešno nadomeščajo modularni programirljivi logični krmilniki. Večzančni regulatorji in modularni programirljivi logični krmilniki so običajno sposobni komuniciranja z nadrejenimi računalniki. V teh primerih kot nadrejene računalnike uporabimo osebne računalnike v robustnejši izvedbi, uporabimo pa jih za grafični prikaz procesnih spremenljivk, pregled stanja regulacijskega sistema, vnašanja receptur in arhiviranja.

Za vodenje večjih zveznih, šaržnih in semišaržnih procesov uporabimo distribuirane računalniške sisteme za procesno vodenje, toda tudi te kombiniramo s samostojnimi eno- in večzančnimi regulatorji ter kompaktnimi logičnimi krmilniki.

Laboratorijske pilotne naprave lahko vodimo s ceneni osebni računalniki s primerno programsko opremo in analogno-digitalnimi vmesniki.

Za velike distribuirane računalniške sisteme za vodenje je značilno, da je njihova zgradba prilagojena procesnemu vodenju. Pomembni del predstavlja vgrajena zanesljivost. Ta se odraža v posebnih modulih za varno in zanesljivo krmiljenje aktuatorjev, vgrajenih mehanizmih povečevanja zanesljivosti pomnilnika in drugih vitalnih delov računalnikov, v kompleksnih in redundantnih komunikacijskih povezavah, povečani zaščiti proti elektromagnetnim motnjam in vplivom agresivnega okolja, prilagojenih komandnih pultih s pazljivo načrtovanim sistemom povezave človek - stroj, posebej načrtovani programski opremi in predpisani zalogi kritičnih rezervnih delov. Vse naštetje je vzrok za visoko ceno takih sistemov, zato je razumljivo, da uporabniki poskušajo najti cenejše sisteme. Pri tem je mogoče precej nižjo ceno doseči predvsem na račun zmanjšanja zanesljivosti in varnosti, uporabniške prijaznosti ter možnosti ročnega posredovanja operaterja.

Zelo dobre sisteme za vodenje lahko zgradimo tako, da vse pomembnejše regulacijske funkcije prepustimo eno- ali večzančnim regulatorjem, sekvenčne funkcije in zbiranje signalnih vrednosti zaupamo modularnim programirljivim logičnim krmilnikom, prikaz vrednosti in vnos receptur pa prepustimo izpeljankam osebnih računalnikov ali delovnih postaj. Varnostne mehanizme zgradimo na osnovi

1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje

stopenjskih tipal in relejske logike. Pri tem skušamo upoštevati naslednja priporočila:

- sistem za vodenje poskušajmo sestaviti iz čimveč enostavnih in samostojnih elementov,
- v posamezni element sistema ne vključujemo veliko funkcij, ker sicer postane sistem nezanesljiv, težko razumljiv in uporabljiv ter zahteven za vzdrževanje,
- kritičnih funkcij regulacijskega sistema ne razdelimo tako, da bi obremenjevala komunikacijsko vodilo,
- predvidimo dovolj možnosti ročnega vodenja procesa,
- nezahtevne regulacijske zanke lahko vodi modularni programirljivi logični krmilnik, zahtevne pa enozančni in večzančni samostojni regulatorji.

1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje

Gradnike sistemov za vodenje povezujemo med seboj z osnovnimi signalnimi povezavami in z zahtevnejšimi komunikacijskimi zvezami. Osnovne signalne povezave potekajo med merilnimi pretvorniki, aktuatorji, regulatorji in računalniškimi sistemi. V procesni industriji so uveljavljene naslednje signalne oblike:

- zvezni tokovni signali 0/4 do 20mA,
- pnevmatski signali 0.2 do 1 bar,
- logični signali 0/24V AC/DC.

Za prenos zveznih signalov merilnih pretvornikov in krmiljenje aktuatorjev je tehnično najbolj primeren tokovni signal 4 do 20mA. Ta signalna oblika omogoča poleg relativno kvalitetnega prenosa merilnega signala še vrsto dodatnih možnosti in prednosti:

- daljinsko napajanje nekaterih merilnih pretvornikov (dvožična povezava),

- alarmiranje v primeru okvare tipala ali prekinitve signalnega voda (npr. prekinitvev termočlena itd.),
- prenosne razdalje do 1km in več,
- ugodno razmerje signal/šum v celotnem uporabnem območju,
- signalna povezava poteka le po dveh žicah,
- majhna občutljivost na slabe kontakte,
- možna dopolnitev s servisno serijsko komunikacijo po protokolu tipa HART.

Navesti moramo seveda tudi nekaj slabosti:

- za precizno prenašanje signalnih vrednosti potrebujemo precizne komponente (visokostabilne upore, visokorazločljive A/D in D/A pretvornike, zahtevno galvansko izolacijo itd.),
- pri večkratnem digitalnem prikazu (npr. na panelnem voltmetru, na digitalnem regulatorju in na računalniškem zaslonu) se prikazane vrednosti običajno razlikujejo med seboj,
- nekateri kompaktni (inteligentni) merilni pretvorniki lahko obdelajo signale več različnih tipal hkrati, le enega izmed njih pa lahko posredujejo po tokovni signalni zanki.

Navedene slabosti kažejo na potrebo po digitalnem prenosu signalov. Digitalna komunikacija, ki je bila najprej razvita za komunikacije med centralnim računalniškim sistemom in inteligentnimi procesnimi vmesniki, je postala pomembna tudi za signalne prenose na nižjem nivoju. V sodobnih sistemih vodenja večina informacij med gradniki sistemov vodenja že poteka v digitalni obliki. S stališča uporabnikov take rešitve pogosto niso optimalne in nujno potrebne. Zakonitosti na tržišču nenehoma spreminjajo cenovno razmerje med gradniki s klasičnimi in gradniki z digitalnimi signalnimi sistemi. Gradniki z digitalnimi signalnimi sistemi postajajo čedalje cenejši. Iz tehnološkega stališča je že skoraj vsak sodoben merilni pretvornik izdelan na osnovi mikroporcesorske tehnologije, ki omogoča enostavnejšo izvedbo zahtevnih signalnih obdelav, večjo fleksibilnost, pomnenje kalibracijskih parametrov, lažje postopke kalibracije, samotestiranje itd. Ko pa

1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje

je tako "predelana" procesna vrednost že v digitalni obliki, jo je seveda ceneje prenašati v digitalni obliki do drugih naprav, kot pa jo z visoko natančnostjo pretvoriti v analogno obliko in jo v tej obliki prenašati med sistemi.

Po drugi strani pa digitalni prenos uporabljamo le redko "od točke do točke". Praviloma poteka prenos po skupnem vodilu. Komunikacijsko vodilo je signalni sistem, ki povezuje gradnik v komunikacijsko omrežje. V tem omrežju sme v določenem trenutku le ena izmed naprav oddajati sporočilo (podatkovni vir), ostale smejo le poslušati in preverjati, če je sporočilo namenjeno njim. Skupno komunikacijsko omrežje praviloma zmanjša obseg žičnih povezav v primerjavi s klasičnimi signalnimi sistemi 4-20 mA, toda hkrati prinese nevarnost izpada celotnega sistema, če kateri izmed gradnikov prične delovati nepravilno ali je v okvari.

Sodobna komunikacijska omrežja prinašajo v tehnologijo vodenja procesov veliko prednosti, ki odtehtajo skrbi pred potencialnimi težavami. Zaradi tega se njihov delež v primerjavi s klasičnimi signalnimi sistemi nenehno izboljšuje. Sto-percentne prevlade kljub temu ni mogoče pričakovati. Velik problem prodora komunikacijskih sistemov predstavlja problem standardizacije. Proizvajalci opreme si namreč prizadevajo, da bi v mednarodne standarde vgradili njihove rešitve in si s tem pridobili prednost na tržišču. Tako je npr. v Evropi nemška industrija v tekmi z ameriško pričela s standardom PROFIBUS, ki je nosil začetno oznako DIN 19245. Ta je počasi prerastel v evropski standard EN 50170. Ker tudi ta ni zadovoljil vseh proizvajalcev, je "na pohodu" mednarodni standard IEC 61158. Nadaljevanje sledi!

Računalniško vodenje procesov je tehnična disciplina, ki že več kot tri desetletja počasi osvaja kemijsko in procesno industrijo. Razlog za relativno počasnost uvajanja računalniške avtomatizacije na to področje izhaja predvsem iz potencialnih nevarnosti za delovno osebje, možnih izgub energije in surovin, onesnaženja okolja, uničenja drage procesne opreme itd. Vsak nov element ali postopek je potrebno pred splošnim uvajanjem temeljito preizkusiti, spoznati negativne in pozitivne lastnosti, preveriti skladnost s standardi ter z novimi znanji in pojavnimi oblikami seznaniti celotno verigo uporabnikov (od kemijskega tehnologa, avtomatika, strojnega inženirja, vzdrževalca do operaterja). To velja tudi za področje računalniške avtomatizacije, še več, ni dovolj spoznavati in preizkušati le delovanje in uporabo računalnikov, temveč vseh elementov, ki pri računalniški avtomatizaciji sodelujejo.

Pri gradnji računalniških sistemov za vodenje se moramo zavedati, da: računalnik predvsem omogoča obsežno obdelavo signalov in podatkov, regulacijski in drugi algoritmi določajo kvaliteto dinamičnega obnašanja sistema, tipala s pretvorniki zagotavljajo natančnost in ponovljivost tehnološkega procesa, aktuatorji in izvršni členi določajo vodljivost sistema, kvalitetno vzdrževanje pa dolgoročno uporabnost. Nobenega izmed naštetih gradnikov ne smemo precenjevati (še posebej računalnika), pač pa moramo poskrbeti za strokovno in tehnično skladnost.

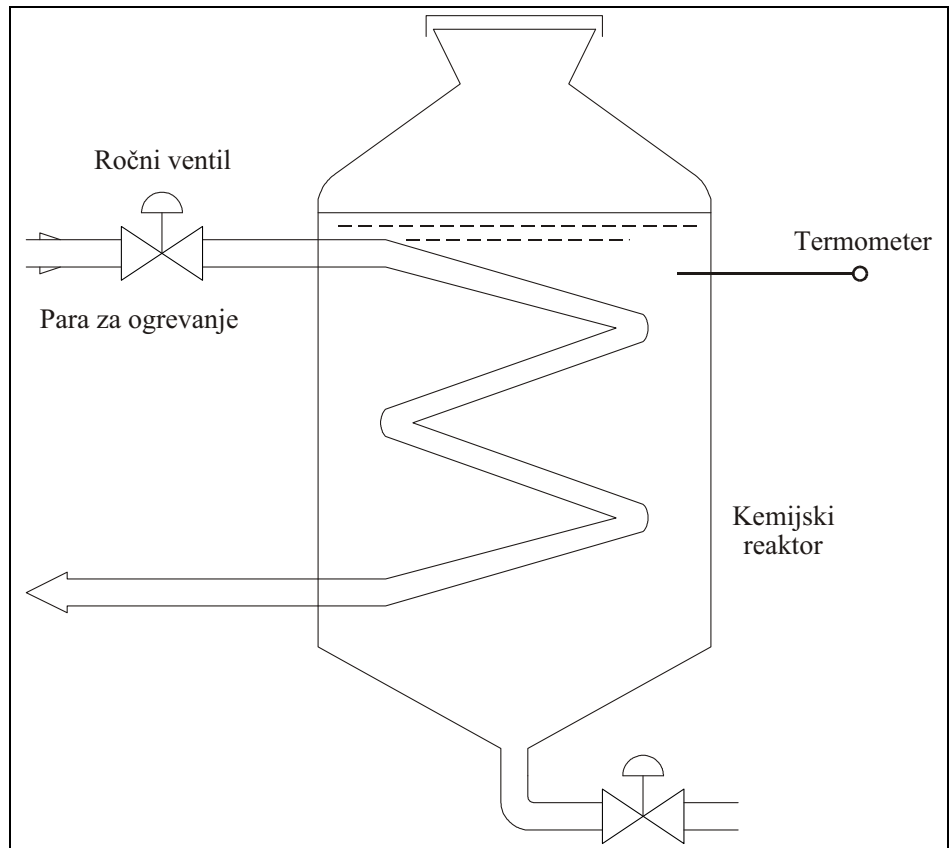
Primeri

PRIMER 1.1

Slike 1.4 - 1.6 prikazujejo postopni potek avtomatizacije - regulacije temperature kemijskega reaktorja. Primer je namenjen ilustraciji sugestije, da je potrebno avtomatizacijo pričeti "pri tleh" in ne pri izbiri računalniškega sistema ali elektronskega regulatorja.

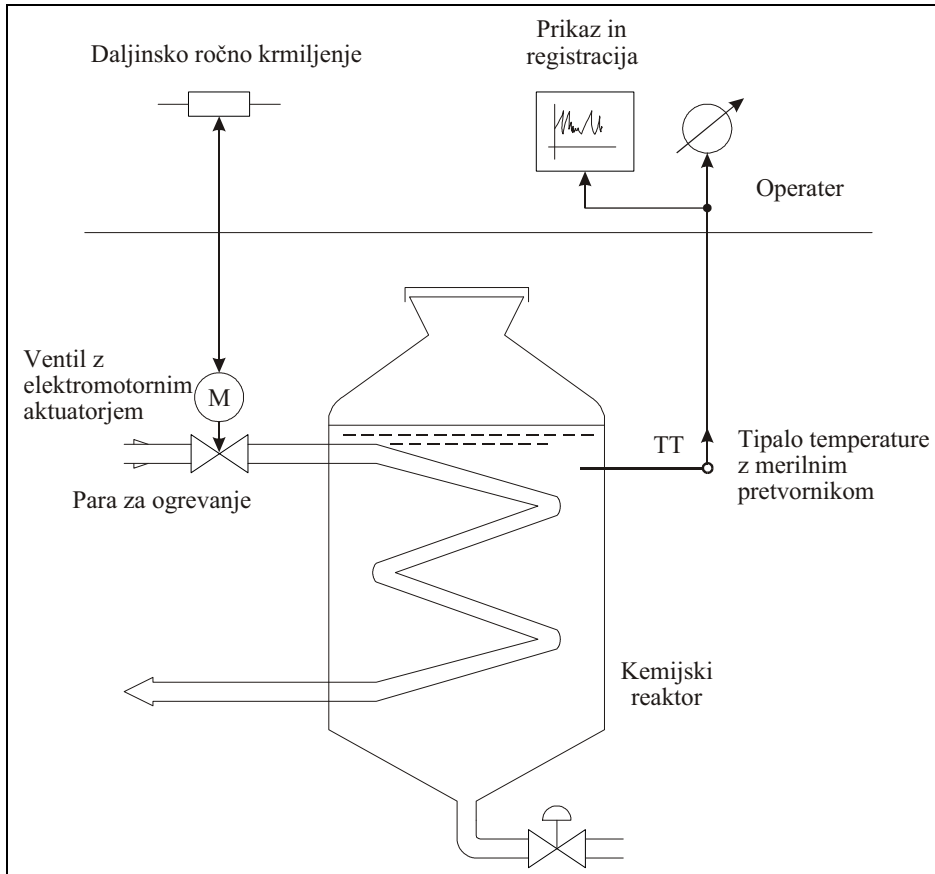
1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje

1. korak Kemijski reaktor brez gradnikov za vodenje (slika 1.4).



Slika 1.4: Kemijski reaktor v "surovem" stanju: z ročnim ventilom uravnavamo dotok pare in ogrevanje, temperaturo reagentov odčitujemo na termometru

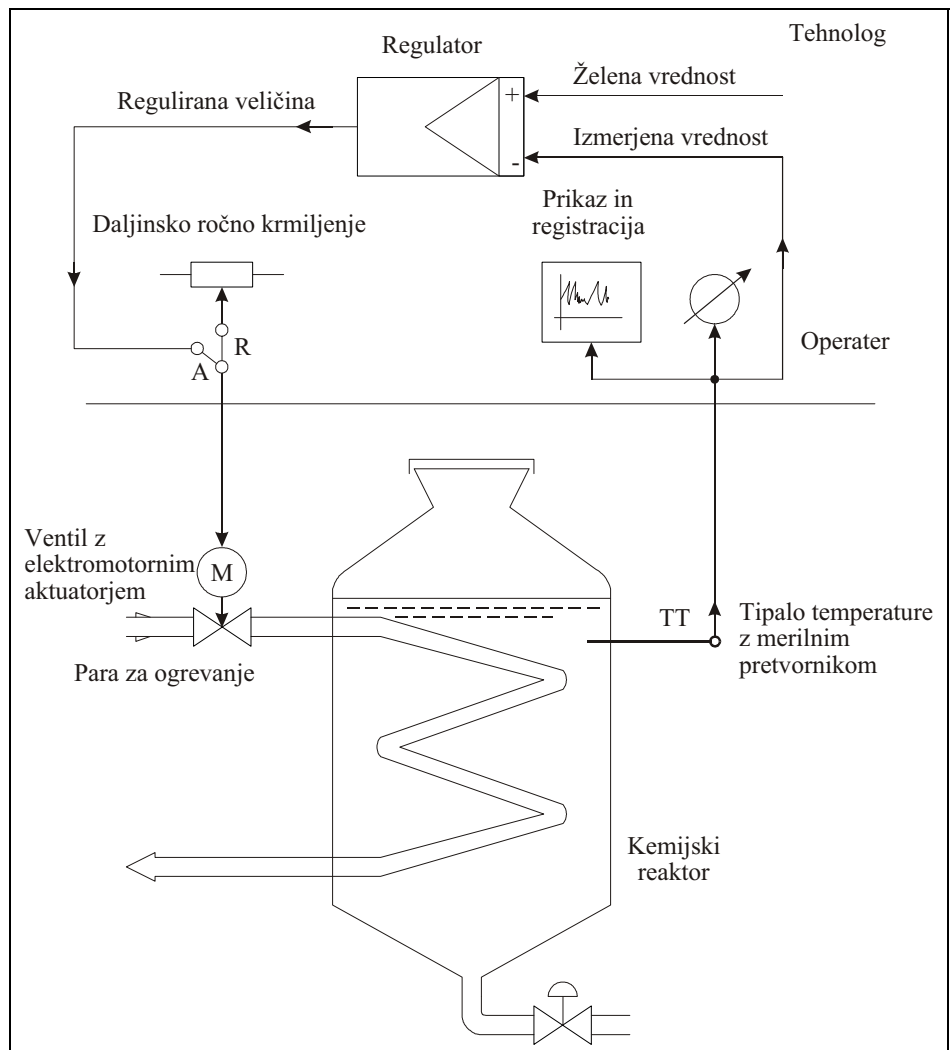
2. korak Kemijski reaktor z nameščenimi tipali, izvršnimi členi in ročnim vodenjem (slika 1.5).



Slika 1.5: Kemijski reaktor z daljinskim odčitavanjem temperature in daljinskim uravnavanjem položaja parnega ventila (operater lahko dela v prijaznejšem okolju komandne sobe)

3. korak Kemijski reaktor z avtomatsko regulacijo (slika 1.6).

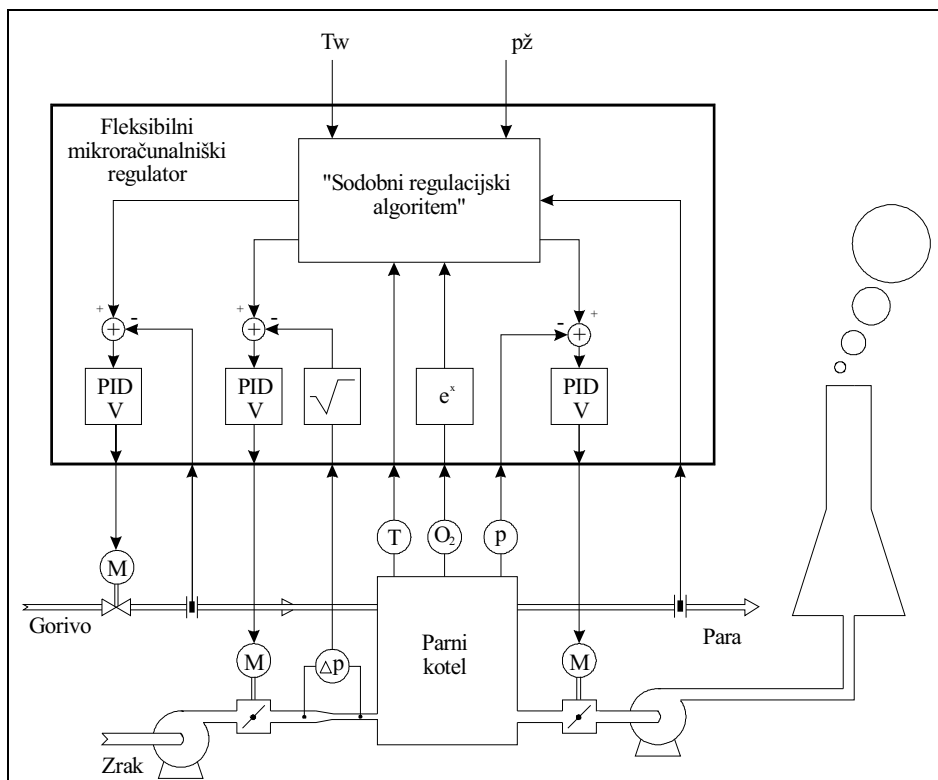
1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje



Slika 1.6: Kemijski reaktor z avtomatsko regulacijo temperature (operater le nadzoruje pravilnost delovanja regulacijskega sistema in v kritičnih trenutkih posreduje preko sistema ročnega vodenja pri čemer upošteva navodila tehnologa, npr. nastavlja želena vrednost)

PRIMER 1.2

Razširitev sistema vodenja na obsežnejši objekt. Slika 1.7 prikazuje shemo aplikacije sodobne metode avtomatskega vodenja na parnem kotlu.

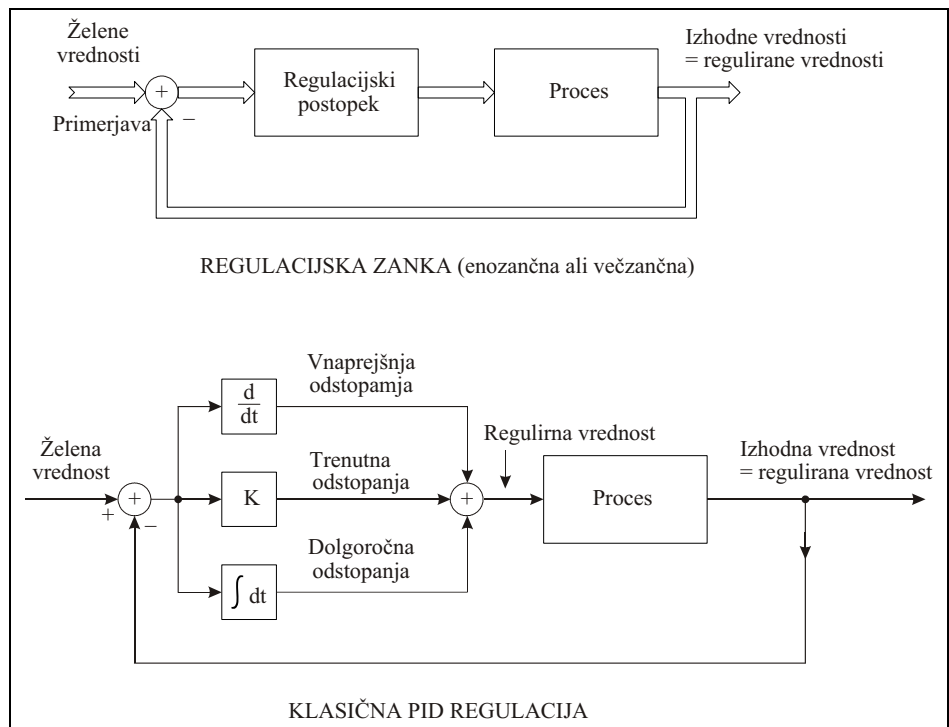


Slika 1.7: Zahtevnejša regulacija (vodenje) parnega kotla (oznake na sliki: PID V - regulator s hitrostnim izhodom; $\sqrt{\quad}$ - korenska funkcija za izračun pretoka na osnovi padca tlaka; e^x - antilogaritemska funkcija za linearizacijo signala tipala koncentracije kisika)

PRIMER 1.3

Regulator PID in njegova uporaba (slika 1.8).

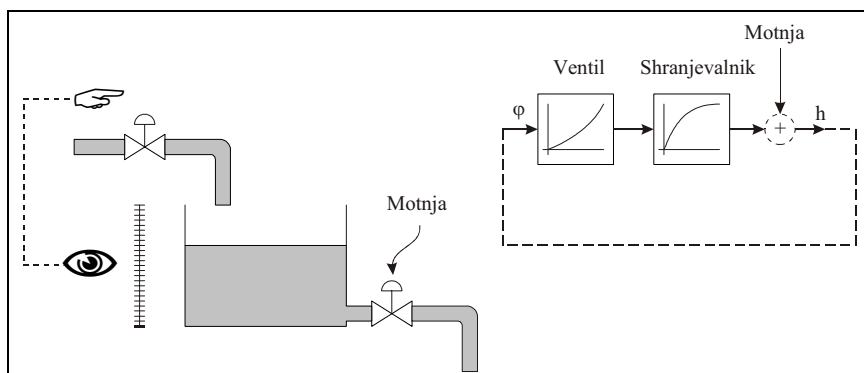
1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje



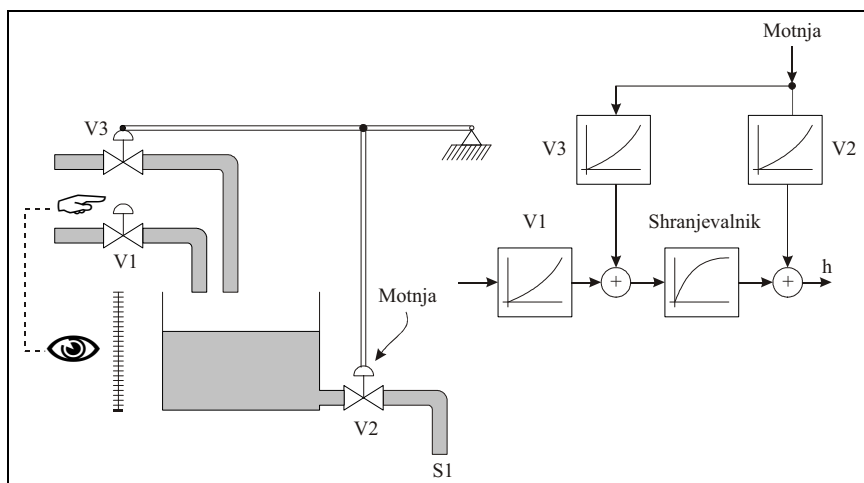
Slika 1.8: Bločna shema zaprtozančnega sistema (zgornja slika) in vloga PID regulatorja v zaprtozančnem sistemu (spodnja slika).

PRIMER 1.4

Slike 1.9 - 1.12 prikazujejo nekatere osnovne oblike vodenja procesa.

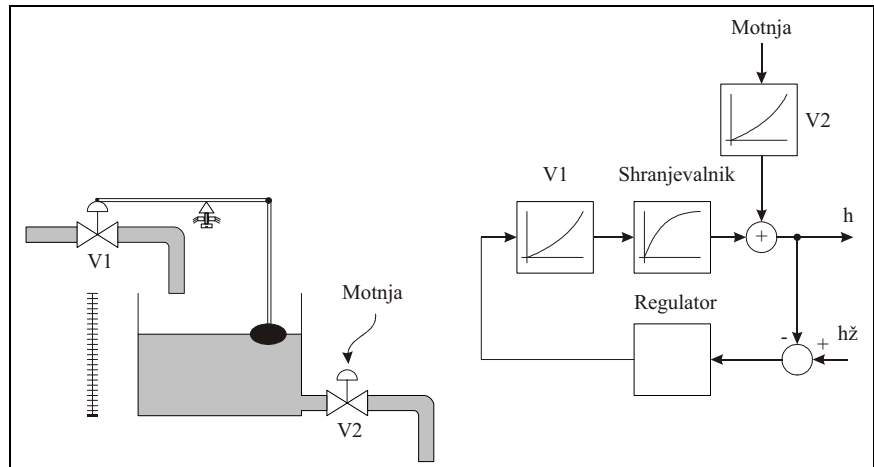


Slika 1.9: Krmiljenje (motnjo predstavlja spreminjanje odvzema tekočine iz shranjevalnika)

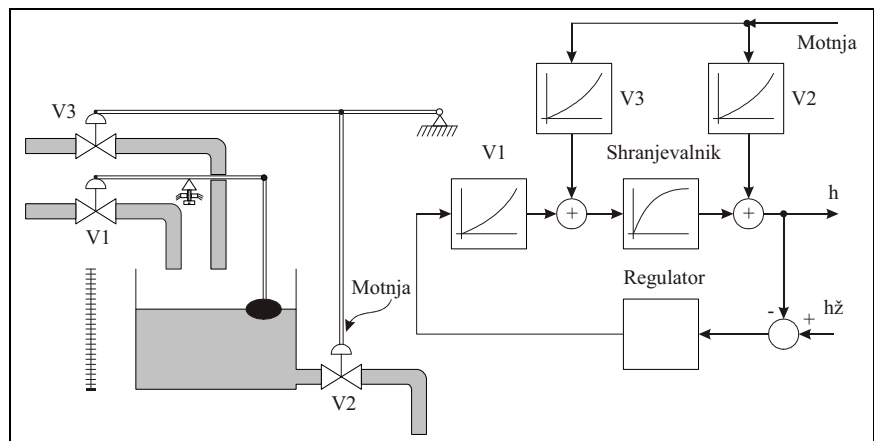


Slika 1.10: Krmiljenje z upoštevanjem motenj iz okolice (povečani odvzem preko ventila V2 nemudoma povzroči povečanje dotoka in s tem prepreči večje spremembe nivoja)

1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje



Slika 1.11: Povratnozančna regulacija (povečani odvzem povzroči znižanje nivoja, plavec se spusti in odpre ventil V1, sveži dotok nato počasi kompenzira povečani odvzem)

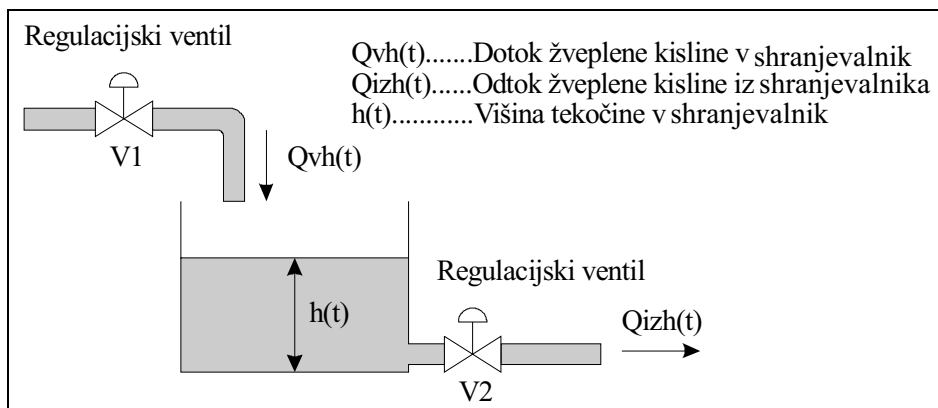


Slika 1.12: Povratnozančna regulacija s kompenzacijo motnje (spremenjeni odvzem takoj vpliva na sveži dotok, morebitna odstopanja nivoja zaradi nepopolne kompenzacije popravi povratna regulacijska zanka)

Naloge

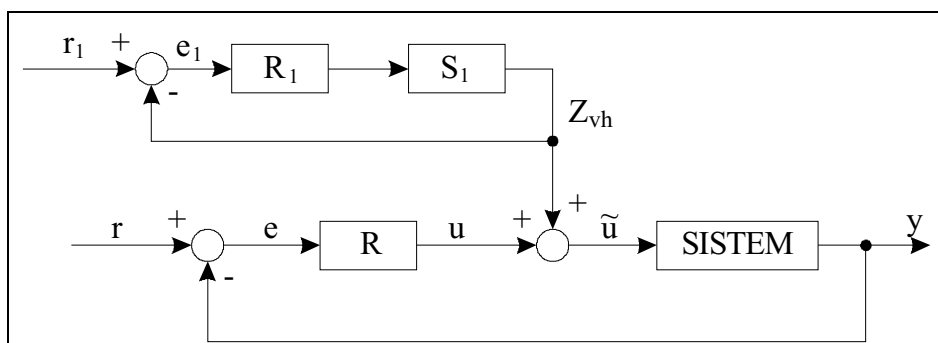
NALOGA 1.1

V tanku, kot ga prikazuje slika 1.13, želimo regulirati nivo žveplene kisline $h(t)$.



Slika 1.13: Shranjevalnik žveplene kisline

Pri tem smo se odločili za bločno shemo, kot jo prikazuje slika 1.14. Kakšen tip



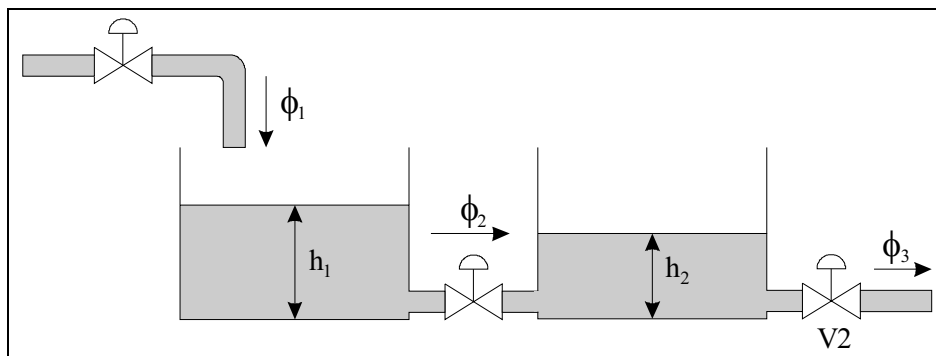
Slika 1.14: Bločna shema

regulacije uporabljamo? Spremenljivkam $y, \tilde{u}, u, e, r, Z_{vh}, e_1$ in r_1 priredite veličine obravnavanega procesa!

1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje

NALOGA 1.2

V primeru dveh povezanih shranjevalnikov na sliki 1.15 reguliramo nivo tekočine v prvem shranjevalniku h_1 . V spodnji tabeli so dane merjene in regulirne veličine.



Slika 1.15: Dva povezana shranjevalnika

Glede na njih se odločite, kateri od štirih obravnavanih načinov vodenja je bil uporabljen za posamezne kombinacije.

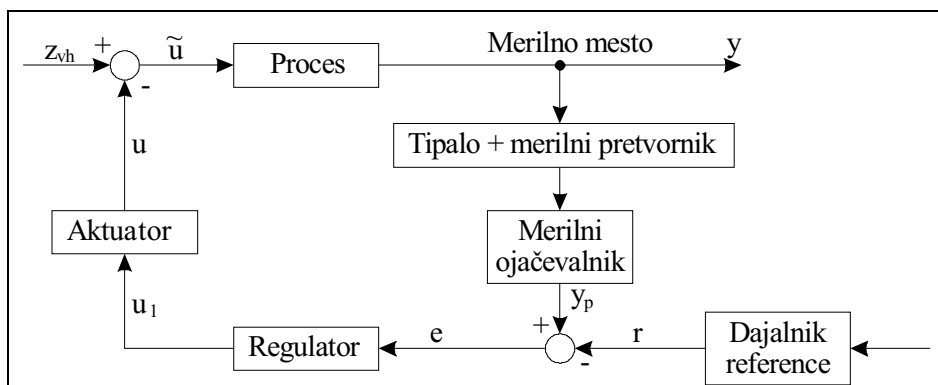
| številka kombinacije | merjena veličina | regulirna veličina |
|----------------------|------------------|--------------------|
| 1 | Φ_1 | Φ_1 |
| 2 | Φ_1 | Φ_2 |
| 3 | / | Φ_1 |
| 4 | h_1 | Φ_1 |
| 5 | h_1 | Φ_2 |

NALOGA 1.3

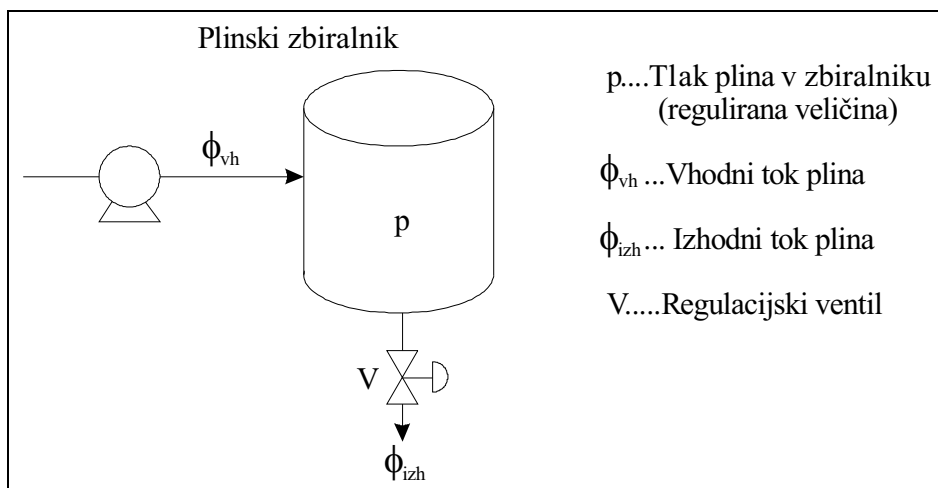
Regulirati želimo temperaturo peči na način, kot ga prikazuje bločni diagram na sliki 1.16. Pri tem je nenatančnost tipala, merilnega pretvornika in ojačevalnika dana z vrednostjo w_{yp} , nenatančnost dajalnika reference z w_r , vpliv različnih vhodnih motenj, ki delujejo na regulacijski signal pa ocenjujemo na vrednost $w_{zv/h}$. Karakteristika aktuatorja je linearna ($u = Ku_1$), uporabljamo pa proporcionalni regulator ($u_1 = P \cdot e$). Ocenite odstopanje $w_{\tilde{u}}$ regulirnega signala!

NALOGA 1.4

Za sistem na sliki 1.17 smo izbrali 5 različnih možnosti, kot jih prikazuje tabela. V zadnji stolpec tabele vpišite za kakšen način vodenja smo se odločili pri izbrani merjeni in regulirni veličini!



Slika 1.16: Bločna shema vodenja



Slika 1.17: Plinski zbiralnik

| številka kombinacije | merjena veličina | regulirna veličina | izbrani način vodenja |
|----------------------|------------------|--------------------|-----------------------|
| 1 | p | Φ_{izh} | |
| 2 | Φ_{vh} | Φ_{vh} | |
| 3 | Φ_{vh} | Φ_{izh} | |
| 4 | / | Φ_{izh} | |
| 5 | Φ_{izh} | Φ_{vh} | |

1.5. Signalne povezave med elementi sistemov za vodenje

NALOGA 1.5

Želeli bi izmeriti navor na gredi, ki obrača obdelovanca na stružnici, da bi tako spremljali obrabljenost nožev. S preprosto skico nakažite osnovne elemente, ki bi bili potrebni za izvedbo take meritve.

NALOGA 1.6

Med pogonskim motorjem in ventilatorjem imamo elastično jekleno gred, ki služi za prenos navora. Skicirajte pomembnejše dodatne elemente, ki bi jih bilo potrebno dograditi, da bi lahko velikost navora na gredi odčitali na namiznem V-metru!

NALOGA 1.7

V sobi želimo zaprtozračno regulirati, na hodniku pa krmiliti temperaturo zraka.

- Narišite bločna diagrama obeh principov vodenja!
- Katere veličine bi merili v prvem in katere v drugem primeru?
- Katere veličine bi izbrali kot regulirne v prvem oz. v drugem primeru?

2.

Stopenjska bližinska tipala

Stopenjska tipala, ki imajo le dva možna izhoda (ON/OFF, 0/1) imajo pomembno vlogo pri vodenju sistemov. Množično jih uporabljamo v sistemih fleksibilne avtomatizacije. V procesnem vodenju pa jih uporabljamo, tako kot smo omenili že v uvodnem poglavju, predvsem za določene nadzorne in varnostne funkcije.

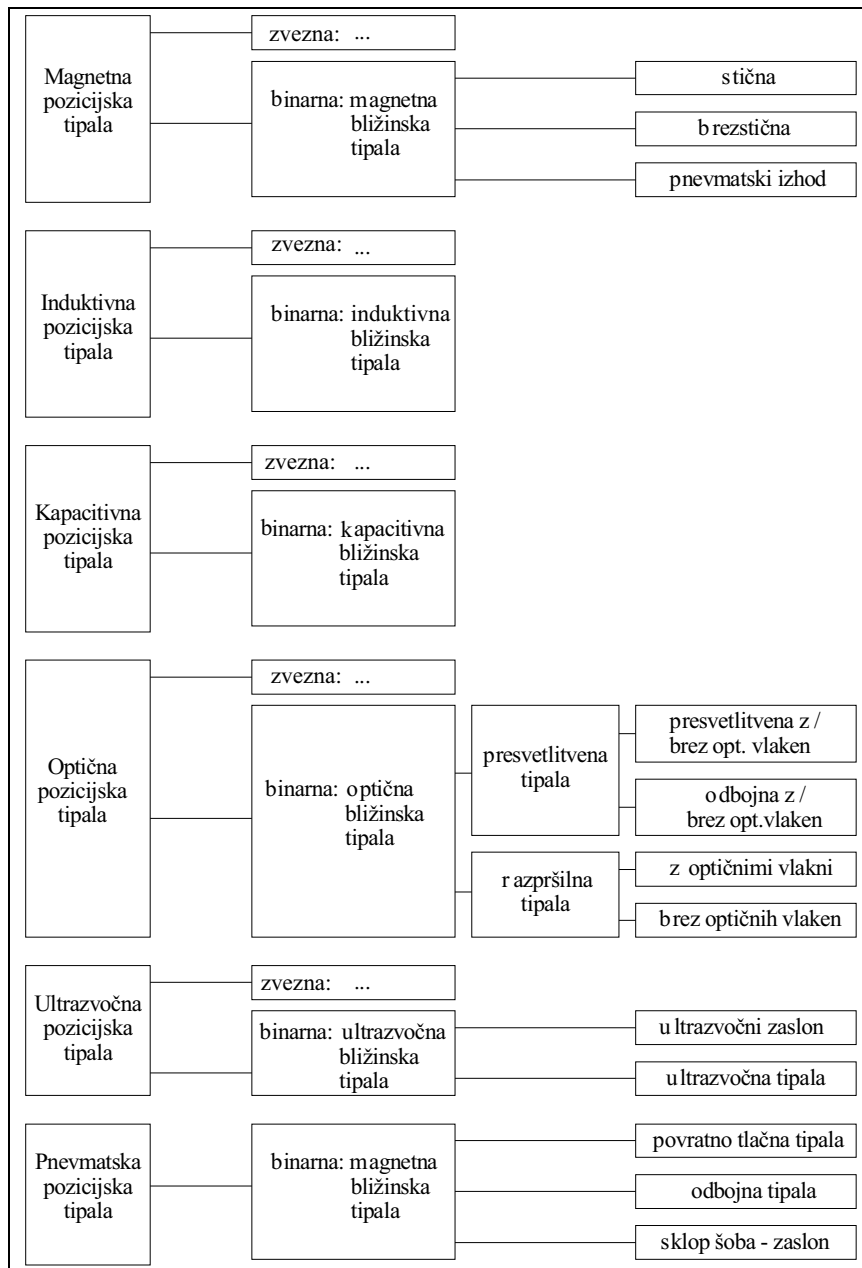
Stopenjska tipala delimo na:

- končna stikala,
- bližinska tipala,
- tipala tlaka,
- tipala nivoja,
- bimetalna tipala.

V tem poglavju si bomo podrobneje ogledali stopenjska bližinska tipala.

Ločimo magnetna, induktivna, kapacitivna, optična, ultrazvočna in pnevmatska stopenjska bližinska tipala. Vrste bližinskih tipal podrobneje prikazuje slika 2.1.

Stopenjska bližinska tipala



Slika 2.1: Vrste bližinskih tipal

2.1. Lastnosti posameznih vrst bližinskih tipal

2.1.1. Induktivna tipala

Induktivna tipala vsebujejo LC oscilator, ki začne proizvajati visokofrekvenčno magnetno polje, ko priključimo tipalo na napetost. Ko se mirujoči električno prevodni objekt pojavi v izmeničnem magnetnem polju, se v njem inducirajo vrtnični tokovi. Ti povzročijo, da se velikost oscilacij zmanjša, kar pomeni večjo porabo toka in posledično spremembo signala na izhodu tipala.

Pri induktivnih tipalih je dosegljiva preklopna razdalja odvisna od premera resonančnega navitja in tako od velikosti cilindričnega tipala. Večji je premer, večja je preklopna razdalja. Za zagotovitev zanesljivega delovanja ima tipalo histerozo. Če bi namreč točki vklopa in izklopa sovpadali, bi lahko prišlo do izredno intenzivnega preklapljanja izhodnega signala. Potrebno prilagoditev induktivnih tipal pri namestitvi dobimo z merjenjem preklopne razdalje. Pri namestitvi tipala moramo paziti, da v njegovem aktivnem področju ni motečih predmetov. Prosto območje (območje med senzorjem in ozadjem) mora biti veliko najmanj trikrat toliko, kot je nominalna preklopna razdalja (po priporočilu proizvajalcev). Pri skupinski namestitvi tipal moramo poskrbeti za primerno vrednost najmanjše razdalje med tipali, da bi ne vplivali drug na drugega.

2.1.2. Kapacitivna tipala

Princip delovanja kapacitivnih bližinskih tipal sloni na merjenju sprememb električne kapacitivnosti v RC relaksacijskem oscilatorju pri približevanju različnih materialov. Kapacitivno tipalo ustvari elektrostatično polje med aktivno elektrodo in maso (večkrat imamo tudi elektrodo za kompenzacijo npr. vlage). Ko se objekt pojavi v aktivnem preklopnem območju, se spremeni kapacitivnost RC vezju, kar povzroči spremembo frekvence oscilatorja. Spremembo frekvence tipalo pretvori v spremembo izhodnega stanja (ON/OFF).

S kapacitivnim bližinskim tipalom lahko zaznavamo tako kovinske kot nekovinske materiale. Za razliko od optičnih razpršilnih tipal, ki jih bomo opisali v naslednjem podpoglavju, imajo to prednost, da zaznajo tudi materiale z zelo slabo odbojnostjo (zelo temne površine). Materiale z zelo majhno dielektrično konstanto

(večina plastičnih materialov) zaznamo samo od določene debeline naprej. Kapacitivna tipala se odzovejo tudi na večino tekočin. Tu pa lahko nastopi problem, kadar se aktivna površina nenamena zmoči (npr. kondenzacija), kar lahko povzroči spremembo izhodnega signala.

2.1.3. Optična tipala

Optična bližinska tipala uporabljajo za zaznavanje objektov optične in električne lastnosti. V bistvu so to pretvorniki svetlobnega signala v električnega. V uporabi sta predvsem rdeča ali infrardeča svetloba. Kot viri svetlobe so zelo zanesljive svetleče (LED) diode, ki so majhne, robustne, z dolgo življenjsko dobo in svetlobo lahko tudi modulirajo. Kot sprejemni element uporabljamo fotodiode ali fototranzistorje. Pri nastavitvi imajo prednost optična tipala z rdečo svetlobo, ker je vidna, poleg tega pa jih lahko uporabljamo v kombinaciji s polimernimi optičnimi kablji zaradi manjše oslabitve svetlobe. Infrardečo svetlobo uporabljamo tam, kjer potrebujemo večjo moč svetlobe (pri premostitvi večjih razdalj) in kjer potrebujemo manjšo občutljivost na svetlobo iz okolja. Pri obeh tipih tipal zmanjšanje vplivov iz okolice dosežemo z modulacijo optičnega signala. Posebno v primeru infrardeče svetlobe lahko z uporabo filtrov dnevne svetlobe povečamo neobčutljivost na svetlobo iz okolice.

Ločimo dve vrsti optičnih tipal: presvetlitvena in razpršilna tipala. **Presvetlitvena tipala** sestavljata ločena oddajnik in sprejemnik svetlobe, s katerima dosežemo široko območje delovanja. Prekinitev svetlobnega žarka pomeni prisotnost objekta. Objekt mora zagotoviti le minimalno prepuščanje svetlobe. Če jo odbija, je še ugodnejše. Problem nastopi, kadar se pokvari oddajnik, saj signal na izhodu tipala javlja prisotnost objekta. Prednosti presvetlitvenih tipal:

- večja zanesljivost zaradi stalne svetlobe, ko tipalo ni v aktivnem preklopnem stanju,
- širši doseg,
- majhne predmete lahko zaznamo tudi pri večjih oddaljenostih,
- primernost za agresivna okolja,
- objekt lahko svetlobo odbija ali deloma prepušča,

2.1. Lastnosti posameznih vrst bližinskih tipal

- natančnost pozicioniranja.

Slabosti presvetlitvenih tipal:

- ločena dela tipala (oddajnik in sprejemnik), kar pomeni ločene električne povezave,
- ne moremo jih uporabljati za prozorne materiale.

Razpršilna tipala imajo oddajnik in sprejemnik svetlobe nameščen v istem ohišju. Objekt razpršeno odbija del oddane svetlobe in tako aktivira sprejemnik, ki se v odvisnosti od izvedbe vklopi ali izklopi. Preklopna razdalja je v veliki meri odvisna od odbojnosti objekta. Na razpršenost svetlobe tipala vplivajo velikost, površina, oblika, gostota in barva objekta ter kot odboja svetlobe. S tipalom lahko zaznavamo bližino objektov le na relativno majhnih razdaljah reda nekaj decimetrov. Ozadje objekta mora absorbirati ali odvrniti preostalo svetlobo, kajti ko objekta ni v območju zaznavanja, mora biti od ozadja odbita svetloba močno pod pragom zaznavanja. Prednosti razpršilnih tipal:

- ker aktivira sprejemnik odboj svetlobe od objekta, ni potrebe po dodatnem zrcalu,
- objekti so lahko zrcalni ali prosojni (dokler se od njih odbija dovolj velika količina svetlobe),
- medtem ko presvetlitvena tipala zaznavajo objekte le od strani, ko pridejo med oddajnik in sprejemnik, razpršilna zaznavajo tudi objekte, ki prihajajo direktno pred tipalo po osi žarka,
- glede na nastavitev občutljivosti lahko tipalo selektivno zaznava objekte pred ozadjem.

Slabosti razpršilnih tipal:

- krivulje odziva niso ravne, zato tipala niso primerna, če je potreben natančen bočni odziv (v tem primeru uporabimo presvetlitvena tipala).

2.1.4. Magnetna tipala

Magnetna tipala so tista, ki reagirajo na magnetno polje trajnega magneta ali elektromagneta. Ločimo stična in brezstična tipala, kar pa se nanaša le na notranjo zgradbo tipala, saj za spremembo stanja izhoda tipala ni potreben fizičen stik z objektom merjenja.

Stična tipala vsebujejo stikalo, ki je občutljivo na magnetno polje. To je tako imenovani reed-rele, ki je sestavljen iz dveh kovinskih lističev v hermetično zaprti stekleni cevki. Zunanje magnetno polje povzroči stik med lističema.

Brezstična tipala so zelo podobna induktivnim. Prav tako vsebujejo LC oscilator, ki za razliko od induktivnega ne ustvarja magnetnega polja navzven, ampak je navitje na jedru, ki tvori zaprto magnetno zanko. S približevanjem trajnega magneta postane jedro nasičeno, kar povzroči spremembo toka v tipalu.

Poznamo še nekatere druge vrste bližinskih tipal, ki izrabljajo magnetizem: magnetno-uporovna tipala, Hallova tipala, magnetno-pnevmatska tipala itd.

2.1.5. Ultrazvočna tipala

Ultrazvočna tipala proizvajajo, oddajajo in sprejemajo zvočne signale v neslišnem področju (frekvence od 30 do 300 kHz). Sestavljena so iz treh glavnih delov: oddajno-sprejemne enote, enote za ovrednotenje in izhodne enote. Oddajno-sprejemna enota je običajno piezo-električni modul, ki povzroča nihanje ultrazvočnih frekvenc s sinusno vzbujevalno napetostjo. Ultrazvočne signale oddaja tipalo v okolico v paketih impulzov (burst) s frekvenco med 1 Hz in 100 Hz. Na podlagi pretečenega časa med oddajo in sprejemom od objekta odbitega signala dá tipalo na izhodu signal.

2.1.6. Pnevmatična tipala

Pri pnevmatičnih tipalih se bližina objektov zaznava z brezstičnim zaznavanjem s curkom zraka iz ozkih šob na tipalu. Če se objekt približa šobi, se spremeni tlak, kar se izrazi kot sprememba izhodnega signala tipala. Področje delovanja tipala je

2.2. Na kaj moramo paziti pri izbiri bližinskih tipal

med 0 in 100 mm. Ker so pnevmatski signali preslabotni za nadaljnjo obdelavo, jih ojačujemo s posebnimi ojačevalniki.

Prednosti pnevmatskih tipal:

- zadovoljivo delovanje v onesnaženih (prašnih) okoljih,
- varno delovanje pri višjih temperaturah,
- možna uporaba v eksplozivnih okoljih,
- neobčutljivost na magnetne vplive,
- zanesljivost v zelo svetlih okoljih pri zaznavanju prozornih predmetov, kjer odpovedo optična tipala.

2.2. Na kaj moramo paziti pri izbiri bližinskih tipal

Katero vrsto bližinskega tipala izberemo, je odvisno od več dejavnikov. Eden najpomembnejših kriterijev je snov, iz katere je zgrajen objekt, ki ga zaznavamo. To je lahko električno prevoden material (npr. jeklo, nerjaveče jeklo, medenina, baker, aluminij, nikel, krom, električno neprevodni materiali, prevlečeni s prevodnim materialom, grafit) ali električno neprevoden material (npr. plastika, karton, papir, les, tkanina, steklo).

Pri neprevodnih snoveh moramo paziti na lastnosti, ki lahko vplivajo na zaznavanje, kot so: prozornost snovi, odbojnost na svetlobo, homogenost snovi, poroznost, agregatno stanje in dielektrična konstanta. Poleg tega vplivata na zaznavanje tudi velikost in oblika objekta, katerega bližino bi želeli zaznati.

Poleg snovnih lastnosti vplivajo na izbiro tipal tudi naslednje zahteve:

- vrsta ozadja in okolice objekta,
- zahtevana razdalja med tipalom in objektom, pri čemer upoštevamo tudi možna odstopanja,
- želena stičnost ali brezstičnost tipala;

- ali so zaznavne lastnosti objekta konstantne ali spremenljive (npr. objekt se giblje ali miruje),
- če se objekt giblje, je pomembna njegova hitrost oziroma čas, v katerem je objekt zaznan,
- stopnjo zaznavanja objektov v okolici objekta, ki ga želimo zaznavati.

Pri namestitvi tipala je pomembno, koliko praznega prostora je v območju zaznavanja. To pomeni, da moramo ugotoviti, koliko prostora imamo na voljo za tipalo oziroma za področje zaznavanja (npr. kadar gre za zaznavanje podrobnosti). Moramo biti pozorni tudi na to, ali je potrebno zaznavati bližino skozi izvrtine ali celo okoli vogala. Kadar imamo blizu skupaj nameščenih več tipal, moramo paziti na vplive oziroma na potrebno razdaljo med njimi.

Tudi okolje, v katerem bo nameščeno tipalo, ima svojo vlogo. Zanima nas temperatura okolja, vpliv prahu, umazanije, prostih delcev, vlažnosti, curkov tekočine, magnetnih in električnih polj, vpliv svetlobe okolice in možnih svetlobnih učinkov ter nevarnost eksplozij. Srečamo se lahko tudi s posebnimi pogoji delovanja, kot so: uporaba tipala v čisti sobi ali podobnih okoljih z visokimi zahtevami po sterilnosti ali higieni, uporaba tipala v prostorih pod visokim ali zelo nizkim tlakom.

V posebnih okoljih je uporaba bližinskega tipala še posebej zanimiva, saj se uporabljajo za signaliziranje in preprečevanje nevarnosti eksplozij, nesreč in tam, kjer želimo preprečiti možnost strojeloma.

Da bi zadovoljili večino potreb, imamo na tržišču razne izvedbe tipal, ki se razlikujejo po naslednjih lastnostih:

- oblika, vrsta in dimenzije,
- dopustna temperatura okolice med delovanjem,
- napajanje (enosmerno, izmenično),
- tip priključnih sponk (kabelske ali konektorji),
- največja frekvenca preklapljanja,
- največji tok obremenitve,

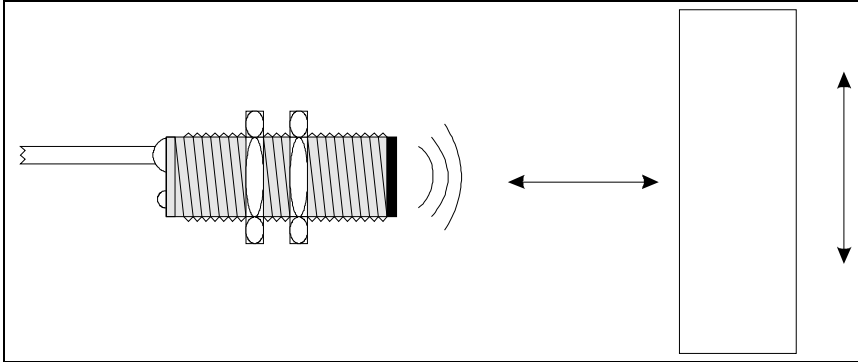
2.3. Primeri uporabe

- preklopna histereza,
- zaščitni razred glede na standarda IEC 529, DIN 40050,
- vrsta preklopnega izhoda in zaščitnega vezja:
 - zaščita pred kratkim stikom,
 - zaščita pred zamenjavo polaritete priključnih sponk,
 - negativno preklapljanje (NPN izhod),
 - pozitivno preklapljanje (PNP izhod),
- možnost posebnih izvedb, npr. glede na standard DIN 19234 (NAMUR), eksplozivno varna izvedba, izvedba za zaščito pred nesrečo itd.,
- do določene mere nastavljiva oziroma nenastavljiva vrednost področja zaznavanja,
- možnost namestitve posameznega tipala ali več tipal skupaj,
- najmanjša razdalja med skupaj ležečimi tipali iste vrste,
- nominalna preklopna razdalja ali nominalno področje zaznavanja,
- obnavljanje,
- dodatki pri odbojnih optičnih tipalih,
- rezervni faktor delovanja pri optičnih tipalih,
- možnost izvedbe z optičnimi vlakni pri optičnih tipalih, kjer imamo pri optičnih vlaknih upoštevamo še naslednje faktorje: območje, dimenzije glave optičnih vlaken, dolžina kabla, kot zaznavanja, odzivna območja in dopustna temperatura okolice,
- cena in cenovni razredi bližinskih tipal.

2.3. Primeri uporabe

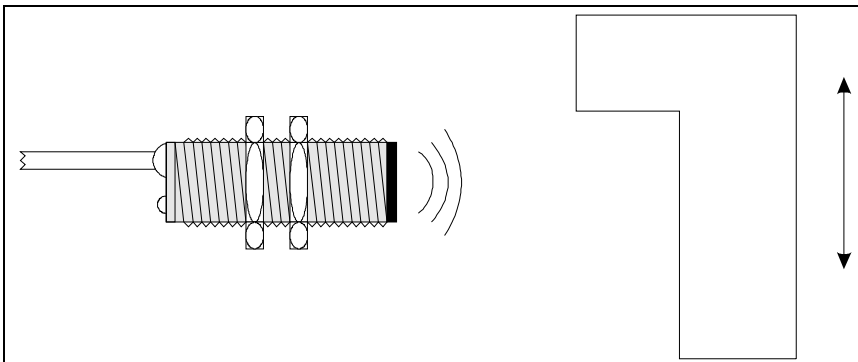
Možni primeri uporabe bližinskih tipal so:

- zaznavanje prisotnosti objekta na določenem mestu (slika 2.2), kar uporabljamo pri delovnih operacijah s pnevmatskimi cilindri, z električnimi pogoni, s prijemali, z avtomatskim varjenjem in z avtomatskimi vrati,



Slika 2.2: Brezstično zaznavanje

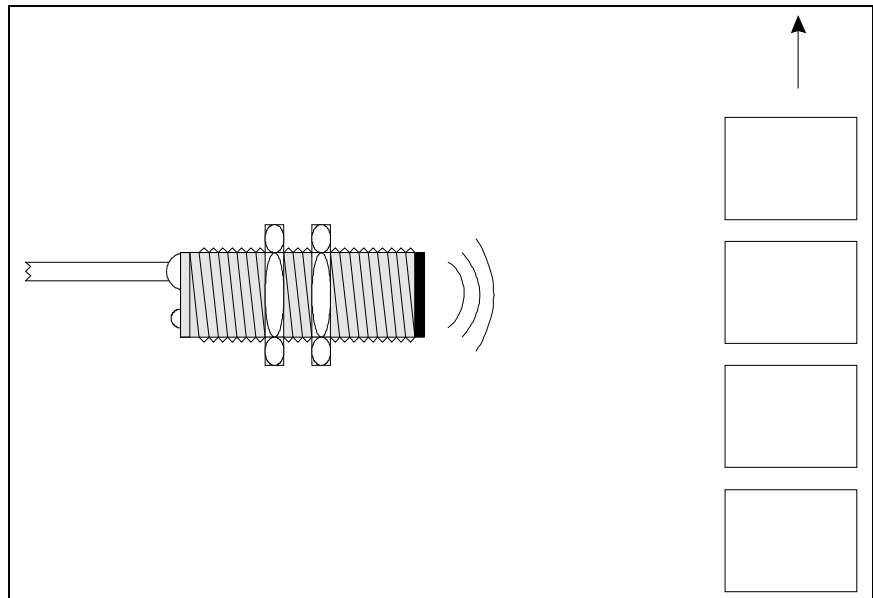
- postavitve obdelovancev na pravo mesto (slika 2.3), npr. v strojno obdelovalnih centrih, v transportnih sistemih in v pnevmatičnih cilindrih,



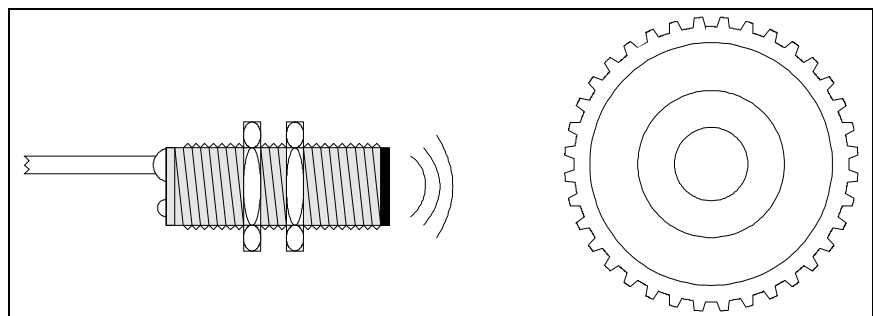
Slika 2.3: Postavitve obdelovanca

- štetje objektov (slika 2.4), npr. transportni trakovi in sortirne naprave,
- merjenje hitrosti vrtenja, npr. zobatih koles (slika 2.5), in zaznavanje mirovanja objekta,

2.3. Primeri uporabe

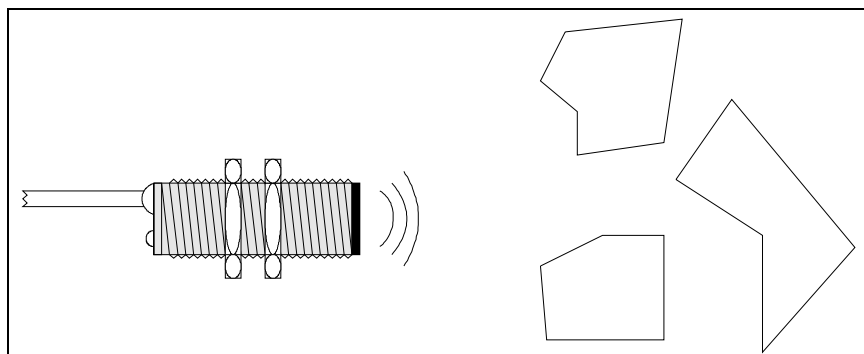


Slika 2.4: Štetje objektov

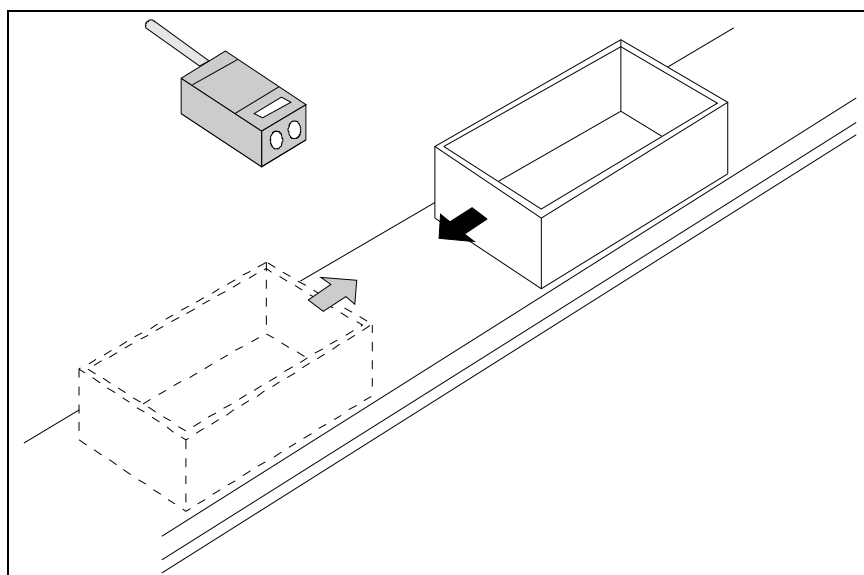


Slika 2.5: Zaznavanje vrtenja

- zaznavanje vrste materiala (slika 2.6), npr. za sortiranje odpadnih surovin,
- zaznavanje smeri gibanja oziroma vrtenja objektov (slika 2.7) [obstajajo izvedbe induktivnih tipal, ki zaznavajo gibanje v eno smer, v drugo pa ne],
- zaznavanje prisotnosti orodij (slika 2.8),



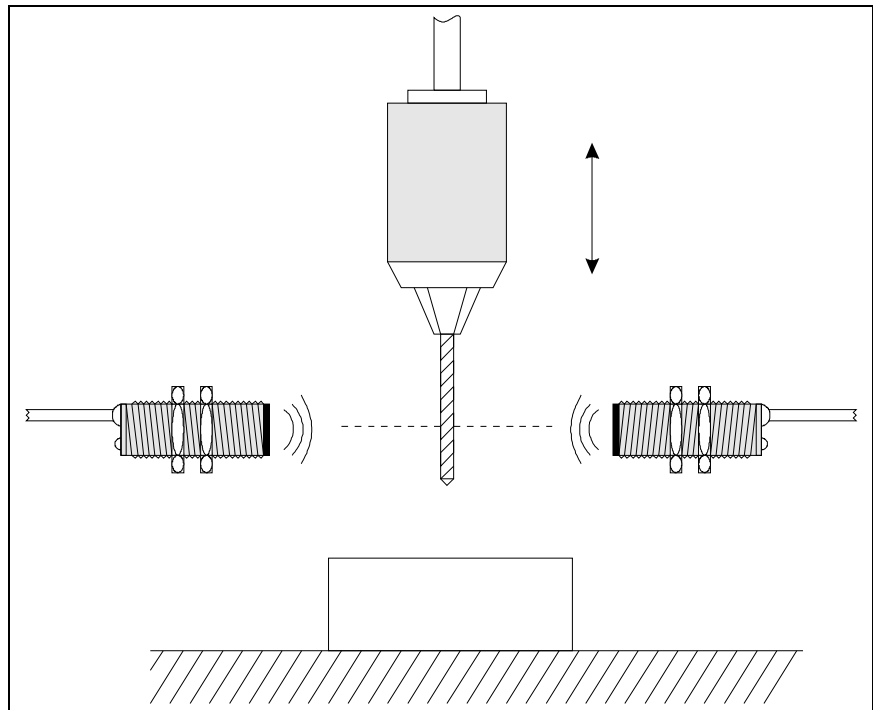
Slika 2.6: Razločevanje materialov



Slika 2.7: Zaznavanje smeri

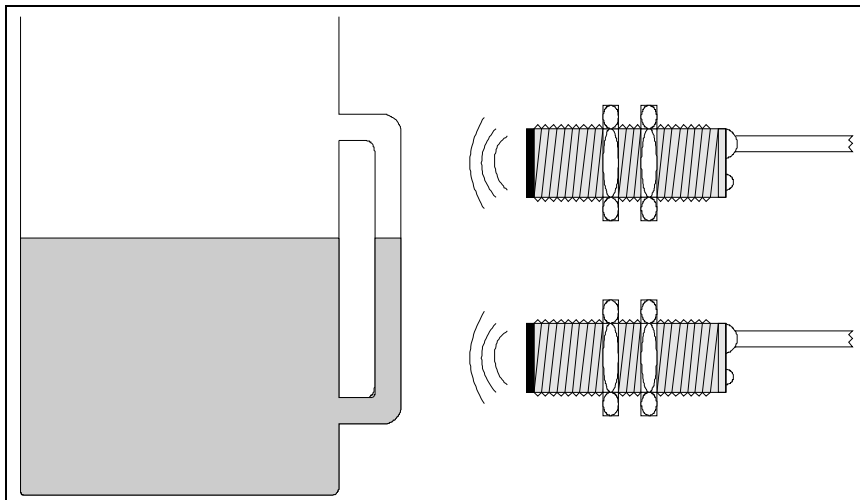
- zaznavanje nivoja polnosti z optičnimi, kapacitivnimi ali ultrazvočnimi bližinskimi tipali (slika 2.9),
- grobo ocenjevanje razdalje x (slika 2.10),

2.3. Primeri uporabe



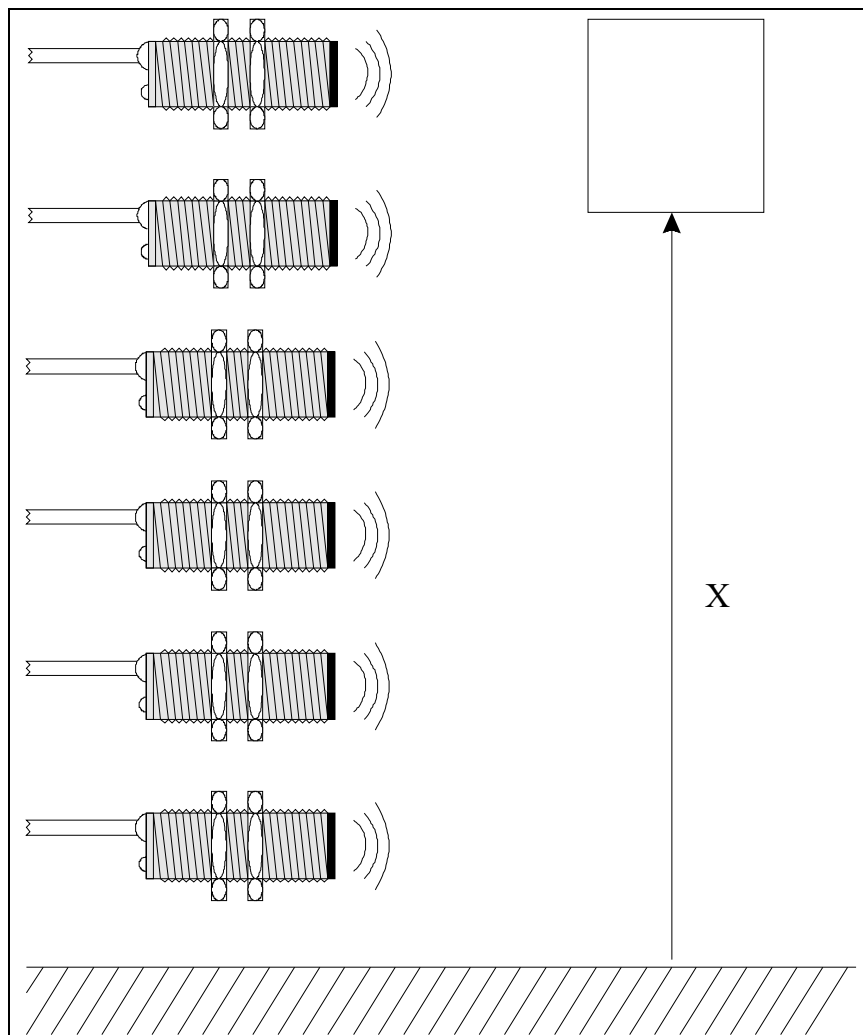
Slika 2.8: Zaznavanje loma svedra

- ocenjevanje hitrosti v (slika 2.11),
- zaznavanje in signaliziranje neželenega ali nevarnega dotika (slika 2.12),
- grobo zaznavanje obrisa objekta z več tipali, ki so primerno razporejena (slika 2.13).

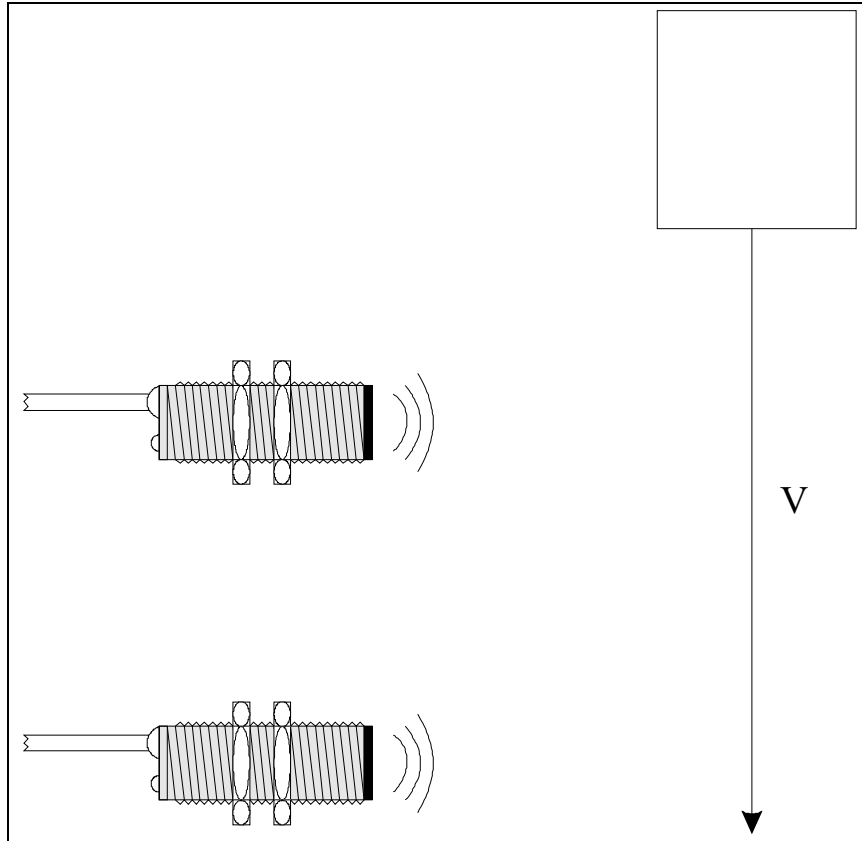


Slika 2.9: Zaznavanje polnosti

2.3. Primeri uporabe

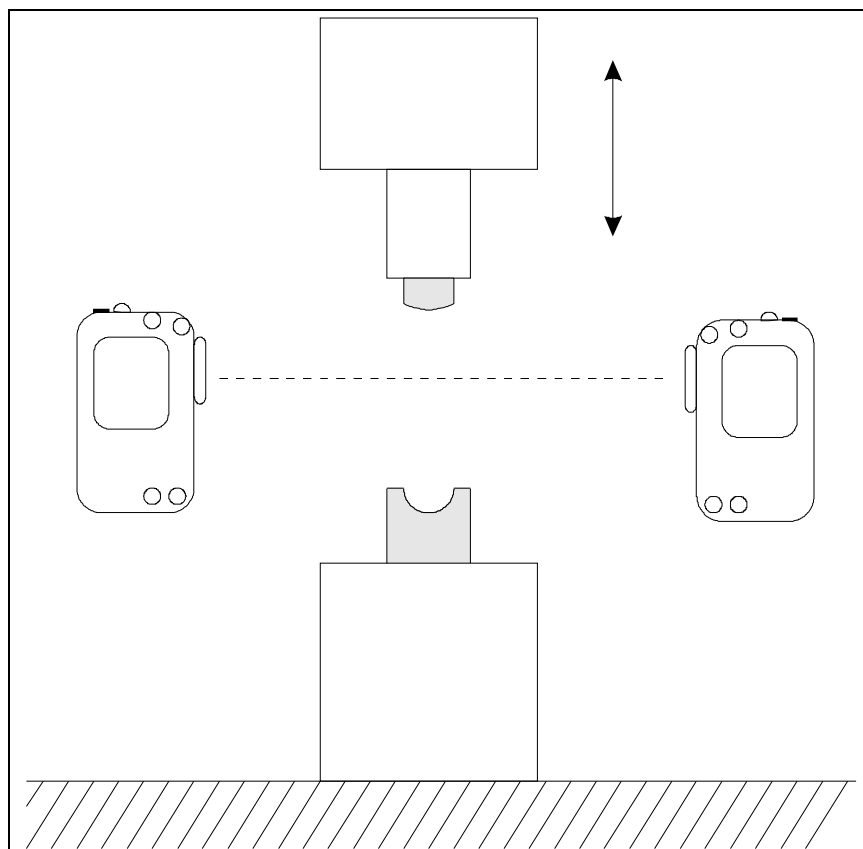


Slika 2.10: Ocenjevanje razdalje

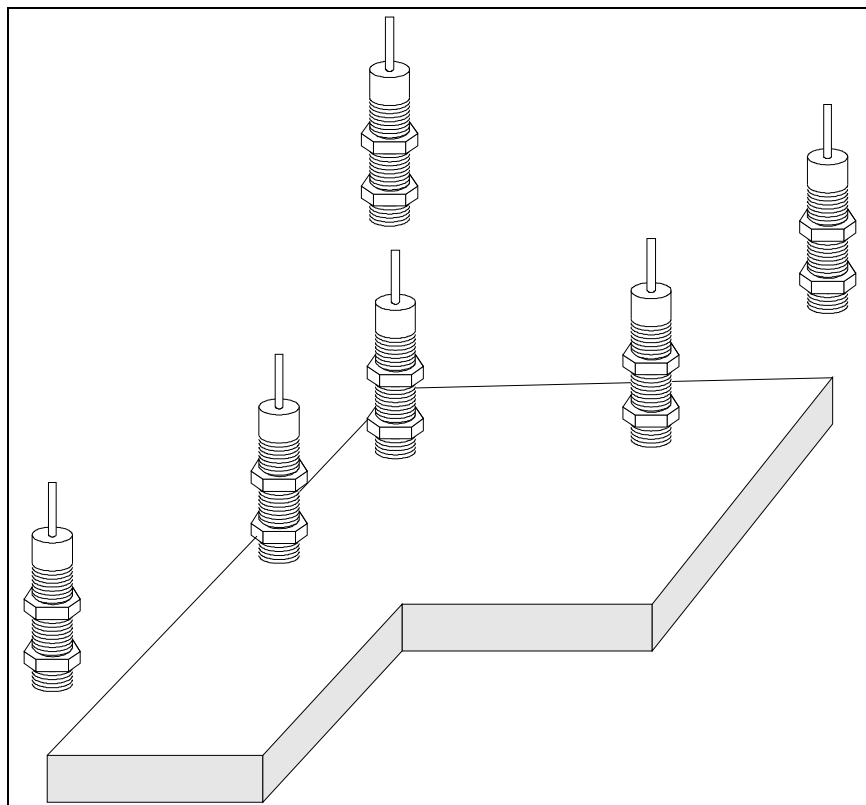


Slika 2.11: Ocenjevanje hitrosti

2.3. Primeri uporabe



Slika 2.12: Dodatno preprečevanje nesreče s tipali (osnovno zaščito dosežemo s sistemom dvoročnega vklopa)



Slika 2.13: Zaznavanje obrisa objekta

2.3. Primeri uporabe

Naloge

NALOGA 2.1

Želimo zaznavati pozicijo pomičnega batnega cilindra. Kakšno vrsto bližinskega tipala lahko uporabimo? Skicirajte, kako bi ga namestili.

NALOGA 2.2

Po tekočem traku prihajajo kovinski elementi različnih oblik, vendar iz enake snovi. S kakšno vrsto tipala jih lahko zaznavamo? Skicirajte namestitev tipala.

NALOGA 2.3

S kombinacijo tipal bi radi izmerili hitrost vrtenja zobatega kolesa in določili smer vrtenja. Koliko tipal moramo izbrati, katera in kako naj bodo nameščena?

NALOGA 2.4

Skicirajte, kako bi z bližinskim tipalom zaznavali končni položaj premičnega dela elektro-hidravlične preše?

NALOGA 2.5

Po tekočem traku prihajajo jekleni predmeti enake oblike, ki jih želimo šteti z bližinskim tipalom. Kakšno tipalo bomo izbrali? Skicirajte njegovo namestitev.

NALOGA 2.6

Kako bi lahko s kapacitivnimi bližinskimi tipali ocenjevali nivo tekočine v neprozorni posodi? Naštejte več možnih rešitev.

NALOGA 2.7

Plastične steklenice s čistilom pakiramo v kartonaste škatle. Kakšna tipala bi morali izbrati in kako bi jih morali namestiti, da bi lahko zaznavali, ali so kartonaste škatle polne?

NALOGA 2.8

Želimo zaznavati, ali so navoji na vijakih vrezani. S kakšnim tipalom si lahko pomagamo in kako?

NALOGA 2.9

S preprosto skico prikažite vsaj štiri postopke, s katerimi bi bilo mogoče signalizirati polnost shranjevalnika s tekočino ali sipkim materialom.

3.

Merjenje temperature v procesni industriji

Temperatura je ena izmed najpomembnejših fizikalnih veličin našega vsakdanjika. Ustrezno izmerjena lahko veliko pove o stanju nas samih (telesna temperatura), naše okolice (hidrometeorološka meritev), našega prevoznega sredstva (temperatura olja v avtomobilu), procesa, ki ga vodimo (temperatura medija v kemijskem reaktorju) itd. Osredotočimo se le na zvezno merjenje temperature v procesni industriji, ki jo namenjamo vodenju procesov s pomočjo regulacijskih (tudi računalniških) sistemov. V ta namen potrebujemo merilne sisteme, ki pretvarjajo merjeno veličino v ustrezni "komunikacijski" signal. Pri sodobnem merjenju temperature je to pretežno standardni tokovni signal 4-20 mA, ostale oblike (različni tokovni in napetostni signali, pnevmatski signal, digitalno kodirani signali itd.) pa so bodisi redko v uporabi, v zatonu ali v počasnem prodiranju v vsakdanjo prakso.

3.1. Pogosto uporabljena tipala za temperaturo

Temperaturo je mogoče zaznati na veliko načinov, toda v praktični uporabi so najbolj razširjena predvsem naslednja tipala:

- uporovna tipala (Pt-100, Pt-500, Pt-1000),

Merjenje temperature v procesni industriji

- termočleni,
- NTC uporovna tipala,
- polprevodniška integrirana tipala.

Z uporabo teh tipal lahko zadovoljimo večino potreb merjenja temperature, za nekatere posebne primere pa seveda potrebujemo tudi druge merilne principe in tipala (npr. pirometer za brezkontaktno merjenje). Tabela 3.1 podaja nekatere najpomembnejše lastnosti naštetih tipal.

3.1. Pogosto uporabljena tipala za temperaturo

Tabela 3.1: Pregled najpomembnejših lastnosti najbolj razširjenih temperaturnih tipal

| | UPOROVNO TIPALO (Pt-100) | TERMOČLENI | *NTC - UPORI | POLPREVODNIŠKO INTEGR. TIPALO |
|-------------------------------------|--|--|---|---|
| Temperaturno bomočje | -200°C do 850°C | -250°C do 1700°C | -55°C do 350°C | -55°C do 150°C |
| Praktično primerno temp. območje | -200°C do 600°C | 400°C do 1700°C | -55°C do 150°C | -55°C do 150°C |
| občutljivost | majhna | majhna | visoka | zmerna |
| Nelinearnost | 0.385Ω/°C @ 0°C | 10 - 80 μV/°C | 1.5 do 6%/°C | 10mV/°C, 1μA/°C |
| Natančnost | majhna-dobro definirana | izražena | zelo izrazita | majhna |
| Stabilnost | največja | zadovoljiva | slaba do zadovoljiva | zadovoljiva |
| Odpornost proti mehanskim poškodbam | najboljša | slaba do zadovoljiva | slaba do zadovoljiva | slaba do zadovoljiva |
| Potrebno napajanje tipala | zadovoljiva | visoka | dobra | dobra |
| Zahtevnost pretv. elektrone | DA | NE | DA | DA |
| Cena tipala | visoka | visoka | majhna | zelo majhna |
| Odziv | visoka | nizka, srednja | zelo nizka | nizka |
| Najznačilnejša področja uporabe | počasen kemijska in procesna industrija do 600°C, npr. temp. zraka, plinov, vode, reagentov, v kemijskih reaktorjih, temperaturna kompenzacija pH in merilnikov vlažnosti itd | hitro kemijska in procesna industrija 400-1700°C, predvsem pri vodenju zgorevanja, taljenju stekla in kovin itd | počasen do zmeren avtomobili (temp. motorja, zraka itd), klimatske naprave, zaščita elektromotorjev, temperaturne kompenzacije itd | počasen do zmeren klimatske naprave, temperaturne kompenzacije |

*obstajajo tudi posebni linearizirani NTC upori, ki imajo odlično linearnost in visoko občutljivost (npr. YSI Incorporated)

Uporovno tipalo iz platinastega uporovnega navitja ali nanosa (Pt uporovno tipalo) sodi med najnatančnejša in izjemno stabilna temperaturna tipala in ga uporabljajo tudi metrološki laboratoriji za najnatančnejše meritve. Zaradi nekaterih odličnih lastnosti in sodobnih izvedb pretvorniških modulov poskušamo ta tipala uporabiti za merjenja temperatur v območju do $+600^{\circ}\text{C}$ v vseh aplikacijah v procesnih in kemijskih industrijah. Problemi, ki jih povzročajo uporaba termočlenov, ne odtehtajo več višje cene merilnih sistemov s Pt upori. Za temperature nad 600°C so Pt uporovna tipala manj primerna, ker nastopi problem termičnega raztezanja keramičnega nosilca uporovnega elementa. Zato za tovrstna merjenja skoraj izključno uporabimo **termočlene**.

Na tržišču je mogoče najti veliko število različnih **termočlenov**. Najznačilnejše so naslednje kombinacije:

| | | | |
|---|------------------|---|----------------------|
| E | NiCr - Const | T | Cu - Const |
| J | Fe - Const | B | Pt 30% Rh - Pt 6% Rh |
| K | NiCr - NiAl | R | Pt 13% Rh - Pt |
| N | Nicrosil - Nisil | S | Pt 10% Rh - Pt |

Evropski izbor je ožji in zajema kombinacije J, K(N), T in R. Z ozirom na čedalje "popularnejšo" uporabo Pt merilnih sistemov se v praksi odločamo predvsem za kombinacijo K (NiCr - NiAl) oziroma stabilnejšo izvedbo N (Nicrosil - Nisil) za merjenje temperatur od 600°C (400°C) do 1100°C , za visoke temperature nad 1100°C pa za tip R (Pt 13% Rh - Pt). Ostale kombinacije postajajo manj primerne in se jih v bodoče izogibajmo!

NTC upore odlikuje izjemna občutljivost in cenenost pretvorniške elektronike. Hkrati njihova nelinearnost omejuje področje uporabe le na nekatere cenovno kritične in manj zahtevne primere uporabe, kot npr. merjenje temperatur avtomobilskih motorjev ali temperature zraka v klimatizacijskih napravah. Na tržišču pa je mogoče dobiti tudi nekatere posebne izvedbe NTC uporov z odlično linearizirano karakteristiko, vendar njihova bistveno višja cena zelo omejuje njihovo področje uporabe.

Integrirana polprevodniška tipala (npr. AD590, LM135) se odlikujejo po izjemno enostavnem načinu uporabe, saj je pretvorniški del elektronskega vezja že integriran na istem substratu kot tipalo - oziroma tipalo je že del pretvorniškega vezja. Zaradi problema lastnega gretja pa so izhodni tokovi oziroma napetosti zelo majhne in jih je zato potrebno še dodatno ojačevati. Ozko temperaturno območje in problemi z mehansko zaščito tipala še nadalje zmanjšujejo področje uporabe.

3.2. Nekateri problemi pri merjenju temperature s Pt uporovnimi tipali

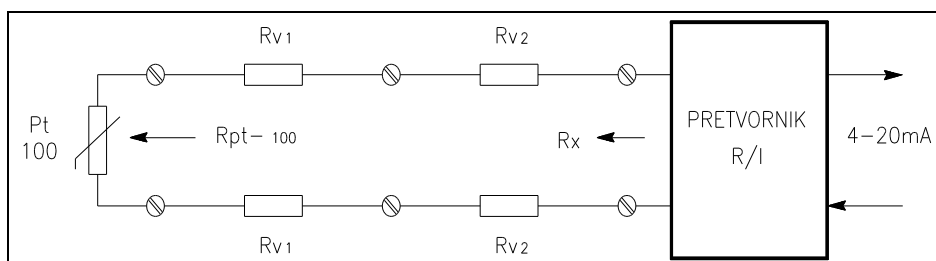
V sistemih procesnega vodenja jih zasledimo predvsem kot tipala temperature iz-otermičnih spenk za povezavo termočlenov na pretvorniške enote.

3.2. Nekateri problemi pri merjenju temperature s Pt uporovnimi tipali

1. Povezava Pt-100 upora z merilnim pretvornikom

Relativno nizka upornost Pt-100 uporovnega tipala povzroča nekaj problemov pri povezavi z oddaljenim pretvornikom za pretvorbo v standardni tokovni signal. Do izraza namreč pridejo upornosti priključnih vodov in kontaktov na priključnih letvah.

V preprosti dvožični povezavi (Slika 3.1) merilni pretvornik meri upornost celotne napeljave.



Slika 3.1: Dvožična povezava Pt-100 tipala z merilnim pretvornikom

Ocenimo vpliv vodov v naslednjem primeru:

dolžina vodov: 100 m

material žil: Cu $\phi = 0.6$ mm

upornost žil pri 20°C: 0.0593 Ω/m

celotna upornost vodov: $R_v = 2 \cdot 100m \cdot 0.0593\Omega/m = 11.86\Omega$

Če izrazimo upornost vodov v ekvivalentu temperature tipala Pt-100, katerega občutljivost v območju 0-100°C znaša 0.385 $\Omega/^\circ C$, potem priključni vodi merjeno temperaturo "povečajo" za:

$$\Delta T = 11.86\Omega / 0.385\Omega / ^\circ C = 30.8^\circ C$$

Taka razlika je seveda nedopustna! Če izvedemo zares dobro kontaktno povezavo na kontaktnih letvah, smemo ta "prirastek" temperature odšteti oziroma kompenzirati v merilnem pretvorniku. Toda ...! Tudi bakreni vodniki s spreminjanjem temperature okolice spreminjajo svojo upornost. Če bi se v zgornjem primeru temperatura okolice, kjer so položeni signalni vodniki, spremenila od zime do poletja za $50^\circ C$ (od $-15^\circ C$ do $+35^\circ C$), bi se v tem času upornost vodov povečala za (ocena):

$$\Delta R = R_V \cdot \alpha_{Cu} \cdot \Delta T_0 = 11.86\Omega \cdot 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 2.31\Omega$$

Ta sprememba upornosti vodov bi povzročila spremembo izmerjene temperature za:

$$\Delta T = 2.31\Omega / 0.385\Omega / ^\circ C = 6^\circ C$$

Tako velika sprememba je v večini primerov daleč nad sprejemljivo mejo natančnosti merjenja temperature v procesni industriji!

Vpliv priključnih vodov lahko zmanjšamo na več načinov. Najprej za povezavo uporabimo bistveno debelejša vodnike (običajno s premerom 1.5 mm^2). Nadaljnje izboljšanje dosežemo s trožično povezavo med tipalom in merilnim pretvornikom (slika 3.2).

PRIMER 3.1 (TROŽIČNA POVEZAVA V MERILNI MOSTIČ)

Mostič je uravnotežen le v primeru, ko je $R_x = R_3$, kar pomeni le pri eni temperaturi.

Ta vezava se uporablja zelo pogosto, vendar izhodna napetost ni linearno odvisna od upornosti R_x .

Idealno:

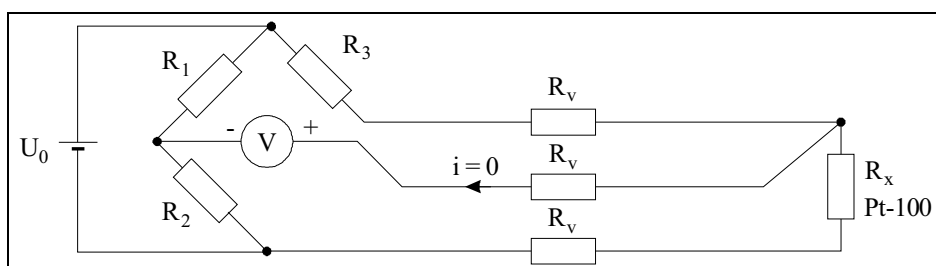
$$V = U_0 \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} \right) \quad (3.1)$$

Trožična vezava:

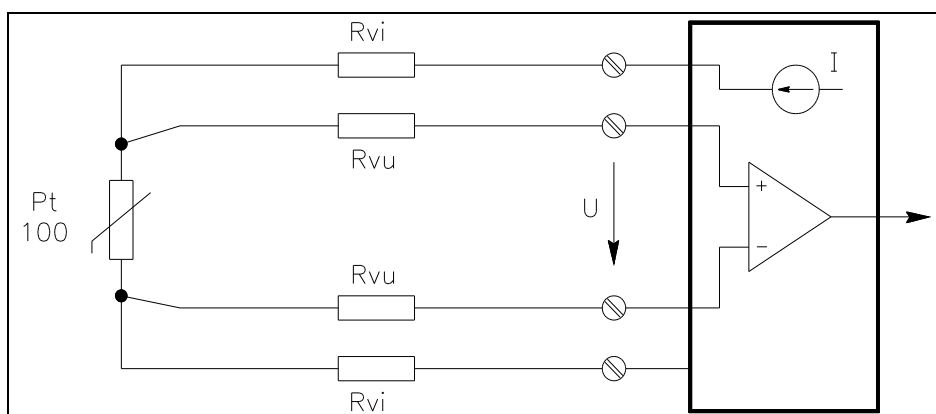
$$V = U_0 \left(\frac{R_x + R_v}{R_3 + R_x + 2R_v} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (3.2)$$

Opozoriti pa velja, da taka vezava, ki je sicer zelo razširjena, omogoči le avtomatsko kompenzacijo izhodiščne upornosti vodov (iz prejšnjega primera

3.2. Nekateri problemi pri merjenju temperature s Pt uporovnimi tipali



Slika 3.2: Trožična povezava v merilni mostič



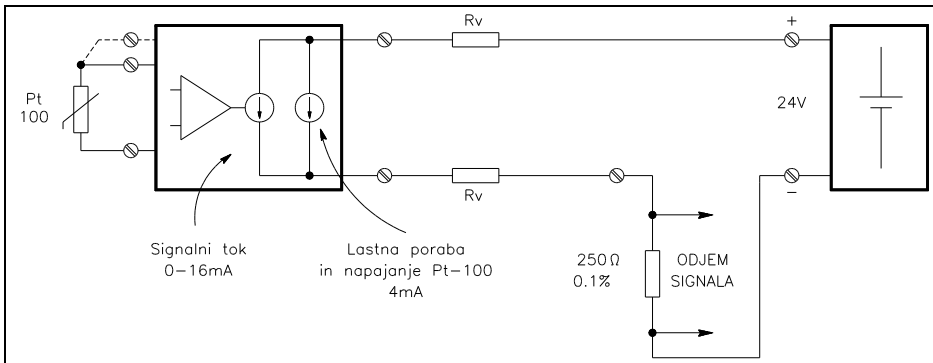
Slika 3.3: Štirižična povezava Pt-100 tipala z merilnim pretvornikom

30.8°C), ne izloči pa vpliva upornosti vodov na merilni obseg pretvornika. Za natančno daljinsko merjenje temperature je primerna štirižična vezava (Kelvinova vezava), ki jo prikazuje slika 3.3. Pri tej vezavi tipalo napaja elektronski izvor konstantnega toka I , ki ta tok vsiljuje tipalu neglede na upornost napajalnih vodov R_{vi} . Tudi upornosti tipalnih vodov R_{vu} ne pride do izraza, ker po njima tečeta le zanemarljivo majhna tokova merilnega ojačevalnika.

Štirižična vezava je žal malo cenjena zaradi velikega števila žic, ki jih je potrebno napeljati do posameznega tipala. Kljub temu tro- in štirižično povezavo pogosto uporabljamo, saj nekateri regulatorji in računalniški sistemi za vodenje nudijo možnosti direktne priključitve Pt uporovnih tipal

(običajno preko dodatnih elektronskih modulov).

Zelo elegantno rešitev pa omogočajo sodobni merilni pretvorniki, ki jih vgradimo neposredno s standardizirano glavo Pt uporovnega tipala ali v njegovo neposredno bližino. Problem priključnih vodov popolnoma odpade. Tok žive ničle 4mA hkrati služi za daljinsko napajanje merilnega pretvornika, zato za povezavo potrebujemo le en par vodnikov. Pri uporabi teh pre-



Slika 3.4: Uporaba in povezava merilnega pretvornika za Pt uporovno tipalo z montažo v glavi tipala in dvožičnim prenosom

tvornikov moramo biti previdni. Večina dosegljivih pretvornikov tega tipa nima vgrajene galvanjske izolacije med vhom in izhodom pretvornika, kot to velja za večino Pt merilnih pretvornikov, ki jih ne vgrajujemo neposredno v glavo tipala (problem majhnih dimenzij). Galvanska izolacija normalno niti ni potrebna, če je tipalo električno dobro ločeno od okolice. Parazitni tokovi, ki bi tekli od uporovnega tipala proti okolici, namreč bistveno pokvarijo merilni rezultat oziroma meritev celo onemogočijo. Zato moramo v tem primeru še posebej paziti, da je tipalni uporovni element dobro izoliran in hermetično zaprt, da preprečimo kondenzacijo vlage in prisotnost korozivnih plinov. Z malo pazljivosti s temi pretvorniki dosežemo odlične merilne rezultate in zanesljivo delovanje.

2. Lastno gretje uporovnega tipala

Če želimo elektronsko meriti upornost, moramo merjeni upor napajati s tokom. Ta tok pa povzroča na tipalu lastno gretje z močjo

$$P = I_{ref}^2 \cdot R_{tipala} \quad (3.3)$$

3.2. Nekateri problemi pri merjenju temperature s Pt uporovnimi tipali

Če je stik tipala z merjenim medijem slab (npr. mirujoči zrak), lahko odstopanje doseže tudi 1°C za vsak mW moči na tipalu.

Problem je manj izrazit pri manjših merilnih tokovih, vendar vrednosti pod 1 mA zaradi drugih razlogov niso praktično uporabne. Kot uporabniki teh tipal na velikost tega toka običajno nimamo vpliva, lahko pa pri montaži poskrbimo za čimboljši stik tipala z medijem, kar lahko bistveno zmanjša vpliv lastnega gretja (npr.: ker je hitrost zraka ob steni zračnega voda ali na notranjem delu zavoja najmanjša, tipalo namestimo dovolj globoko v zračni vod - vpliv lastnega gretja zmanjšamo za nekajkrat). Pri tipalih z višjo nazivno upornostjo (npr. Pt-1000) je za isto občutljivost napajalni tok lahko manjši. Zaradi tega je manjše tudi lastno gretje upora.

3. Vpliv temperaturne prevodnosti

Uporovna tipala so pogosto zaščitena s kovinskim plaščem iz nerjavečega jekla. Ta plašč odvajata del toplote od merjenega medija proti okolici (običajno bistveno hladnejši). Toploto prav tako odvajajo priključni vodi Pt upora. Vpliv je lahko zelo velik, zmanjšamo pa ga tako, da tipalo namestimo dovolj globoko v merjeni medij in da preprečimo preprih preko zunanega dela tipala (priključne glave) z dodatno izolacijo. Globino namestitve tipala moramo določiti eksperimentalno - najbolje s pomožnim tipalom večje dolžine, ki ga počasi vbadamo v merjeni medij. Ko postane razlika v kazanju dovolj majhna (npr. $< 1^{\circ}\text{C}$), izmerimo vbadno dolžino in izberemo tipalo ustrezne dolžine.

4. *Odvisnost hitrosti odziva od pretoka medija*

Pri počasi se gibajočem mediju je prenos toplote od medija proti tipalu počasnejši, zato je tudi odziv tipala počasnejši. Kadar pričakujemo tak problem, poskušamo tipalo namestiti na tisto mesto v merjenem sistemu, kjer pričakujemo največje hitrosti medija, npr. v zožitve, na zunanji obod zavojev, pred razdelitvami medija.

Posebej pozorni pa moramo biti pri nastavljanju parametrov regulatorja pripadajoče regulacijske zanke. Ker je odziv pri manjših pretokih medija počasnejši, je nevarnost nestabilnosti regulacijske zanke večja. Delovanje regulacijske zanke zato obvezno preverimo tudi pri majnih pretokih merjenega medija in po potrebi zmanjšajmo ojačenje (P) in povečamo integrirni čas (I) pripadajočega regulatorja.

5. Problematika instalacije uporovnih tipal

Čeprav so uporovna tipala, ki jih uporabljamo v industrijskih sistemih vodenja, vgrajena v robustno ohišje iz nerjavečega tulca in aluminijaste glave, moramo pri montaži paziti na naslednje probleme:

- če tipalo montiramo na že ogreti objekt (npr. med delovanjem), moramo s *počasnim* vbadanjem preprečiti prehitro segrevanje, ki bi povzročilo poškodbo keramičnega nosilca Pt upora oziroma keramične izolacije priključnih vodnikov. Nadzor vbadanja lahko opravimo tako, da na tipalo priključimo Ω -meter. Tipalo nato vbadamo tako počasi, da upornost raste pretežno s hitrostjo 0.3 do 0.5 Ω/s (za Pt-100).
- V mediju, ki se pretaka z veliko hitrostjo, lahko vrtinci povzročijo nihanje tipala in hitro odpoved. Zaradi tega in pa zaradi zaščite pred trdnimi delci (npr. pesek, kamenje itd) tipalo vgradimo v zaščitno cev, iz katere le rahlo štrli občutljivi del tipala. Zaščitna cev povzroča vrtince nižjih frekvenc, ki so manj nevarne za vzbuditev nosilca tipala v resonančno frekvenco. Med zagonom ali pri začetku obratovanja preverimo morebitna nihanja tipala in jih po potrebi zadušimo s skrajšanjem tipala ali pa s podaljšanjem zaščitne cevi.

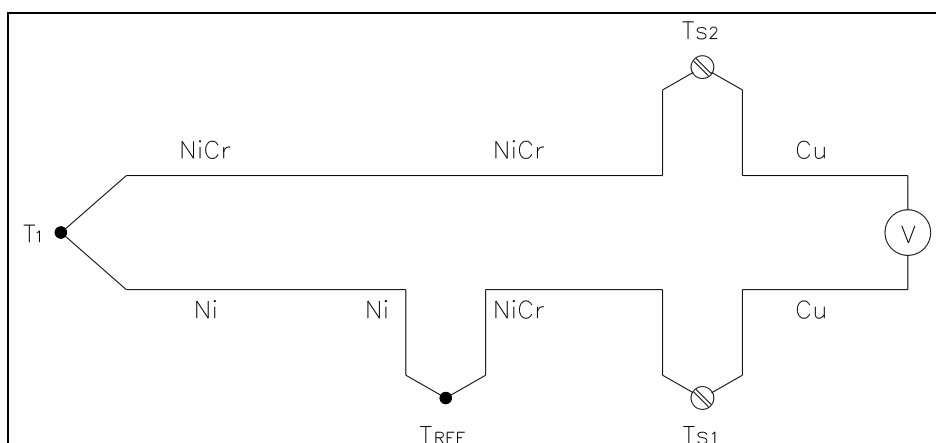
3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni

1. Osnovna merilna shema

Pri merjenju temperature s termočleni se moramo vedno zavedati, da je ta merilni način v osnovi diferenčnega značaja. Če na termočlen povežemo milivoltmeter, izmerimo napetost in iz tabel odčitamo ekvivalentno temperaturo, lahko naredimo velik sistematski pogrešek. Pravo merilno shemo prikazuje slika 3.5.

V pravilni merilni shemi se med seboj stikata le dve različni kombinaciji različnih kovin (tabela 3.2) - na sliki 3.5 sta to kombinaciji NiCr-Ni in NiCr-Cu. Slednja je posledica priključitve merilnega instrumenta. Obe priključni žici voltmetra (npr. iz Cu) se stikata z NiCr zlitino. Obe stičišči izvedemo na izotermičnih sponkah, s čimer poskrbimo za enakost temperatur TS1 in

3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni



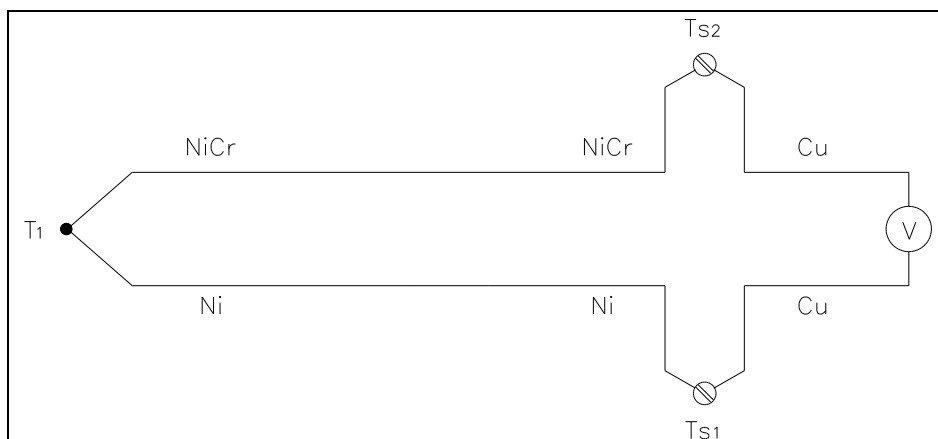
Slika 3.5: Popolna merilna shema za merjenje temperature s termočleni

TS2. V tem primeru se obe termoelektrični napetosti popolnoma kompenzirata in zato ne vplivata na merilni rezultat. Toda pri tej shemi "pridelamo" dodatni referenčni termočlen! Izmerjena napetost je proporcionalna razliki temperatur \rightarrow diferenčna meritev: $U = f(T_1 - T_{REF})$. Kam z njim?

Za natančno merjenje potopimo referenčni člen v mešanico voda-led, ki definira temperaturo 0°C . Za ta primer veljajo temperaturne tabele iz priložnikov in standardov. Vendar pa je vzdrževanje mešanice vode in ledu v industrijskem okolju silno neprikladno. Uporabimo lahko hladilnik s termostatom, lahko pa tudi grelnik s termostatom, ki vzdržuje temperaturo referenčnih termočlenov na 50°C .

V obeh naštetih primerih je merilni sistem relativno drag in zahteven. Zato težimo k rešitvi, ki jo prikazuje slika 3.6 - poskušamo opustiti referenčni termočlen.

Če zagotovimo enako temperaturo obeh priključnih sponk: $T_{S1} = T_{S2} = T_{REF}$ z uporabo izotermičnih sponk, lahko za večino industrijskih primerov kljub opustitvi referenčnega termočlena dovolj natančno izmerimo temperaturo T_1 . Izmerjena napetost je zopet odvisna od razlike temperatur: $U = f(T_1 - T_{REF})$. Temperature priključnih sponk ne smemo zanemariti! Če so nameščene v temperaturno stabilnem (klimatiziranem okolju), privzamemo za referenčno temperaturo - temperaturo okolice. Toda, če se



Slika 3.6: Enostavna povezava termočlena v merilni sistem

le-ta spreminja, se spreminja tudi merilni rezultat. Npr. če se poleti dvigne temperatura zraka v komandni sobi od 13°C zjutraj na $+33^{\circ}\text{C}$ popoldne, izmerjena napetost pade za vrednost, ki ustreza 20°C . Instrument bi pri isti temperaturi v reaktorju kazal 580°C namesto 600°C (izjemoma ne pri termočlenu tipa B).

Starejši merilni sistemi vsebujejo kompenzacijski mostič z NTC uporom v eni izmed vej. Ta meri temperaturo izotermičnih sponk, izhodna napetost mostiča pa je približno enaka napetosti, ki bi jo pri tej temperaturi dal uporabljeni termočlen. Ta napetost se prišteva k napetosti termočlena. Merilni rezultat tako postane praktično neodvisen od temperature okolice. Ta način je za sodobne sisteme vodenja postal nepraktičen (vsak mostič potrebuje svoje napajanje itd). Sodobni pretvorniki signala termočlena v standardni tokovni signal že vsebujejo polprevodniško tipalo temperature priključnih sponk in ustrezno elektronsko kompenzacijo. Enako so grajeni tudi posebni moduli elektronskih regulatorjev in računalniških sistemov za vodenje. Še posebej v tem primeru velja opozoriti, da moramo termočlene do vhodnih sponk pretvornika povezati z vodniki iz istega para kovin, kot ga vsebuje termočlen, ali pa moramo uporabiti cenejše nadomestke (t.i. kompenzacijske vode). V nobenem primeru ne smemo uporabiti bakrenih vodnikov!

Prav ta zadnja zahteva povzroča visoko ceno in zahtevnost instalacije merilnih sistemov s termočleni. Še posebej neprijetno pa je dejstvo, da so

3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni

izhodne napetosti termočlenov nizke in je zato možnost vpliva elektromagnetnih motenj zelo verjetna. Zato naj velja kot priporočilo, da poskušamo merilni pretvornik namestiti v neposredno bližino tipala s termočlenom, naprej pa vodimo tokovni signal 4-20mA, ki zagotavlja dovolj kvaliteten in neobčutljiv daljinski prenos. S tega stališča postaja uporabnost posebnih modulov z vhodi za termočlene, ki jih dodamo regulatorjem in računalniškimi sistemom za vodenje, zelo omejena in vprašljiva. Uporabimo jih le za majhne in zaključene sisteme, kjer so povezave med tipalom in regulacijskim sistemom zelo kratke. Taka neposredna povezava je primerna za cenovno občutljive aplikacije pri zaključenih strojih z velikim številom temperaturnih regulacij.

2. *Uporaba pretvorniških modulov za neposredno vgradnjo v glavo tipala s termočlenom*

Podobno, kot pri uporovnih tipalih, so tudi za tipala s termočleni že na voljo pretvorniški moduli, ki jih namestimo neposredno v glavo tipala. Dvožična povezava hkrati omogoča napajanje pretvornika in kvaliteten prenos signala v tokovni obliki (4-20mA). Ta rešitev je zelo elegantna, vendar moramo biti pri montaži previdni.

Ker termočlenska tipala uporabljamo pri visokih temperaturah, je običajno tudi temperatura okolice in s tem tudi temperatura glave tipala sorazmerno visoka. Del toplote na glavo tipala prenese tudi zaščitni plašč, ki je potopljen v merilni medij. Pretvornik v glavi je izpostavljen višji temperaturi. Ker pa smejo biti delovne temperature pretvornika največ do +85°C, moramo zelo paziti na hlajenje glave tipala. To lahko dosežemo z izbiro dovolj dolgega telesa tipala in z zagotovitvijo dovolj velikega pretoka zraka preko tipala (konvekcija). Nekateri proizvajalci pa sploh ne ponujajo pretvornikov za temperature višje od 600°C.

Drugi problem vgradnih pretvornikov je v tem, da med vhodom in izhodnimi sponkami nimajo galvanske izolacije, ki jo kvalitetni zunanji pretvorniki imajo. Če lahko zagotovimo kvalitetno izolacijo med termočlenom in zaščitnim plaščem tipala, problem galvanske izolacije ni pereč. Če pa izberemo tipalo s hitrim odzivom, pri katerem je termočlen v kontaktu z zaščitnim plaščem, je tak način neprimeren. Problem pojasnjuje slika 3.7.

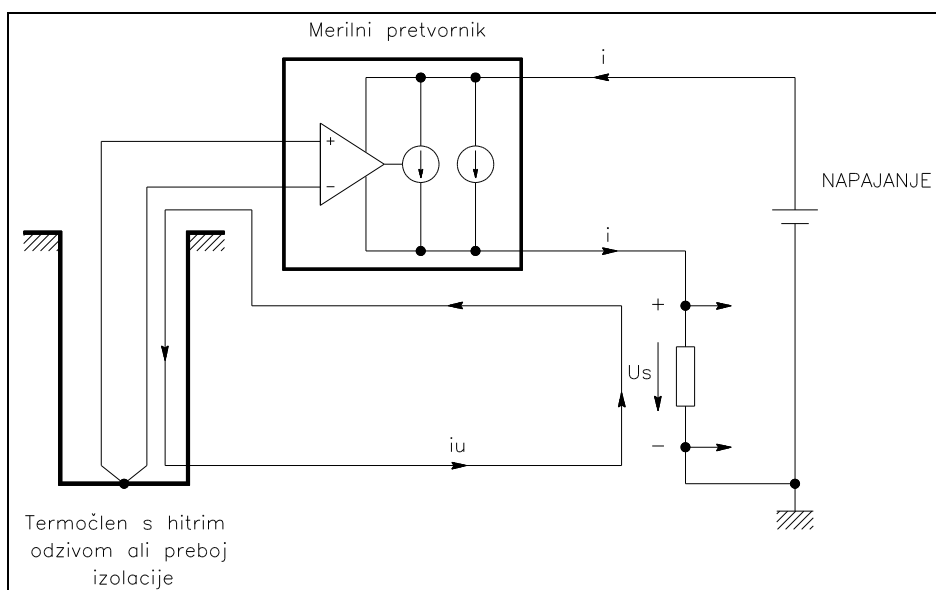
3. *Problemi montaže*

Čeprav so tipala s termočleni mnogo robustnejša od tipal s Pt upori, moramo

Tabela 3.2: Termopari

| Označba termočlena | Cu-Konst | | | Fe-Konst | | | NiCr-Ni | | | PtRh-Pt | | |
|--------------------------|------------------|---------------|------|---------------------------|---------------|------|------------------|---------------|------|------------------|---------------|-----|
| | baker | | | železo | | | nikelj-krom | | | platina-rodij | | |
| | osnovna vrednost | dov. odst. °C | % | osnovna vrednost | dov. odst. °C | % | osnovna vrednost | dov. odst. °C | % | osnovna vrednost | dov. odst. °C | % |
| +krak | | | | | | | | | | | | |
| -krak | | | | Konstantan (nikelj+baker) | | | | | | platina | | |
| merjena temperatura (°C) | | | | | | | | | | | | |
| -200 | -5.70 | - | - | -8.15 | - | - | | | | | | |
| -100 | -3.40 | - | - | -4.75 | - | - | | | | | | |
| 0 | 0 | - | - | 0 | - | - | 0 | - | - | 0 | - | - |
| 100 | 4.25 | 3 | - | 5.37 | 3 | - | 4.10 | 3 | - | 0.643 | 3 | - |
| 200 | 9.25 | 3 | - | 10.95 | 3 | - | 8.13 | 3 | - | 1.436 | 3 | - |
| 300 | 14.89 | 3 | - | 16.56 | 3 | - | 12.21 | 3 | - | 2.316 | 3 | - |
| 400 | 20.99 | 3 | - | 22.16 | 3 | - | 16.40 | 3 | - | 3.251 | 3 | - |
| 500 | 27.40 | - | 0.75 | 27.85 | - | 0.75 | 20.65 | - | 0.75 | 4.221 | 3 | - |
| 600 | 34.30 | - | 0.75 | 33.67 | - | 0.75 | 24.91 | - | 0.75 | 5.224 | 3 | - |
| 700 | | | | 39.72 | - | 0.75 | 29.14 | - | 0.75 | 6.260 | - | 0.5 |
| 800 | | | | 46.22 | - | 0.75 | 33.30 | - | 0.75 | 7.329 | - | 0.5 |
| 900 | | | | 53.14 | - | 0.75 | 37.36 | - | 0.75 | 8.432 | - | 0.5 |
| 1000 | | | | | | | 41.31 | - | 0.75 | 9.570 | - | 0.5 |
| 1100 | | | | | | | 45.16 | - | 0.75 | 10.741 | - | 0.5 |
| 1200 | | | | | | | 48.89 | - | 0.75 | 11.935 | - | 0.5 |
| 1300 | | | | | | | 52.46 | - | 0.75 | 13.138 | - | 0.5 |
| 1400 | | | | | | | | | | 14.337 | - | 0.5 |
| 1500 | | | | | | | | | | 15.530 | - | 0.5 |
| 1600 | | | | | | | | | | 16.716 | - | 0.5 |

3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni



Slika 3.7: Parazitni tok pri galvanško neizoliranem merilnem pretvorniku za vgradnjo v glavo tipala

pri montaži paziti:

- da je "stik" z merjenim medijem dovolj dober, sicer dobimo počasen odziv meritve in statično napako zaradi odvajanja toplote proti hladnemu koncu tipala,
- da preprečimo rezonantno nihanje tipala zaradi vrtincev v mediju,
- da pri montaži na ogretem objektu tipalo počasi ogrejemo na delovno temperaturo, sicer povzročimo pokanje keramične izolacije med vodniki termočlena.

4. Kvaliteta signalnih povezav

Kadar signale termočlenov, ki dosegajo napetosti 10 do 50mV, vodimo po daljši poti do merilnih pretvornikov, moramo paziti na nekaj pomembnih podrobnosti.

- Kot že omenjeno, mora biti celotna napeljava do izotermičnih sponk izvedena s pomočjo kompenzacijskih vodnikov, ki so narejeni iz istih

ali ekvivalentnih materialov, kot uporabljeni termočlen.

- Izogibajmo se vmesnih kontaktnih letev (celotna napeljava naj bo iz istega kosa). Vsak dodatni kontakt lahko prinese novo termoelektrično napetost.
- Spoji morajo biti dobro (hermetično) zaščiteni pred vplivi okolice.
Plini, ki skupaj z vlago tvorijo kisline, povzročijo na mestih spoja različnih kovin galvanski člen. Ta povzroča korozijo z električno napetostjo, ki je najmanj za velikostni razred višja od termoelektrične in bistveno zniža kvaliteto signala.
- Paziti moramo na kvaliteto izolacije med vodniki, kar dosežemo s kvalitetnim polaganjem signalnih vodov. Kratek stik med vodniki je namreč silno težko odkriti, saj je tudi termočlen iz električnega stališča v "kratkem stiku".

5. Vzdrževanje kvalitete merilnega rezultata

Pri visokotemperaturnih termočlenskih tipalih iz žlahtnih materialov (Pt, Rh) moramo biti še posebej pozorni pri izbiri in izvedbi zaščite tipala pred delovanjem medijev. Pogosto mora biti tudi zaščitni plašč tipala iz žlahtnega materiala kot termočlen sam. Pri visokih temperaturah lahko kovinske pare drugih materialov difundirajo v material termočlena in mu bistveno spremenijo termoelektrične lastnosti. Prav tako se moramo izogibati lokalnemu pregrevanju žic termočlenov in večjim mehanskim obremenitvam (npr. ostro zvijanje). Oboje lahko povzroči spremembe v strukturi materialov in s tem možnosti za nastanek parazitnih termočlenov.

6. Pazljivo vodenje dokumentacije o zamenjavi termočlenov

Še posebej pri servisni zamenjavi termočlenov je natančno in pazljivo vodenje dokumentacije silno pomembno. Ker je različnih tipov termočlenov veliko in so njihove izhodne napetosti pri istih temperaturah zelo podobne, zlahka pride do napačne zamenjave, ki jo je mogoče včasih opaziti šele, ko je proizvod tehnološkega postopka že uničen zaradi previsoke ali prenizke temperaturne obdelave. Tudi zaradi tega se pri izbiri, nakupu in skladiščenju rezervnih termočlenov odločajmo za čim ožji nabor, npr. le tipa K in R.

Primeri

PRIMER 3.2 (LINEARIZACIJA PRENOSNE KARAKTERISTIKE TERMOČLENOV)
Izhodna napetost termočlenov ni linearno odvisna od razlike merjenih temperatur. Med njima vlada kompleksna nelinearna odvisnost, ki jo je mogoče aproksimirati s polinomom visokega reda (9 ali več). Ker pri praktični uporabi potrebujemo odvisnost temperature od izmerjene termo-napetosti, je delo s polinomske aproksimacije precej neprikladno, še posebej, če jo hočemo programirati v cenene mikrokontrolerje s šibko aritmetično podporo. Računalniški sistemi in mikroprocesorski merilni pretvorniki zato običajno delujejo po metodi linearne interpolacije med dovolj gosto podanimi napetostmi pri izbranem temperaturnem koraku (npr. 10°C, 50°C, 100°C).

Naslednji primer služi kot prikaz stopnje nelinearnosti. Vzemimo, da obravnavamo termočlen NiCr-Ni v temperaturnem območju 0-600°C. Iz tabele 3.4 odčitamo, da je izhodna napetost pri 600°C enaka 24.902 mV. Če bi predpostavili linearno odvisnost med temperaturo in napetostjo, bi po enačbi premice njuno odvisnost opisali kot:

termočlen NiCr - Ni, referenčni par pri 0°C:

0°C ... 0 mV

600°C ... 24.9mV

$$T_x = 600^\circ\text{C} \cdot \frac{V_x}{24.9\text{mV}} \quad (3.4)$$

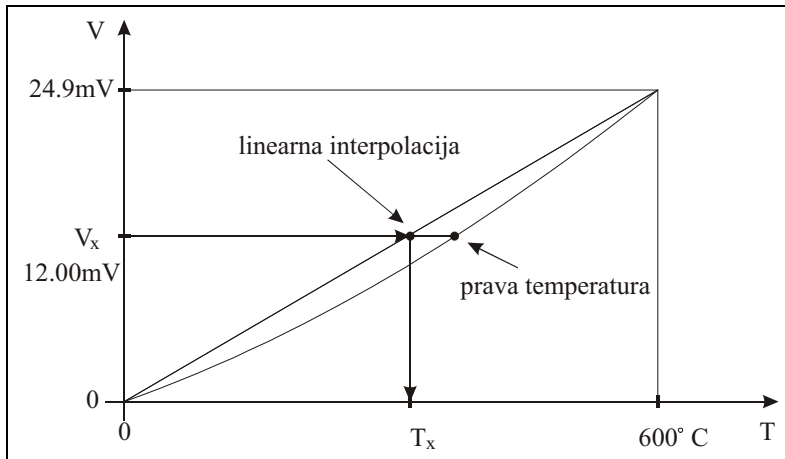
- Z mV-metrom npr. izmerimo 12.00 mV. Po linearni zvezi dobimo:

$$T_x = 600^\circ\text{C} \cdot \frac{12\text{mV}}{24.9\text{mV}} = 289.2^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

- iz tabele 3.4 odčitamo pri 12 mV \rightarrow 295°C
- razlika:

$$\begin{aligned} 289.2^\circ\text{C} - 295^\circ\text{C} &= -5.8^\circ\text{C} \\ \frac{-5.8^\circ\text{C}}{295^\circ\text{C}} \cdot 100\% &= -1.97\% \end{aligned} \quad (3.6)$$

Tolikšna razlika je v sodobni procesni industriji pogosto nedopustna. Linearno interpolacijo je zato treba izvesti v ožjih temperaturnih območjih.



Slika 3.8: Prikaz nelinearnosti termočlena NiCr-Ni v temperaturnem območju 0-600 °C

PRIMER 3.3

Podobno kot termočleni tudi uporovna tipala nimajo linearne karakteristike. Vendar je nelinearnost uporovnih tipal na osnovi platine bistveno manj izražena. Odvisnost upornosti od temperature je mogoče zelo natančno popisati z enačbo drugega reda (3.10) oziroma z enačbo tretjega reda za temperature pod lediščem.

Naslednji primer naj služi za oceno nelinearnosti tipala Pt-100 v območju 0-500°C. Iz enačbe (3.10) lahko za Pt-100 ($R_0 = 100\Omega$) izračunamo nazivni upornosti pri 0°C in 500°C:

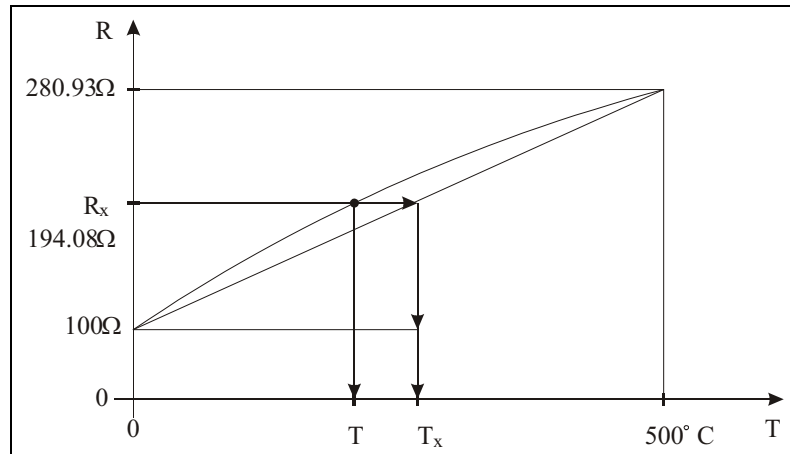
$$\begin{aligned} 0^\circ\text{C} &\rightarrow 100\Omega \\ 500^\circ\text{C} &\rightarrow 280.93\Omega \end{aligned}$$

Če bi na celem območju uporabili linearno interpolacijo, bi lahko na podlagi izmerjene upornosti R_x izračunali merjeno temperaturo kot:

$$T_x = 500^\circ\text{C} \cdot \frac{R_x - 100\Omega}{280.93\Omega - 100\Omega} = 500^\circ\text{C} \cdot \frac{R_x - 100\Omega}{180.93\Omega} \quad (3.7)$$

- Izmerimo npr.: 194.08Ω,

3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni



Slika 3.9: Ocena nelinearnosti uporovnega tipala Pt-100

- po enačbi dobimo

$$T_x = 500^{\circ}\text{C} \cdot \frac{194.08\Omega - 100\Omega}{180.93\Omega} = 259.99^{\circ}\text{C} \approx 260^{\circ}\text{C} \quad (3.8)$$

- na osnovi enačbe (3.10) lahko izračunamo "pravo" vrednost:
 $194.08\Omega \rightarrow 250^{\circ}\text{C}$
- razlika:

$$\begin{aligned} 260^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C} &= 10^{\circ}\text{C} \\ \frac{10^{\circ}\text{C}}{250^{\circ}\text{C}} \cdot 100\% &= 4\% \end{aligned} \quad (3.9)$$

Iz tega primera je razvidno, da tudi uporovnih tipal ni primerno obravnavati kot linearna tipala.

Standardizirana odvisnost:

$$\begin{aligned} R_T &= R_0 \cdot (1 + AT + BT^2) & (3.10) \\ A &= 0.390784076 \cdot 10^{-2} [(^{\circ}\text{C})^{-1}] \\ B &= -0.5784084 \cdot 10^{-6} [(^{\circ}\text{C})^{-2}] \\ R_0 &= 100\Omega \text{ za Pt-100} \end{aligned}$$

Merjenje temperature v procesni industriji

Tabela 3.3: Standardizirane upornosti tipala Pt-100 pri temperaturah -250°C do +850°C

| | | | | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| °C | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | -60 | -70 | -80 | -90 | -100 | Ω°C |
| -200 | 18.44 | 14.26 | 10.35 | 7.06 | 4.49 | 2.52 | - | - | - | - | - | - |
| -100 | 60.20 | 56.13 | 52.04 | 47.93 | 43.80 | 39.65 | 35.48 | 31.28 | 27.03 | 22.71 | 18.44 | 0.42 |
| 0 | 100.00 | 96.07 | 92.13 | 88.17 | 84.21 | 80.25 | 76.28 | 72.29 | 68.28 | 64.25 | 60.20 | 0.40 |
| °C | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | Ω°C |
| 0 | 100.00 | 103.90 | 107.79 | 111.67 | 115.54 | 119.40 | 123.24 | 127.07 | 130.89 | 134.70 | 138.50 | 0.385 |
| 100 | 138.50 | 142.28 | 146.06 | 149.82 | 153.57 | 157.32 | 161.04 | 164.76 | 168.47 | 172.16 | 175.84 | 0.373 |
| 200 | 175.84 | 179.51 | 183.17 | 186.82 | 190.46 | 194.08 | 197.70 | 201.30 | 204.88 | 208.46 | 212.03 | 0.361 |
| 300 | 212.03 | 215.58 | 219.13 | 222.66 | 226.18 | 229.69 | 233.19 | 236.67 | 240.15 | 243.61 | 247.06 | 0.350 |
| 400 | 247.06 | 250.50 | 253.93 | 257.34 | 260.75 | 264.14 | 267.52 | 270.89 | 274.25 | 277.60 | 280.93 | 0.338 |
| 500 | 280.93 | 284.26 | 287.57 | 290.87 | 294.16 | 297.43 | 300.70 | 303.95 | 307.20 | 310.43 | 313.65 | 0.327 |
| 600 | 313.65 | 316.86 | 320.05 | 323.24 | 326.41 | 329.57 | 332.72 | 335.86 | 338.99 | 342.10 | 345.21 | 0.315 |
| 700 | 345.21 | 348.30 | 351.38 | 354.45 | 357.51 | 360.55 | 363.59 | 366.61 | 369.62 | 372.62 | 375.61 | 0.304 |
| 800 | 375.61 | 378.59 | 381.55 | 384.50 | 387.45 | 390.38 | - | - | - | - | - | 0.295 |

Enačba za izračun temperature na podlagi izmerjene upornosti R_T :

$$T_x = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{R_T}{R_0})} - A}{2B} \quad (3.11)$$

v komponentah sistemov za procesno vodenje lahko nelinearnost Pt uporovnih tipal lineariziramo kar z elektronskimi vezji ali z mikroprocesorji in sicer računsko ali preko interpolacijskih tabel (tabela 3.3).

3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni

Tabela 3.4: Termoelektrična napetost v milivoltih za termočlen NiCr-Ni (prvi del)

| °C | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | °C |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| -270 | -6,458 | | | | | | | | | | | -270 |
| -260 | -6,441 | -6,444 | -6,446 | -6,448 | -6,450 | -6,452 | -6,453 | -6,455 | -6,456 | -6,457 | -6,458 | -260 |
| -250 | -6,404 | -6,408 | -6,413 | -6,417 | -6,421 | -6,425 | -6,429 | -6,432 | -6,435 | -6,438 | -6,441 | -250 |
| -240 | -6,344 | -6,351 | -6,358 | -6,364 | -6,371 | -6,377 | -6,382 | -6,388 | -6,394 | -6,399 | -6,404 | -240 |
| -230 | -6,262 | -6,271 | -6,280 | -6,289 | -6,297 | -6,306 | -6,314 | -6,322 | -6,329 | -6,337 | -6,344 | -230 |
| -220 | -6,158 | -6,170 | -6,181 | -6,192 | -6,202 | -6,213 | -6,223 | -6,233 | -6,243 | -6,253 | -6,262 | -220 |
| -210 | -6,035 | -6,048 | -6,061 | -6,074 | -6,087 | -6,099 | -6,111 | -6,123 | -6,135 | -6,147 | -6,158 | -210 |
| -200 | -5,891 | -5,907 | -5,922 | -5,936 | -5,951 | -5,965 | -5,980 | -5,994 | -6,007 | -6,021 | -6,035 | -200 |
| -190 | -5,730 | -5,747 | -5,763 | -5,780 | -5,796 | -5,813 | -5,829 | -5,845 | -5,860 | -5,876 | -5,891 | -190 |
| -180 | -5,550 | -5,569 | -5,587 | -5,606 | -5,624 | -5,642 | -5,660 | -5,678 | -5,695 | -5,712 | -5,730 | -180 |
| -170 | -5,354 | -5,374 | -5,394 | -5,414 | -5,434 | -5,454 | -5,474 | -5,493 | -5,512 | -5,531 | -5,550 | -170 |
| -160 | -5,141 | -5,163 | -5,185 | -5,207 | -5,228 | -5,249 | -5,271 | -5,292 | -5,313 | -5,333 | -5,354 | -160 |
| -150 | -4,912 | -4,936 | -4,959 | -4,983 | -5,006 | -5,029 | -5,051 | -5,074 | -5,097 | -5,119 | -5,141 | -150 |
| -140 | -4,669 | -4,694 | -4,719 | -4,743 | -4,768 | -4,792 | -4,817 | -4,841 | -4,865 | -4,889 | -4,912 | -140 |
| -130 | -4,410 | -4,437 | -4,463 | -4,489 | -4,515 | -4,541 | -4,567 | -4,593 | -4,618 | -4,644 | -4,669 | -130 |
| -120 | -4,138 | -4,166 | -4,193 | -4,221 | -4,248 | -4,276 | -4,303 | -4,330 | -4,357 | -4,384 | -4,410 | -120 |
| -110 | -3,852 | -3,881 | -3,910 | -3,939 | -3,968 | -3,997 | -4,025 | -4,053 | -4,082 | -4,110 | -4,138 | -110 |
| -100 | -3,553 | -3,584 | -3,614 | -3,644 | -3,674 | -3,704 | -3,734 | -3,764 | -3,793 | -3,823 | -3,852 | -100 |
| -90 | -3,242 | -3,274 | -3,305 | -3,337 | -3,368 | -3,399 | -3,430 | -3,461 | -3,492 | -3,523 | -3,553 | -90 |
| -80 | -2,920 | -2,953 | -2,985 | -3,018 | -3,050 | -3,082 | -3,115 | -3,147 | -3,179 | -3,211 | -3,242 | -80 |
| -70 | -2,586 | -2,620 | -2,654 | -2,687 | -2,721 | -2,754 | -2,788 | -2,821 | -2,854 | -2,887 | -2,920 | -70 |
| -60 | -2,243 | -2,277 | -2,312 | -2,347 | -2,381 | -2,416 | -2,450 | -2,484 | -2,518 | -2,552 | -2,586 | -60 |
| -50 | -1,889 | -1,925 | -1,961 | -1,996 | -2,032 | -2,067 | -2,102 | -2,137 | -2,173 | -2,208 | -2,243 | -50 |
| -40 | -1,527 | -1,563 | -1,600 | -1,636 | -1,673 | -1,709 | -1,745 | -1,781 | -1,817 | -1,853 | -1,889 | -40 |
| -30 | -1,156 | -1,193 | -1,231 | -1,268 | -1,305 | -1,342 | -1,379 | -1,416 | -1,453 | -1,490 | -1,527 | -30 |
| -20 | -0,777 | -0,816 | -0,854 | -0,892 | -0,930 | -0,968 | -1,005 | -1,043 | -1,081 | -1,118 | -1,156 | -20 |
| -10 | -0,392 | -0,431 | -0,469 | -0,508 | -0,547 | -0,585 | -0,624 | -0,662 | -0,701 | -0,739 | -0,777 | -10 |
| 0 | 0,000 | -0,039 | -0,079 | -0,118 | -0,157 | -0,197 | -0,236 | -0,275 | -0,314 | -0,353 | -0,392 | 0 |
| °C | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | °C |
| 0 | 0,000 | 0,039 | 0,079 | 0,119 | 0,158 | 0,198 | 0,238 | 0,277 | 0,317 | 0,357 | 0,397 | 0 |
| 10 | 0,397 | 0,437 | 0,477 | 0,517 | 0,557 | 0,597 | 0,637 | 0,677 | 0,718 | 0,758 | 0,798 | 10 |
| 20 | 0,798 | 0,838 | 0,879 | 0,919 | 0,960 | 1,000 | 1,041 | 1,081 | 1,122 | 1,162 | 1,203 | 20 |
| 30 | 1,203 | 1,244 | 1,285 | 1,325 | 1,366 | 1,407 | 1,448 | 1,489 | 1,529 | 1,570 | 1,611 | 30 |
| 40 | 1,611 | 1,652 | 1,693 | 1,734 | 1,776 | 1,817 | 1,858 | 1,899 | 1,940 | 1,981 | 2,022 | 40 |
| 50 | 2,022 | 2,064 | 2,105 | 2,146 | 2,188 | 2,229 | 2,270 | 2,312 | 2,353 | 2,394 | 2,436 | 50 |
| 60 | 2,436 | 2,477 | 2,519 | 2,560 | 2,601 | 2,643 | 2,684 | 2,726 | 2,767 | 2,809 | 2,850 | 60 |
| 70 | 2,850 | 2,892 | 2,933 | 2,975 | 3,016 | 3,058 | 3,100 | 3,141 | 3,183 | 3,224 | 3,266 | 70 |
| 80 | 3,661 | 3,702 | 3,743 | 3,784 | 3,825 | 3,866 | 3,907 | 3,948 | 3,989 | 4,030 | 4,071 | 80 |
| 90 | 4,071 | 4,112 | 4,153 | 4,194 | 4,235 | 4,276 | 4,317 | 4,358 | 4,399 | 4,440 | 4,481 | 90 |
| 100 | 4,508 | 4,549 | 4,590 | 4,632 | 4,673 | 4,714 | 4,755 | 4,796 | 4,837 | 4,878 | 4,919 | 100 |
| 120 | 4,919 | 4,960 | 5,001 | 5,042 | 5,083 | 5,124 | 5,164 | 5,205 | 5,246 | 5,287 | 5,327 | 120 |
| 130 | 5,327 | 5,368 | 5,409 | 5,450 | 5,490 | 5,531 | 5,571 | 5,612 | 5,652 | 5,693 | 5,733 | 130 |
| 140 | 5,733 | 5,774 | 5,814 | 5,855 | 5,895 | 5,936 | 5,976 | 6,016 | 6,057 | 6,097 | 6,137 | 140 |
| 150 | 6,137 | 6,177 | 6,218 | 6,258 | 6,298 | 6,338 | 6,378 | 6,419 | 6,459 | 6,499 | 6,539 | 150 |

Tabela 3.5: Termoelektrična napetost v milivoltih za termočlen NiCr-Ni (drugi del)

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| 160 | 6,539 | 6,579 | 6,619 | 6,659 | 6,699 | 6,739 | 6,779 | 6,819 | 6,859 | 6,899 | 6,939 | 160 |
| 170 | 6,939 | 6,979 | 7,019 | 7,059 | 7,099 | 7,139 | 7,179 | 7,219 | 7,259 | 7,299 | 7,338 | 170 |
| 180 | 7,338 | 7,378 | 7,418 | 7,458 | 7,498 | 7,538 | 7,578 | 7,618 | 7,658 | 7,697 | 7,737 | 180 |
| 190 | 7,737 | 7,777 | 7,817 | 7,857 | 7,897 | 7,937 | 7,977 | 8,017 | 8,057 | 8,097 | 8,137 | 190 |
| 200 | 8,137 | 8,177 | 8,216 | 8,256 | 8,296 | 8,336 | 8,376 | 8,416 | 8,456 | 8,497 | 8,537 | 200 |
| 210 | 8,537 | 8,577 | 8,617 | 8,657 | 8,697 | 8,737 | 8,777 | 8,817 | 8,857 | 8,898 | 8,938 | 210 |
| 220 | 8,938 | 8,978 | 9,018 | 9,058 | 9,099 | 9,139 | 9,179 | 9,220 | 9,260 | 9,300 | 9,341 | 220 |
| 230 | 9,341 | 9,381 | 9,421 | 9,462 | 9,502 | 9,543 | 9,583 | 9,624 | 9,664 | 9,705 | 9,745 | 230 |
| 240 | 9,745 | 9,786 | 9,826 | 9,867 | 9,907 | 9,948 | 9,989 | 10,029 | 10,070 | 10,111 | 10,151 | 240 |
| 250 | 10,151 | 10,192 | 10,233 | 10,274 | 10,315 | 10,355 | 10,396 | 10,437 | 10,478 | 10,519 | 10,560 | 250 |
| 260 | 10,560 | 10,600 | 10,641 | 10,682 | 10,723 | 10,764 | 10,805 | 10,846 | 10,887 | 10,928 | 10,969 | 260 |
| 270 | 10,969 | 11,010 | 11,051 | 11,093 | 11,134 | 11,175 | 11,216 | 11,257 | 11,298 | 11,339 | 11,381 | 270 |
| 280 | 11,381 | 11,422 | 11,463 | 11,504 | 11,546 | 11,587 | 11,628 | 11,669 | 11,711 | 11,752 | 11,793 | 280 |
| 290 | 11,793 | 11,835 | 11,876 | 11,918 | 11,959 | 12,001 | 12,042 | 12,083 | 12,125 | 12,166 | 12,207 | 290 |
| 300 | 12,207 | 12,249 | 12,290 | 12,332 | 12,373 | 12,415 | 12,456 | 12,498 | 12,539 | 12,581 | 12,623 | 300 |
| 310 | 12,623 | 12,664 | 12,706 | 12,747 | 12,789 | 12,831 | 12,872 | 12,914 | 12,955 | 12,997 | 13,039 | 310 |
| 320 | 13,039 | 13,080 | 13,122 | 13,164 | 13,205 | 13,247 | 13,289 | 13,331 | 13,372 | 13,414 | 13,456 | 320 |
| 330 | 13,456 | 13,497 | 13,539 | 13,581 | 13,623 | 13,665 | 13,706 | 13,748 | 13,790 | 13,832 | 13,874 | 330 |
| 340 | 13,874 | 13,915 | 13,957 | 13,999 | 14,041 | 14,083 | 14,125 | 14,167 | 14,208 | 14,250 | 14,292 | 340 |
| 350 | 14,292 | 14,334 | 14,376 | 14,418 | 14,460 | 14,502 | 14,544 | 14,586 | 14,628 | 14,670 | 14,712 | 350 |
| 360 | 14,712 | 14,754 | 14,796 | 14,838 | 14,880 | 14,922 | 14,964 | 15,006 | 15,048 | 15,090 | 15,132 | 360 |
| 370 | 15,132 | 15,174 | 15,216 | 15,258 | 15,300 | 15,342 | 15,384 | 15,426 | 15,468 | 15,510 | 15,552 | 370 |
| 380 | 15,552 | 15,594 | 15,636 | 15,679 | 15,721 | 15,763 | 15,805 | 15,847 | 15,889 | 15,931 | 15,974 | 380 |
| 390 | 15,974 | 16,016 | 16,058 | 16,100 | 16,142 | 16,184 | 16,227 | 16,269 | 16,311 | 16,353 | 16,395 | 390 |
| 400 | 16,395 | 16,438 | 16,480 | 16,522 | 16,564 | 16,607 | 16,649 | 16,691 | 16,733 | 16,776 | 16,818 | 400 |
| 410 | 16,818 | 16,860 | 16,902 | 16,945 | 16,987 | 17,029 | 17,072 | 17,114 | 17,156 | 17,199 | 17,241 | 410 |
| 420 | 17,241 | 17,283 | 17,326 | 17,368 | 17,410 | 17,453 | 17,495 | 17,537 | 17,580 | 17,622 | 17,664 | 420 |
| 430 | 17,664 | 17,707 | 17,749 | 17,792 | 17,834 | 17,876 | 17,919 | 17,961 | 18,004 | 18,046 | 18,088 | 430 |
| 440 | 18,088 | 18,131 | 18,173 | 18,216 | 18,258 | 18,301 | 18,343 | 18,385 | 18,428 | 18,470 | 18,513 | 440 |
| 450 | 18,513 | 18,555 | 18,598 | 18,640 | 18,683 | 18,725 | 18,768 | 18,810 | 18,853 | 18,895 | 18,938 | 450 |
| 460 | 18,938 | 18,980 | 19,023 | 19,065 | 19,108 | 19,150 | 19,193 | 19,235 | 19,278 | 19,320 | 19,363 | 460 |
| 470 | 19,363 | 19,405 | 19,448 | 19,490 | 19,533 | 19,576 | 19,618 | 19,661 | 19,703 | 19,746 | 19,788 | 470 |
| 480 | 19,788 | 19,831 | 19,873 | 19,916 | 19,959 | 20,001 | 20,044 | 20,086 | 20,129 | 20,172 | 20,214 | 480 |
| 490 | 20,214 | 20,257 | 20,299 | 20,342 | 20,385 | 20,427 | 20,470 | 20,512 | 20,555 | 20,598 | 20,640 | 490 |
| 500 | 20,640 | 20,683 | 20,725 | 20,768 | 20,811 | 20,853 | 20,896 | 20,938 | 20,981 | 21,024 | 21,066 | 500 |
| 510 | 21,066 | 21,109 | 21,152 | 21,194 | 21,237 | 21,280 | 21,322 | 21,365 | 21,407 | 21,450 | 21,493 | 510 |
| 520 | 21,493 | 21,535 | 21,578 | 21,621 | 21,663 | 21,706 | 21,749 | 21,791 | 21,834 | 21,876 | 21,919 | 520 |
| 530 | 21,919 | 21,962 | 22,004 | 22,047 | 22,090 | 22,132 | 22,175 | 22,218 | 22,260 | 22,303 | 22,346 | 530 |
| 540 | 22,346 | 22,388 | 22,431 | 22,473 | 22,516 | 22,559 | 22,601 | 22,644 | 22,687 | 22,729 | 22,772 | 540 |
| 550 | 22,772 | 22,815 | 22,857 | 22,900 | 22,942 | 22,985 | 23,028 | 23,070 | 23,113 | 23,156 | 23,198 | 550 |
| 560 | 23,198 | 23,241 | 23,284 | 23,326 | 23,369 | 23,411 | 23,454 | 23,497 | 23,539 | 23,582 | 23,624 | 560 |
| 570 | 23,624 | 23,667 | 23,710 | 23,752 | 23,795 | 23,837 | 23,880 | 23,923 | 23,965 | 24,008 | 24,050 | 570 |
| 580 | 24,050 | 24,093 | 24,136 | 24,178 | 24,221 | 24,263 | 24,306 | 24,348 | 24,391 | 24,434 | 24,476 | 580 |
| 590 | 24,476 | 24,519 | 24,561 | 24,604 | 24,646 | 24,689 | 24,731 | 24,774 | 24,817 | 24,859 | 24,902 | 590 |
| 600 | 24,902 | 24,944 | 24,987 | 25,029 | 25,072 | 25,114 | 25,157 | 25,199 | 25,242 | 25,284 | 25,327 | 600 |

Naloge

NALOGA 3.1

Na katere načine lahko uredimo problematiko referenčnih členov v sistemih merjenja temperature s termočleni (naštejte tri do štiri rešitve)?

3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni

NALOGA 3.2

Uporovno tipalo Pt-100 je vezano v Wheatstonov mostič, sestavljen iz uporov 100Ω . Napajamo ga z enosmerno napetostjo 2 V. Koliko znaša izhodna napetost mostiča pri temperaturah 100°C in 250°C , kjer je upornost Pt-100 tipala 138.05Ω oziroma 194.08Ω . Obremenitev mostiča z voltmetrom zanemarite!

NALOGA 3.3

Na kaj moramo paziti pri montaži temperaturnih tipal na že ogretyh objektih?

NALOGA 3.4

Termočlen NiCr-Ni opremimo z referenčnim členom pri 0°C . Izhodno napetost z ojačevalnikom primerno ojačimo in jo brez linearizacije priredimo za prikaz na digitalnem voltmetru tako, da voltmeter pri zgornji temperaturi 1000°C kaže pravilno vrednost. Koliko znaša napaka merjenja pri temperaturi 200°C (v $^\circ\text{C}$)? Nazivni napetosti termočlenov znašata:

$200^\circ\text{C} \dots 8.13\text{ mV}$

$1000^\circ\text{C} \dots 41.31\text{ mV}$

NALOGA 3.5

Karakteristiko NTC upora je mogoče približno opisati z naslednjo odvisnostjo:

$$R(T) = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad T[\text{K}]! \quad (3.12)$$

Izbrani upor ima naslednje parametre: $B=2000\text{ K}$, $R_0 = 100\Omega$ pri 25°C ($0^\circ\text{C}=273\text{ K}$). Določite upornost tega termistorja pri 0°C in 100°C . Izračunajte temperaturni koeficient (v $[1/\text{K}]$) pri 0°C . Kolikšen je le-ta v primerjavi s temperaturnim koeficientom Pt-upora, ki pri 0°C znaša $3.9 \cdot 10^{-3} / \text{K}$?

NALOGA 3.6

Merilni sistem s Pt-100 uporom sestavlja prezicni tokovni izvor $I_{ref}=10.000\text{ mA}$ in ustrezní ojačevalnik za merjenje padca napetosti na Pt-100 merilnem uporu. Skicirajte vezavo in komentirajte vpliv upornosti priključnih vodov!

Ocenite, kolikšno napako (v $^\circ\text{C}$) povzroča lastno segrevanje merilnega upora pri 350°C zaradi napajalnega toka, če je termična upornost merilnega upora približno $0.5^\circ\text{C}/\text{mW}$!

Merjenje temperature v procesni industriji

NALOGA 3.7

Meriti želimo temperaturo plina v območju od 10 do 90°C. Na razpolago imamo nekaj uporovnih tipal, katerih karakteristike pa ne poznamo. Na kratko opišite (narišite) kako bi prišli do potrebne informacije za ustrezno izbiro tipala! Naštejte tri značilne predstavnike, katerim z višanjem temperature upornost narašča!

NALOGA 3.8

Na razpolago imamo diodo, uporovno tipalo Pt-100 in termistor. Katere od naštetih temperaturnih pretvornikov bi uporabili, če bi želeli:

- čim cenejšo opremo;
- čim bolj linearno karakteristiko pretvornika;
- čim boljšo občutljivost meritve.

Pojasnilo: napetost kolena silicijevih polprevodniških diod, ki znaša približno 600 mV pri toku 1 mA, ima temperaturni koeficient 2-2.2 mV/°C. Za vsak posamezen primer utemeljite izbiro!

NALOGA 3.9

Na osnovi tabelarično podane odvisnosti upornosti Pt-100 upora od temperature določite upornost Pt-100 pri 314°C! Rezultat naj bo zaokrožen na 2 decimalki.

NALOGA 3.10

Termočlen NiCr-Ni opremimo z refererenčnim členom pri 0°C. Izhodno napetost z ojačevalnikom primerno ojačimo in jo brez linearizacije priredimo za prikaz na digitalnem voltmetru tako, da ta pri spodnji temperaturi 200°C in zgornji temperaturi 1000°C kaže pravilni vrednosti. Koliko znaša napaka merjenja pri temperaturi 500°(v °C)? Nazivne napetosti termočlenov znašajo:

3.3. Nekateri problemi pri merjenju temperature s termočleni

200°C ... 8.13 mV

500°C ... 20.65 mV

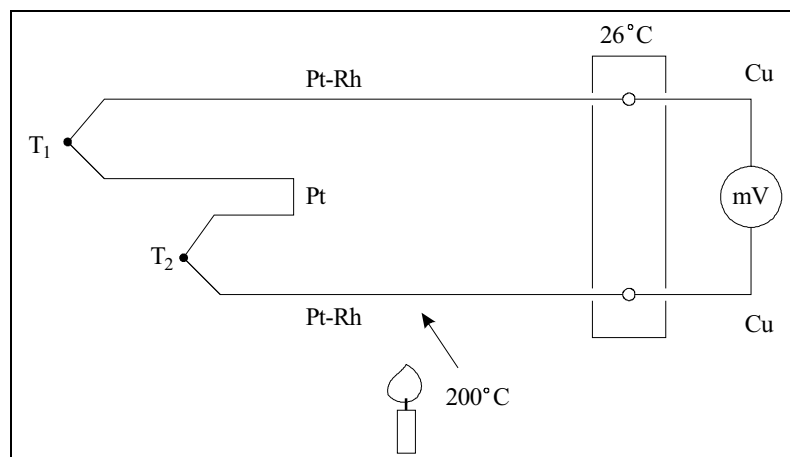
1000°C ... 41.31 mV

NALOGA 3.11

Merilni sistem na sliki 3.10 meri temperaturo $T_1 = 1020^\circ\text{C}$. Preko izotermičnih sponk je povezan na mV-meter.

- Kaj predstavlja temperatura $T_2 = 50^\circ\text{C}$?
- Koliko kaže mV-meter?
- Koliko bi kazal mV-meter, če bi drugi par potopili v ledeno-vodno kopel?
- Koliko bi se spremenil odklon, če bi spodnji vod na sredini segreti na 200°C ?

Pojasnilo: po "zakonu vmesnih temperatur" spreminjanje temperature priključnih žic termočlenov v zmernem območju ne vpliva na merilni rezultat.



Slika 3.10: Merilni sistem

4.

Merjenje tlaka v procesni industriji

Merjenje tlaka v procesni industriji je ob merjenju temperature druga najpomembnejša fizikalna veličina, ki lahko veliko pove o stanju procesa in procesne instalacije. Merjenje tlaka je pogosto tudi sekundarna meritev, s katero realiziramo meritve pretokov, nivojev, gostote. Prav zaradi teh številnih možnosti in pogostnosti uporabe so merilniki tlaka s pretvornikom v standardni tokovni signal 4-20 mA najbolj razširjeni in tehnološko najbolj izdelani ("izpiljeni") pretvorniški sistem za procesno in kemično industrijo. Tlačne pretvornike izdelujejo in razvijajo vsi najpomembnejši proizvajalci, ki se sicer ukvarjajo z izdelavo komponent za procesno vodenje.

Tlak lahko merimo absolutno ali relativno. Absolutno meritev v procesni industriji sicer redkeje zasledimo, čeprav bi jo v marsikaterem primeru morali upravičeno uporabiti. Uporabiti bi jo morali v primerih, ko potek procesa ni odvisen od normalnega tlaka, temveč od absolutnega tlaka, npr. pri kemijskih reakcijah. Kljub temu absolutno meritev pogosto nadomešča kar normalna meritev tlaka. Pri normalni meritvi tlaka namreč merimo tlak relativno proti atmosferskemu tlaku.

Pri diferencialnih merilnikih tlaka moramo vedno definirati tudi referenčni tlak. Ta je lahko npr. tlak na izstopni strani merilne zaslonke ali tlak v zgornjem delu zaprtega shranjevalnika pri hidrostatičnem merjenju nivoja. Včasih diferencialni merilnik uporabimo tudi kot normalni merilnik (za majhne tlake) in s tem

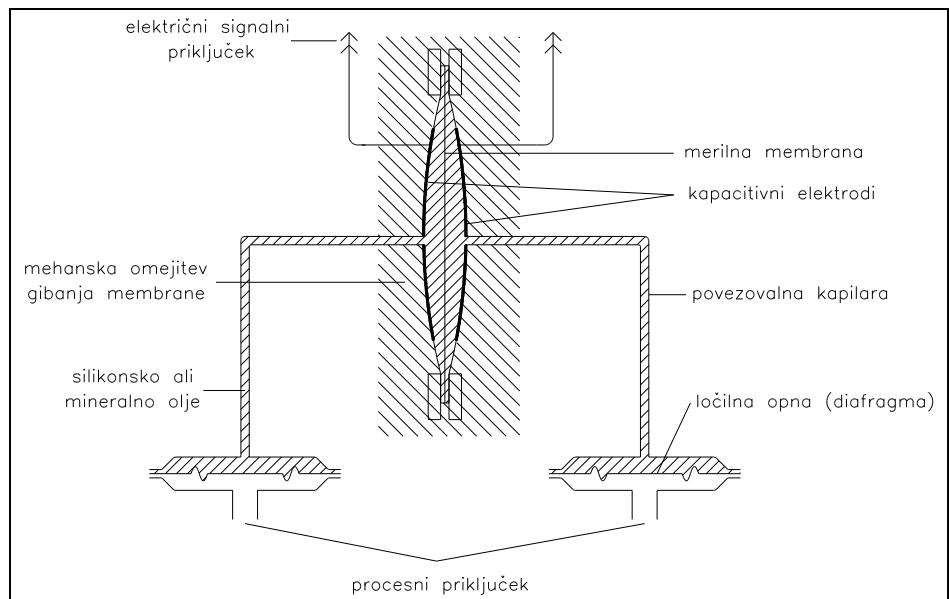
zmanjšamo število različnih komponent merilno-regulacijske opreme. V tem primeru je referenčni priključek (-) merilnika odprt proti okolici.

Osnovni princip merjenja tlaka je pri vseh merilnikih za splošno uporabo praktično enak: v merilni komori je nameščena elastična membrana, ki se pod vplivom razlike tlakov na njej upogne v eno stran. Merjeni medij lahko deluje na membrano neposredno ali pa preko vmesnega medija (silikonsko, mineralno olje). Vmesni medij preprečuje korozijske spremembe membrane in ščiti merilno membrano pred velikimi temperaturnimi in tlačnimi kratkotrajnimi preobremenitvami.

Pomembnejše razlike med merilniki tlakov različnih proizvajalcev najdemo v materialu, iz katerega je izdelana merilna membrana in v principu merjenja premika membrane. Najboljše lastnosti (predvsem dovoljeno temperaturno območje) ima kovinska membrana iz nerjavečega jekla. Povezava z merjenim medijem v teh primerih vedno poteka preko vmesnega medija (olja) in ločilnih diafragm. Vedno bolj pa so v uporabi membrane iz keramike in iz silicijevega monokristala, ki omogočata znižanje cene merilnikov celo za 30-50%. Keramična membrana je hkrati že del keramične merilne komore, nanjo pa so naparjene kovinske elektrode za kapacitivni odjem - merjenje premika membrane. Membrana iz silicijevega monokristala pa je dodatno obdelana tako, da hkrati služi kot substrat za polprevodniško natezno tipalo v obliki Wheatstone-ovega mostiča in za temperaturno tipalo za temperaturno kompenzacijo. Ta združitev omogoča uporabo sodobnih avtomatiziranih tehnoloških postopkov izdelave in s tem nižjo ceno merilnikov. V teh primerih merilni medij prihaja v neposredni stik z merilno membrano, kar lahko povzroči predvsem nevarnosti nenadnih temperaturnih preobremenitev. Kompaktna konstrukcija onemogoča dobro odzračevanje merilne napeljave, zato so merilniki te vrste primerni predvsem za merjenje tlakov v zračnih in plinskih napeljavah ter pri merjenju *višjih* tlakov tekočin, pri katerih slabša odzračenosť merilnega voda bistveno ne vpliva na kvaliteto merilnega rezultata.

Za merjenje premika merilne membrane iz nerjavečega jekla sta najpogosteje v rabi kapacitivni odjem in odjem z nateznim mostičem (uporovni lističi = strain gauge). Pri kapacitivnem odjemu elektronsko vezje meri spremembo kapacitivnosti med membrano in dvema elektrodama na obeh stenah merilne komore, pri odjemu z nateznim mostičem pa zaznamo signal na osnovi spremembe upornosti natezno obremenjenih kovinskih ali polprevodniških uporov. Merjenja premika z linearnim diferencialnim transformatorjem in s sistemom t.i. tokovne tehtnice v sodobnih rešitvah ne zasledimo več, saj je bil ta sistem zelo občutljiv na mehanske vibracije in udarce.

4.1. Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju



Slika 4.1: Poenostavljena shema merilnega dela sodobnega merilnika tlaka s kovinsko membrano in kapacitivnim odjemom

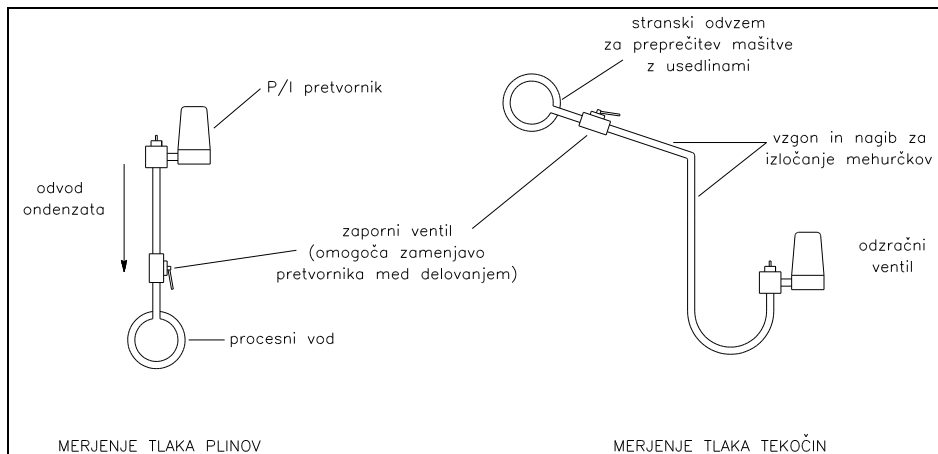
4.1. Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju

1. Izvedba instalacije pri normalnem ali absolutnem merjenju tlaka

Pri izvedbi procesne instalacije merilnika tlaka moramo paziti na velikost mehanskih oscilacij, tesnost, možnost zamenjave merilnika med obratovanjem sistema, odzračevanje-odplinjevanje pri merjenju tlaka tekočin, izločanje kondenzata pri merjenju tlaka plinov in zraka, preprečitev neposrednega dovoda pregrete pare do merilnika in druge temperaturne omejitve merilnika.

Načeloma naj bi bila dolžina tlačnega voda merilnika tlaka čim krajša in izvedba čim enostavnejša, da bi s tem zmanjšali možnosti za puščanje napeljave, ki lahko bistveno poslabša merilni rezultat. Toda v primerih, ko je temperatura procesne instalacije v bližini odjemnega mesta visoka ali mehanski tresljaji izraziti, moramo s pomočjo daljše instalacije merilnik

premahniti v hladnejšo in mirnejšo okolico (npr. merjenje tlaka pare pri parnih kotlih). Primere pravilne izvedbe instalacije pri merjenju tlaka plinov, tekočin in pare prikazujeta sliki 4.2 in 4.3.



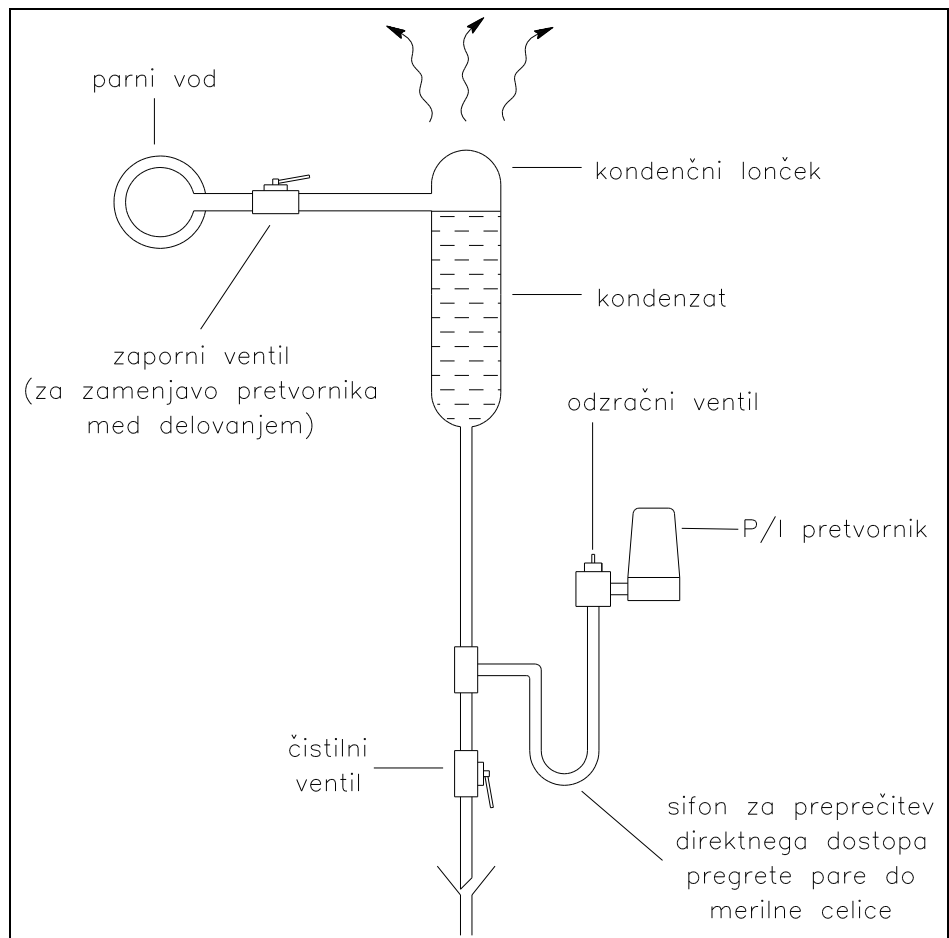
Slika 4.2: Primera pravilne izvedbe procesne instalacije merilnika tlaka pri merjenju tlaka plinov in tekočin

Primer na sliki 4.3 skriva več podrobnosti. Kondenčni lonček služi zato, da z večjo hladilno površino hitreje tvori kondenzat, ki zapolni merilno instalacijo. S tem je merilni sistem po zagonu hitreje pripravljen za pravilno merjenje. Zelo hitro se v sifonskem kolenu nabere dovolj kondenzata, da prepreči neposredni stik pare z merilno celico, ki bi povzročil okvaro odjemnega sistema. Čistilni ventil omogoča občasen izpust kondenzata in s tem delno čiščenje tlačnih vodov. Z odzračnim ventilom lahko občasno izločimo morebitne zračne mehurčke, vendar le-ti pri običajno visokih tlakih pare bistveno ne vplivajo na kvaliteto meritve. Paziti pa je treba, da je izpust odzračnega ventila usmerjen tako, da se vzdrževalec pri odpiranju ne opeče z vrelo vodo.

2. Odvzem tlačnega signala preko diafragme

Pri primerih na slikah 4.2 in 4.3 merjeni medij (ali kondenzat) zapolni celotno tlačno instalacijo do ločilne opne (diafragme) p/I pretvornika. Pogosto pa medij ne sme zaiti v merilno instalacijo, npr. če se v njej lahko strdi,

4.1. Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju

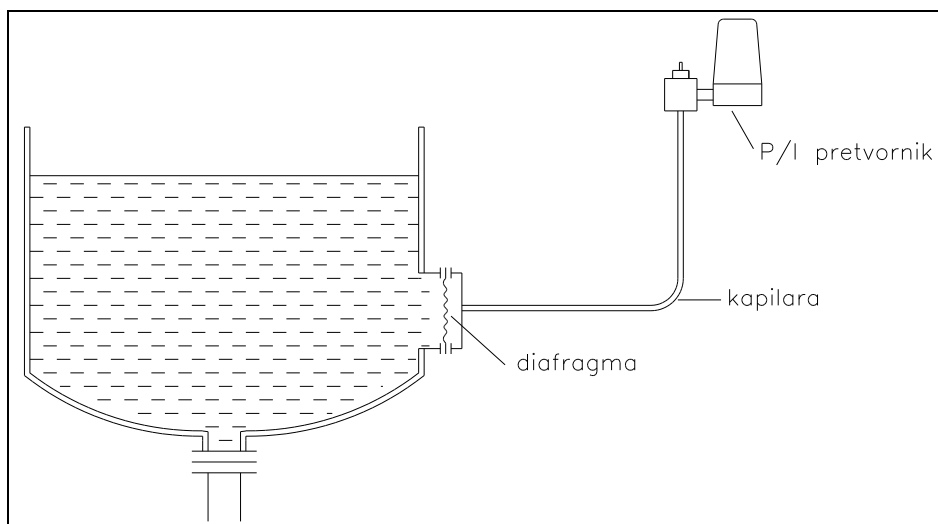


Slika 4.3: Primer izvedbe merilne instalacije za merjenje tlaka pare

kristalizira ali organsko spremeni (npr. v živilski industriji). V teh primerih tlačni signal odjemamo preko diafragme in tlačne kapilare.

Pri tem primeru je potrebno upoštevati dva problema. Kljub stabilnemu p/I pretvorniku postane sistem na sliki 4.4 temperaturno odvisen. Sprememba temperature medija preko diafragme in temperature okolice preko kapilare vplivata na volumen prenosne tekočine (silikonsko olje, glikol). Sprememba volumna prenosne tekočine rahlo spremeni tlak v prenosnem

sistemu, zaradi česar pride do odstopanja v merilnem rezultatu. To odstopanje lahko pri nižjih tlakih doseže tudi nekaj procentov merilnega obsega. Drug problem lahko nastopi zaradi vrtnicev v reaktorjih (npr. zaradi delovanja mešala). Ti preko velike površine diafragme povzročajo visoko nihanje tlaka v kapilari in seveda izrazit šum v merilnem signalu. Problem zmanjšuje daljša kapilara. Seveda pa daljša kapilara povzroča počasnejši odziv merilnika in večjo temperaturno odvisnost.



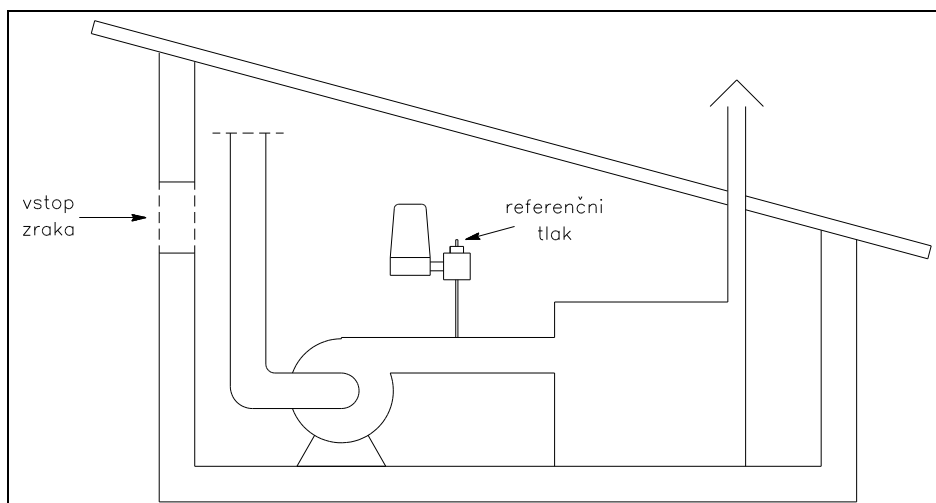
Slika 4.4: Odjem tlačnega signala preko diafragme

3. Referenčni tlak pri normalnem merjenju tlaka

Pri normalnem merjenju služi kot referenčni tlak atmosferski tlak okolice. Z nekoliko nepazljivosti lahko povzročimo veliko nestabilnost sistema, ki lahko pride pri merjenju nizkih tlakov posebej do izraza. Primer prikazuje slika 4.5.

V primeru na sliki 4.5 močan ventilator črpa zrak izpod stropa kotlovnice in ga dovaja v kurišče. Zaradi omejenih vstopnih odprtin v kotlovnico nastane v prostoru podtlak v relaciji do zunanjega atmosferskega tlaka. Podtlak deluje tudi kot referenčni tlak normalnega merilnika tlaka, katerega merilni rezultat je zato večji od dejanskega. Meritve tlaka zraka, podtlaka v kurišču itd. se lahko zato bistveno razlikujejo od pravih vrednosti. Problem

4.1. Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju



Slika 4.5: Primer nastopa težav pri normalnem merjenju tlaka

rešimo tako, da uporabimo diferencialni merilnik tlaka, katerega negativni priključek (L) posebej povežemo v zunanost kotlovnice.

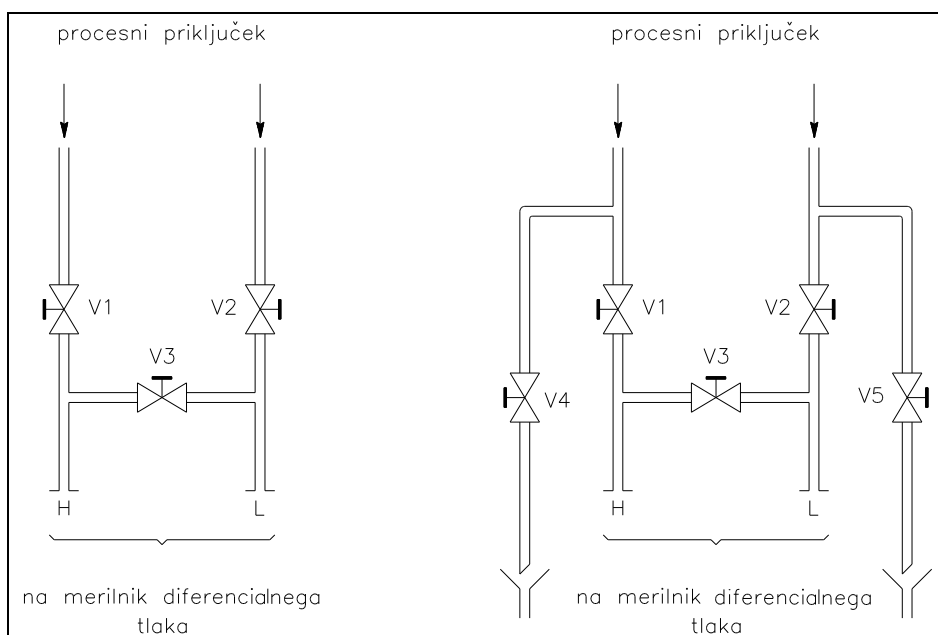
4. Izvedba instalacije pri diferencialnem merjenju tlaka

Podobno kot pri normalnem in absolutnem merjenju tlaka, tudi pri diferencialni meritvi ni vseeno, ali merimo tlak plina, tekočine ali pare. Z izvedbo instalacije moramo preprečiti moteče stranske pojave: prisotnost kapljevine v vodih pri merjenju tlaka plinov ali zraka, prisotnost zračnih mehurčkov pri merjenju tlaka tekočin, kondenzacijo pare pri merjenju tlaka v parnih sistemih.

Ker pri diferencialnih meritvah merilni obsegi dosega nižje vrednosti, kot pri normalnem ali absolutnem merjenju, moramo biti pri izvedbi in vzdrževanju instalacije še posebej pozorni in dosledni. Neravnovesje oziroma neurejenost hidrostatičnih tlakov lahko zavzame večji del merilnega obsega in s tem zamegli merilni rezultat.

Diferencialne merilnike tlaka v sistemu praktično v vseh primerih priključujemo preko triventilske kombinacije oziroma bloka. Skico povezave prikazuje slika 4.6.

Ventila V1 in V2 omogočata menjavo ali kalibracijo merilnega pretvornika



Slika 4.6: Tri- in petventilska kombinacija za priključitev merilnika diferencialnega tlaka na odjemni sistem

med obratovanjem procesa. Ko ventila V1 in V2 zapremo, smemo merilnik odstraniti iz sistema. Ventil V3 služi za izravnavo tlakov med obema priključkoma merilnika. Z njim preprečimo enostransko preobremenitev merilnika pri zagonu oziroma po montaži in izravnamo tlak, ko želimo preveriti ali nastaviti izhodiščno vrednost merilnika. Sodobni merilniki diferencialnega tlaka so sicer konstruirani tako, da prenesejo zelo visoke statične enostranske preobremenitve (100, 160, 250, 400 barov), vendar je uporaba izravnalnega ventila V3 kljub temu priporočljiva, saj lahko dinamični tlaki zaradi vodnega udara ("hidravlično kladivo") v zelo neugodnih primerih dosežejo zelo visoke vrednosti.

Pred zagonom morajo biti ventili v stanju: V1 zaprt, V2 zaprt, V3 odprt. Vključitev merilnika v sistem opravimo v vrstnem redu: odpremo V1, odpremo V2, zapremo V3. Izključitev izvedemo v vrstnem redu: odpremo V3, zapremo V2, zapremo V1.

4.1. Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju

Najpogosteje je merilnik povezan na sistem s petimi ventili (drugi del slike 4.6). Dva dodatna ventila V4 in V5 služita za odzračevanje in čiščenje priključnih vodov. Lahko sta dodana tri-ventilskemu bloku, lahko pa tvorita pet-ventilski blok. Pravilno in dobro odzračevanje sistema je zelo pomembno in lahko poteka v naslednjih korakih:

K0: V1, V2, V4 in V5 zaprti, V3 odprt

K1: odpremo V4 za toliko časa, da priteče tekočina brez mehurčkov

K2: odpremo V5 in odzračimo še drugi vod, nato ga zapremo

K3: odpremo odzračni ventil (vijak) L priključka in ventil V1, odzračimo in ju zopet zapremo (najprej odzračni vijak, nato V1)

K4: odpremo odzračni vijak H priključka in ventil V2, odzračimo in ju zopet zapremo (najprej odzračni vijak, nato V2)

K5: ponovimo korake K1, K2, K3 in K4

K6: odpremo V3

5. Hidrostatično merjenje nivoja z diferencialnim merilnikom tlaka

Hidrostatično merjenje nivoja je ena izmed pogosteje uporabljenih metod merjenja nivoja tekočin. Njeno razširjenost pogojuje prav gotovo izjemna razširjenost diferencialnih merilnikov tlaka. Pri tej metodi merimo hidrostatični tlak, ki ga povzroča nivo tekočine $p = \rho gh$ (ρ je specifična gostota, g težnostni pospešek in h nivo tekočine nad merilnim mestom). Meritev nivoja je odvisna od specifične gostote tekočine, na kar moramo biti zelo pozorni, ko poskušamo meriti višino s tem načinom. Ta se lahko spreminja z mešanjem reagentov različnih gostot ali s spreminjanjem temperature merjene tekočine. Rezultat merjenja po tej metodi je pravzaprav proporcionalen teži tekočine nad merilno točko (če je presek shranjevalnika v odvisnosti od višine konstanten).

Merjenje nivoja s hidrostatično metodo je zelo enostavno, če je shranjevalnik odprt. Če pa je slednji zaprt in pod tlakom, lahko nastopijo problemi - še posebej, če plin ali zrak nad tekočino vsebuje pare oziroma hlapne, ki lahko kondenzirajo. V teh primerih moramo realizirati sistem z reverznim merjenjem, npr. kot ga prikazuje slika 4.7.

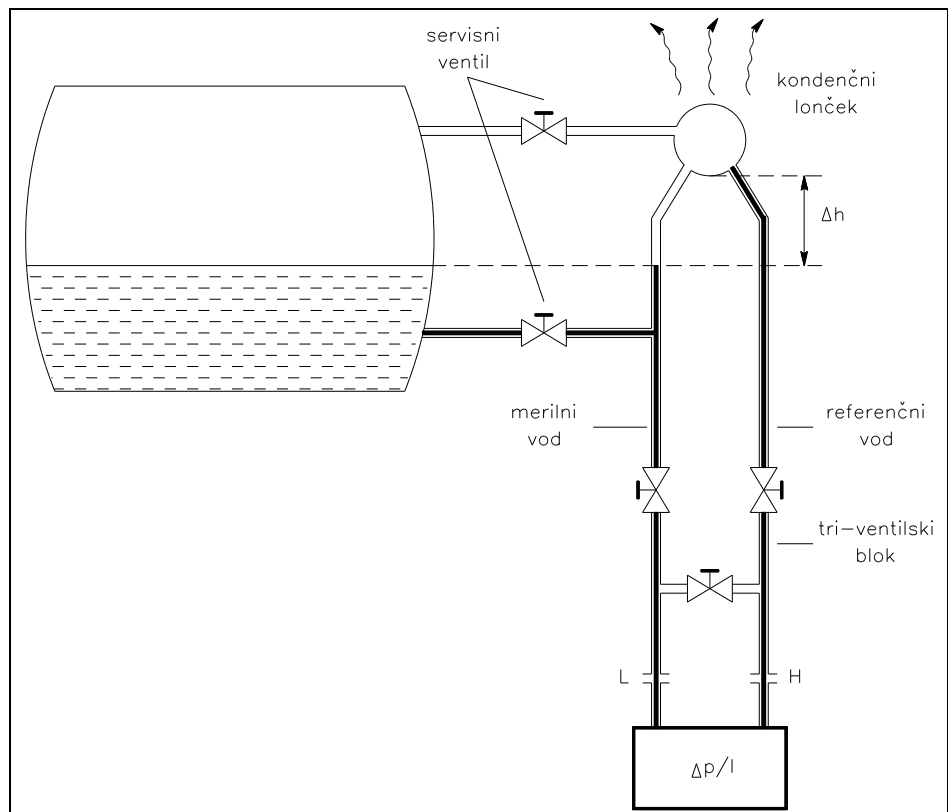
V sistemu na sliki 4.7 je referenčni vod na desni strani poln kondenzirane tekočine, za razliko od običajnega merjenja nivoja, kjer je popolnoma prazen. Ker bi v primeru hlapljivih tekočin oziroma vodne pare ne mogli stalno

vzdrževati praznega referenčnega voda, poskrbimo za nasprotno - da je vedno poln. To dosežemo s kondenčnim lončkom, na katerega notranji strani se para kondenzira zaradi odvajanja toplote preko večje površine lončka v okolico. Kondenzirana tekočina (voda) počasi napolni referenčni vod, odvečna tekočina pa nato stalno odteka preko zgornjega dela levega voda ter spodnjega priključnega voda nazaj v shranjevalnik. Referenčni vod je tako vedno napolnjen do iste višine. Levi vod je povezan s tekočino v shranjevalniku in tako tvori sistem vezne posode. Višina tekočine v njem je enaka višini tekočine v shranjevalniku. Na merilni sistem in referenčni vod pritiska statični tlak v shranjevalniku enako, zato se njegov vpliv na meritev kompenzira. Merilnik diferencialnega tlaka tako meri le razliko hidrostatičnih tlakov v obeh krakih, ki je na sliki 4.7 označena z oznako Δh . Razlika tlakov je tem večja, čimbolj prazen je shranjevalnik. Ko je shranjevalnik poln do spodnjega dela kondenčnega lončka, pade razlika tlakov na vrednost 0. Višjih nivojev ni več mogoče izmeriti. Izhodni signal pada z naraščanjem nivoja (ravno obratno, kot pri merjenju nivoja odprtih shranjevalnikov).

Sistem na sliki 4.7 je zelo zanesljiv, vendar moramo paziti na nekaj podrobnosti:

- Pred vsakim zagonom je običajno referenčni vod bolj ali manj izprazen. Potrebno ga je napolniti. V nekaterih primerih preprosto shranjevalnik napolnimo do vrha, da tekočina preko zgornjega voda zalije celotno instalacijo. Nato le še pravilno odzračimo sistem. Pogosto pa shranjevalnika ne smemo prepolniti. Tedaj moramo sistem voditi ročno toliko časa, da se referenčni vod napolni s kondenzatom. To lahko traja tudi 30-60 minut. V tem času meritev nivoja seveda ni uporabna, zato moramo tak objekt opremiti še z drugimi načini merjenja (opazovanja) nivoja (npr. optično okence).
- Sistem tlačnih povezav mora biti izjemno dobro tesnjen. Vsako še tako majhno puščanje (pri običajno visokih statičnih tlakih) lahko povzroči veliko razliko v tlakih in s tem močno odstopanje rezultata meritve.
- Pomembno je, kako procesna tekočina vstopa in izstopa iz shranjevalnika, ter kako je ta oblikovan. Dotekanje in odtekanje tekočine povzroča nihanje površin tekočine (valove), ki se ob stenah pravih oblik razvije v slabo dušeno stojno valovanje. Preko povezoval-

4.1. Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju



Slika 4.7: Merjenje nivoja v zaprtem shranjevalniku pod tlakom s hlapljivo tekočino ali vodno paro

nih vodov to nihanje zazna tudi merilnik tlaka in ga seveda prenese v izhodni signal, ki tako poleg osnovnega signala nosi še nihajočo (sinusno) komponento. To lahko močno moti regulacijski sistem in bistveno poslabša njegove lastnosti. Temu problemu se moramo posvetiti že pri konstrukciji shranjevalnika: izogibati se moramo dolgim valjastim oblikam, pravilno oblikovanim stenam, po potrebi vgradimo mehanske difuzorje valov, dovodne in odvodne vode pa primerno nastavimo tako, da čim manj vzbujajo površino tekočine v shranjevalniku. Šele ko izčrpamo te "naravne možnosti", poskušamo problem rešiti s povečanim dušenjem odziva tlačnega pretvornika (posebna na-

stavitev) ali pa z dodatkom dušilnih elementov v tlačne vode pretvornika. Povečano dušenje v merilnem krogu namreč upočasni odziv merilnega sistema. Regulacijski sistem zato reagira počasneje, povzroči večja dinamična odstopanja, včasih pa lahko celo zaniha.

6. Merjenje pretoka tekočin in plinov z merilnikom diferencialnega tlaka

Tudi pri merjenju pretoka tekočin in plinov so zelo razširjene metode, ki posredno uporabljajo merilnik diferencialnega tlaka kot pretvornik v električni signal. Vsaka ovira na poti tekočine ali plina povzroči padec tlaka, ki je po Bernoullijevem zakonu proporcionalen razliki kvadratov hitrosti tekočine pred in po oviri. Seveda pri merjenju potrebujemo "urejene" ovire za katere je padec tlaka v odvisnosti od pretoka dobro definiran in ponovljiv. Med najbolj znane in široko uporabne sodijo merilne zaslonke (plošče z odprtino), ostale pa so še: Venturijeve cevi in Dallove zožitve, Pitot-ova cev, šobe, merilno koleno, za meritve v kanalih pa še ovire v obliki Venturijeve kanalske zožitve, jezu in klina.

Merilni pretvorniki za tlak in diferencialni tlak so tehnološko zreli in kvalitetni senzorski elementi. Poleg tlaka in razlike tlakov lahko z njimi ob ustreznih dodatkih kvalitetno merimo tudi pretoke tekočin in plinov, nivoje tekočin v zaprtih in odprtih shranjevalnikih, gostoto in drugo. Če je le mogoče, poskušajmo merilno instrumentacijo izbirati in načrtovati tako, da čimveč meritev izvedemo s takimi pretvorniki kot primarnimi ali sekundarnimi elementi. S tem zmanjšamo število različnih rezervnih komponent, poenotimo servis in s tem dosežemo višjo kvaliteto obratovanja procesov.

Naloge

NALOGA 4.1

Stojite pred visokim, zgoraj odprtim shranjevalnikom valjaste oblike. Kako bi s priročnimi sredstvi izmerili količino goriva v tem shranjevalniku? Kako bi lahko meritev količine goriva avtomatizirali za daljinski prikaz v komandni sobi?

NALOGA 4.2

Naštejte dve metodi za merjenje najvišjih in dve metodi za merjenje najnižjih tlakov!

4.1. Pogosti problemi pri merjenju tlaka v industrijskem okolju

NALOGA 4.3

Na voljo imamo diferencialni merilnik/pretvornik tlaka. Radi bi ga uporabili za merjenje pretoka tekočine.

- Kaj poleg tega pretvornika še potrebujemo (naštete več variant!)?
- Skicirajte procesno instalacijo ene izmed naštetih variant!
- Na kaj moramo pri načrtovanju takega merilnega mesta paziti?
- Kakšne je odvisnost med pretokom in izhodnim signalom pretvornika?
- Kaj povzroča tako merilno mesto v procesni instalaciji?

NALOGA 4.4

Slika 4.8 prikazuje hidravlični sistem. Na dnu posode P2 merimo tlak in njegov signal vodimo na vhod regulatorja. Izhod regulatorja je povezan z regulacijskim ventilom V2. Odgovorite na naslednja vprašanja:

- a) Kaj je regulirana veličina?
- b) Kaj predstavlja regulirana veličina v fizikalnem smislu?
- c) Kaj je regulirna veličina?
- d) Kaj bi lahko počeli s podatkom o odprtosti ventila V1?

NALOGA 4.5

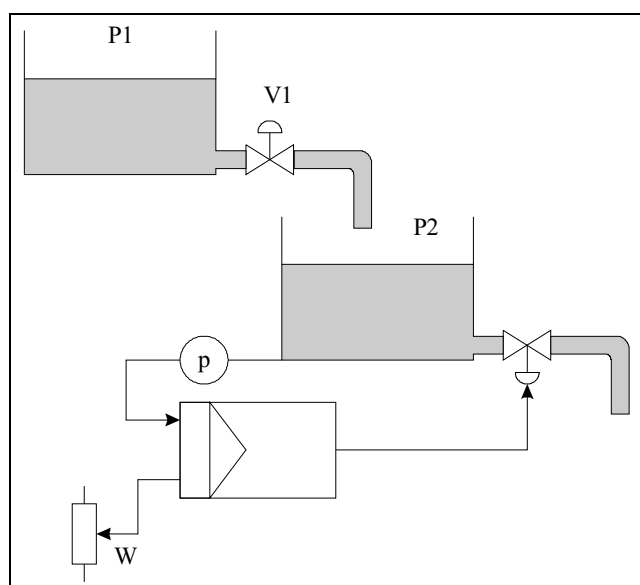
Skicirajte osnovne elemente merilnika tlaka z električnim izhodom (eno izmed številnih variant)!

NALOGA 4.6

Meriti želimo tlak v kotlu z zelo agresivno tekočino tako, da bo ta čim bolj enak tlaku tekočine v sosednjem kotlu. Potrebujemo torej informacijo o absolutnem tlaku v reguliranem kotlu in informacijo o razliki obeh tlakov, ki predstavlja signal pogoška. Kakšen merilnik bo najprimernejši, če želimo, da bo izhod električen, merilno območje naprav pa 2000 do 5000 kPa?

NALOGA 4.7

Skicirajte in opišite princip merjenja nivoja z mehurno metodo!



Slika 4.8: Shema sistema

5.

Merjenje pretoka v procesni industriji

Merjenje pretokov je ena izmed najpomembnejših in najpogostejših meritev v procesni industriji. Na podlagi merjenja temperatur, tlakov in pretokov je namreč mogoče obvladovati večji del industrijskih (kemijskih) procesov in procesov pretvarjanja energije. Toda za razliko od merjenja temperature in tlaka, kjer so osnovni merilni principi praktično neodvisni od lastnosti medija, je merjenje pretokov odločilno pogojeno z lastnostmi medija, katerega pretok želimo meriti, ter z drugimi zahtevami tehnologije, ki merjenje pretoka zahteva. Tako je mogoče, da merilni princip, primeren za merjenje pretokov tekočin, ni primeren za merjenje pretoka plinov. Podobno je lahko merilni instrument, primeren za merjenje pretoka običajnih tekočin, povsem neuporaben za merjenje pretoka visoko viskoznih tekočin. Še več težav lahko povzroči zahteva po merjenju pretokov suspenzij in gošč. Če je medij zelo abraziven ali koroziven, so merilne metode, ki so odvisne od tolerance mehanskih sestavnih delov tipala, pogosto neuporabne. Če merilna metoda povzroča relativno velik padec tlaka v cevovodu, je lahko povsem neprimerna, saj pri velikih pretokih povzroča ogromno izgubo energije (npr. dovajanje velikih količin zraka za zgorevanje). Prav tako je lahko merilni sistem neuporaben, če ga je zelo težko čistiti, pri tem pa naj bi meril pretok nečistih plinov ali tekočin. Našteti in še številni drugi primeri nekompatibilnosti nakazujejo, zakaj je danes mogoče izbirati med tako številnimi različicami merilnih sistemov. A kljub raznovrstni izbiri se kaj rado zgodi, da pri postavitvi novih tehnologij ali

pri izpopolnjevanju že obstoječih, ne moremo izbrati pravega merilnega sistema: takega, ki bo meril pretok z zahtevano natančnostjo, ne bo povzročal nepotrebne padca tlaka, se ne bo mašil in izgubljal občutljivosti zaradi nalaganja usedlin in oblog, ki bo prenesel temperaturne ali hidravlične šoke itd. Velike firme si lahko ob takih potrebah omislijo celo razvoj lastnega, specifičnega tipala in s tem morda celo bistveno izboljšajo njihov osnovni tehnološki postopek. V običajnih primerih pa je izbiro potrebno opraviti med dosegljivimi merilniki pretoka, pri tem paziti na najbolj kritične lastnosti, seveda pa je v teh posebnih primerih potrebno pričakovati tudi možnost, da izbira kljub temu ni popolnoma ustrezna. V zadnjih dveh desetletjih je tehnologija merilnikov pretoka bistveno napredovala. Zaradi tega so njihove cene postale sprejemljivejše, natančnosti bistveno boljše, izkušnje o uporabi različnih principov pa bogatejše. Nekatere klasične metode hitro izgubljajo svoje mesto, novejša metode žanjejo nove uspehe. Namen tega poglavja je predstaviti le nekatere izmed tistih merilnih metod, ki so danes najbolj razširjene.

5.1. Splošno o merjenju pretokov

V procesni industriji merimo pretok plinov (tudi zraka in vodne pare), tekočin, prahu, zrn in drugih sipkih materialov. Poleg tega pa je potrebno meriti tudi pretoke dvofaznih medijev, npr. suspenzij, aerosolov ali sipkih materialov pri zračnem transportu, raznih brozg, ipd., kjer je merjenje pretokov še posebej zahtevna naloga. Osnovne lastnosti, ki jih je potrebno upoštevati pri merjenju pretoka oziroma na postopek merjenja bistveno vplivajo so: viskoznost, gostota, stisljivost, temperatura, tlak.

5.1.1. Volumski in masni pretok

Pretok lahko izmerimo v volumetrični ali masni obliki. Volumetrična oblika podaja količino fluida v volumskih enotah (m^3 , dm^3 , l), ki preko merilnika preteče v določenem časovnem intervalu. Pretok podajamo v enotah m^3/h , dm^3/h , l/h, l/min itd. Masni pretok pa izraža maso fluida, ki preteče v intervalu 1 ure, 1 minute ali 1 sekunde, podajamo pa ga z enotami kg/s, t/h, kg/h itd. Skorajda vsi klasični merilniki pretoka sicer merijo volumski pretok, vendar pa je kemijska tehnologija

5.1. Splošno o merjenju pretokov

skorajda izključno vezana na masne pretoke reagentov(!). Kemijske reakcije potekajo na osnovi masnih bilanc in nimajo neposredne zveze z volumni reagentov, ki so v proces vstopili. Pri zgorevanju, na primer, metana potrebujemo za vsak kmol metana 2kmola kisika, ali izraženo v masah: za 20 kg metana je potrebno 64 kg kisika. Volumen enega ali drugega plina pri tem ni pomemben in je seveda odvisen od temperature in tlaka plina, ki vstopa v reakcijo. Za nekatera področja uporabe je merilo volumskega pretoka uveljavljeno ali dogovorjeno, pri čemer to ni vedno v skladu s fizikalnim ozadjem. Porabo pitne ali industrijske vode podajamo volumetrično, bencin in druge naftne derivate kupujemo v količinah, izraženih v litrih, tekočine polnimo v embalažo praviloma tudi izraženo v litrih itd. Če poznamo gostoto fluida, je pretvorba iz volumetrične vrednosti pretoka v masni pretok in obratno zelo enostavna:

$$\phi_m = \phi_V \rho \quad (5.1)$$

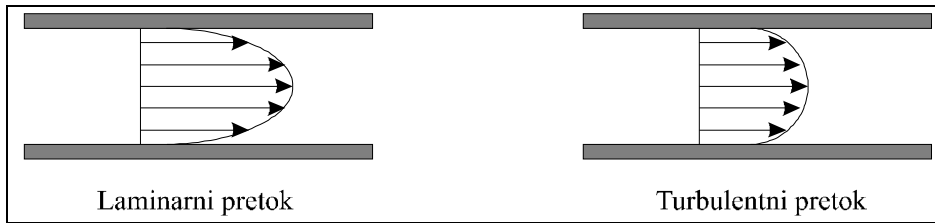
V procesni industriji pa gostota medija pogosto ni konstantna, temveč se menja v odvisnosti od temperature, tlaka, mešalnega razmerja, koncentracije itd. Pri merjenju pretokov plinov je zato v navadi, da izmerjeni volumski pretok plinov preračunamo v primerljivo obliko, to je v ekvivalentni volumski pretok, ki bi ga ta plin imel pri tlaku 1013 mbar ter pri temperaturah 0°C ali 20°C. Če izračun opravimo za temperaturo 0°C, potem govorimo o normalnem pretoku, če pa za temperaturo 20°C, govorimo o standardnem pretoku. Ta preračun opravimo po preprosti enačbi, ki izvira iz plinske enačbe, npr. za pretvorbo v normalno vrednost:

$$\phi_{Vn} = \phi_V \frac{273K}{T} \frac{p}{1.013\text{bar}} \quad (5.2)$$

V enačbi je ϕ_V izmerjeni volumski pretok, T temperatura plina v Kelvinih ter p absolutni tlak merjenega plina. Pogosto tak preračun izvajajo posebne korekcijske enote ali procesni računalnik, temperaturo in tlak pa je nato potrebno sprotno meriti z merilnimi pretvorniki.

5.1.2. Laminarni in turbulentni pretok

Fluidi zaradi viskoznosti ne tečejo po celem prerezu cevi enakomerno. Običajno je pretok največji na sredini cevi, ob stenah pa tekočina ali plin praktično mirujeta. Zadržuje ju namreč sila, ki jo povzroča viskoznost. Pretok tekočine se po prerezu cevi razporedi približno v obliki parabole, kot to nakazuje slika 5.1. Pretok fluida skozi cev je tako proporcionalen povprečni hitrosti fluida.



Slika 5.1: Razporeditev hitrosti fluida v cevi pri laminarnem in turbulentnem pretoku (pri turbulentnem pretoku je pretok fluida enakomerneje razporejen po celotnem preseku cevi)

Hitrostna razporeditev pa je različna za laminarni tok ter za turbulentni tok. Pri turbulentnem toku je razporeditev hitrosti po preseku enakomerneje razporejena. Pri prehodu iz laminarnega v turbulentni pretok, ki se zgodi pri povečevanju pretoka medija, se zato pri nekaterih merilnih metodah pojavi občutno odstopanje merilnih rezultatov (npr. pri merjenju z zaslonko, Venturijevo cevjo itd.). Večina običajnih meritev pretoka poteka pri turbulentnem pretoku, zato je potrebno pogosto le preveriti, če pri zelo majhnih pretokih oblika ne preide v laminarni tok. Oceno za ta prehod podaja t.i. Reynoldsovo število, ki je brezdimenzijsko razmerje med silami vztrajnosti in trenja fluida v cevi:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (5.3)$$

v je srednja hitrost fluida v cevi, d premer cevi in ν kinematična viskoznost, (za vodo: $\nu = 1.01 \text{ mm}^2/\text{s}$, za zrak: $\nu = 15.7 \text{ mm}^2/\text{s}$). Če je izračunano število precej manjše od 2320, potem lahko sklepamo, da je pretok pri teh pogojih laminaren. Če pa je število precej večje, npr. 5000 in mnogo več, potem je pretok zelo verjetno turbulenten.

5.2. Merilniki pretoka na osnovi diferencialnega tlaka

Posredno merjenje pretoka tekočin in plinov z merjenjem padca tlaka je eden izmed najstarejših merilnih principov in je tudi danes še zelo pogost v industriji. Meritev je v osnovi zelo preprosta: v pretočno cev namestimo kalibrirano oviro, ki povzroči padec tlaka. Padec tlaka je po Bernoullijevem zakonu proporcionalen

5.2. Merilniki pretoka na osnovi diferencialnega tlaka

razliki kvadratov hitrosti tekočine pred in po oviri. Seveda pri merjenju potrebujemo "urejene" ovire za katere je padec tlaka v odvisnosti od pretoka dobro definiran in ponovljiv. Med najbolj znane in široko uporabne sodijo merilne zaslonke, ostale pa so še: Venturijeve cevi in Dallove zožitve, Pitot-ove cevi, šobe, merilna kolena, za meritve v kanalih pa še ovire v obliki Venturijeve kanalske zožitve, jezu in klina. V procesni industriji so najpogosteje v uporabi merilne zaslonke za merjenje pretoka tekočin in plinov, Venturijeve cevi za merjenje pretoka umazanih in viskoznih tekočin, Dallove zožitve v zračnih napeljavah ter Venturijeve kanalske zožitve za merjenje pretoka odpadne vode. Izbor in dimenzioniranje primarnega elementa je zelo zahteven postopek. To področje je bilo v preteklosti zelo dobro in temeljito teoretično in eksperimentalno raziskano, rezultati, postopki in zahteve pa so zbrani v standardih ISO5167 in DIN1952. Za praktično uporabo oziroma oceno merilne zaslonke smemo uporabiti naslednji enačbi:

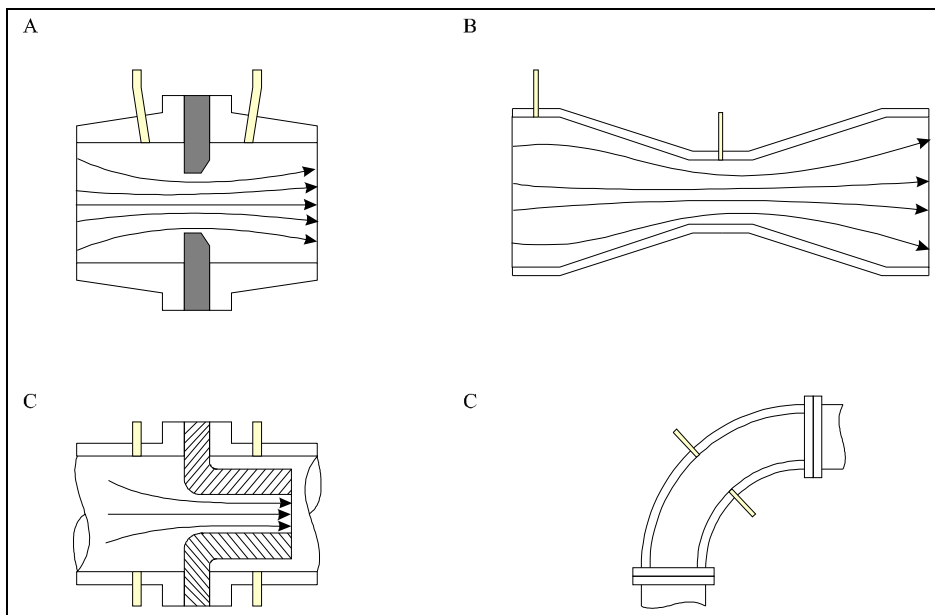
volumski pretok:

$$\phi_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (5.4)$$

masni pretok:

$$\phi_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (5.5)$$

C je konstanta zaslonke, ki najpogosteje zavzame vrednost 0.61, β je razmerje premera odprtine zaslonke d proti premeru cevovoda D , ε je faktor stisljivosti (za tekočine približno 1, za pline približno 0.9), Δp je izmerjeni padec tlaka in ρ specifična gostota plina ali tekočine. Enačbi lahko v praksi služita kot npr. dobri oceni (± 5 do 10%) pretoka ali kot pomoč pri oceni potrebnega razmerja premerov zaslonke β , za natančno odvisnost pretok - Δp pa je potrebno konstante C in ε natančneje določiti preko tabel iz naštetih standardov. Na enak način lahko ocenimo (izračunamo) tudi pretok skozi druge standardne ovire, kot so Venturijeve cevi, merilna kolena in šobe, le da se rezultati razlikujejo zaradi različnih konstant C . Ta ima pri šobah in Venturijevih ceveh vrednost blizu 1, kar pomeni, da pri istem pretoku izmerimo manjšo razliko tlakov, kot bi jo izmerili pri uporabi zaslonke. Merilna zaslonka ima od vseh ovir največjo občutljivost, vendar povzroča tudi največji konstantni padec tlaka v cevovodu. Venturijeva cev in merilno koleno povzročata zelo majhno izgubo tlaka, sta pa zelo obsežna elementa. Za merjenje hitrosti oziroma pretokov plinov, še posebej pri visokih temperaturah, pogosto uporabljamo t.i. Pitot-ovo cev. S Pitot-ovo cevjo merimo zastojni tlak, ki je proporcionalen kvadratu hitrosti plina (zraka, pare itd.). Pitot-ova cev meri



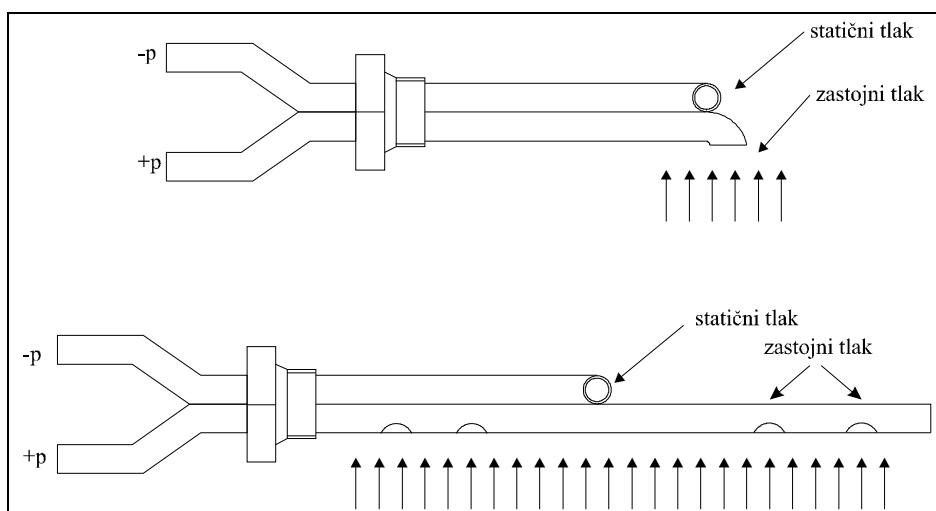
Slika 5.2: Standardne ovire v cevovodu za merjenje pretoka na osnovi padca tlaka: A - merilna zaslonka, B - Venturijeva cev, C - šoba, D - merilno koleno

hitrost le v točki odprtine (glej sliko 5.2) zato je zelo pomembno, kako jo namestimo. Če je zastojna odprtina postavljena na razdaljo $r/3$, merjeno od stene okrogle cevi, potem izmerimo približno povprečno hitrost medijev, ki je tako dobro merilo celotnega pretoka. Pri tem mora biti pretok turbulenten! Bolj natančne rezultate dobimo, če uporabimo t.i. Annubar-ovo izvedbo Pitot-ove cevi, ki ima več zastojnih odprtin, skupni vod pa omogoča, da izmerimo povprečno hitrost na osnovi meritev v več točkah.

Pitot-ova oz. Annubar-ovo cev povzročata zanemarljiv padec tlaka, kar sodi med njune najpomembnejše prednosti. Tudi montaža je zelo enostavna. Žal pa z njima ne moremo pretokov meriti natančneje od 5-10%, še posebej ne pri nizkih hitrostih. Pri hitrostih plinov pod 5 m/s je namreč izmerjena tlačna razlika že komajda zaznavna.

Osnovna pomanjkljivost merjenja pretoka z mejenjem padca tlaka na oviri je v kvadratični odvisnosti padca tlaka od pretoka. Če pretok znaša 50% nazivne vre-

5.2. Merilniki pretoka na osnovi diferencialnega tlaka



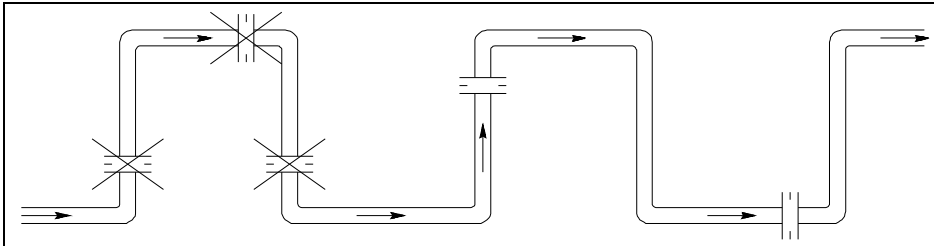
Slika 5.3: Pitot-ova cev in Annubar cev za merjenje hitrosti/pretoka

dnosti, padec tlaka doseže le 25% nazivnega padca. Pri 10% pretoka, padec tlaka doseže le 1% nazivnega padca, kar je tudi z zelo dobrimi merilniki diferencialnega tlaka težko izmerljivo. Praktično uporabno merilno območje (angl. rangeability) leži približno v območju od 25% do 100% merilnega (projektiranega) območja. Zaradi tega moramo paziti na naslednje:

- pri specifikacijah nazivnih pretokov moramo biti zelo natančni, da “ujamemo” ustrezno merilno območje,
- tudi pri uporabi zelo natančne in kvalitetne merilne opreme merjene vrednosti pod 20% nazivnega pretoka vsebujejo veliko merilne negotovosti, zato ne morejo služiti npr. za natančen obračun stroškov oziroma porabe.

Pri merjenju pretoka z zaslonkami in z drugimi ovirami moramo zagotoviti ustrezne merilne pogoje. Najpomembnejše je seveda oblikovanje hitrostnega profila tekočine ali plina, ki teče preko primarnega elementa. Standardi natančno predpisujejo, kako dolg mora biti **ravni** del cevovoda pred merilno zaslonko in kako dolg za njo. Dolžina je odvisna od merjene tekočine, od razmerja premerov zaslonke in cevovoda, predvsem pa od tipa instalacijskih elementov pred in za zaslonko, npr.

enojno koleno, dvojno koleno, sprememba višine, reducirni element, regulacijski ventil itd. Projektant oziroma dobavitelj tovrstne opreme običajno te standarde upošteva, kaj lahko pa se zgodi, da pri manjših (eksperimentalnih) rekonstrukcijah cevovodov spregledamo take podrobnosti. Paziti moramo tudi, da je merilni del cevovoda vedno poln tekočine. Slika 5.4 prikazuje nekaj pravilnih in nepravilnih namestitvev.



Slika 5.4: Nepravilne in pravilne postavitev merilne zaslonke v cevovodu s tekočino

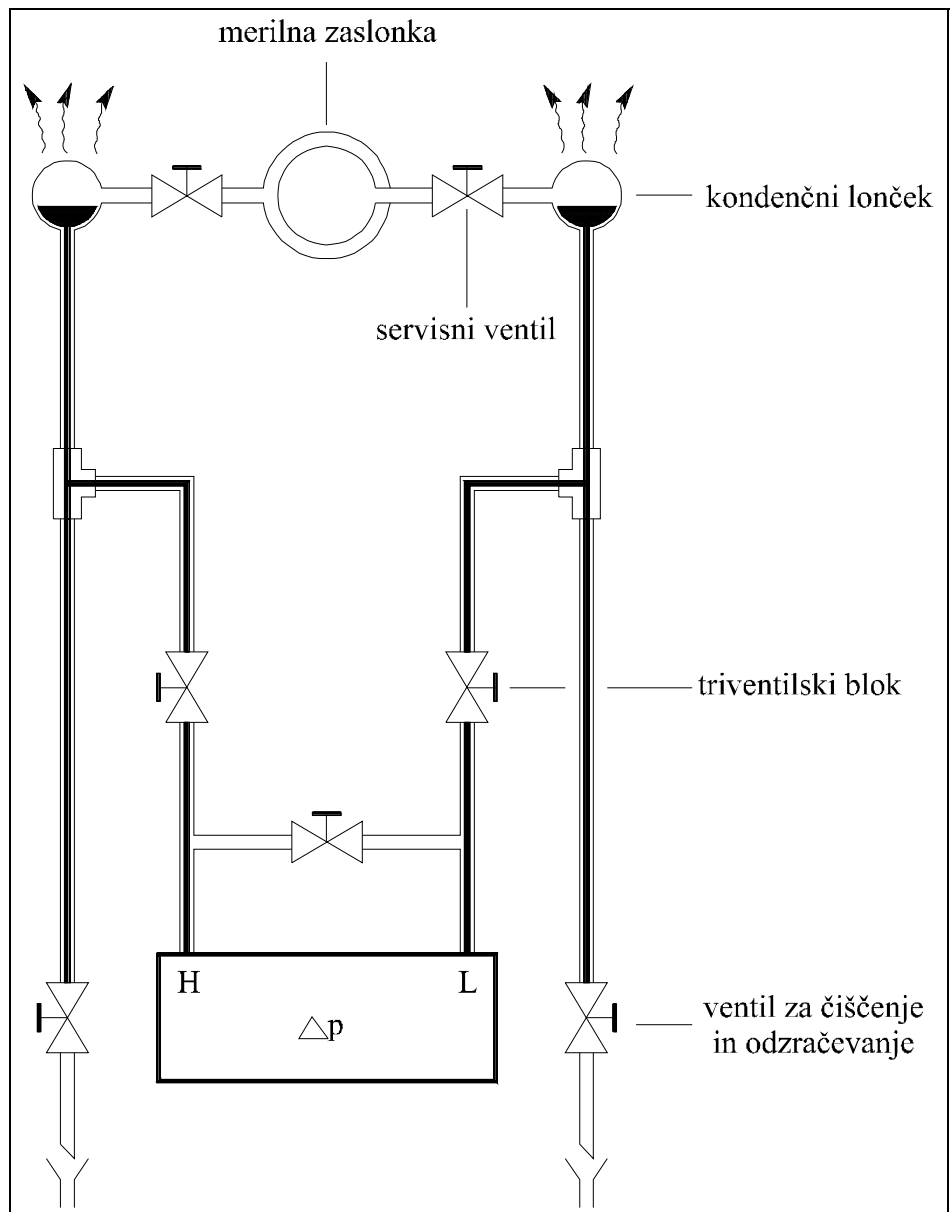
Pri merjenju pretoka z Δp pretvorniki moramo paziti na pravilno odzračevanje pri tekočinskih napeljavah, na odvajanje kapljev in pri plinskih napeljavah in na odvajanje kondenzata pri parnih napeljavah. Pri tekočinskih napeljavah namestimo pretvornik diferencialnega tlaka nižje od cevovoda z merilno zaslonko, pri plinskih napeljavah navpično nad plinovod, primer pri parovodih pa prikazuje slika 5.5.

Kondenčna lončka na sliki 5.5 služi trojnemu namenu:

- hitro ohladi paro, da bi ne prišla v neposredni stik z membrano merilnika diferencialnega tlaka,
- tvori kondenzat, ki tlačne vode samodejno napolnjuje do hidrostatično iste višine,
- z večjo površino zmanjšata nihanje nivoja kondenzata zaradi premikanja merilne membrane Δp merilnika.

Sodobni Δp merilniki imajo zelo majhen nazivni premik merilne membrane (majhna sprememba volumna v merilni komori), zato je mogoče pri dovolj dolgi merilni

5.2. Merilniki pretoka na osnovi diferencialnega tlaka



Slika 5.5: Merilna instalacija za merjenje pretoka pare z merilno zaslonko

instalaciji kondenčne lončke tudi opustiti. Pogosta napaka oziroma okvara sistema na sliki 5.5, ki jo je mogoče zaslediti, je rahlo puščanje merilne instalacije. Ker je običajno statični tlak zelo visok (npr. 60 bar-ov), padec tlaka na zaslonki pa zelo majhen (npr. nazivni Δp znaša 250 mbar-ov), lahko zelo majhna odprtina povzroči visoko razliko tlakov. Zadostuje že počasno kapljanje kondenzata iz katerega izmed spojev, pa dobimo velika odstopanja v meritvi. Ker je odkrivanje odstopanj kazanja včasih zelo težavno (npr. na odstopanje sklepamo le z opazovanjem razmerij gorivo/para, gorivo/zrak itd, moramo biti pri ogledu merilnih vodov zelo temeljiti in natančni, prav tako pa pri rednih servisnih popravilih).

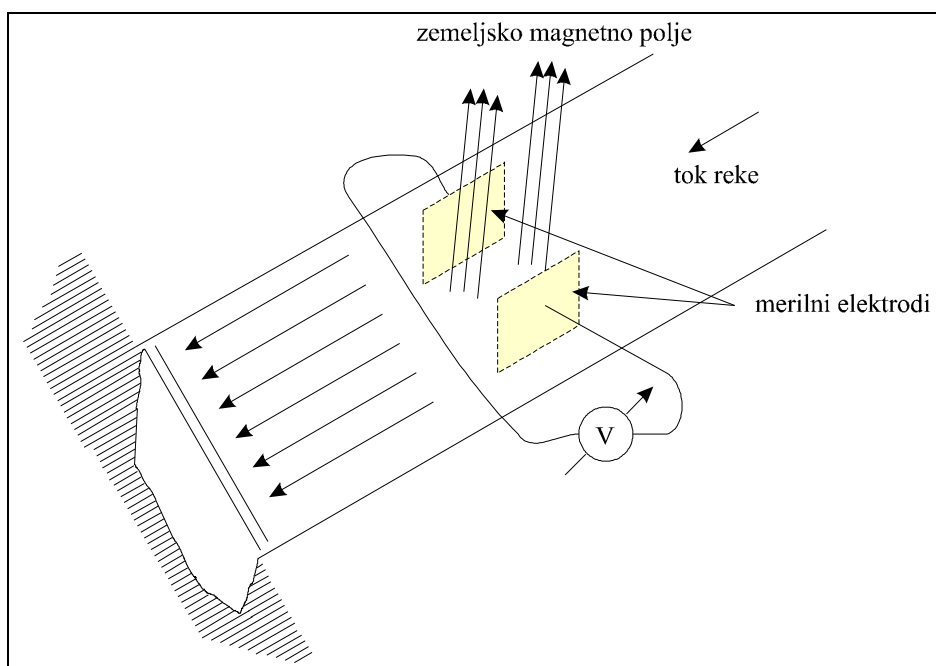
5.3. Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka

Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka je eden izmed najpogostejših sodobnih merilnih sistemov za merjenje pretoka tekočin. V novih tehnoloških napravah uspešno nadomešča še do nedavnega zelo razširjeno merjenje pretoka z uporabo merilnih zaslonk. Toda razvoj te merilne metode je trajal vrsto let. Leta 1832 je M. Faraday, utemeljitelj elektromagnetne indukcije, poskušal svojo teorijo praktično uporabiti za merjenje pretoka reke Temze. Njegovo idejo ilustrira slika 5.6. Poskus tedaj ni bil uspešen (kar bi verjetno veljalo tudi za današnji čas), saj je zemeljsko magnetno polje prešibko in inducirane napetosti komaj zaznavne. Sto let kasneje so poskušali ta merilni princip praktično uporabiti za merjenje pretoka krvi v ožilju. Še dobrih dvajset let kasneje so na Nizozemskem izkoristili to idejo za merjenje pretoka mešanice vode, peska in drugih usedlin pri čiščenju rečnih strug in pri drugih melioracijskih delih. Po letu 1980 pa je ta merilni princip oziroma tehnologija izdelave merilnih pretvornikov postal zrel za množično uporabo v procesni industriji, pri vodenju čistilnih naprav, v energetskih sistemih in drugje. Vsi sodobni merilni pretvorniki za ta način merjenja pretoka vsebujejo mikroprocesorsko jedro, ki opravi relativno obsežno obdelavo signalov, ki je potrebna za kvalitetno merjenje pretoka.

5.3.1. Osnovna ideja

Slika 5.7 pojasnjuje razvoj osnovne ideje. Osnovni pogoj takega načina merjenja je, da je tekočina, ki teče v električno neprevodni cevi, prevodna. Za sodobne merilnike te vrste je dovolj prevodna že običajna pitna voda. Meritve pretokov kislin

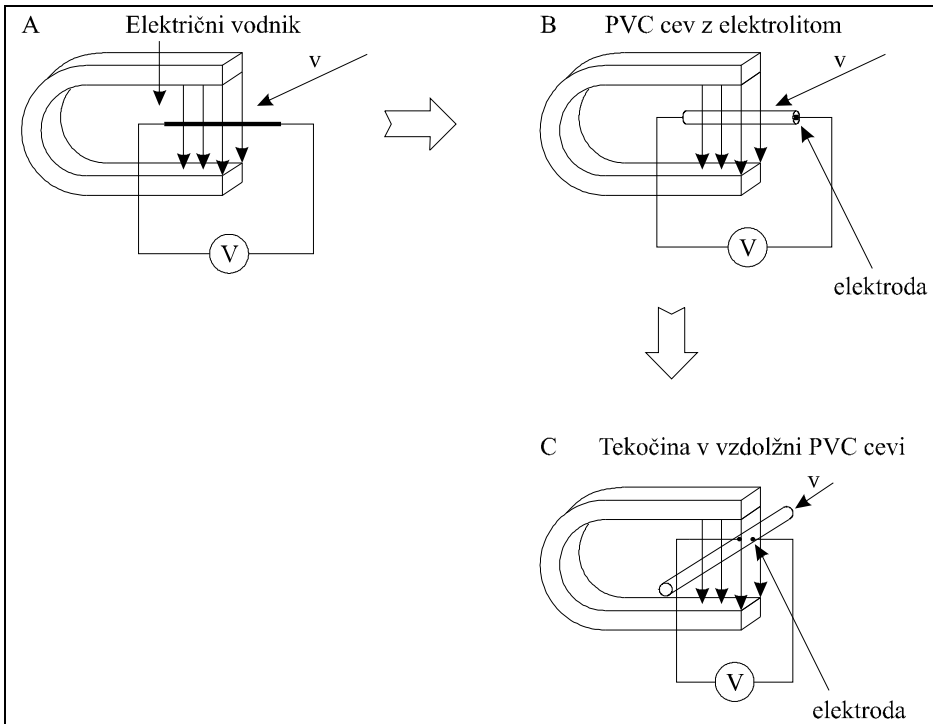
5.3. Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka



Slika 5.6: Poskus, s katerim je M. Faraday poskušal izmeriti pretok reke Temze. Zaradi prisotnosti zemeljskega magnetnega polja naj bi se med elektrodama (dve večji kovinski plošči) inducirala električna napetost, ki je proporcionalna hitrosti reke

in luga zaradi tega pogoja niso problematične, ni pa mogoče meriti pretokov neprevodnih tekočin, kot npr. raznih goriv (bencina, olja, alkoholov itd). Čeprav je ta pogoj prevodnosti, ki mora znašati vsaj $5 \mu\text{S}/\text{cm}$, zelo selektiven, pa je ugodnih primerov uporabe v procesni industriji več kot dovolj.

Inducirane napetosti med elektrodami so v normalnem režimu zelo majhne. Če ima npr. tipično efektivno magnetno polje gostoto 100 mT, premer cevi 15 mm (DN 15), tekočina pa se giblje s hitrostjo 1 m/s, bi inducirana napetost znašala le 1.5 mV (to je približno toliko, kot bi dobili na izhodu NiCr-Ni termočlena pri temperaturi približno 40°C). Tako majhna napetost pa se zlahka "zgubi" v elektrokemijskih potencialih, ki nastanejo na elektrodah zaradi prisotnosti tekočine (elektrolita). Nič čudnega torej, če Faradayev poskus merjenja pretoka reke Temze ni bil uspešen.

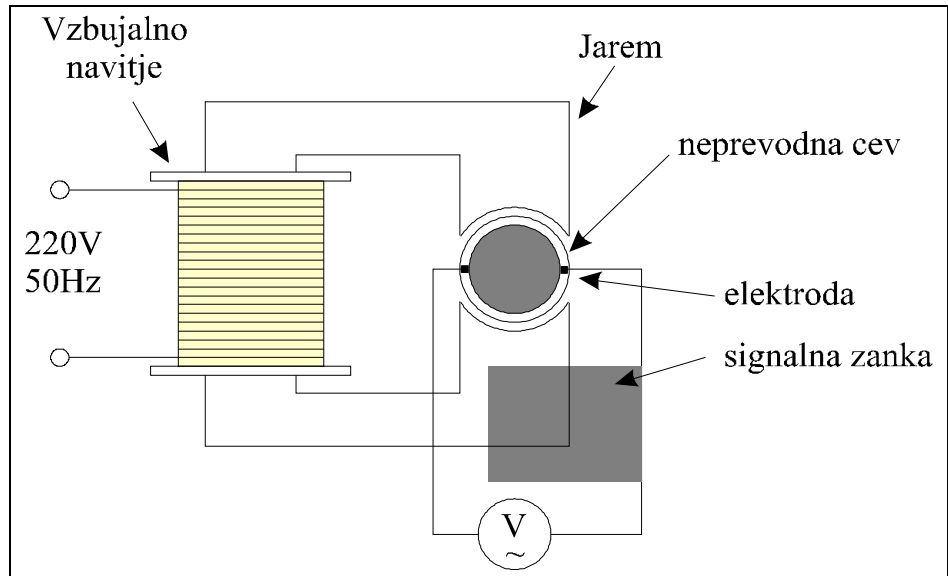


Slika 5.7: Izoblikovanje osnovne ideje merjenja pretoka tekočin z elektromagnetno indukcijo A - Faradayev poskus: v električnem vodniku, ki seka magnetno polje, se inducira električna napetost. B - Če namesto električnega vodnika v izolirano cev nalijemo prevodno tekočino in konca cevi zapremo s kovinskima elektrodama, je rezultat isti, kot v primeru A. C - Inducirano napetost dobimo tudi, če elektrodi mirujeta, giblje pa se le tekočina v cevi.

5.3.2. Izmenično vzbujanje

Da bi prebrodili problem prisotnosti elektrokemijskih potencialov, so razvijalci teh merilnikov namesto konstantnega enosmernega magnetnega polja uporabili izmenično magnetno polje - permanentni magnet nadomesti s tuljavo napajano z izmeničnim tokom. Omrežna napajalna napetost je bila v ta namen zelo prikladna. Pri izmeničnem magnetnem vzbujanju tudi inducirana napetost neprestano menja svojo polariteto in amplitudo. Namesto šibke enosmerne napetosti dobimo

5.3. Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka



Slika 5.8: Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka z izmeničnim vzbujanjem

na izhodu šibko izmenično napetost. Izmenično napetost pa je kaj lahko ločiti od motečih elektrokemijskih potencialov, ki imajo pretežno enosmerni značaj, oziroma se le počasi spreminjajo. To nalogo uspešno opravijo visokoprepustni elektronski filtri.

Ta merilni princip se je uspešno uveljavil v procesni industriji. Njegova posebna prednost je bila prav v vzbujanju z omrežno napetostjo, s katero je mogoče zaradi večje tokovne razpoložljivosti doseči dovolj visoka magnetna polja v preseku cevi, skozi katero teče merjena tekočina. Tako je mogoče meriti pretok tudi v cevovodih z izjemnimi primeri (npr. do 2 m).

Toda tudi ta način vzbujanja ima nekaj pomanjkljivosti. Dve sta še posebej izraziti: občutljivost na zunanje motnje in transformatorski efekt. V okolici takega merilnega instrumenta se običajno nahaja vrsta drugih naprav, ki generirajo elektromagnetne motnje (npr. elektromotorji, močnostni transformatorji, razsvetljava itd.). Motnje teh izvorov, ki v električni ali magnetni obliki prodrejo v merilni sistem, so iste frekvence, kot šibek inducirani signal zaradi pretoka tekočine, saj izvirajo iz istega napajalnega sistema! Z elektronskimi vezji ni več mogoče dobro

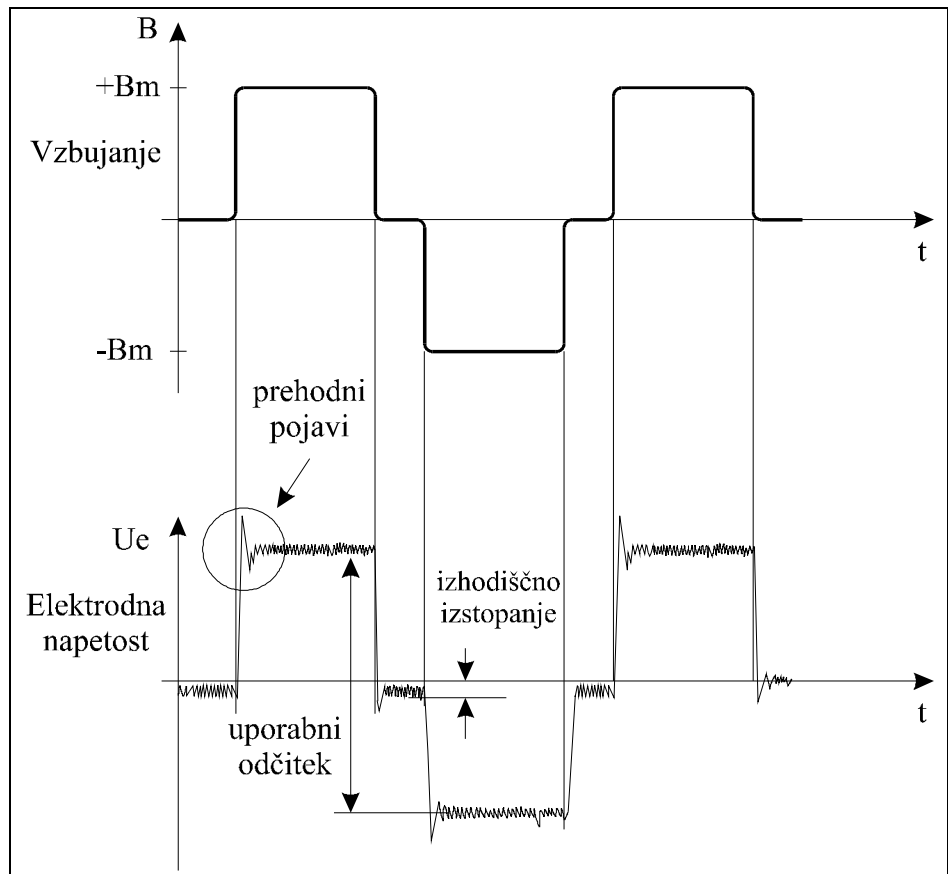
ločiti med koristnimi in motilnimi signali! Transformatorski efekt nastane tako, da del magnetnega polja seže tudi v signalno zanko, ki je označena na sliki 5.8. V tej zanki pride do direktne indukcije napetosti, tako kot pri običajnem transformatorju. Izhodna napetost je tako seštevek dveh prispevkov: inducirane napetosti zaradi pretoka tekočine in direktne inducirane napetosti. To direktno inducirano napetost je mogoče z elektronskim vezjem delno kompenzirati, problem pa je v tem, da ni stalna. S spremembo temperature magnetnega jarma in vzbujalnega navitja se namreč stresano magnetno polje vzbujalnega sistema spreminja, zato pa se spreminja tudi motilna inducirana napetost. Kot posledico dobimo neželena lezenje izhodišča merilnega obsega merilnika.

5.3.3. Impulzno vzbujanje

Za rešitev problema izmeničnega vzbujanja bi zopet potrebovali nekaj let in nekaj novih idej. Načrtovalci so se izognili problemu zunanjih motilnih signalov tako, da so frekvenco vzbujanja spremenili. Ker ima koristni inducirani signal drugačno frekvenco od motilnih signalov frekvence 50 Hz, je mogoče motilne signale z elektronskimi filtri lažje izločiti. Transformatorskega efekta ni, če uporabimo enosmerno vzbujanje (ker ni spremenljivega magnetnega polja, ni indukcije v signalni zanki, označeni na sliki 5.8). Toda tedaj naletimo na osnovne probleme, opisane v podpoglavju 5.3.2. Rešitev se ponudi z uporabo impulznega vzbujanja. Za razliko od izmeničnega, impulzno vzbujanje nima sinusnega pretoka magnetnega polja, pač pa ima obliko pravokotnih impulzov pozitivne in negativne polaritete (slika 5.9). Merilni pretvornik vzbudi magnetno polje npr. v pozitivni smeri, počaka, da prehodni pojavi izzvenijo, nato pa odčita napetost na elektrodah, kot v primeru enosmernega vzbujanja. Zatem izklopi vzbujanje za krajši čas in v tem času korigira odstopanje ničle elektronskega ojačevalnika. Potem vklopi vzbujanje v obratni smeri. Zopet počaka, da prehodni pojavi izzvenijo in odčita elektrodno napetost kot bi bilo vzbujanje konstantno (enosmerno). Razlika odčitkov elektrodnih napetosti med pozitivnim in negativnim vzbujanjem je odvisna le od pretoka medija mimo elektrod, morebitna prisotnost elektrodnih elektrokemijskih potencialov pa se na ta način izniči. Ker je vzbujanje podobno permanentnemu vzbujanju, tudi transformatorski efekt, značilen za izmenično vzbujanje, ne pride do izraza. Impulzno (bipolarno) vzbujanje tako rešuje več problemov hkrati (transformatorski efekt, vpliv izmeničnih motenj iz okolice, elektrokemijski potenciali elektrod) in omogoča odlično delovanje tega merilnega sistema v zahtevnih pogojih procesne industrije. Ponavljalna frekvenca vzbujalnih impulzov znaša 12.5

5.3. Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka

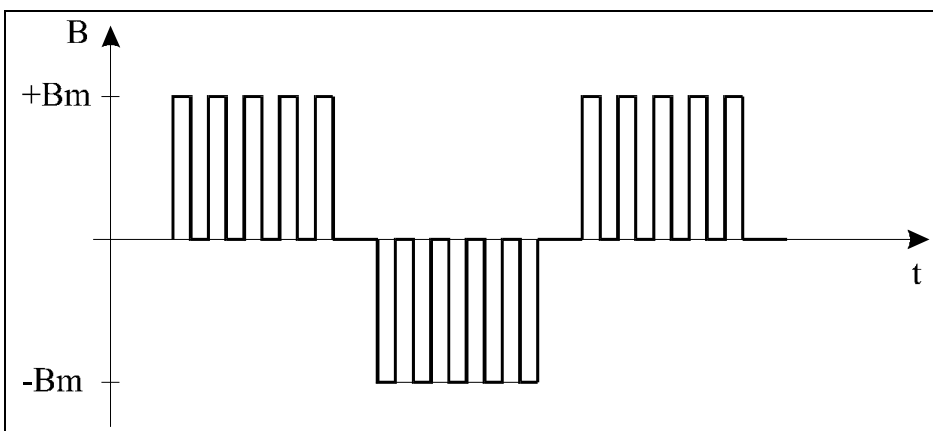
Hz ali 6.25 Hz in je tako enaka 1/4 oziroma 1/8 omrežne frekvence. Tak izbor omogoča vgrajenim elektronskim vezjem še dodatno zmanjšanje motenj omrežne frekvence iz okolice.



Slika 5.9: Oblika bipolarnega impulznega vzbujanja in elektrodni signal. Signal je potrebno odčitati šele tedaj, ko prehodni pojavi izzvenijo. Diferenčni odčitek izloči vplive izhodiščnega odstopanja, elektrokemijskih potencialov, lezenja itd.

5.3.4. Izboljšano impulzno vzbujanje

Tudi bipolarno impulzno vzbujanje ima svoje pomanjkljivosti, čeprav odraža odlično stabilnost in natančnost! Najpomembnejša slabost je počasnost odčitkov, saj znaša frekvenca vzbujanja le 6.25 Hz ali 12.5 Hz. To omejuje uporabo tega principa pri regulacijah hitrih šaržnih procesov, kjer je potrebno spremembe pretokov dobro slediti s hitrim merilnikom pretoka. V ta namen so razvijalci tega merilnega principa morali poiskati nove rešitve. Hitrost merjenja so uspeli izboljšati z izpopolnjeno obliko impulznega vzbujanja, kot ga prikazuje slika 5.10.



Slika 5.10: Izpopolnjeno bipolarno impulzno vzbujanje

V izpopolnjenem impulznem režimu osnovni signal nizke frekvence omogoča izločitev vpliva elektrokemijskih potencialov in lezenja izhodiščnih potencialov tako, kot pri osnovnem bipolarnem impulznem vzbujanju. Dodatni visokofrekvenčni signal (višje frekvence od omrežne frekvence 50 Hz) pa omogoča bistveno povečanje hitrosti odziva merilnika. Meritev namreč poteka v dveh paralelnih vejah: v počasni, a zelo stabilni in natančni veji, ter v hitri veji nižje natančnosti. Obe meritvi mikroprocesor kombinira tako, da je merilni rezultat hkrati natančen, stabilen in hiter.

5.3. Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka

5.3.5. Prednosti in slabosti elektromagnetnega induktivnega merilnika pretoka

Elektromagnetni induktivni merilnik pretoka ima v primerjavi z drugimi merilnimi metodami nekatere zelo izrazite prednosti. Najpomembnejše so:

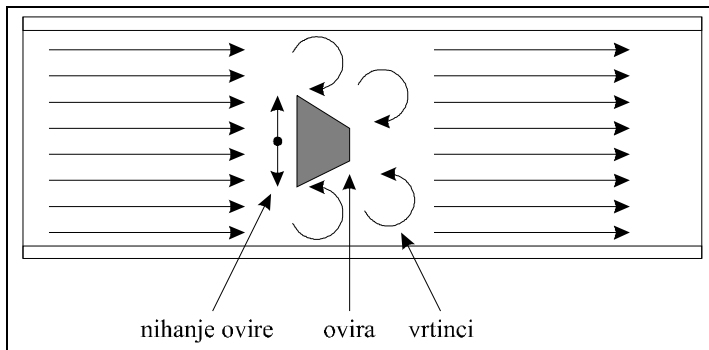
- v tekočinskem vodu povzroča le zanemarljiv padec tlaka (praktično toliko, kot ekvivalentni cevni odsek),
- v pretoku tekočine ni nobene ovire (ni razlogov za nabiranje nečistoč, vlaken, mulja itd.) in/ali premičnih delov,
- omogoča merjenje pretoka suspenzij, gošče,
- izravnava pred-toka tekočine z ravnimi odseki cevi zahteva bistveno krajše razdalje od številnih drugih metod, npr. merilne zaslonke, vrtinčnega merilnika itd,
- omogoča merjenje pretoka v obe smeri,
- meri volumetrični pretok brez izrazite odvisnosti od temperature, tlaka, viskoznosti ali gostote tekočine.

Pri uporabi tega merilnega postopka oziroma pri izboru merilnikov pa moramo biti pozorni na naslednje slabosti:

- merjenje pretoka je možno le za **električno prevodne tekočine**; prevodnost mora biti boljša od $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ (pitna ali industrijska voda je običajno dovolj prevodna),
- presek merilnega dela cevi merilnika mora biti vedno poln tekočine, na točnost pa vpliva tudi prisotnost zračnih ali drugih plinskih mehurčkov (polnost preseka je mogoče doseči s sifonsko montažo),
- zaradi zelo nizkih elektrodnih potencialov je potrebna velika previdnost pri izvedbi izenačitve potencialov merilnika in merjene tekočine,
- izbor elektrodnega materiala je kritičen,
- uporaben merilni obseg je relativno ozek; hitrosti medija morajo doseči vrednost med 0.5 m/s in 10 m/s.

5.4. Vrtinčni merilnik (Vortex)

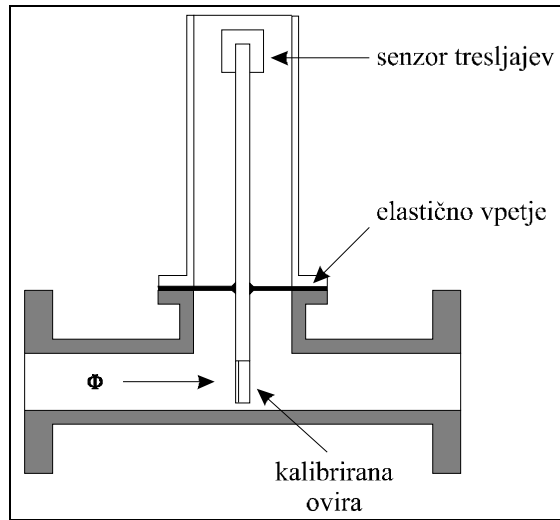
Vrtinčni merilnik pretoka (Vortex) je sodoben merilni sistem, katerega število instalacij nezadržno narašča. Ta merilni princip je primeren tako za tekočine, kot tudi za pline, proizvajalci pa ga priporočajo tudi kot merilni instrument za merjenje pretoka pare, za katerega so bile do sedaj v uporabi predvsem merilne zaslonke. Merilni princip temelji na merjenju vibracij, ki jih povzročajo vrtinci v mediju, v katerega postavimo oviro.



Slika 5.11: Osnovni princip merjenja pretoka na osnovi vrtnicev

Če izmerimo frekvenco pojavljanja teh vibracij, ugotovimo, da je ta proporcionalna hitrosti fluida, ki teče preko ovire. Odvisnost je linearna, kar je še posebej ugodno. Problem pa je, kako te vibracije izmeriti. Pri prvih industrijskih merilnikih te vrste so za oviro namestili dve občutljivi temperaturni tipali (Pt-100), ki ju je grel električni tok. Vrtinci so neenakomerno odnašali toploto iz tipal, zato se je njuna upornost spreminjala nihajoče v ritmu vrtnicev. Spremembo upornosti je bilo mogoče izmeriti kot nihanje ravnotežne napetosti Wheatstone-ovega mostička. Sledil je le še merilnik frekvence nihanja te upornosti, izhodna frekvenca pa je nato merilo pretoka oziroma hitrosti. Ta merilni princip je imel številne pomanjkljivosti, med ostalim je zelo omejeval temperaturno območje delovanja merilnika. Drugi princip zaznavanja vrtnicev je temeljil na merjenju tlačnih sprememb v fluidu s pomočjo občutljivega in hitrega merilnika diferencialnega tlaka. Tudi ta način ni doživel množične uporabe. Nekatere sodobne izvedbe temeljijo na direktnem merjenju nihanja elastično vpete ovire v cevovodu, kot ga prikazuje slika 5.12. Pri merilniku, kot je prikazan na sliki 5.12, je kalibrirani del ovire

5.4. Vrtinčni merilnik (Vortex)



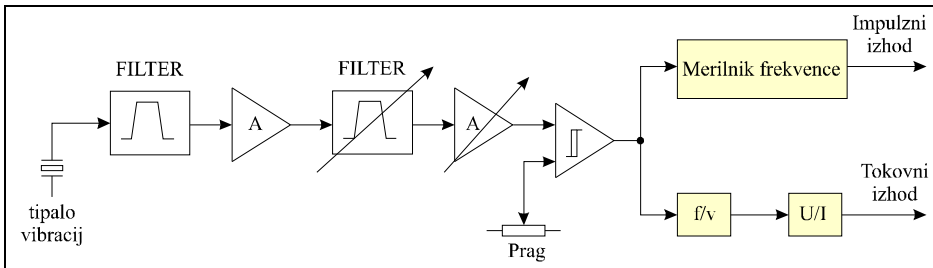
Slika 5.12: Prerez sodobnega Vortex merilnika pretoka

izdelan na koncu kovinskega droga, ki je elastično vpet s pomočjo zaporne membrane. Drugi konec droga je opremljen s senzorjem tresljajev, ki deluje na principu merjenja spreminjajoče se kapacitivnosti, napetosti piezoelektričnega kristala ali inducirane napetosti v tuljavici, nameščeni v polje permanentnega magneta. Povezovalni drog je lahko dolg tudi nekaj 10 cm in služi izolaciji sensorja tresljajev od možne visoke temperature fluida, katerega pretok želimo meriti.

5.4.1. Obdelava električnega signala

Električni signal, ki ga dobimo na izhodu iz sensorja, je (kot običajno!) zelo šibek. Potrebno ga je ojačiti, z električnim filtrom izločiti neželene motilne signale in ga nato pretvoriti v pravokotno obliko, primerno za digitalno merjenje frekvence (slika 5.13).

Pri tem je pogosto potrebno stopnjo ojačenja signala, karakteristiko filtra in nivo praga prilagajati lastnostim fluida, ki teče skozi merilnik, pa tudi zunanjim vplivom, med katerimi so najpomembnejše vibracije, ki jih v cevovodu povzročajo pulzacije črpalk, tresenje procesnih postrojenj itd. Za ustrezne nastavitve parametrov signalne obdelave je potrebno slediti navodilom proizvajalca merilnega instrumenta.



Slika 5.13: Blokovna shema tipičnega merilnega pretvornika za vrtnični merilnik pretoka

5.4.2. Merilno območje

Posebna lastnost tovrstnih merilnikov pretoka je v njihovi neodvisnosti merilnega rezultata od gostote in drugih lastnosti fluida, ki teče skozi merilnik. Frekvenca vrtnicev je namreč proporcionalna hitrosti medija - pri isti hitrosti je praktično enaka ne glede na to, ali merimo pretok plinov, pare, vode itd. Merilnik tako meri volumski pretok fluida in je kalibriran v impulzih/volumsko enoto. Lastnosti fluida pa vplivajo na širino merilnega območja. Med njimi sta najpomembnejši gostota in viskoznost, ki določata predvsem spodnjo mejo merilnega območja. Gostejše fluide lahko merimo pri nižjih pretokih kot redkejše. Viskoznejši fluide imajo ožje merilno območje od manj viskoznih fluidov. Uporabno območje hitrosti za vodo znaša med pribl. 0.2 m/s in 10 m/s. Pri plinih in pari je zgornja hitrostna meja lahko tudi bistveno višja (50 m/s in več). V merilnem območju volumskih pretokov, ki so glede na hitrostne obsege določeni predvsem z nazivnim presekom merilnika, je mogoče doseči merilne negotovosti v razredu 1% ali boljše. Ta natančnost je v veliko primerih, predvsem pa v regulacijske namene, zelo sprejemljiva.

5.4.3. Posebnosti montaže

Vrtnični merilniki pretoka (Vortex) zahtevajo urejen turbulenten pretok fluida preko merilne ovire. Zaradi tega je potrebno pred merilnikom ter za njim z dovolj dolgimi ravnimi odseki (najmanj 15 nazivnih premerov cevovoda) pretok fluida primerno umiriti, sicer lahko rezultati bistveno odstopajo od prave vrednosti. Za

5.4. Vrtinčni merilnik (Vortex)

dvojnimi koleni ali regulacijskimi ventili pa je potrebno tudi do 45 nazivnih premerov izravnalnih odsekov, da bi pretok fluida dovolj umirili.

Glede na to, da sodobni vrtinčni merilniki zaznavajo nihanje merilne ovire, moramo pri montaži paziti, da se po cevovodih do mernika ne prenašajo vibracije drugih procesnih elementov, predvsem batnih črpalk, raznih mlinov, transportnih naprav itd. Merilnike tipa Vortex lahko načeloma montiramo v katerikoli orientaciji. Toda pri tem moramo paziti, da je:

- merilnik vedno poln tekočine, če merimo pretok tekočih fluidov (veljajo enake montažne možnosti, kot pri merilni zaslonki),
- da je elektronski del merilnika nameščen tako, da je hlajenje čim učinkovitejše, oziroma da se ne segreva zaradi toplotne konvekcije od vročih cevovodov.

5.4.4. Prednosti in slabosti

Prednosti:

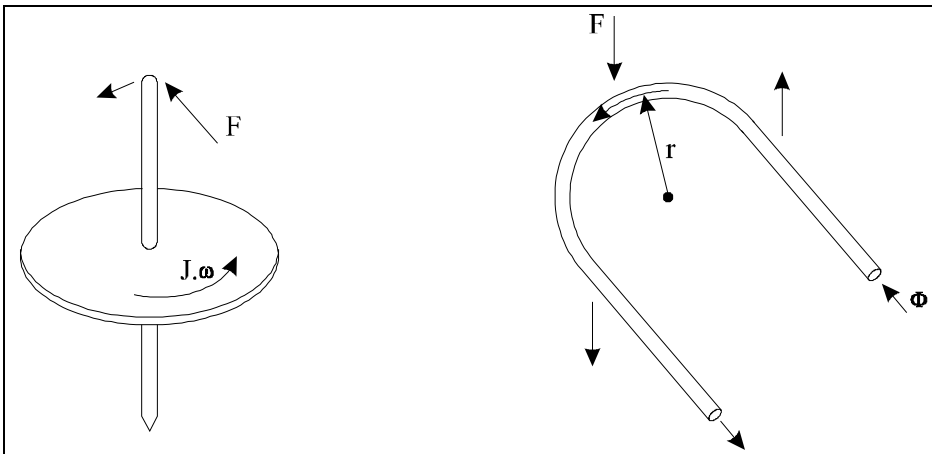
- zanemarljiva odvisnost merilnega rezultata (volumskega pretoka) od hidrodinamičnih parametrov tekočine, temperature itd.,
- nima gibljivih delov,
- enostavna montaža in vzdrževanje,
- široko merilno območje in sprejemljiva natančnost,
- široko temperaturno območje.

Slabosti:

- ovira v pretoku - relativno velik padec tlaka,
- možnost nabiranja vlaknastih nečistoč na merilni oviri,
- omejene uporabne dimenzije oz. maksimalni pretoki (npr. DN 300).

5.5. Coriolisov merilnik pretoka

Pod imenom Coriolisov merilnik pretoka se čedalje bolj uveljavlja sodoben merilni princip, ki je namenjen merjenju **masnega pretoka** tekočin. Z nekaterimi posebnimi izvedbami je sicer možno meriti tudi pretoke plinov, vendar jih v ta namen v industriji le redko uporabljajo. Čeprav nosijo ime po Coriolisovi sili, pa večina izvedb teh merilnikov pravzaprav meri na osnovi vztrajnosti tekočin, ki tečejo preko cevi v merilniku. Slika 5.14 ponazarja primerjavo med obnašanjem hitro vrteče-se vrtavke in tekočine, ki teče skozi U-cev merilnika.

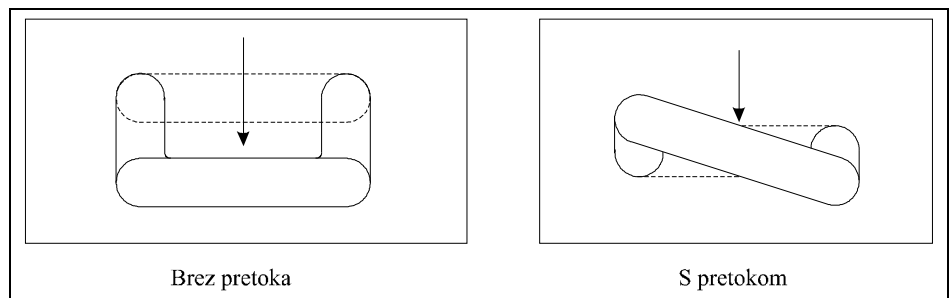


Slika 5.14: Primerjava med reakcijo vrteče-se vrtavke in U-cevi s pretokom tekočin pri delovanju sile F

Če želimo vrtavko odkloniti v smeri sile F (od sebe), potem se bo odmaknila v stran in pričela precesirati. Če poskušamo U-cev, skozi katero teče tekočina z veliko hitrostjo upogniti navzdol, potem se bo upognila tako, kot nakazujejo puščice na sliki. Če pa pretoka ni, bi se cev enakomerno upognila navzdol na obeh straneh, kot je to prikazano na sliki 5.15 v pogledu od strani zavoja.

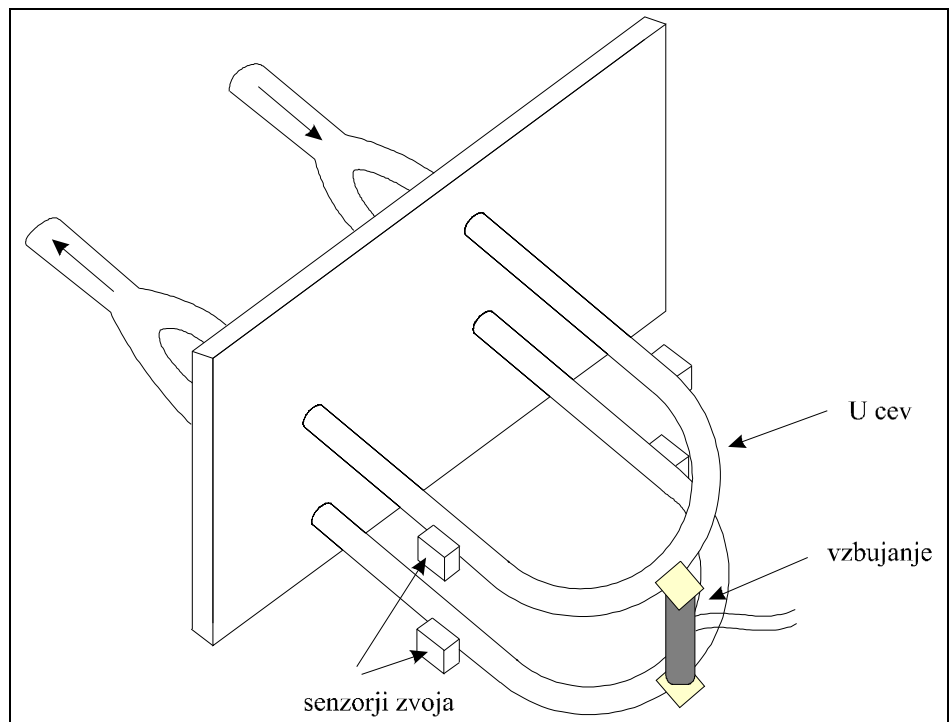
Zvoj cevi je tem večji, čim večja je hitrost tekočine. Proporcionalen je pravemu masnemu pretoku, saj vztrajnost določa masa tekočine. Da bi dosegli večjo občutljivost na pretok ter hkrati manjšo občutljivost na zunanje motnje, je v praksi v uporabi dvojna U-cev, pri kateri se pretok enakomerno razdeli med obe cevi.

5.5. Coriolisov merilnik pretoka



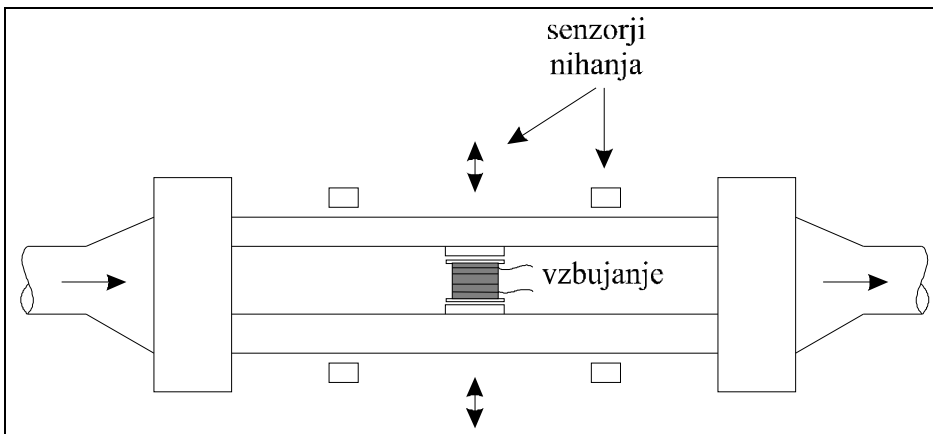
Slika 5.15: Ponazoritev odklona U-cevi pri upogibu s silo F . V primeru, ko preko cevi teče pretok, se U-cev zvije

Podrobnosti rešitve prikazuje slika 5.16.



Slika 5.16: "Coriolisov" merilnik z dvojno U-cevjo

Z elektromagnetnim sistemom vzbujamo U-cevi, da pričneta nihati z njuno lastno frekvenco. Senzorji zvoja (elektromagnetni, optični, kapacitivni itd.) detektirajo nihanje U-cevi. Če pretoka skozi cevi ni, je nihanje sofazno. Ko prične teči skozi cevi tekočina, se pričneta U-cevi zvijsati. Senzorji zvoja zaznajo nihanje z različnim faznim premikom. Izkaže se, da je ta fazna razlika linearno proporcionalna masnemu pretoku tekočine. Fazno razliko je mogoče zelo natančno meriti in jo z elektronskimi vezji pretvoriti v standardni tokovni signal. Številni proizvajalci merilnikov "Coriolis" so preoblikovali U-cevi na najrazličnejše načine (v obliko tuljave, v obliko črk Ω , S, B, Z itd.). Glavna razloga sta: iskanje večje občutljivosti ter izogibanje obstoječim patentom. Kljub temu, da praviloma zahtevnejše oblikovane cevi merilnika omogočajo večje občutljivosti in s tem dosežejo nižjo spodnjo mejo uporabnega merilnega območja, pa postajajo taki merilniki zato vse manj primerni za vzdrževanje, saj je zahtevno obliko cevi težko čistiti. Novi merilniki imajo zato zopet čedalje enostavnejši sistem cevi, zelo pogosta je rešitev z dvojno ravno cevjo, kot je prikazana na sliki 5.17.



Slika 5.17: "Coriolisov" merilnik z dvojno ravno cevjo

Sistem z dvojno ravno cevjo je zelo enostavno čistiti, povzroča manjši padec tlaka v sistemu, a je zato manj občutljiv. Cevi so pogosto izdelane iz titana ali cirkonija. Zato so kemijsko zelo odporne, a hkrati zdržijo visoke procesne tlake. Ker so lahke, je za vzbujanje potrebno manj energije.

5.5. Coriolisov merilnik pretoka

5.5.1. Posebnosti "Coriolisovih" merilnikov pretoka

Lastna frekvenca nihanja cevi je proporcionalna njihovi masi. Ker se masa cevi ne spreminja, je frekvenca nihanja proporcionalna tudi gostoti fluida, ki teče skozi merilnik. Z merjenjem frekvence nihanja je tako mogoče meriti tudi gostoto. In ker je pri tem potrebno upoštevati še temperaturo cevi, vsak merilni sistem vsebuje še tipalo temperature. Iz enega merilnega sistema na ta način dobimo kar tri pomembne procesne veličine: masni pretok, gostoto in temperaturo.

Pri "Coriolisovem" merilniku oblika pretoka bistveno ne vpliva na merilni rezultat. Zaradi tega posebni izravnalni cevovodi niso potrebni.

Merilnik je mogoče instalirati v različnih orientacijah. Primerne so tiste, ki omogočajo odvajanje mehurčkov, preprečujejo nalaganje usedlin in pri katerih sila gravitacije deluje simetrično na obe cevi. Upogibne in torzijske sile na prirobnicah merilnika niso zaželeni in se jih je potrebno izogibati. Tudi pri tem merilniku je priporočljivo izbrati tako orientacijo, ki preprečuje, da bi se elektronski del merilnika pretirano grel ali hladil zaradi konvekcijskih tokov od procesne instalacije.

5.5.2. Prednosti in slabosti "Coriolisovih" merilnikov pretokov

Prednosti:

- merjenje masnega pretoka tekočin,
- možno sočasno merjenje pretoka, gostote in temperature,
- enostavno čiščenje pri ravnih izvedbah cevi,
- nekritičnost instalacije pred in za merilnikom,
- visoka natančnost (0.1%).

Slabosti:

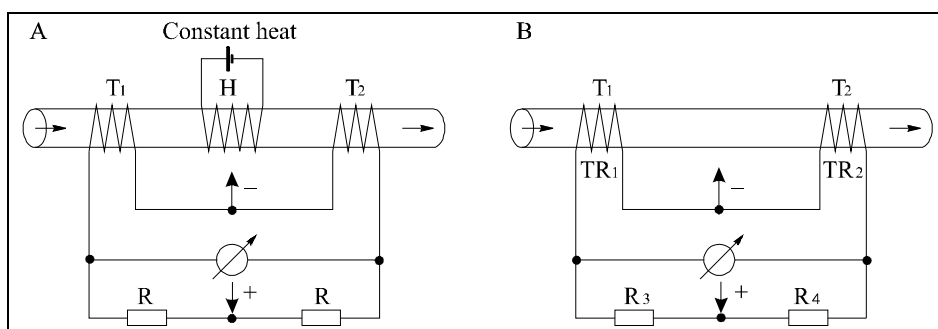
- težko čiščenje pri zahtevnejših oblikah merilnih cevi,
- primerni so le za majhne nazivne preseke cevi (DN 100 itd),

- visok padec tlaka,
- primerni so predvsem za tekočine (ne za pline).

5.6. Termični-masni merilniki pretoka

Za merjenje masnih pretokov plinov so primerni termični-masni merilniki pretoka. Njihova uporaba je zelo razširjena v industrijah “visoke tehnologije”, kot npr. v polprevodniški industriji, pri izdelavi optičnih vlaken, pri naprševanju. Večje izvedbe so primerne za merjenje pretokov zraka, dimnih plinov, CO₂ in drugih zaščitnih plinov v termoenergetskih napravah, v jeklarski industriji, v pivovarstvu, v čistilnih napravah itd.

Termični-masni merilniki pretoka delujejo na enem izmed dveh uveljavljenih merilnih principov, ki sta prikazana na sliki 5.18. Prvi princip je uveljavljen za majhne, drugi pa za večje pretoke.



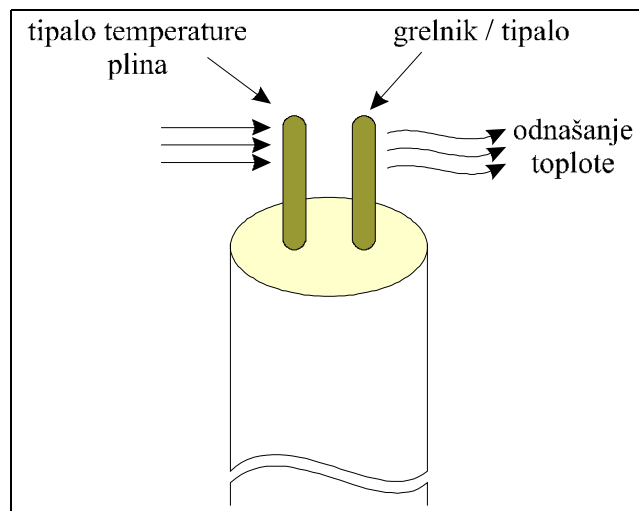
Slika 5.18: Dva osnovna principa merjenja masnih pretokov plinov

Pri principu A grelnik H segreva cev (kapilaro), preko katere teče plin. Toplota grelnika se širi enakomerno proti dvema uporovnima tipaloma temperature (npr. Pt-100). Če v cevi ni pretoka, obe tipali izmerita enako temperaturo, zato Wheatstone-ov mostiček ostane v ravnotežju. Pri pretoku plina skozi cev pa se prehod toplote proti tipalu T₁ zmanjša, proti tipalu T₂ pa poveča. Nastala temperaturna razlika povzroči porušitev ravnotežja mostička. Izmerjena napetost mostička je proporcionalna masnemu pretoku plina. Spremembo prehoda toplote namreč povzročijo molekule plina, ki toploto prenašajo.

5.6. Termični-masni merilniki pretoka

Princip B je zelo podoben principu A, le da v tem primeru temperaturni tipali hkrati tudi grejeta sistem s tokom, ki ga določajo upornosti v Wheatstone-ovem mostičku. Temperatura na mestu T_2 se pri pretoku plina dvigne, saj molekule prenesejo del toplote od prvega grelnika (tipala) k drugemu. Zelo pogosta pa je tudi tretja varianta, pri kateri imamo prav tako dve uporovni temperaturni tipali. Prvo meri temperaturo plina, drugo pa služi hkrati kot grelnik in kot tipalo. S posebnim elektronskim vezjem grejemo drugo tipalo tako, da ima vedno konstantno temperaturno razliko do prvega tipala. Pri pretoku plina se drugo tipalo hladi. Elektronsko vezje zato povečuje tok skozi drugo tipalo, da bi nadomestilo izgubo toplote. Izkaže se, da je ta tok proporcionalen masnemu pretoku plina skozi sistem.

Ta tretja varianta je mogoča tudi v "odprti" obliki, kot jo prikazuje slika 5.19. Kot taka pravzaprav meri hitrost plina, iz katere lahko pri znanem preseku kanala izračunamo masni pretok plina.



Slika 5.19: Merilna glava termičnega-masnega merilnika hitrosti/pretoka

5.6.1. Prednosti in slabosti termičnega-masnega merilnika pretoka

Prednosti:

- meri masni pretok plinov,
- merilni princip je mogoče prirediti za izjemno široko področje pretokov plinov - od nekaj ml/min do skorajda poljubnih pretokov v odprti izvedbi,
- merilnik v odprti izvedbi povzroča le zanemarljiv padec tlaka (podobno kot Pitot-ova cev),
- občutljivost tega merilnega principa je za razliko od vseh ostalih merilnih metod odlična tudi pri nizkih pretokih.

Slabosti:

- natančnosti pod 1% je težko doseči,
- pri izvedbi s kapilaro je problem mašenja zaradi nečistoč zelo pereč,
- pri izvedbah s kapilaro je padec tlaka lahko zelo velik,
- merilni rezultat je odvisen od toplotnih lastnosti plinov, zato je potrebno merilni rezultat pri različnih plinih preračunati oziroma merilnik prekalibrirati.

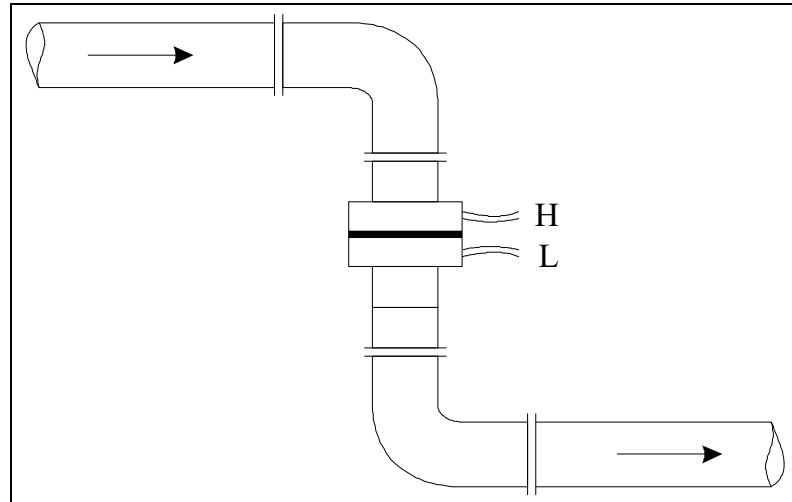
Idealni merilnik pretoka naj bi izmeril masni ali volumski pretok plina ali tekočine, naj ne bi pri tem povzročal zaznavnega padca tlaka, naj bi deloval tudi pri nečistih fluidih, bi bil enostaven za čiščenje in vzdrževanje, naj bi ne imel vrtečih se delov (dolga življenjska doba), naj bi omogočal uporabo korozijsko, temperaturno in abrazijsko odpornih materialov, naj bi dosegal natančnosti blizu 0.1% ali bolje. Mnogi izmed sodobnih merilnih principov so po nekaterih lastnostih že zelo blizu tem idealnim zahtevam - toda njihove omejitve onemogočajo, da bi bili uporabni v vsakem možnem primeru v procesni industriji. Pri izboru je zato potrebno vedno iskati kompromis med prednostmi in slabostmi možnih rešitev. Zaradi tega je pomembno, da posamezne merilne principe temeljito razumemo, da bi znali v konkretnem primeru izbrati najustreznejšo rešitev. Neustrezen izbor merilnika pretoka je namreč vedno povezan z velikimi stroški, saj so cene merilnikov pretoka v primerjavi z ostalimi množičnimi merilnimi sistemi relativno visoke.

5.6. Termični-masni merilniki pretoka

Naloge

NALOGA 5.1

V čem je namestitev merilne zaslonke po sliki 5.20 napačna?



Slika 5.20: Namestitev merilne zaslonke

NALOGA 5.2

Naštejte nekaj merilnih postopkov za merjenje pretoka plinov, tekočin in sipkih materialov, ki lahko na izhodu dajo električni signal!

NALOGA 5.3

Naročate merilnik pretoka umazane vode za čistilno napravo. Dobavitelj želi vedeti, kakšen merilni obseg potrebujete. Kako bi s priročnimi sredstvi ocenili pretok odplak v odprtem betonskem kanalu?

NALOGA 5.4

Kako bi s preprostimi sredstvi ocenili pretok odpadne vode v odtočnem kanalu? Kateri od znanih merilnih sistemov bi uporabili za daljinsko merjenje?

NALOGA 5.5

Naštejte 10 do 15 metod za merjenje pretoka različnih medijev! Če ne poznate ustreznega imena metode, lahko s preprosto skico nakažete princip.

NALOGA 5.6

Dimenzionirajte Venturijevo cev, če želimo meriti pretoke vode okrog $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$. Koeficient učinkovitosti merilnika $C=0.98$, na razpolago pa imamo živosrebrni manometer z dolžino skale 70 cm. Površina prereza cevi po kateri teče voda je 2.5 dm^2 , vpliv temperature na meritev pa lahko zanemarimo. Specifična teža živega srebra je 13.55-krat večja od specifične teže vode. V katero skupino merilnikov pretoka sodijo Venturijeve cevi? Naštete še tri različne tipe merilnikov, ki izkoriščajo enak princip merjenja! Naštete tri glavne slabosti merilnikov tega tipa!

NALOGA 5.7

Zakaj so predpisani ravni in gladki odseki procesne instalacije (cevi) pred in za merilno zaslonko, Dallovo cevjo zožitvijo, Pitot-ovo cevjo ali nekaterimi drugimi senzorskimi sistemi za merjenje pretoka medijev?

NALOGA 5.8

Kako bi s priročnimi sredstvi izmerili odvisnost pretoka vode iz vodovodne pipe od kota odprtosti?

- Katera priročna sredstva bi uporabili?
- Skicirajte hipotetično (namišljeno) karakteristiko!
- Kakšna bi bila razlika med izmerjeno karakteristiko v dnevnem oz. nočnem času (kaj bi meritev močno motilo)?

Op.: Tak postopek pogosto uporabljajo pri nastavljanju gorilnikov oz. mazutnih ventilov pri parnih in vročevodnih kotlih.

NALOGA 5.9

Kako bi s priročnimi sredstvi približno izmerili pretok odpadne vode v kanalu s trapeznim presekom na sliki 5.21? Podatek potrebujete kot osnovo za naročilo primerne merilne sistema! Katera merilna sredstva bi pri tem potrebovali?

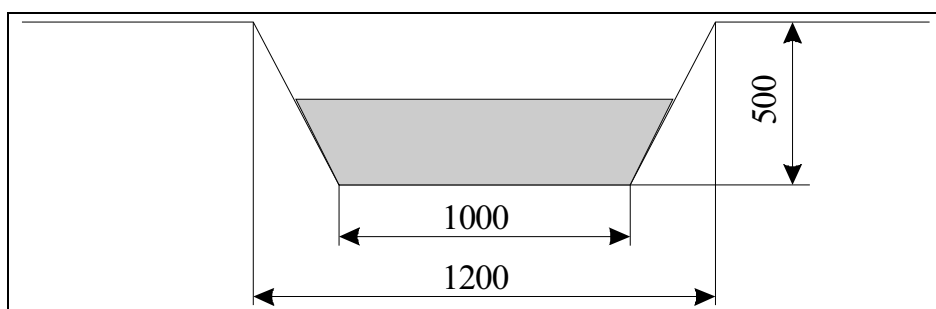
NALOGA 5.10

Na kaj moramo paziti pri montaži merilne zaslonke za merjenje pretoka tekočin?

NALOGA 5.11

Regulirati želimo pretok plina po ceveh, ki so nameščene pod tlemi obrata v vodoravni legi. Ali je izbira rotametra primerna za meritev takšnega tipa? Utemeljite!

5.6. Termični-masni merilniki pretoka



Slika 5.21: Trapezni kanal

NALOGA 5.12

Meriti želimo pretoke agresivnih tekočin pod velikim tlakom (okrog 20000 kPa). Signal želimo voditi na komandno ploščo obrata s pomočjo električnega signala. Poiščite ustrezno napravo!

6.

O izbiri in dimenzioniranju regulacijskih ventilov

Namen tega poglavja je predstaviti kratek vodnik po postopku izbire regulacijskih ventilov. Procesni regulacijski ventili, na katere se bomo omejili, so eni najbolj pogostih izvršnih sistemov procesnega vodenja, zaradi česar smo jim posvetili več pozornosti. Naš namen ni prikazati celoten postopek izbire z vsemi podrobnostmi in izračuni, temveč opozoriti na kompleksnost izbire regulacijskih ventilov. Ta postopek je v primerjavi z izbiro drugih gradnikov avtomatskega vodenja veliko zahtevnejši in se ne da primerjati z izbiro le po katalogih, kot je to pri večini preostalih gradnikov v sistemih vodenja.

Vsebina poglavja je povzeta po delih [56] in [59] in ima namen dopolniti opis in razvrstitev v [58]. Podrobnejše opise najdemo tudi v delu [57].

Procesni ventili so naprave, s katerimi lahko spreminjamo pretok fluida ali pa ga popolnoma prekinemo/sprostimo. Ventil je sestavljen iz dveh osnovnih enot: pogonskega in izvršnega dela.

Pogonski del

Regulacijske ventile poganjajo električni, pnevmatski in hidravlični pogoni. Ventil ima lahko tudi ročni pogon, vendar ga v regulacijskih zankah uporabljamo le za zasilno rešitev ob izpadu regulacijskega sistema ali napajalnega vira.

Električni je najenostavnejši način pogona, saj omogoča neposreden prenos regulacijskega signala od regulatorja do izvršnega dela brez pretvorbe energije (iz električne v pnevmatsko ali hidravlično). Primeren je za manjše sile v neeksplozivnem okolju.

Pnevmatski pogoni so enostavni, robustni, zanesljivi in poceni. Odporni so na agresivno atmosfero in niso eksplozijsko nevarni. V kemijski in procesni industriji prevladujejo.

Hidravlični pogoni so po lastnostih podobni pnevmatskim, le da so sposobni delovati z večjo silo ali navorom. Uporabljamo jih pri transportnih napravah in pri obdelavi kovin.

Izvršni del

Ventile lahko delimo na več načinov. Po načinu delovanja jih delimo na zaporne in regulacijske.

Zaporni ali on-off ventili so v normalnem načinu delovanja največkrat odprti, v zapornem režimu pa popolnoma zaprejo pretok. Regulacijski ventili so namenjeni uravnavanju masnega oziroma volumskega pretoka fluidov in izrabljajo polno območje hoda, vendar ni nujno, da pri zaprtju zagotavljajo popolno neprepustnost.

Ventili imajo različne karakteristike: linearno, enakoprocentno, parabolično, hiperbolično, logaritmično itd. Najpogostejši sta linearna in enakoprocentna. Za enakoprocentne karakteristike je značilno, da dajejo v vsakem položaju ventila za enako spremembo hoda enako procentno spremembo proste površine, preračunano na pretočno površino ventila (ki jo je imel ventil pred spremembo premika). Na karakteristikah lahko vidimo, da pretoka nekateri regulacijski ventili ne zapirajo popolnoma. Zato v praksi, kadar želimo popolno tesnenje, ponavadi zaporedno namestimo regulacijski in zaporni ventil.

Glede na obnašanje ob izpadu energije ločimo ventile s pomnjenjem in ventile z vnaprej določenim položajem mirovanja. Ventili s pomnjenjem obdržijo položaj, v katerem so bili v trenutku izpada. Ventili z vnaprej določenim položajem mirovanja pa ob izpadu zavzamejo popolnoma odprt ali zaprt položaj.

Ventil je sestavljen iz telesa ventila in aktuatorja. Telo ventila sestavljajo: ohišje, premični del, vodilo, sedež in tesnilo vodila.

O izbiri in dimenzioniranju regulacijskih ventilov

Glede na izvedbo premičnega dela obstaja več vrst ventilov. Naštejmo le najpomembnejše skupine, katerih slike si lahko ogledamo v [56, 58]:

Ventili s čepom spadajo med najstarejše krmilne ventile. V osnovi čep premika vreteno. Oblike čepov so različne: parabolični, iglični in naluknjani čep, čep z izrezom oblike V. Za povečanje življenjske dobe in za boljše tesnenje sta čep in sedež ventila prevlečena z različnimi materiali. Ventili s čepom so namenjeni zapiranju, v omejenem obsegu pa tudi reguliranju tekočin.

Ventili z loputo so primerni v procesih z velikimi premeri cevi in majhnim padcem tlaka. Odlikujejo jih enostavna in robustna izvedba, majhna teža, ugodna cena in neobčutljivost na umazanijo. Njihova karakteristika je podobna enakoprocenčni. Slabost predstavlja ležaj v tekočinskem toku, ki je izpostavljen korozijskim vplivom tekočine, zato se uporabljajo za neagresivne medije.

Krogelni ventili so namenjeni za manjše pretoke. V običajni izvedbi imajo nelinearno karakteristiko. Z vgradnjo dodatne plošče na izhodni strani krogle lahko karakteristiko spremenimo v linearno, kvadratično ali enakoprocenčno.

Ventilski zasuni so ponavadi le v popolnoma odprtem ali zaprtem položaju in niso namenjeni reguliranju pretoka. Zaporni člen je klin oziroma ploščica, ki jo pomikamo navzgor ali navzdol. V odprtem položaju ne povzročajo upora pretočnemu mediju. Uporabni so za pretok tekočin v obeh smereh.

Membranske ventile zapiramo s pritiskom na gumijasto membrano, zato imajo ti ventili nelinearno karakteristiko. Membrana poskrbi tudi, da tekočina ne pride v stik z drugimi gibljivimi deli ventila, zato so membranski ventili primerni za regulacijo pretoka agresivnih in umazanih tekočin.

Vsi opisani ventili so dvokraki. Poznamo tudi trokrake ventile, ki jih delimo na: mešalne in razdelilne. Uporabljamo jih v ogrevalnih in klimatskih sistemih ter pečeh.

Glede na izvedbo delimo ventile na ravne in kotne, ki poleg velikosti spreminjajo tudi smer pretoka.

Ventile delimo tudi glede na število sedežev na eno ali dvosedežne ventile. Z dvosedežnimi zmanjšamo obremenitve na čep in vodilo ventila. Pogosto uporabljamo dva različna čepa, saj se s tem zmanjša možnost oscilacij.

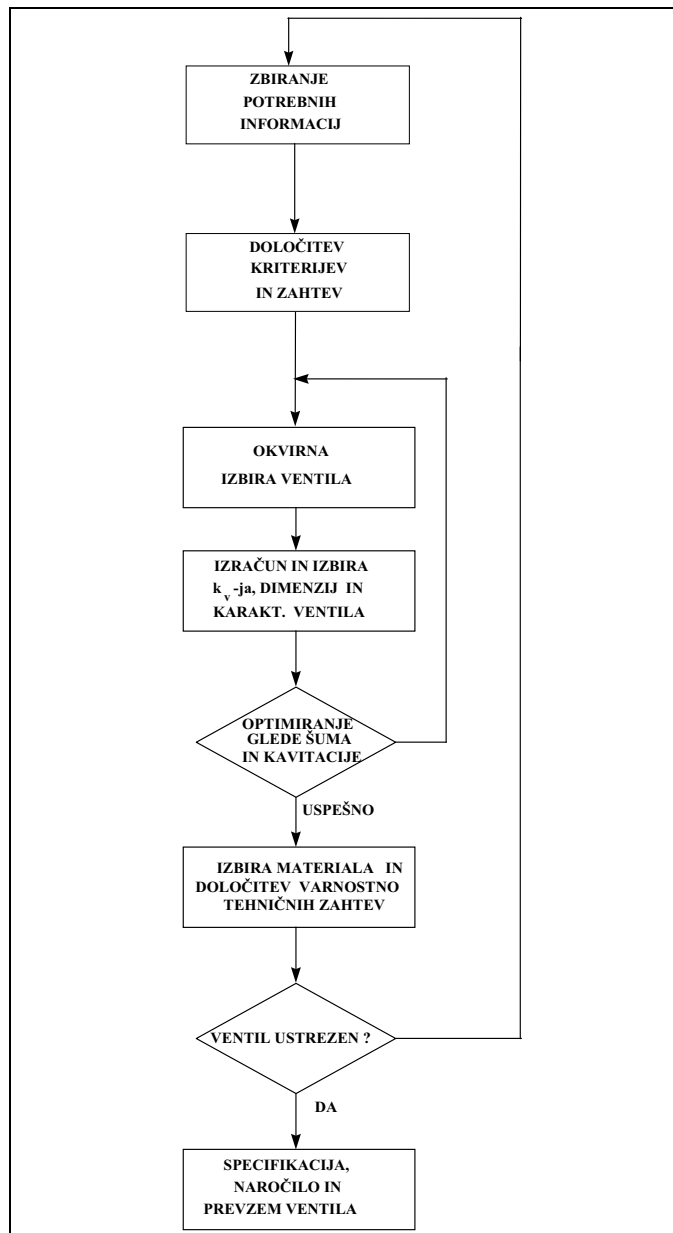
6.1. Postopek izbire in dimezioniranje ventila

Pri izbiri regulacijskega ventila moramo sprejeti odločitve o:

- nazivnemu tlaku,
- vrsti ventila,
- izvedbi prirobnic,
- vrsti pogona,
- lastnostih pogonskega dela,
- obliki pretočne karakteristike,
- vrednosti koeficienta pretoka,
- izvedbi dušilnega elementa,
- materialu ventila,
- dopustnem pretoku v zaprtem stanju,
- načinu obnašanja pri izpadu pomožne energije in
- načinu priključka in vrsti zaščite pogonskega dela.

Iterativni postopek izbiranja ventila prikazuje slika 6.1.

6.1. Postopek izbire in dimezioniranje ventila



Slika 6.1: Postopek izbiranja regulacijskega ventila

Tako kot so prikazane faze postopka v diagramu na sliki 6.1, sledi tudi opis posameznih faz.

6.1.1. Zbiranje potrebnih informacij

Prva faza izbiranja ventila obsega zbiranje podatkov in informacij, ki bodo vplivali na izbiro in dimenzioniranje. Glede na stopnjo pomembnosti ločimo

primarne podatke:

- stanje medija v ventilu: tekočina, plin, mešanica,
- gostota (molska masa) in viskoznost,
- pretoki: minimalni, normalni, maksimalni,
- temperatura: minimalna, maksimalna,
- želena karakteristika ventila: linearna, enakoprocentna, druga,
- minimalni padec tlaka na ventilu pri maksimalnem pretoku,
- vrsta izvedbe ventila: pretočni, kotni, trikraki (tropotni) itd.,
- potrebno postavno razmerje,
- način obnašanja pri izpadu pomožne energije,
- dimenzije ventila in cevi,

sekundarne podatke:

- kemijska formula medija,
- parni tlak,
- kritični termodinamični tlak,
- razmerje specifičnih toplot,

6.1. Postopek izbire in dimezioniranje ventila

- realni plinski koeficient,
- uporovna karakteristika sistema,
- zahteve po posebnih materialih ali konstrukcijah,

informacije:

- spremembe preseka, kolena, razdelilniki pred ventilom in za njim,
- časovne konstante sistema vodenja, želena postavna hitrost,
- podatki o koroziji, eroziji, kavitaciji,
- zahtevno tesnjenje ventila,
- posebne klimatske in varnostne zahteve,
- dopustni nivo šuma,
- zahteve po vzdrževanju, življenjski dobi in posebnih varnostnih ukrepih,
- dopolnilni podatki pri posebnih medijih (kot so klor, kisik ali eksplozivne snovi),
- zahteve montaže in servisiranja.

Primarni so nujno potrebni podatki, sekundarni pa imajo manjšo težo, vendar jih prav tako potrebujemo za dimezioniranje ventilov. Informacije za dimezioniranje ventilov niso nujno potrebne, vendar pomagajo proizvajalcu ventila in projektantu sistema, katerega del je ventil.

6.1.2. Določitev kriterijev in zahtev

Kriterijev in zahtev je veliko, zato pogledjmo le nekatere. Ventil mora imeti dovolj velike dimenzije dušilnega telesa. Srednja delovna točka ventila naj bo med 40 in 70% nazivnega hoda ventila, obenem pa naj ventil nikoli ne preseže območja izven 10 in 90% hoda. Pomembna je tudi karakteristika ventila. Tako naj bi po nekaterih priporočilih za regulacijo pretoka uporabili regulacijski ventil z linearno karakteristiko, za regulacijo tlaka pa ventil z enakoprocentno karakteristiko. Karakteristiko lahko določamo tudi na podlagi razmerij tlakov na ventilu in na celotnem sistemu.

6.1.3. Okvirna izbira vrste ventila

Tu se odločimo predvsem za tip ventila (enosedežni, dvosedežni, krogelni, s čepom itd.) glede na področje uporabe.

6.1.4. Izračun in izbira vrednosti koeficienta pretoka, dimenzij in karakteristike ventila

Pri tem koraku je potrebno opozoriti na vrednosti empirično dobljenih konstant, ki jih vsebujejo enačbe. Te so lahko različne od navedenih, če ne uporabljamo standardnih, marveč angleške merske enote, ki so še vedno v rabi v Ameriki. Tu bodo predstavljene le enačbe za veličine, izražene v standardnih enotah. Enačbe, ki uporabljajo angleške enote, lahko najdemo v delu [57].

Za pretok nestisljivega medija velja približna enačba:

$$\phi_v = k_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (6.1)$$

oziroma:

$$\phi_m = k_v \sqrt{\Delta p \rho} \quad (6.2)$$

pri čemer so:

ϕ_v - volumski pretok [m^3/h];

ϕ_m - masni pretok [kg/h];

Δp - padec tlaka na ventilu [bar];

ρ - gostota tekočine [kg/m^3];

k_v - koeficient pretoka.

V koeficientu pretoka k_v se skriva geometrija in dimenzije ventila. Z uporabo k_v vrednosti je izračun oziroma dimenzioniranje ventila precej poenostavljeno. Parametri za dimenzioniranje ventila ponavadi niso podani v osnovnih enotah (Pa, kg/s). Načelno je bolj priročno računati v barih kot v pascalih, vendar to žal pelje k

6.1. Postopek izbire in dimezioniranje ventila

precejšnji neenotnosti. Pri koeficientu pretoka največkrat ne pišemo enot, čeprav ne gre za brezdimenzijsko število. Nekateri proizvajalci ogrevalno hladilnih sistemov (upoštevajoč, da je pretočni medij samo voda) popolnoma poenostavijo izračun k_v kot razmerje največjega pretoka pri najmanjšem padcu tlaka na ventilu:

$$k_v = \frac{\Phi_{max}}{\sqrt{\Delta p}} \quad (6.3)$$

Takšen izračun je uporaben le za izbiro ventila iz proizvajalčevih tabel (dimenzijsko ne ustreza). Če želimo dobiti neki splošno uporaben rezultat, moramo uporabiti bolj splošni in pogost postopek. Za izračun ventila obstajata dva takšna postopka: klasični in IEC postopek.

Klasični postopek

Koeficient pretoka k_v računamo po različnih enačbah, odvisno od medija, ki se pretaka skozi ventil:

- a) pretočni medij so kapljevine - nestisljivi mediji:
- pri znanem volumskem pretoku:

$$k_v = \frac{\Phi_v}{31.6} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (6.4)$$

- pri znanem masnem pretoku:

$$k_v = \frac{\Phi_m}{31.6} \frac{1}{\sqrt{\rho \Delta p}} \quad (6.5)$$

- b) pretočni medij so plini, katerih razmerje absolutnih tlakov na iztoku in pritoku ventila p_2/p_1 presega vrednost 0.5:
- pri znanem volumskem pretoku:

$$k_v = \frac{\Phi_v}{514} \sqrt{\frac{T_1 \rho_n}{p_2 \Delta p}} \quad (6.6)$$

- pri znanem masnem pretoku:

$$k_v = \frac{\Phi_m}{514} \sqrt{\frac{T_1}{\rho_n p_2 \Delta p}} \quad (6.7)$$

kjer so:

O izbiri in dimenzioniranju regulacijskih ventilov

ρ_n - gostota plina v normalnem stanju [kg/m^3],

T_1 - temperatura na pritoku [K],

p_2 - absolutni tlak na iztoku [bar];

c) pretočni medij so plini, katerih razmerje absolutnih tlakov na pritoku in iztoku ventila p_2/p_1 ne presega vrednosti 0.5:

- pri znanem volumskem pretoku:

$$k_v = \frac{\phi_v}{257 p_1} \sqrt{\rho_n T_1} \quad (6.8)$$

- pri znanem masnem pretoku:

$$k_v = \frac{\phi_m}{257 p_1} \sqrt{\frac{T_1}{\rho_n}} \quad (6.9)$$

kjer je:

p_1 - absolutni tlak na pritoku [bar].

Najpogosteje izračunamo tri vrednosti k_v :

k_{Vnorm} - pri normalnem ϕ in Δp ,

k_{Vmin} - pri najmanjšem ϕ in največjem Δp ,

k_{Vmax} - pri največjem ϕ in najmanjšem Δp .

V izjemnih situacijah (velik pretok pri majhnem tlaku) mora imeti ventil tudi večji k_v , da lahko uspešno opravi nalogo. Ustrezno večji k_{v100} izračunamo s priporočljivo pretočno rezervo a , ki je posledica praktičnih izkušenj:

$$a = \frac{\phi_{100}}{\phi_{max}} = 1.25 \dots 1.30 \quad (6.10)$$

$$k_{v100} = b k_{vmax} \quad (6.11)$$

$$b = \sqrt{\frac{a^2 + V - 1}{V}} \quad (6.12)$$

6.1. Postopek izbire in dimezioniranje ventila

$$V = \frac{\Delta p_{100}}{\Delta p_0} = \frac{\Delta p_{min}}{\Delta p_{max}} \quad (6.13)$$

pri čemer je V razmerje diferencialnih tlakov pri odprtem in zaprtem ventilu.

Iz proizvajalčevih tabel poiščemo najnižjo k_{vs} vrednost (nazivni koeficient pretoka), ki izpolnjuje pogoj $k_{vs} > k_{v100}$. To šele je tista vrednost, ki jo bomo uporabili za nabavo regulacijskega ventila.

Sedaj preverimo še, če je izbrana karakteristika (linearna, enakoprocentna itd.) primerna za obstoječo situacijo. To naredimo tako, da izračunamo hod za največji in najmanjši pretok. Pri kriterijih za izbiro ventila smo omenili, da hod ventila ne sme presegati skrajnih vrednosti (npr. pod 10% in nad 90 %). Če se to zgodi, nismo izbrali primerne karakteristike.

Hod izračunamo po enačbah:

$$\chi = \frac{k_v}{k_{v100}} \quad (6.14)$$

- za linearno karakteristiko:

$$h = \frac{\chi - 0.02}{0.98} \quad (6.15)$$

- za enakoprocentno karakteristiko:

$$h = \frac{\ln \chi}{3.912} + 1 \quad (6.16)$$

V naslednjem koraku izračunamo hod pri k_{vmin} in k_{vmax} in primerjamo ustreznost rezultatov za različne karakteristike. Podrobnejše izračune in ozadja enačb najdemo v [56].

IEC postopek

Enačbe za izračun koeficienta pretoka k_v , ki jih je uveljavila mednarodna elektrotehniška komisija (IEC), so v osnovi podobne klasičnim enačbam. Dodani so korekcijski koeficienti, v katerih se skrivajo naslednji vplivi:

- vpliv geometrije cevovoda,
- vpliv kritičnega razmerja tlakov pri pojavu vparjanja tekočin,

- skupni vpliv geometrije cevovoda in povratne pridobitve tlaka pri tekočinah,
- vpliv Reynoldsovega števila,
- vpliv znižanja tlaka na ventilu pri stisljivih medijih,
- vpliv spremembe gostote pri realnih plinih.

Cena za doseženo večjo točnost zaradi korekcijskih koeficientov je množica enačb oziroma relativno zamuden in zahteven računski postopek, ki največkrat ne odtehta boljšega rezultata. Dobrodošli so računalniški programi, ki precej olajšajo delo. Pri "ročnem" računanju se pri kapljevinah pogosto uporabljata le univerzalni enačbi, ki dajeta dovolj točne rezultate, primerne za praktično uporabo:

- pri znanem volumskem pretoku:

$$k_v = \frac{\phi_v}{31.6 F_p F_y F_R \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} \quad (6.17)$$

- pri znanem masnem pretoku:

$$k_v = \frac{\phi_m}{31.6 F_p F_y F_R \sqrt{\rho \Delta p}} \quad (6.18)$$

kjer so:

F_p - koeficient vpliva geometrije cevovoda,

F_y - koeficient vpliva uparjanja,

F_R - koeficient Reynoldsovega števila.

Tudi tokrat najdemo podrobnejši opis v [56].

6.2. Optimiranje šuma in kavitacije

Posledica spremembe pretoka sta tudi šum in kavitacija. Kavitacija je pojav, ki nastane zaradi padca tlaka, ki je večji od vparjalnega tlaka tekočine. Pojavijo se

6.2. Optimiranje šuma in kavitacije

mehurčki, ki se reabsorbirajo, ko tlak ponovno naraste nad vparjalno mejo. Predpisi, ekološke zahteve (hrup) in dolga življenjska doba narekujejo zmanjševanje teh pojavov, odvisno od področja oziroma lokacije, kjer je ventil. Razumljivo je, da je večji dopustni hrup v popolnoma industrijskih področjih, manjši pa v bližini bolnišnic. Šum in kavitacijo zmanjšujemo z izbiro ustrezne vrednosti koeficienta pretoka, s spremembo oblike čepa ali tako, da vežemo več ventilov zaporedno. S tem se izvedba seveda podraži.

6.2.1. Izbira materiala

Za določitev materiala, iz katerega je ventil, ni pravil ali "recepta", zato se lahko projektant opre le na praktične izkušnje. Izbrati moramo material, ki bo izpolnjeval več kriterijev. Ventil mora imeti določeno trdnost in odpornost proti obrabi, upoštevati moramo zahtevnost izdelave ventila glede na izbrani material in ne nazadnje ima svojo težo tudi cena materiala in njegove obdelave.

Zaradi ugodne cene in enostavne tehnologije pogosto uporabljamo lito železo, vendar se ta material hitro obrabi in dovoljuje nizke tlačne, temperaturne ter korozijske obremenitve. Jeklo ima poleg železa še od 2 do 3.6% ogljika. Z dodajanjem različnih vrednosti kroma, niklja, molibdena in drugih primesi dobimo širok spekter uporabnosti jekla. Tako dosežemo visoko trdnost, odpornost proti koroziji in široko temperaturno območje. Uporabljamo še medenino, nikljeve, titanove in tantalove zlitine ter keramične materiale. Za čepa in sedeže se uporablja material iz volframovega karbida, za prevleke pa sintetične kavčukovce, termoplastične umetne snovi in emajle.

Pri izbiri materiala, iz katerega je ventil, so pomembne tri lastnosti: korozijska odpornost, odpornost na obrabo in trdnost ter trajna trdnost.

Korozijska odpornost

Za razvoj korozije morajo biti izpolnjeni trije pogoji:

- prisotnost kovine,
- prisotnost agresivnega medija,
- določeno stanje okolja.

Korozijo vrednotimo na dva načina: kot izgubo mase materiala v gramih na kvadratni meter v enem dnevu in kot izgubo debeline v milimetrih na leto. Materiale lahko razdelimo v več stopenj korozijske odpornosti. Tako ima zelo odporen material izgubo mase manjšo od 0.021g/m^2 na dan, še zadovoljivo odporen material med 2.1 in 21g/m^2 na dan, medtem ko ima popolnoma neodporen material izgubo mase večjo od 210g/m^2 na dan.

Odpornost na obrabo

Obrabo povzroča več pojavov. Eden izmed njih je kavitacija. Številne majhne implozije, ki nastanejo pri kavitaciji, povzročajo obrabo ventila, včasih pa tudi resne poškodbe. Obrabo povzroča tudi erozija. Obraba zaradi trdih delcev v mediju pa je odvisna od pretočne hitrosti medija, spremembe smeri in trdnosti delcev v mediju. Kapljične udare povzročajo kondenzirajoče se kapljice pri visokih hitrostih.

Trajna trdnost materiala

Ločimo: vlečno trdnost, lomno trdnost, trdnost po Vickersu, rezno trdnost, upogibne lastnosti in vplive interkristalne korozije. Podrobne opise najdemo v [56].

Skladnost z okoljem

Skladnost z okoljem je vse bolj pomemben dejavnik. Material mora biti med proizvodnjo, predelavo in uporabo čim manj škodljiv okolju. Po uporabi mora biti primeren za predelavo in ponovno uporabo oziroma mora na deponijah čim manj škodljivo razpadati. Okolju so najbolj neškodljive železove kovine, problematične pa so umetne mase, saj jih večino ne znamo reciklirati.

6.2.2. Določitev varnostno-tehničnih zahtev

Upoštevati moramo naslednje varnostno tehnične zahteve:

6.2. Optimiranje šuma in kavitacije

Varnostni položaj ob izpadu dovoda pomožne energije. Ventil lahko ob izpadu zavzame popolnoma odprt ali zaprt položaj ali pa ostane na položaju ob izpadu. Za spremembo položaja ob izpadu potrebuje ventil rezervno energijo. Ta je lahko shranjena v vzmeti, ki potisne ventil v določen položaj, ali pa je energija shranjena v posodi pod tlakom, ki premakne pnevmatski ali hidravlični ventil. Pri zobniških prenosih se pogosto pojavlja samozaviranje, zato moramo tam poskrbeti za rezervni električni vir. Nekateri procesi zahtevajo tudi ročni poseg, ki premosti regulator in omogoči ročno odpiranje ali zapiranje.

Notranja in zunanja tesnost ventila sta naslednji zahtevi. Notranja tesnost pomeni tesnost med čepom ventila in njegovim sedežem, zunanja tesnost pa med deli pod tlakom in okoljem ventila. Notranja tesnost je zelo pomembna pri procesih, kjer se fluidi ne smejo mešati med seboj. Merimo jo na več načinov. Na zaprt ventil lahko priklopimo tlak med 3 in 4 bari ali maksimalen dopusten diferencialni tlak in merimo pretok na izhodu ventila. Na podlagi rezultatov lahko klasificiramo ventile v več razredov netesnosti. Če omenjena meritev ni možna, netesnost merimo tako, da zaprt ventil, ki je na eni strani priklopljen na zračni tlak, potopimo v vodo. Na podlagi prešteti h zračnih mehurčkov, ki so ušli skozi ventil, lahko klasificiramo ventil. Pri ventilih z zelo visoko notranjo tesnostjo merimo netesnost tako, da ventil na eni prirobnici zapremo, na drugo prirobnico pa pripeljemo tlak in ventil zapremo. Nato na strani, kjer je bil prej priklopljen tlak, priklopimo merilnik tlaka. Ta meri tlak, ki je posledica uhajajočega zraka skozi ventil. Zunanja netesnost je pretežno posledica netesnosti, ki se pojavi na tesnilih med ohišjem in zgornjim delom ventila. Zunanjo tesnost merimo podobno kot notranjo.

Elektrotehnične varnostne zahteve zagotavljajo varnost pred eksplozijo, ki bi jo povzročile električne naprave. Zaščito izvedemo tako, da električni del z ohišjem ločimo od okolice. Električne dele lahko tudi prekrijemo s peskom ali pa jih potopimo v olje. Tudi tu ločimo več razredov zaščite.

Posebne varnostne zahteve moramo upoštevati pri kritičnih obremenitvah ventila in pri postopkih, kjer so prisotni kritični materiali (klor, čisti kisik itd.).

6.2.3. Specifikacija, naročilo in prevzem regulacijskega ventila

Zelo pomembna faza je tudi specifikacija ventila. Za ta namen obstajajo enotni specifikacijski listi, kamor navedemo vse pomembne parametre, ki smo jih prej izračunali in izbrali iz tabel. Napačni podatki imajo lahko neprijetne posledice za naročnika, lahko pa predstavljajo nevarnost za poznejše obratovanje. Prevzem ventila določa mednarodna norma, po kateri naročnik pred prevzemom preizkusi ventil.

6.3. Dimenzioniranje in izbira ventila s programskimi paketi

Zaradi številnih parametrov in izračunov sta izračun in izbira ventila relativno zapletena. Zato so proizvajalci ventilov pripravili programske pakete, s katerimi je izbira ventila enostavnejša. Tako kot pri "ročnem" računanju tudi tu potrebujemo množico informacij. Podatke vnesemo v računalnik, ta pa izračuna ustrezno k_v vrednost in omogoča različne optimizacije.

Programske pakete za izbiro ventilov lahko nabavimo pri proizvajalcih regulacijskih ventilov. Nekaj tovrstne programske opreme lahko najdemo tudi na medmrežju.

Naloga

NALOGA 6.1

Na medmrežju poiščite različne programske pakete za dimenzioniranje ventilov in primerjajte njihove izračune za iste vhodne podatke. Pri tem pazite na merske enote, ki jih uporabljajo različni proizvajalci ventilov.

7.

Signali in prenos podatkov v sistemih vodenja industrijskih procesov

V sistemih vodenja industrijskih procesov s signalnimi povezavami med seboj povežemo tipala, regulatorje, aktuatorje in računalniške sisteme za vodenje. Signalne povezave so lahko električne, pnevmatske, hidravlične, optične ali mehanske. Preproste regulacijske naprave delujejo na osnovi mehanskih signalnih povezav (npr. vplinjač pri starejših avtomobilih). Kjer so hkrati potrebni tudi prenosi velike energije uporabimo hidravlične povezave (robotika, avionika). Pnevmatске signalne povezave postajajo zelo pomemben način krmiljenja aktuatorjev - še posebej v lesni in kemijski industriji pa tudi v prehrabeni in farmacevtski industriji. Električne povezave močno prevladujejo, optične pa prihajajo do izraza v okoljih z možnimi interferenčnimi motnjami in v sistemih zaščite proti streli.

V procesni-kemični industriji je pnevmatski signalni sistem doživel svoje rojstvo in kasnejši razcvet. Razviti sistemi so zajemali tako senzorske pretvornike, pnevmatske pogone ventilov, ojačevalnike, P, PI in PID regulacijske naprave, registratorje, kasneje pa še analogne računske enote.

Najpomembnejše prednosti pnevmatskih signalnih sistemov so:

- sočasni prenos aktivacijske energije (pomembno pri izvedbi aktuatorjev),

Signali in prenos podatkov v sistemih vodenja industrijskih procesov

- možnost shranjevanja energije v shranjevalnikih kompresorskih postaj za primer izpada napajanja,
- protiprašna zaščita - prenos poteka z nadtlakom,
- ta oblika energije ne more povzročiti eksplozije v okolju z eksplozivnimi mešanici, ki so značilne za kemijsko industrijo in petrokemijo,
- signalne povezave s cevmi iz umetnih mas so korozijsko neobčutljive,
- snaga.

Slabosti pa so:

- počasen odziv aktuatorjev pri zelo dolgih napeljavah,
- mašitve zaradi zmrzovanja kondenzirane vode v vodih,
- omejene možnosti signalne obdelave.

Pri sodobnem vodenju procesov uporabljamo pnevmatske signalne povezave predvsem za krmiljenje pnevmatskih aktuatorjev: zveznih regulacijskih ventilov in pnevmatskih cilindrov. Pretvorbo iz električnih signalov v pnevmatske izvršimo z I/p pretvorniki ali z ON-OFF elektropnevmatskimi ventili.

Večina sodobnih signalnih povezav poteka v električni obliki. Če izvzamemo močnostne povezave, v sistemih vodenja ločimo digitalne, analogne in komunikacijske signale.

1. *Digitalne signalne povezave*

Z digitalnimi signalnimi povezavami med seboj povezujemo diskretna tipala, logične sklope, računalniške sisteme, programirljive logične krmilnike (PLK) in diskretno krmiljene aktuatorje. Diskretna tipala so lahko: končna stikala, bližinska stikala, optične zapore, tlačna stikala, nivojska stikala, "gama" detektorji, detektorji pretoka, termična stikala, pomožni kontakti relejev, ročne tipke in stikala itd. Diskretno krmiljeni aktuatorji so lahko:

močnostni kontaktorji, črpalke, ventilatorji, pogonski elektromotorji, signalne žarnice, elektropnevmatski ventili itd. Logični sklopi so lahko sestavljeni iz relejev (klasičnih in elektronskih), logičnih vrat in avtomatov. Običajno služijo za izvedbo preprostejših in robustnejših (neobčutljivih na motnje) logičnih funkcij, kot npr. varnostnih zapor (blokad), pomožnih sistemov za ročno vodenje (manual back-up), zagonskih sistemov, alarmne logike. Velik del klasične logike lahko danes uspešno nadomestijo programirljivi logični krmilniki, ki so mikroprocesorsko krmiljeni logični avtomati z omejenim številom digitalnih vhodov in izhodov.

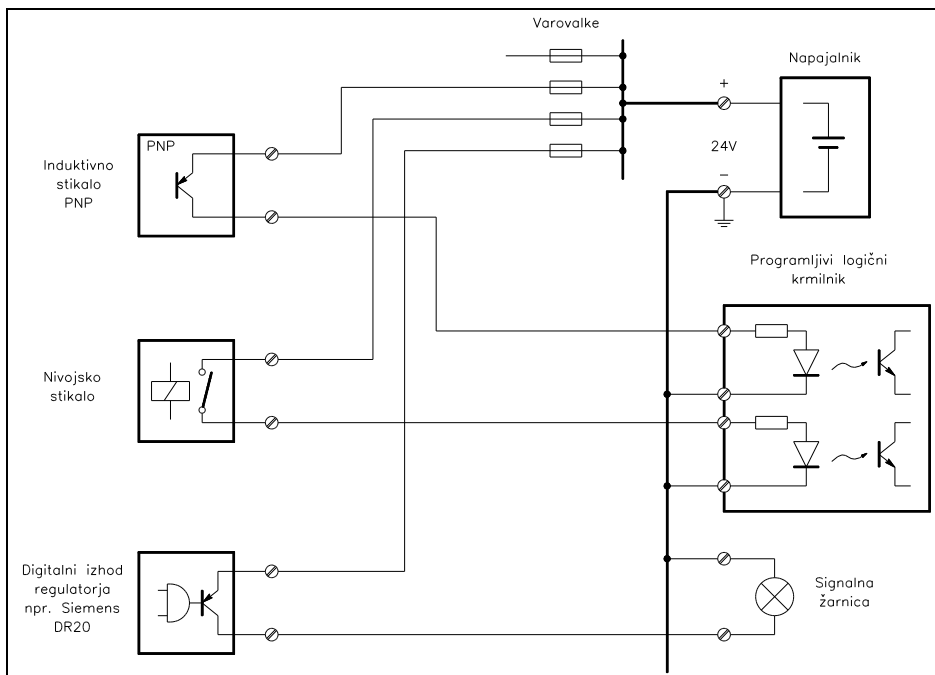
V praksi zasledimo veliko število različnih digitalnih signalnih sistemov. Najpogostejši so: 230 V_{AC}, 60 V_{DC}, 48 V_{DC}, 24 V_{AC}, 24 V_{DC}. Tu opustimo analizo TTL digitalnega signalnega sistema, ki ni primeren za "odprte" industrijske povezave. Napetostna nivoja 230 V_{AC} in 24 V_{DC} praktično prevladujeta. Pri gradnji sodobnih sistemov vodenja se poskušamo izogibati tudi napetostnemu nivoju 230 V_{AC}. Celoten sistem zgradimo na osnovi 24 V_{DC} napetostnih nivojev, le neposredno pred aktuatorjem uporabimo vmesniški kontaktor z navitjem 24 V_{DC} in kontakti, ki vklapljajo izmenične napetosti oziroma bremena 230 V_{AC}.

Napetostni nivo 24 V_{DC} ima številne pomembne prednosti:

- je življenjsko varen,
- je skladen s polprevodniško tehnologijo,
- ima manjšo energetske porabo,
- napajanje dobimo preko napajalnikov iz omrežja - napajalniki lahko odlično zadržijo motnje in napetostne preobremenitve električnega omrežja,
- zasilno napajanje izvedemo ceneno in neposredno s svinčevim akumulatorjem.

Čeprav je napetostni nivo zelo razširjen, pa oblika vklapljanja ni enoumno določena. V Evropi je bolj razširjen sistem z aktivnim visokim nivojem, v ZDA in na Japonskem pa z aktivnim nizkim nivojem. Primera pravilnih povezav v eni in drugi obliki prikazujeta sliki 7.1 in 7.2.

V sistemu z aktivnim visokim nivojem v procesno polje razpeljemo napajalno napetost +24 V preko varovalk do posameznih digitalnih dajalnikov. Le-ti v aktivnem stanju vklopijo napajalno napetost na povratni signalni

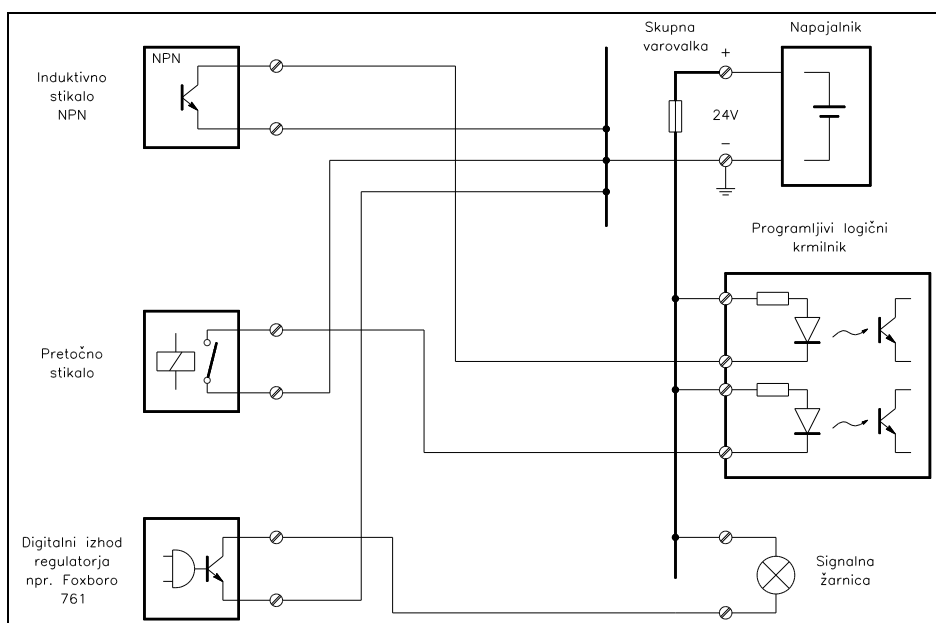


Slika 7.1: Digitalne povezave s 24 V_{DC} signalnim sistemom z aktivnim visokim nivojem ("Evropski" sistem)

vod. Na sprejemni strani steče signalni tok povratnega voda preko signalnega porabnika na zbirni negativni vod napajalnika - 24 V, ki pa naj bo povezan tudi z ozemljitvijo. Povezava z ozemljitvijo nima neposredne zveze s potekom signala, prinaša pa varnostno zaščito in zmanjša vpliv motenj iz okolice. Signalni porabniki so lahko optični sklopniki na vseh PLC-jev in drugih elektronskih naprav, signalne žarnice, navitja relejev, ipd.

V sistemu z aktivnim nizkim nivojem je napajalna napetost +24 V razpeljana neposredno na (+) vhode signalnih porabnikov (če so le-ti nameščeni v omejenem prostoru, zadostuje skupna varovalka). V procesno polje razpeljemo negativni in ozemljeni pol napajalnika, povratni vod pa povežemo na negativni vhod signalnih porabnikov.

Na prvi pogled sta oba signalna sistema ekvivalentna oziroma enakovredna. V praksi pa se je pokazala naslednja prednost "Ameriškega" sistema. Si-



Slika 7.2: Digitalne povezave s 24V_{DC} signalnim sistemom z aktivnim nizkim nivojem ("Ameriški" sistem)

Signalni vodi in signalni dajalniki se običajno nahajajo v "kovinskem" okolju kabelskih kinet, ohišij ventilov, podzemnih kanalov itd., ki so praviloma povezani z ozemljitvijo oziroma so drugače v kontaktu z ozemljitvenim potencialom. Če v sistemu z aktivnim visokim nivojem pride do stika med signalnimi vodi in "kovinskim" okoljem, so varovalke v pozitivnem vodu edini pretokovni zaščitni element. V primeru stika pride do prekinitve varovalke. Če ne moremo dopustiti izpada celotnega sistema zaradi stika na enem vodu, moramo vsak vod posebej ščititi s svojo varovalko, kar je še posebej priporočljivo za zagotovitev učinkovitega servisiranja. V sistemu z aktivnim nizkim nivojem so v polje razpeljani vodniki z negativnim, ozemljenim potencialom. Kratki stik z ozemljenimi deli v tem primeru ne more povzročiti tokovnih preobremenitev, povzroči lahko le lažni aktivni signal v primeru stika na povratnem vodu. V tem sistemu varovalke za posamezni signalni vod niso potrebne, kar omogoča enostavnejšo, cenejšo in robustnejšo izvedbo sistema. Servisni postopek je enostaven.

Galvanska izolacija med signalnimi dajalniki in vhodi elektronskih naprav je običajno izvedena s pomočjo optičnih sklopnikov (digitalni vhodni moduli PLK, regulatorjev, računalniških sistemov itd.) in počasi postaja standardna. Ni pa nujno potrebna, če je instalacija izvedena korektno in so izhodi signalnih dajalnikov potencialno "plavajoči".

Kadar smo prisiljeni voditi digitalne signalne vode zelo blizu energetskih vodov (bližje od 10cm), je priporočljivo uporabiti oklopljeni signalni kabel. Oklop na strani regulacijskega sistema dobro povežemo z ozemljitvenim vodnikom. Signalne vode vedno vodimo v parih s prepletenima vodnikoma za zmanjšanje vpliva izmeničnih magnetnih polj.

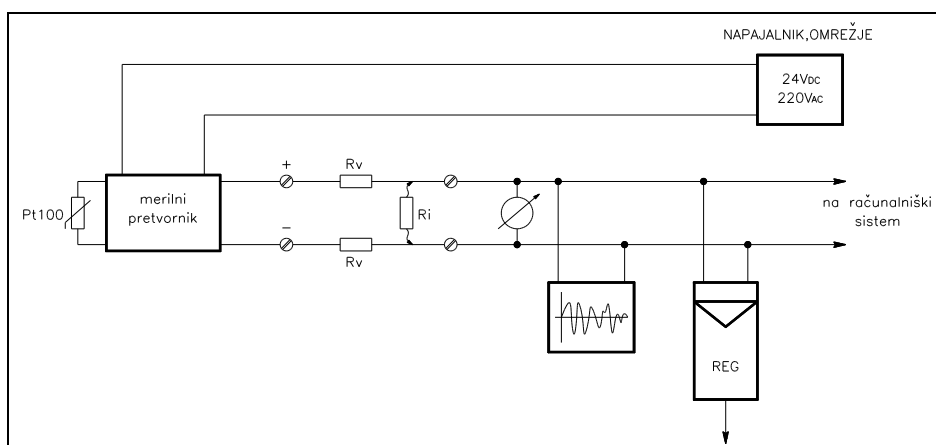
Digitalne izhodne signale iz regulacijskih naprav praviloma vodimo proti aktuatorjem preko relejev in kontaktorjev, ki služijo kot vmesniki med 24V signalnim sistemom in 230V omrežnim sistemom. Releje in kontaktorje po možnosti namestimo v ločeno stikalno omarico, njihova navitja pa opremimo z diodami ali RC členi za dušitev induktivne reakcije. Namestitev v ločeno omarico ima dvojni pomen: omogoča manjši prenos kapacitivnih motenj iz omrežnega sistema na signalni sistem ter loči nizkonapetostni in visokonapetostni (življiensko nevarni) del sistema med seboj. To slednje še posebej olajša servisiranje, preizkušanje in dopolnjevanje sistema, saj je tako nevarni del sistema koncentriran na manjšem prostoru.

Če je le mogoče, se izognemo neposrednemu priklapljanju omrežnih napetosti na bremena z relejskimi kontakti digitalnih izhodov programirljivih logičnih krmilnikov in podobnih regulacijskih naprav, kljub temu, da tako možnost deklarirajo proizvajalci teh naprav. Sistem namreč deluje, dokler je "vse v redu". Ko pa pride do npr. kratkega stika na bremenu ali napajalnih vodih, do primarnega ali sekundarnega vpliva strele ali podobnih izrednih pojavov, pride običajno do takih poškodb digitalnih izhodnih modulov, da je potrebno cel modul ali napravo zamenjati. V primeru uporabe vmesniških relejev le-ti prevzamejo večino uničevalne energije in preprečijo okvare dragih naprav.

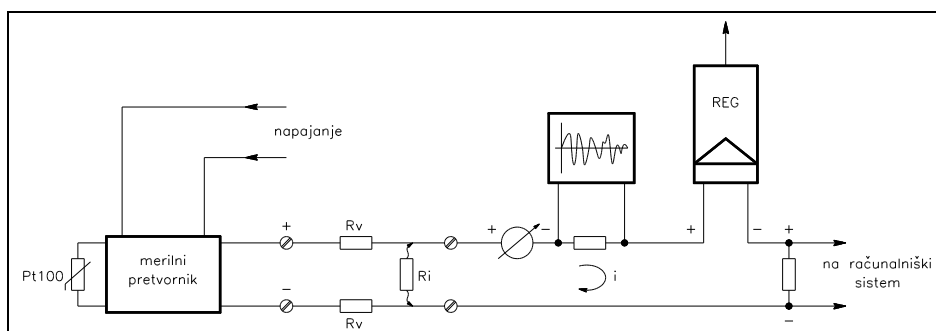
2. *Analogne signalne povezave*

Električne signalne povezave v sistemih vodenja lahko izvedemo v napetostni ali tokovni obliki. Primera povezav prikazujeta sliki 7.3 in 7.4.

Pri konstrukciji sodobnih analognih elektronskih naprav sta si napetostna in tokovna oblika signalov približno enakovredni (včasih je prevladovala



Slika 7.3: Napetostni prenos analognih signalov



Slika 7.4: Tokovni prenos analognih signalov

napetostna oblika). Podobno velja za prenos signalov v procesni industriji. Pri napetostnem prenosu (slika 7.3) merilni pretvornik oddaja napetostni signal, ki je proporcionalen merjeni veličini. Signal potuje po vodih s skupno upornostjo R_V , preko kontaktov na razžirnih sponkah in nato do različnih paralelno vezanih porabnikov (npr. kazalčni instrument, regulator, regulator, A/D modul računalniškega sistema za vodenje). Kvaliteta signala pada z dolžino vodov, saj imajo uporabniki signala končno vhodno upornost, ki z upornostjo vodov tvorijo napetostni delilnik. Manjše puščanje izolacije (R_i) ima le majhen vpliv, če je le napeljava dovolj kvalitetno izvedena.

Pri tokovnem prenosu signalov merilni pretvornik vsiljuje v tokovno zanko enosmerni tok, ki je proporcionalen merjeni veličini. Porabniki signala so vezani zaporedno, zato je tok skozi vse enak. Upornosti vodov v tem primeru ne povzročajo padca nivoja signala, če so le v dopustnem območju merilnega pretvornika. Prav tako kvalitete signala ne poslabšajo parazitni galvanski členi, ki nastanejo na priključnih sponkah v agresivnih okoljih ob prisotnosti vlage. Na kvaliteto signala oziroma na natančnost prenosa pa lahko močno vpliva puščanje izolacije, vendar le-to tudi v agresivnih okoljih ni močno izrazito.

Ker upornost napajalnih vodov in parazitni elektrokemijski potenciali pri tokovnem načinu prenosa ne pridejo do izraza, v kemični in procesni industriji prevladujejo tokovni signali. Nasprotno pa zasledimo napetostne signale v okviru zaključenih manjših naprav predvsem pri obdelovalnih strojih, v robotiki, v sistemih vodenja mikroelektronskih tehnoloških naprav, ipd. Mejna dolžina povezav med obema načinoma znaša 5 do 10m.

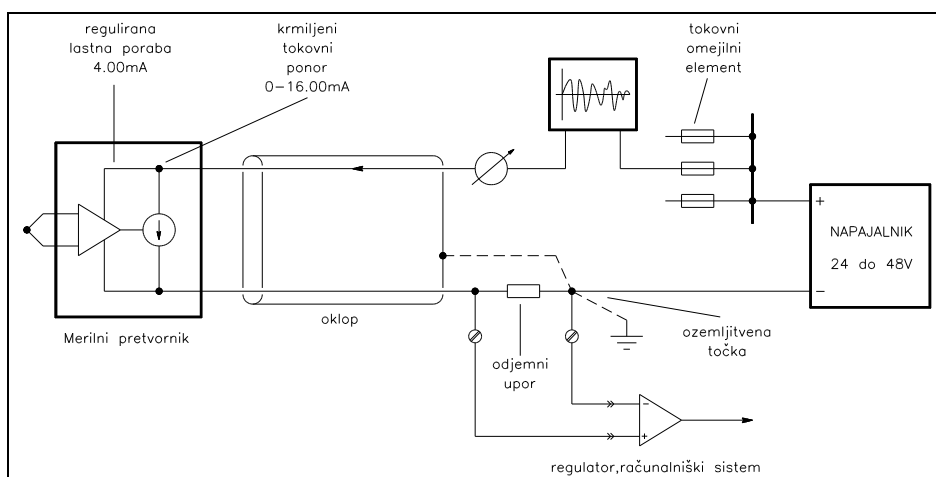
V uporabi zasledimo veliko različnih standardiziranih obsegov signalov: 0-1 V, 0-5 V, 0-10 V med napetostnimi, ter 0-10 mA, 0-20 mA, 0-50 mA, 0-100 mA, 4-20 mA, 10-50 mA, 20-100 mA med tokovnimi signali. V sodobnih sistemih so najpomembnejši obsegi 0-5 V, 0-10 V ter 0-20 mA in 4-20 mA. V okviru procesne industrije tokovni signal 4-20 mA prevladuje v večini primerov.

Tokovni signal 4-20 mA je izjemen tehnični dosežek na področju vodenja procesov in je sad več desetletij dolgega izpopolnjevanja naprav za merjenje in regulacijo. Osnovna prednost je seveda v neobčutljivosti na dolžino signalnih vodov in na elektrokemijske potenciale slabih kontaktov. Posebne prednosti pa nudi signal žive ničle 4 mA. Celotni signal je namreč sestavljen iz izhodiščnega toka 4 mA in variabilnega dela 0-16 mA, ki je proporcionalen merjeni veličini. Signal žive ničle omogoča naslednje prednosti:

- daljinsko napajanje merilnega pretvornika po istem vodu, kot potuje signal,
- odlično razmerje signal/šum pri nizkih vrednostih merjene veličine,
- enostavna kontrola sklenjenosti signalne zanke: tok je v dobro sklenjeni zanki vedno prisoten (> 0 mA),
- možnost javljanja okvare merilnega pretvornika ali tipala. Ob okvari pretvornik postavi izhodni tok na vrednosti pod 4 mA (tipično 3 mA) ali nad 20 mA (tipično 23 mA).

Poleg naštetega je mogoče v sodobnih sistemih tokovnemu signalu superponirati digitalni signal v obliki dvo-tonske modulacije po standardu Bell 202. Z merilnim pretvornikom, ki praviloma vsebuje tudi mikrokrmilnik, je tako mogoče komunicirati tudi digitalno po pravilih HART protokola. Le-tega je sprejela večina svetovnih proizvajalcev merilno-regulacijske opreme.

Najpomembnejša prednost signala z živo ničlo 4-20 mA je možnost daljinskega napajanja merilnih pretvornikov. Na ta način je mogoče napajati vse tiste merilne pretvornike, katerih lastna poraba je manjša od 4 mA oziroma manjša od 50 mW. S CMOS digitalno tehnologijo in izboljšanimi analognimi integriranimi vezji je to v več primerih mogoče, najpogosteje pa ta način zasledimo pri: pretvornikih tlaka in diferencialnega tlaka, temperature s Pt-100 in termočlenskimi tipali, pretvornikih pretoka z integrirano zaslonko, vrtnčnih merilnikih pretoka, pH in redox pretvornikih, pretvornikih električne prevodnosti, pozicije itd. Ta signalni način omogoča dvožično priključitev merilnih pretvornikov. S tem zmanjšamo število žic za najmanj $\frac{1}{2}$, se izognemo nastanku parazitnih signalnih zank za zajem elektromagnetnih motenj, poenostavimo sistem distribucije napajalne energije. Primer povezave prikazuje slika 7.5.



Slika 7.5: Dvožična vezava merilnega pretvornika v signalnem sistemu 4-20mA

V tokokrogu od napajalnika proti merilnemu pretvorniku teče tok, ki je v normalnem režimu delovanja večji ali enak 4 mA. Tok 4 mA služi za la-

stno napajanje merilnega pretvornika in je s posebnim elektronskim vezjem reguliran na konstantno in stabilno vrednost. V odvisnosti od merjene veličine krmiljeni tokovni ponor uravnava preostali del toka v območju 0-16 mA. Skupni tok teče preko vseh porabnikov v zanki. Tokovno zanko napaja napajalnik enosmerne napetosti 24 V do 48 V, ki je lahko za več merilnih pretvornikov skupen (v tem je ena izmed najbistvenejših pridobitev tega sistema). V primeru, da en napajalnik napaja več tokovnih zank hkrati, moramo v vsako zanko vgraditi tokovni omejitveni element. Ta je lahko varovalka 30 ali 50 mA, upor - tipično 220 Ω , 3 W ali elektronski tokovni limiter. Tokovni omejitveni element ne služi samo zaščiti napajalnika, pač pa preprečuje, da bi kratek stik pozitivnega vodnika z ozemljitvijo povzročil posedanje napetosti napajalnika in s tem blokado delovanja vseh tokovnih zank, ki jih ta napajalnik napaja. Pri večini vodenih procesov bi sočasna onemogočitev merjenja vseh procesnih veličin operaterju povzročila precejšnje preglavice, če ne že popolne ustavitve sistema. Če kot tokovni omejitveni element uporabimo varovalko, le-ta ob nastopu kratkega stika pregori in zahteva servisno zamenjavo. V primeru uporabe upora ali integriranega elektronskega limiterja opisani sistem po odpravi kratkega stika brez kakršnekoli škode deluje naprej.

Z oklapanjem signalnih vodov bistveno zmanjšamo vpliv motenj, ki se v sistemu prenašajo preko kapacitivnosti med vodniki signalnega sistema in predvsem energetskimi vodi. To je še posebej pomembno pri sodobnih sistemih, kjer čedalje pogosteje uporabljamo frekvenčno regulirane pogone asinhronih motorjev, naprave za mehki zagon in podobne, ki proizvajajo močnostne napetosti z bogato višjeharmonsko vsebino.

Čeprav je pravilno povezovanje oklopa posebna tehnika, pa se v procesni industriji pokaže za najbolj praktično in v večini primerov tudi dovolj učinkovito povezovanje oklopov v skupno točko (kovinska letev) v bližini računalniškega sistema za vodenje. Nato pa povežemo to točko na skupni ozemljitveni vodnik celotne naprave. Na strani merilnega pretvornika pustimo oklop nepovezan. Na obeh straneh nepovezan oklop ne samo, da ne koristi, pač pa pogosto tudi poslabša odpornost sistema proti električnim motnjam.

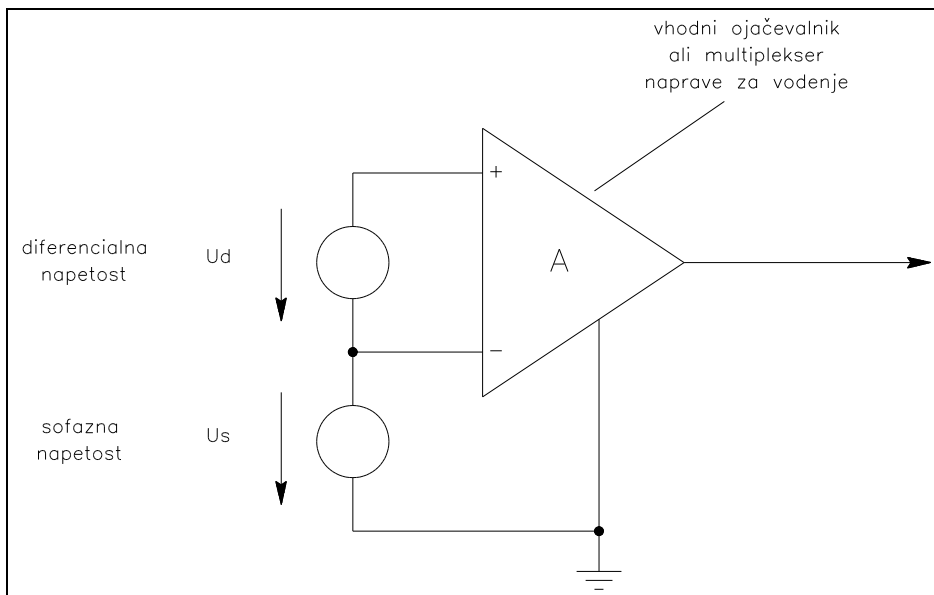
Kot zaščita proti motnjam zaradi izmeničnih magnetnih polj služi prepletanje signalnih parov v posameznem oklopljenem kablu, ki je že standardno. Kadar vodimo več tokovnih zank v enem oklopljenem kablu, vedno pazimo, da za vsako tokovno zanko uporabimo svojo parico! Pogosto nale-

timo tudi na primere, ko izvajalci napeljav pozitivne in negativne vodnike tokovnih zank v priključnih omaricah razpeljejo po različnih poteh. S tem nevede povečajo površino, ki jo tokovna zanka oklepa, zato se lahko bistveno poveča občutljivost sistema na magnetne motnje.

V **klasičnih regulacijskih sistemih** so nekateri projektanti in izvajalci preprosto nanizali potrebne elemente v tokovno zanko in pustili zanko potencialno "plavajočo", kar pomeni, da v nobeni točki ni povezana z ozemljitvijo kot univerzalno referenčno točko. Taka vezava je s stališča dušenja elektromagnetnih motenj v "porazdeljenih" sistemih zelo neugodna. Motnje pa v teh sistemih niso prišle do izraza, ker so uporabljeni elementi vsebovali dovolj veliko dušenje (npr. instrument z vrtljivo tuljavico, regulator z nizkopasovnim filtrom itd.). V **kvalitetnih sodobnih regulacijskih sistemih** težimo k višanju frekvenčne meje elementov, da dosežemo kvalitetnejšo regulacijo. Problem motenj postaja pereč, še posebej pa zaradi uporabe vzorčevalnih tehnik in A/D pretvorbe.

Najpomembnejši vzrok, zaradi katerega moramo obvezno definirati potencialne tokovnih zank, je omejeno napetostno območje vhodnih stopenj elektronskih naprav in analognih modulov računalniških sistemov. Uporabljena elektronska vezja imajo omejena napetostna območja, v katerih se smejo njihovi vhodi nahajati v relaciji do ozemljitvenega potenciala, da je delovanje vezja še pravilno. Prav neupoštevanje teh omejitev je eden izmed najpomembnejših vzrokov za težave pri implementaciji sistemov v praksi. Da bi bil problem še večji, večina proizvajalcev merilno-regulacijske opreme v svojih včasih "preobilnih" tehničnih podatkih o napravah tega pomembnega podatka ne podajo in ga je potrebno določiti z izračunom (če dokumentacija vsebuje tudi električne sheme naprave) ali s preizkusom, kar pa je včasih manj zanesljivo.

Na sliki 7.6 definirajmo pojma diferencialne in sofazne napetosti. Definicija na sliki sicer ni v skladu z ustaljeno definicijo teh pojmov pri instrumentacijskih ojačevalnikih, vendar je za to razlago zaradi pogoste nesimetričnosti vhodov ugodnejša. Diferencialna napetost je napetost, ki jo želimo meriti oziroma ojačevati (npr. napetost na odjemnem uporu na sliki 7.5). Sofazna napetost je napetost med ozemljitveno točko in vhodoma sistema (na sliki 7.6 je to negativni vhod) in nastane kot posledica padcev napetosti v signalnih vodih, morebitnih drugih porabnikov v tokovni zanki, blodečih tokov v ozemljitvenih vodih itd.



Slika 7.6: Definicija diferencialne in sofazne napetosti (prirejena za pojasnitev problemov pri definiranju potencialov tokovnih zank)

Če vsota sofazne in diferencialne napetosti v pozitivni ali negativni smeri preseže delovno območje vhodne stopnje, le-ta ne zmore pravilno prenesti ali ojačiti diferencialne napetosti.

V tabeli 7.1 so prikazane dovoljene vrednosti sofazne napetosti oziroma območja delovanja za nekatere najbolj razširjene regulatorje in mikrokrmilnike.

Kadar povezujemo veliko analognih signalov na analogne vhodne module računalniških sistemov za vodenje, je najprimerneje, da pri večini ali vseh tokovnih zankah povežemo z ozemljitvenim vodnikom negativni pol odjemnih uporov, po možnosti v bližini analognih modulov. Ostale tokovne signale nato pustimo v "plavajočem" režimu. Če smo pri projektiranju in izvedbi previdni, se lahko na ta način izognemo potrebi po galvanski izolaciji vhodnih kanalov, ki sicer možno podraži elemente sistema za vodenje. Večina sodobnih regulatorjev, analognih modulov programirljivih logičnih krmilnikov in modulov računalniških sistemov ne vsebuje več galvanske izolacije, ki sicer dovoljuje sofazne napetosti v velikostnem razredu

Tabela 7.1: Uporabni obsegi sofazne napetosti po sliki 6.6 za nekatere elemente vodenja

| Regulator ali krmilnik | Obseg sofazne napetosti | Opomba |
|--|-------------------------|------------------------------|
| Foxboro 761 | -0.6 V do +17 V | izračunano iz vezja |
| Siemens DR20/DR21 | 0 V | spojen z ozemljitvijo |
| Siemens DR22/DR24 | 0 V do +10 V | |
| Micon-Sensycon P100 | -10 V do +5 V | preračunano |
| Siemens-Simatic S5 Analog input module | ± 60 V | relejsko vzorčenje |
| Mitsubishi MELSEC A Analog input module | ni podano | tipično ± 100 V |
| Tipični analogni vhodni moduli za osebne računalnike npr. Burr- Brown, National Instr. | -11 V do +6 V | pri normalni napetosti 0-5 V |

500 V_{DC} in več.

3. Komunikacijske povezave

Komunikacijske povezave med elementi sistemov procesnega vodenja spadajo med najbolj "priljubljena torišča" sodobnih strokovnjakov - avtomatikov, oziroma velikih proizvajalcev tovrstne opreme. Podrobnejše spremljanje dogajanj na tem področju nas hitro navede na ugotovitev, da pri uvajanju komunikacijskih povezav v procesno industrijo nimajo prvenstvene vloge strokovni argumenti, temveč predvsem komercialne strategije velikih multinacionalnih podjetij ali kar celih narodov. Ob vsej poplavi različnih rešitev, naprav, standardov, računalnikov in omrežij še vedno zelo hitro trčimo na navidez preprost problem: kako vzpostaviti komunikacijsko digitalno povezavo med dvema elementoma procesnega vodenja, ne da bi bili pri tem prisiljeni uporabiti le izdelke in programsko podporo le enega proizvajalca. Ob "visokih" razpravah o ISO komunikacijskih modelih, o omrežjih, o Fieldbusu, Profibus-u itd., se nenadoma znajdemo v neprijetni situaciji, ki nam ne uspe niti preprosta komunikacija med osebnim računalnikom in mikroprocesorsko podprtim regulatorjem.

Če želimo dve ali več naprav med seboj povezati s komunikacijsko povezavo, morajo biti med seboj komunikacijsko skladne. V primeru tokovnega signalnega sistema je zahteva po skladnosti enostavna:

- oddajna naprava mora imeti analogni tokovni izhod, sprejemna pa analogni tokovni vhod (soupor z ojačevalno stopnjo),
- obe napravi morata delovati v istem signalnem obsegu (npr. 4-20 mA),
- obe napravi morata upoštevati (ali neupoštevati) signal žive ničle,
- napetostna zmožnost oddajne naprave mora zadostovati napetostnemu padcu na souporu sprejemne naprave in drugim padcem v zanki,
- napravi morata biti usklajeni proti referenčnemu potencialu (npr. potencial ozemljitve).

V primeru komunikacijskih povezav pa so zahteve po skladnosti obsežnejše in bi jih lahko našteali po nivojih ISO modela komunikacijske povezave. Za ilustracijo naj služijo naslednje zahteve po uskladitvi:

- oddajne in sprejemne naprave morajo imeti vmesnike za vodilo iz iste družine (npr. po standardu RS232),
- oddajni vodi morajo biti povezani na sprejeme in obratno,
- krmilni signali (npr. modemski) morajo biti usklajeni,
- povezovalni kabli in konektorji morajo zagotoviti vse povezave,
- tip prenosa mora biti enak (sinhroni, asinhroni),
- kodiranje posameznega binarnega znaka mora biti enako,
- protokol prenosa informacij mora biti usklajen,
- naslavljanje enot mora biti usklajeno,
- sistem osnovne zaščite pred napakami v prenosu mora biti usklajen
- itd.

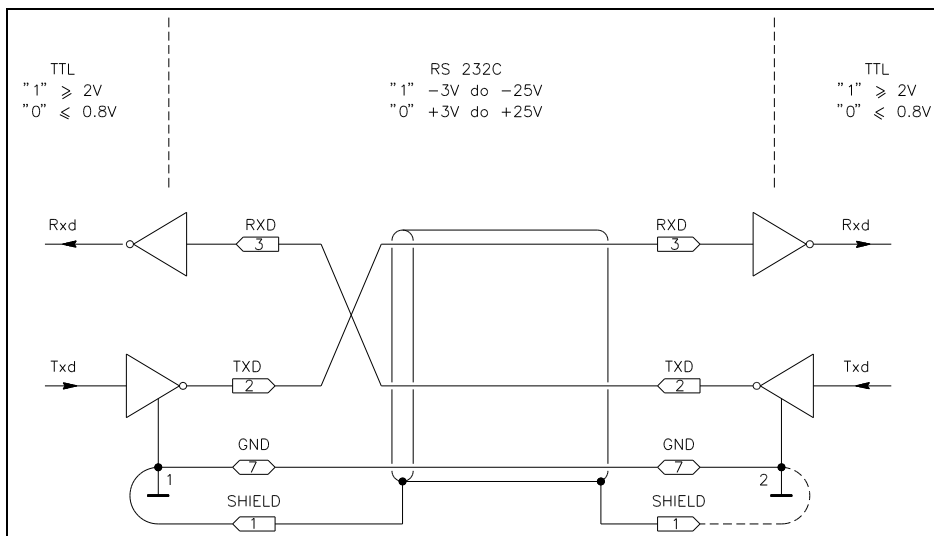
Komunikacija lahko uspešno steče in deluje le, če so naprave med seboj popolnoma skladne. Da bi dosegli to skladnost, različne mednarodne institucije skrbijo za standardizacijo rešitev. Za področje procesnega vodenja sta najpomembnejša konzorcija FIELDBUS (Amerika) in PROFIBUS (Evropa). Evropski sistem PROFIBUS se je razvil iz predhodnega nemškega standarda DIN 19245 in je nato kot izpopolnjeni de-facto standard EN 50170 postal usklajena evropska rešitev, ki so jo sprejeli vsi večji svetovni proizvajalci opreme za vodenje procesov. Ker pa imajo le-ti tudi druge svoje rešitve, ki so prav tako uspešne in razširjene, je v okviru standarda IEC 61158 podan skladnostni okvir, ki naj bi omogočal standardizacijo vseh vodilnih rešitev komunikacijske tehnike.

Ker je to področje sodobnega vodenja procesov preobsežno za to delo, so v nadaljevanju predstavljene le osnove komunikacijskih povezav na najnižjem (fizičnem) nivoju.

Na nižjem komunikacijskem nivoju so pomembne povezave med osebnimi računalniki na eni strani ter mikroprocesorsko podprtimi eno in večzračnimi regulatorji, programirljivimi logičnimi krmilniki ali "inteligentnimi" merilnimi pretvorniki na drugi strani. Na potrebo po komunikacijski povezavi naletimo zato, ker so našti elementi sposobni sprejemati ali oddajati več različnih vrednosti hkrati, za kar bi bile klasične digitalne in analogne signalne povezave preobsežne. Kot primer: preko merilnega pretvornika za pH lahko po komunikacijskem vodu odčitamo napetost elektrode, temperaturo medija, izhodno pH vrednost, v določenem časovnem obdobju izmerjeno najvišjo in najnižjo vrednost pH, tip uporabljene elektrode, diagnostično kodo pretvornika itd. Sodobni regulatorji lahko posredujejo nekaj deset vrednosti, pošiljamo pa jim lahko nekaj deset različnih parametrov ali celotno konfiguracijo.

Komunikacijske povezave na nižjem nivoju običajno potekajo v obliki razširjenih električnih standardov RS232c, RS442A ali RS485. To so relativno stari standardi, ki jih je pripravilo društvo ameriške elektronske industrije EIA, kasneje pa deloma ali v celoti prevzela tudi mednarodna standardizacijska organizacija CCITT pod oznakami V24, X27, in V11. Najstarejši in najbolj razširjen standard je standard RS232c. Povezava po tem standardu poteka unipolarno (slika 7.7).

Signali so definirani proti masni povezavi (GND) in sicer: logični visoki nivo z napetostjo -3 V do -25 V in logični nizki nivo +3 V do +25 V. Med sprejemno in oddajno stranjo potekajo podatkovni signali TXD-RXD in signali za nadzor prenosa oziroma modemske signali Request to Send RTS, Clear to Send CTS, Data Set Ready DSR, Data Terminal Ready DTR in drugi. Našteti signali kažejo na dejstvo, da je bil standard postavljen za ureditev podatkovnih prenosov po javnih komunikacijskih omrežjih z uporabo modemov. Le-teh v sistemih procesnega vodenja običajno ne uporabljamo, zato tudi ti signali nimajo posebnega pomena. Nekatere naprave jih sploh nimajo, pri nekaterih pa se moramo držati navodil proizvajalca in jih pravilno povezati v t.i. null- modem vezavo, npr. RTS na CTS in DTR na isti strani naprave (konektorja). Standardni konektor je 25-polni tipa Cannon (nedefinirano moški-ženski), IBM pa je v okviru PC računalnikov uvedel tudi 9-polni konektor tipa Cannon. Nekatere naprave imajo namesto konektorja



Slika 7.7: Podatkovna povezava po standardu RS232c/V24

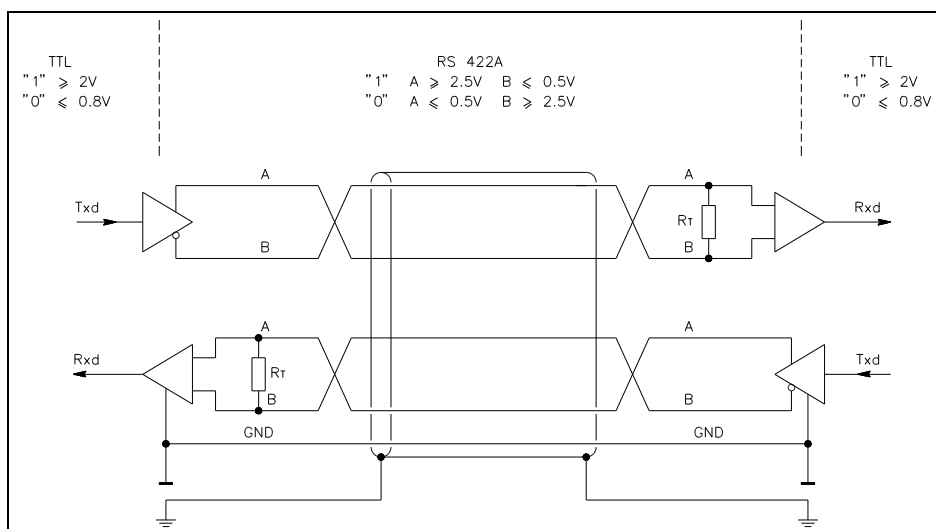
kar priključne sponke. Komunikacijski standard RS232c je primeren za hitrosti prenosov do 19.2 kBaud. Ker je kapacitivnost bremena oddajnika omejena na 2500 pF, je s tem omejena tudi dolžina prenosa na približno 15 m. To je tudi ena izmed glavnih pomanjkljivosti tega načina prenosa. Druga pomanjkljivost leži v "nerodnih" napetostnih nivojih (3 do 25 V), za kar potrebujemo posebne načine napajanja.

Prenos po standardu RS232c praviloma poteka le med dvema napravama, med katerima ima ena vodilno (master), druga pa podrejeno vlogo (slave). Prenos je lahko sočasen v obe smeri (full-duplex). Siemensova izpeljanka SIPART-BUS omogoča komunikacijo ene vodilne z več podrejenimi enotami, vendar ne omogoča kompatibilnosti z opremo ostalih proizvajalcev.

Za dolge povezave poznamo tudi tokovno povezavo, t.i. 20 mA zanko ali TTY, ki omogoča povezave do 1500 m in izvira iz dobe teleprinterjev. To povezavo danes uspešno nadomeščata standarda RS422A in RS485.

Komunikacijska povezava po standardu RS422A odpravlja omenjene pomanjkljivosti povezave po RS232c: napajanje oddajnikov in sprejemnikov je standardno (5 V), prenosne hitrosti lahko dosežejo tudi do 10 M-Baud, prenosne razdalje pa do 1200 m. Ta način prenosa omogoča povezavo ene

vodilne enote (master) z več podrejenimi, vendar tega ni mogoče priporočiti za profesionalno uporabo. V primeru "komunikacijske zmešnjave" na vodilu, ko hoče hkrati več naprav oddajati na skupno vodilo, lahko pride do trajne poškodbe komunikacijskih oddajnikov (pregretja), ki zahteva servisni poseg. Tipično povezavo po standardu RS422A prikazuje slika 7.8.

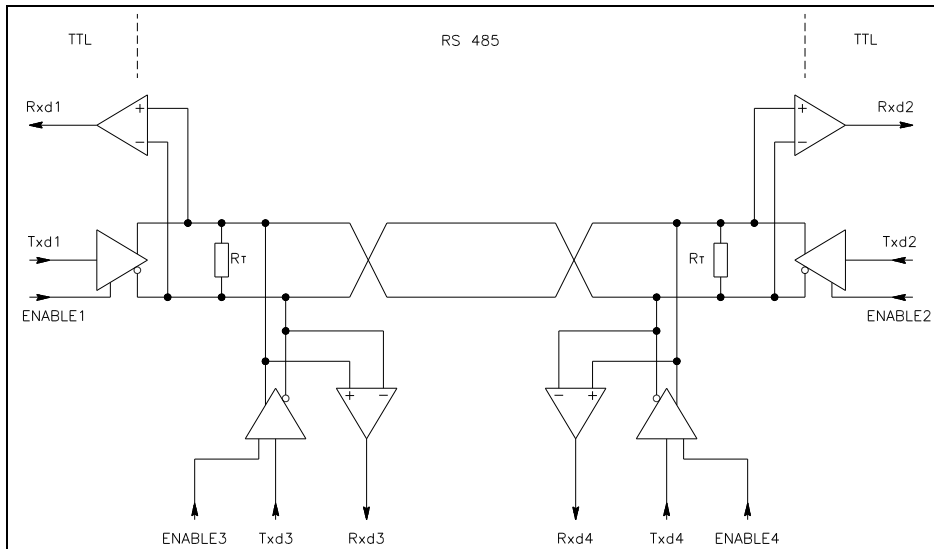


Slika 7.8: Dvosmerna povezava po priporočilih standarda RS422A/X27

Pri tej povezavi se moramo držati nekaterih pravil visokofrekvenčne tehnike. Sprejemnik povežemo z oddajnikom s parico - s prepletenim parom žic. Parico na sprejemni strani zaključimo z uporom, katerega upornost naj bo enaka valovni upornosti kabla (tipično 120Ω). Oklop povežemo na obeh straneh z zaščitnim vodnikom, ki je vezan na ohišje naprav. Pogosto moramo uporabiti tudi izravnalni vodnik (GND) ali na drug način zagotoviti izravnavo potencialov.

Problem povezav več naprav na skupno vodilo je mogoče rešiti z uporabo priporočil standarda RS485/V11. V električnem smislu so priporočila standardov RS422A in RS485 praktično identična, tako, da smemo med seboj povezati oddajnik RS422A in sprejemnik RS485 ali obratno. Priporočilo RS485 je strožje v toliko, da omogoča povezavo več komunikacijskih naprav na skupno vodilo, pri tem pa morajo biti uporabljena integrirana vezja konstruirana tako, da lahko trajno prenesejo kratki stik ali "komunikacijsko

zmešnjavo” na prenosnem vodilu (tokovna in termična zaščita). Povezava RS485 je praviloma pol-duplexna - sočasno poteka prenos podatkov le v eno smer. Potrebujemo le eno parico (glej sliko 7.9).



Slika 7.9: Več komunikacijskih naprav na skupnem vodilu po priporočilih RS485/V11 (izravnalni vodnik GND in vezava oklopov niso prikazani)

Na vodilu so vsi sprejemniki in oddajniki povezani paralelno, vodilo pa je na obeh koncih zaključeno z uporom, enakim valovni impedanci voda. Oddajniki so v mirovnem režimu v visoko-impedančnem stanju (”odrezani od vodila”). Oddajnik, ki mu komunikacijski protokol dovoljuje oddajati, prejme signal ENABLE od svojega mikroprocesorja. V normalnem režimu je ta signal prisoten le na enem izmed oddajnikov. Oddajnik nato odda sporočilo, ki ga sprejmejo vsi sprejemniki.

Električna povezava v vodilo po standardu RS485 je osnova za sodobne komunikacijske sisteme tipa FIELD-BUS in PROFIBUS. Povezava po sistemu PROFIBUS je praktično identična vezavi na sliki 7.9 z manjšo korekcijo vezave zaključitvenih uporov R_T . Standard PROFIBUS definira tudi razpored priključkov na 9-polnem konektorju tipa CANNON. Večji del standarda PROFIBUS pa je posvečen komunikacijskemu protokolu.

Poudariti moramo, da standardi RS232c, RS422A in RS485 vsebujejo le

priporočila za izvedbo električnih povezav med napravami in definicijo napetostnih nivojev, ne vsebujejo pa definicij protokolov za komunikacijo, kar pogosto napačno navajajo proizvajalci merilno-regulacijske opreme za procesno vodenje. Komunikacijski protokoli so pravila, po katerih poteka prenos podatkov po vodilu. Določajo, kako so podatki oblikovani v sporočila, kateri izmed oddajnikov sme v določenem trenutku oddajati, katere postaje so vodilne in katere podrejene itd. Sodobni protokoli so grajeni po ISO-OSI komunikacijskem modelu.

Pogosto uporabljeni protokoli na nižjem nivoju so izpeljani na podlagi standarda ANSI X3.28. Ta standard dopušča celo vrsto različnih variant in primerov - od zelo enostavnih do zahtevnejših. Žal skorajda vsak proizvajalec merilno-regulacijske opreme "čita ta standard po svoje" in postavi svoj specifičen niz pravil. Zato naprave različnih proizvajalcev med seboj niso kompatibilne. Vse, kar je mogoče narediti, je to, da za vsako napravo posebej pripravimo programski vmesnik na centralnem računalniku. To je lahko obsežno delo, zato lahko na ta način povežemo le majhno število elementov procesnega vodenja, ki omogočajo komunikacijske povezave. Namen razvoja sodobnih standardov tipa npr. PROFIBUS je prav v tem, da bi poenotili komunikacijske protokole in tako omogočili učinkovito povezovanje elementov vodenja med seboj.

Ob odločitvi, ali med tipalom s pretvornikom in računalniškim sistemom, med računalniškim sistemom in "inteligentnim" aktuatorjem, mikroprocesorskim regulatorjem in računalniškim sistemom vzpostavimo komunikacijsko povezavo ali standardni tokovni signal, moramo pretehtati celo vrsto prednosti in slabosti ene in druge različice:

- tokovni signal prenaša le en signal (podatek), komunikacija več podatkov,
- tokovni prenos poteka le v eni smeri, komunikacija v obeh,
- tokovni prenos dovoljuje eno oddajno stran in več sprejemnikov, komunikacija pa tudi več oddajnikov,
- natančnost tokovnega prenosa je v razredu 0.1%, komunikacijski prenos je absolutno točen, a vsebuje verjetnost napake pri prenosu,
- okvara (npr. stik) na vodilu okrni le eno signalno vejo pri tokovnem prenosu, poruši pa celotni sistem na komunikacijskem vodilu,
- pri servisiranju tokovnih instalacij najpogosteje potrebujemo le univerzalni instrument (AVO meter), pri komunikacijskih povezavah pa

največkrat osciloskop, včasih tudi protokolni analizator, diagnostične programske pakete itd.,

- servis tokovne instalacije lahko opravlja strokovnjak z nižjo izobrazbo,
- pri tokovni povezavi je povezovanje jasno, uporabljeni komunikacijski protokoli pa so različni, včasih uporabnikom tudi nedostopni,
- tokovna zanka lahko po istem paru žic tudi napaja merilni pretvornik.

Z ozirom na našete prednosti in slabosti ene in druge rešitve lahko z gotovostjo ugotovimo, da tudi v prihodnosti komunikacijske povezave ne bodo nadomestile tokovnih povezav, pač pa lahko pričakujemo enakovreden nastop.

Problemi

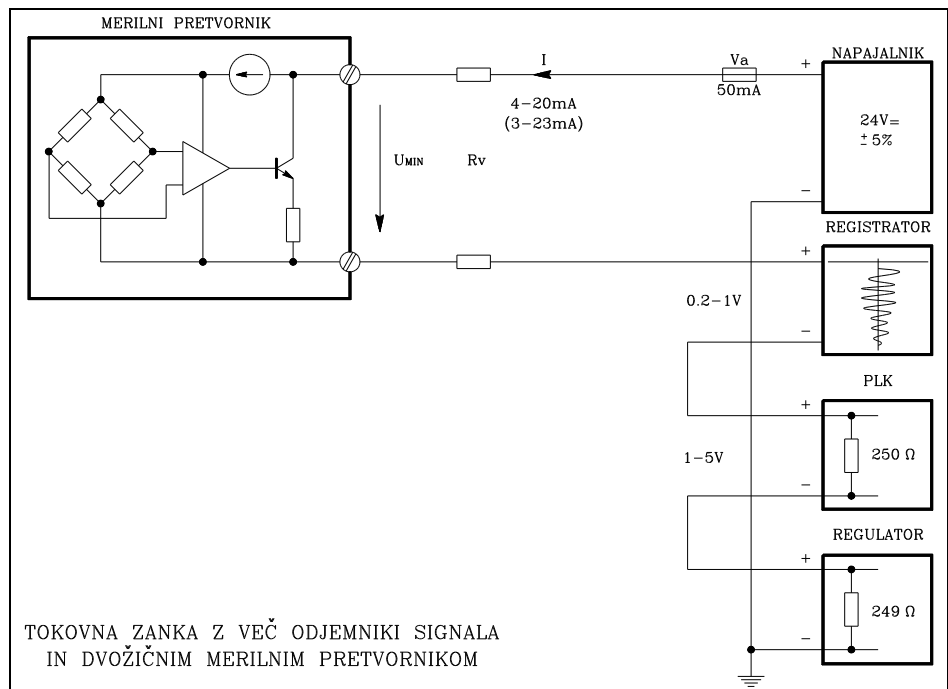
7.1. Dvožična vezava merilnih pretvornikov

Sodobna dvožična vezava merilnih pretvornikov je pri merilnih pretvornikih za tlak izjemno razširjena. Drugačne izvedbe napajanja pretvornika (npr. 230 V_{AC} , 24 V_{DC}) so pravzaprav že velika redkost. Dvožično povezani merilni pretvorniki namreč izkoriščajo signal žive ničle 4 mA (merilni signalni obseg $4\text{--}20\text{ mA}$) za lastno napajanje. Del tega toka napaja merilni mostiček, preostanek toka pa napaja pretvorniško elektroniko. Dvožična vezava bistveno poenostavi in zmanjša ožičenje naprav.

Pri dograjevanju procesnih regulacijskih sistemov z novimi komponentami pogosto "zmanjka" merilnega signala. Problem je sicer enostaven, vendar si ga oglejmo na primeru (slika 7.10).

Napajalnik enosmerne napetosti 24 V napaja tokovno zanko, v katero so vključeni še: zaščitna varovalka, merilni pretvornik, regulator, analogni vhod programirljivega logičnega krmilnika (PLK), vhod elektronskega regulatorja ter celotno ožičenje s skupno upornostjo R_V . V tej tokovni zanki teče signalni tok v normalnem obsegu $4\text{--}20\text{ mA}$, vendar pa ta tok lahko območje tudi preseže. Tipično lahko vrednost toka 3 ali 23 mA označuje okvaro merilnega pretvornika, pogosto

7.1. Dvožična vezava merilnih pretvornikov



Slika 7.10:

pa tok nad 20 mA omogoča merjenje pri vhodnih preobremenitvah, kar je zelo ugodno pri kasnejši analizi procesnih problemov.

Osnovni problem v taki tokovni zanki lahko nastane, če spregledamo lastno rabo merilnega pretvornika. Ta seveda za lastno rabo potrebuje le 4 mA toka - vendar pri minimalni napajalni napetosti (U_{MIN}), ki mora biti ob tem sočasno prisotna na njegovih sponkah. Ta napetost je lahko večja (v dovoljenih mejah), vendar pa ne sme biti manjša od napetosti, ki jo navaja proizvajalec merilnega pretvornika (tipično 10 do 13 V).

Analizirajmo primer za naslednje podatke:

- minimalna napetost pretvornika: 12 V
- upornost varovalke: 10 Ω

- upornost vseh vodnikov: 100Ω
- vhodna upornost regulatorja: $1 \text{ V}/20 \text{ mA} = 50 \Omega$
- vhodna upornost PLK: $5 \text{ V}/20 \text{ mA} = 250 \Omega$
- vhodna upornost regulatorja: 249Ω

Če seštejemo padce napetosti v signalni zanki, pri toku 20 mA dobimo:

| | |
|--------------------|---|
| varovalka | $10 \Omega \cdot 20 \text{ mA} = 0.2 \text{ V}$ |
| merilni pretvornik | $U_{MIN} = 12 \text{ V}$ |
| vodniki | $100 \Omega \cdot 20 \text{ mA} = 2 \text{ V}$ |
| registrator | $50 \Omega \cdot 20 \text{ mA} = 1 \text{ V}$ |
| PLK | $250 \Omega \cdot 20 \text{ mA} = 5 \text{ V}$ |
| regulator | $249 \Omega \cdot 20 \text{ mA} = 4.98 \text{ V}$ |
| Skupaj | $= 25.18 \text{ V}$ |

Očitno te napetosti napajalnik ne more doseči, zato tudi tok v tej zanki ne more doseči vrednosti 20 mA . Pri napetosti napajanja 24 V bi dosegli kvečjemu:

$$I_{\max} = \frac{24 \text{ V} - 12 \text{ V}}{10 \Omega + 100 \Omega + 50 \Omega + 250 \Omega + 249 \Omega} = 18.2 \text{ mA} \quad (7.1)$$

V praksi bi se ta problem odražal tako, da bi tak merilni sistem do toka 18.2 mA deloval solidno, pri nadaljnjem povečevanju merjene veličine pa se ta tok ne bi več povečeval. Pri višjih zelenih vrednostih bi regulator npr. polno odprl paro za gretje, ventil za napajalno vodo, ventil za dodajanje kisline itd., in tako povzročil nastanek nevarne situacije.

Skrita nevarnost prikazane situacije je v tem, da je ne moremo enostavno simulirati (pogoji niso nujno enaki, če namesto merilnega pretvornika v zanko vežemo simulator tokovnega signala). Lahko seveda s simulatorjem na mestu merilnega pretvornika nastavimo ustrezni maksimalni tok (npr. 23 mA) in preverimo, če je padec napetosti na simulatorju večji od minimalne delovne napetosti merilnega pretvornika. Nekateri sodobni "inteligentni" merilni pretvorniki vsebujejo tudi že možnost simuliranja izhodnega toka. Problematični pa so starejši pretvorniki s pomanjkljivo dokumentacijo, pri katerih je potreben preizkus z dejanskim ali simuliranim tokom na vhodu.

7.1. Dvožična vezava merilnih pretvornikov

Če je le mogoče, pred montažo novega elementa v tokovno zanko preverimo, ali je skupna upornost vseh odjemnikov tokovnega signala manjša od največje dovoljene, ki jo izračunamo na naslednji način:

$$R_{\max} = \frac{U_{\text{NAPAJALNIKA}_{\min}} - U_{\text{PRETVORNIKA}_{\min}}}{I_{\text{ZANKE}_{\max}}} \quad (7.2)$$

Za obravnavani primer:

$$U_{\text{NAPAJALNIKA}_{\min}} = 24 \text{ V} - 5\% = 22.8 \text{ V}$$

$$U_{\text{PRETVORNIKA}_{\min}} = 12 \text{ V}$$

$$I_{\text{ZANKE}_{\max}} = 23 \text{ mA}$$

$$R_{\max} = (22.8 \text{ V} - 12 \text{ V}) / 23 \text{ mA} = 470 \text{ } \Omega$$

Skupna upornost odjemnikov =

$$= R_{\text{varovalke}} + R_{\text{ožičenja}} + R_{\text{registratorja}} + R_{\text{PLK}} + R_{\text{regulatorja}}$$

$$= 10 \text{ } \Omega + 100 \text{ } \Omega + 50 \text{ } \Omega + 250 \text{ } \Omega + 249 \text{ } \Omega = 659 \text{ } \Omega$$

V tem primeru skupna upornost odjemnikov bistveno presega največjo dovoljeno upornost.

Kaj storiti, ko se račun ne izide, kot v prikazanem primeru?

Možne rešitve so naslednje:

- če je takih tokovnih zank v sistemu več, potem lahko povečamo napajalno napetost, če ta ni omejena zaradi drugih razlogov (npr. zaradi zaščite pred eksplozijo),
- izločimo manj pomembne signalne porabnike,
- povečamo presek napajalnih vodov, če le-ti bistveno prispevajo k skupni upornosti (pri zelo dolgih napeljavah),
- pri porabnikih, ki to omogočajo, izberemo nižjo vhodno upornost, vendar težimo k temu, da ima čimveč porabnikov višje vhodne upornosti (kvalitetnejši signali),

Signali in prenos podatkov v sistemih vodenja industrijskih procesov

- nekateri večznančni regulatorji imajo več analognih vhodov in izhodov. Pri programiranju (konfiguriranju) regulatorja njegov vhod vežemo v kritično tokovno zanko, ta signal programsko povežemo na njegov pomožni tokovni izhod. S tem izhodom nato napajamo ostale porabnike, ki smo jih izločili iz kritične tokovne zanke,
- enega ali več porabnikov signala konfiguriramo v napetostni režim in jih vežemo paralelno k preciznemu merilnemu upor. Pazimo na Kelvinovo vezavo!
- vgradimo posebne tokovno/tokovne pretvornike ali galvanske izolatorje z **dodatnim napajanjem**.

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave

Pri izgradnji novih ali izpopolnjevanju že delujočih sistemov za vodenje industrijskih procesov ter pri vzdrževanju obstoječe merilno-regulacijske opreme razvijalca, projektanta ali vzdrževalca ob koncu projekta ali posega nemalokrat čaka neprijetno presenečenje. Vse naprave so povezane med seboj (na stotine kontaktov!), položeni so kilometri kablov, konfigurirane so merilno-regulacijske naprave, sistem je "oživel", proizvodnja stekla, toda ... izhod regulatorja občasno "poskoči", kazanje temperature TT 121 je nemirno, računalniški sistem v nedoločljivih časovnih intervalih izpade, tlak v ogromnem shranjevalniku nenadoma naraste za nekaj deset odstotkov. Vodstvo proizvodnje zahteva optimalno proizvodnjo, sistem "se obnaša po svoje", začne se iskanje krivca. To nesrečno vlogo morata nazadnje prevzeti projektant ali vzdrževalec oziroma ustrezna skupina, ki pa se je ob projektu že tako ali tako najbolj "izmučila".

Pogosto so za taka stanja sistemov kriva žarišča elektromagnetnih motenj, ki uspejo s svojim sevanjem prodreti v signalni sistem naprav. Če deluje hkrati več takih žarišč, je iskanje najpomembnejših zelo težko, ker z merilnimi instrumenti izmerimo le njihov skupni učinek. Pogosto so izvori motenj povezani tudi z naključnim vklapljanjem različnih naprav, kar še dodatno oteži iskalni postopek. Že iskanje dveh okvar z medsebojnim vplivom je v praksi zelo zahteven postopek, podobno velja za iskanje virov motenj, ki jih je več in sočasno ogrožajo isti sistem vodenja. Zaradi tega je odpravljanje motilnih učinkov potem, ko je sistem že zgrajen, zelo težavno in zahtevno in nemalokrat "diši po mistiki". Namen tega podpoglavja je opozoriti na najznačilnejše primere problematičnih izvedb signalnih povezav v sistemih vodenja v procesnih industrijah.

7.2.1. O izvorih elektromagnetnih motenj

Čeprav lahko vse motnje in njih posledice, ki jih obravnavamo, splošno imenujemo elektromagnetne, pa je ugodneje, če jih razdelimo v:

- električne (prevodnostne),
- kapacitivne,
- induktivne (magnetne),

- visokofrekvenčne.

V razred "električnih" motenj razvrstimo tiste primere, pri katerih pride do povezave med izvorom motnje in motenim sistemom - neposredno po ožičenju sistema. Sem sodijo predvsem nizkofrekvenčni in enosmerni motilni izvori. V razred "kapacitivnih" motenj sodijo tisti primeri, kjer povezava motilni - moteni sistem poteka preko kapacitivnega sklopa med sistemoma kot posledica bližine prevodnih površin obeh sistemov. Prenos motenj v primeru "induktivnih" (magnetnih) motenj poteka preko izmeničnega (spreminjajočega se) magnetnega polja "napadalca" ki sega v signalni prostor "žrtve". O visokofrekvenčnih motnjah govorimo takrat, ko težko ločimo "kapacitivno" od "induktivne" motilne komponente, to je takrat, ko visokofrekvenčni motilni izvor vpliva na moteni sistem na medsebojni razdalji, ki je večja od $1/6$ valovne dolžine primarne frekvence motilnega izvora.

7.2.2. O elektromagnetni združljivosti

Za pravilno delovanje ("sožitje") elektronskih in električnih naprav je potrebno zagotoviti njihovo elektromagnetno združljivost (EMC - Electromagnetic Compatibility). Večina elektronskih naprav pri svojem delovanju generira tudi motilne signale, ki lahko motijo druge naprave (nenamenoma ali namenoma npr. oddajniki). Prav tako je tudi večina elektronskih naprav občutljiva na motnje iz okolice. Elektromagnetno združljivost dosežemo tako, da:

- napravam omejimo nivo emitiranih motenj,
- napravam določimo minimalni nivo imunosti proti motnjam.

Na ta način vsaka elektronska naprava pri normalni uporabi generira dovolj nizek nivo elektromagnetnih motenj, ki ne presega nivoja imunosti drugih naprav. In obratno, vsaka naprava je dovolj imuna, da deluje ob prisotnosti motenj iz drugih naprav.

Elektromagnetno združljivost naprav v Evropi zahteva evropska direktiva št. 89/336/EEC - Electromagnetic compatibility directive (EMC). Naprave, ki smejo biti v Evropi v prodaji in so označene z znakom CE, morajo izpolnjevati zahteve te direktive.

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave

Slednja zahteva, da **industrijske naprave** ustrezajo standardu EN 50081-2 (Electromagnetic compatibility - Generic emission standard Part 2: Industrial environment) in standardu EN 50082-2 (Electromagnetic compatibility - Generic immunity standard Part 2: Industrial environment). Prvi določa najvišje nivoje emisije drugi pa najnižje nivoje občutljivosti.

Standard EN 50081-2, ki omejuje elektromagnetno emisijo, določa meritve emisije po bazičnem standardu EN 55011 (Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment). Po tem standardu je definirano, da konduktivne motnje (motnje, ki potujejo po vodnikih) zajemajo frekvenčni obseg 150 kHz do 30 MHz, nad to mejo pa govorimo o sevalnih motnjah. Ta delitev je osnovana na obravnavi motenj, ki motijo radiodifuzne in komunikacijske sisteme (npr. radijske in TV sprejemnike).

V sistemih procesnega vodenja pa se medsebojno motenje naprav odraža že pri zelo nizkih frekvencah in celo pri enosmernih signalih. Zelo pogosto je motenje naprav zaradi prisotnosti napajalnega omrežja s frekvenco 50 Hz. Kljub temu, da v sistem povežemo gradnike (naprave), ki so deklarirane kot elektromagnetno združljive, zelo pogosto naletimo na probleme medsebojnega motenja, ki so posledica realne razporeditve naprav in njihovih medsebojnih povezav. Te se namreč razlikujejo od pogojev, pod katerimi je bila izmerjena in deklarirana elektromagnetna združljivost.

V nadaljevanju so prikazani najbolj tipični problemi vstopa motenj v sisteme procesnega vodenja. Primeri prikazujejo vdor konduktivnih, kapacitivnih, induktivnih in visokofrekvenčnih elektromagnetnih motenj. Ta delitev ni v skladu z delitvijo na konduktivne in sevalne motnje po standardu EN 55011, vendar pa nazorno pove, po katerem osnovnem principu je motnja vdrla v signalni sistem.

7.2.3. O ozemljevanju

Ozemljevanje naprav ni postopek, s katerim naj bi dosegli znižanje vpliva motenj v signalnih sistemih. Z ozemljevanjem naprav najpogosteje dosežemo prav nasprotni učinek: nivo motenj na strani motenih naprav se zelo pogosto celo poveča. Marsikateri sistem za vodenje pa po tem ukrepu postane celo neuporaben.

Ozemljevanje naprav je postopek, ki je predpisan in standardiziran (npr. VDE 0100, IEC 1010, EN 61010). Namenjen je preprečevanju nastanka smrtno nevarnih napetosti dotika, ki nastanejo pri prebojih izolacije med "vsebino" in kovinskim ohišjem električnih naprav, priključenih na elektrodistribucijsko omrežje. Zaradi problemov, ki bi jih povzročila atmosferska praznjenja ali nenamerno generirani elektrostatični potenciali, so nevtralne točke (zvezdišča) elektrodistribucijskih omrežij ozemljena. Tako vodniki omrežja niso več potencialno "plavajoči", temveč se ločijo na nevtralni vodnik in na fazne vodnike. Če bi v neozemljeni napravi, priključen na omrežje, prišlo do kratkega stika med faznim vodnikom in ohišjem naprave, bi bil dotik ohišja te naprave smrtno nevaren. Če pa je naprava pravilno ozemljena, steče preko prebojnega mesta v ozemljitev dovolj velik tok, da prekine ustrezno varovalko omrežja. S tem opozori uporabnika na okvaro in ga zaščiti pred preveliko napetostjo dotika. V sodobne napeljave pa vgrajujemo še FI zaščitna stikala, ki reagirajo na neregularen odtok električnega toka proti ozemljitvenem potencialu.

7.2.4. Tipični primeri motilnih povezav v sistemih procesnega vodenja

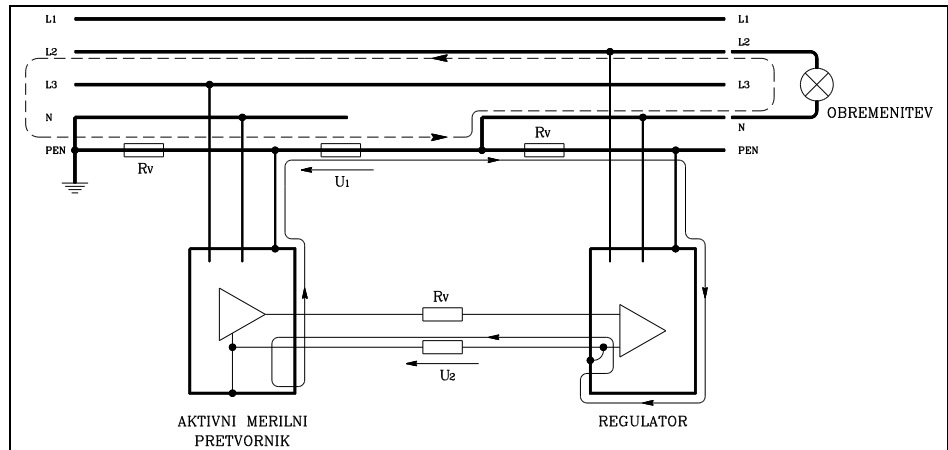
Motilna povezava preko skupnega vodnika

Primer na sliki 7.11 prikazuje problem prenosa "električnih" motenj preko skupnega vodnika.

Zaradi "rasti" električnega omrežja pri različnih razširitvah industrijskih sistemov in zaradi poenostavitve povezav je v delu omrežja pogosto kot zaščita pred dotikom uporabljeno "ničenje", oziroma medsebojno povezavo nevtralnega in zaščitnega vodnika. Na sliki 7.11 je prikazan primer, ko je prvi del omrežja izveden z ločenima ničelnim in zaščitnim vodnikom, ki sta povezana na ozemljitev na vhodu v industrijski objekt. Drugi del omrežja ima sicer ločena vodnika PE in N, vendar sta združena v eni izmed energetske omarice. Merilni pretvornik in računalniški sistem (PLK) sta daleč drug od drugega in sta priključena na lokalno ločeni omrežji. Obe napravi sta zaradi kovinskega ohišja predpisano ozemljeni - povezani z zaščitnim vodnikom.

Zaradi združitve zaščitnega in nevtralnega vodnika v delu omrežja nastane na skupnem vodniku pri obremenitvi omrežja padec napetosti U_1 kot posledica upornosti zaščitno-nevtralnega vodnika PEN. Ta padec napetosti požene motilni tok v

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave



Slika 7.11: Motilna povezava preko zaščitnega vodnika v kombiniranem TN-C-S zaščitnem sistemu

označeni zanki, ki med negativnima (masnima) priključkoma merilnega pretvornika in PLK povzroči padec napetosti U_2 . To napetost zazna vhodna stopnja PLK sistema in jo ne more ločiti od signala. Predstavlja motnjo in ogroža kvaliteto tako izvedene meritve.

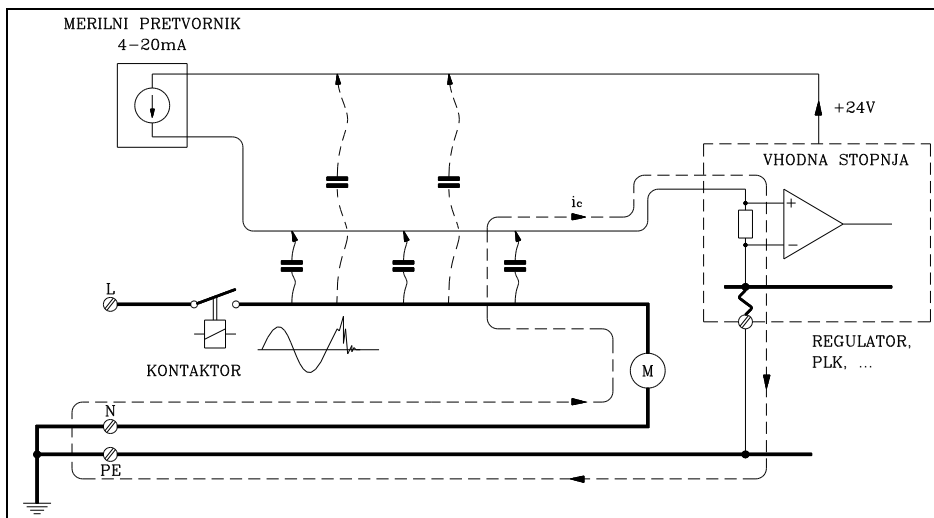
Če v primeru na sliki 7.11 uporabimo namesto napetostnega tokovni prenos signala, so motilne razmere ugodnejše. V vsakem primeru pa lahko preko negativnega signalnega voda tečejo veliki izravnalni tokovi (če so npr. omrežna bremena zelo velika), ki lahko signalne vode tudi prežgejo.

Opisanemu problemu se lahko izognemo, če za napajalno omrežje izvedemo čisto TN-S omrežje z ločenima nevtralnim in zaščitnim vodnikom, ki sta povezana skupaj z ozemljitvijo samo v eni točki priklopa omrežja v objekt. Dodatni kvalitetni učinek pa dosežemo še:

- z uporabo diferencialnega vhoda v PLK ali drug sprejemni sistem,
- z uporabo galvanske ločitve na izhodu merilnega pretvornika ali na vmesni poti.

Merilna povezava preko kapacitivnega sklopa

Slika 7.12 prikazuje primer kapacitivnega sklopa med energetske kablom, ki napaja elektromotor in merilnim pretvornikom, povezanim na vhodno stopnjo elektronskega regulatorja. Merilni pretvornik je pasivni (4-20 mA). Napajanje prejema iz napajalnika regulatorja, izhodni tok pa pošilja preko upora vhodne stopnje regulatorja. Regulator je predpisano zaščiten s povezavo z zaščitnim (PE) vodnikom. Signalni vodnik in energetski kabel sta na dolžini nekaj metrov položena skupaj v isto kineto pod podom komandne sobe.



Slika 7.12: Motilna povezava preko kapacitivnega sklopa med napajalnim in signalnim vodom

Med energetske kablom in signalnim vodom zaradi njune bližine nastane kapacitivni sklop, ki lahko dosega nekaj 10 do 100 pF medsebojne kapacitivnosti na meter skupne poti. Na sliki 7.12 je nakazana pot kapacitivnega toka od napajalnega voda za elektromotor preko vhodne stopnje regulatorja na zaščitni vodnik PE in nazaj na nevtralni vod napajanja elektromotorja. Kapacitivni tok je tem večji, čim bližja sta si signalni in napajalni vod ter čim višja je motilna frekvenca. V primeru na sliki 7.12 največjo motnjo povzroča odklop napajanja za elektromotor, ko se njegova induktivnost odzove na nenadno prekinitev toka. Napetost napajalnega

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave

voda hitro naraste, nakopičena induktivna energija pa se iztroši bodisi s preskokom električne iskre preko kontaktov kontaktorja, bodisi z dušenim iznihavanjem preko kapacitivnosti napajalnega voda.

V obeh primerih so lahko napetosti zelo visoke in frekvenčna vsebina bogata, zato je tedaj kapacitivni tok še posebej velik.

Za rešitev problema, prikazanega na sliki 7.12, moramo izvršiti naslednje ukrepe:

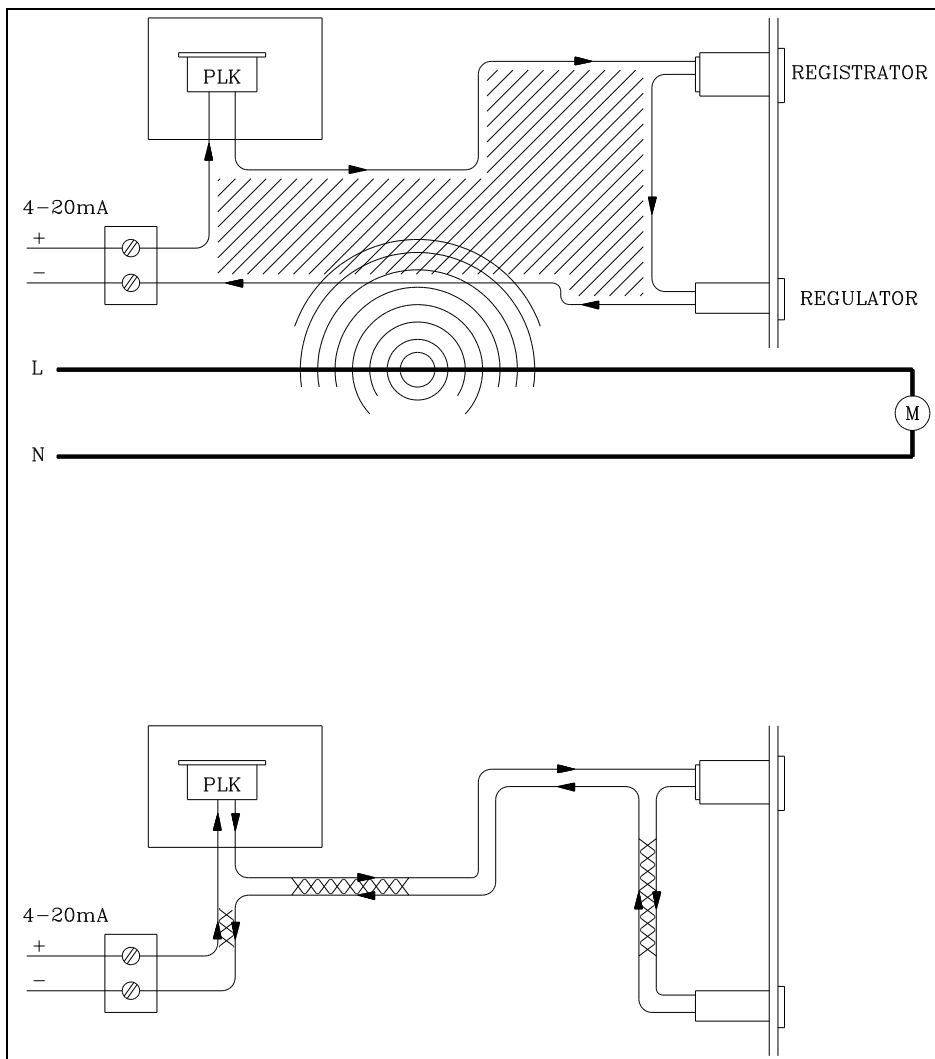
- oba signalna vodnika merilnega pretvornika zaščitimo z oklopom (npr. dvožilni oklopljeni kabel),
- paralelno h kontaktom kontaktorja ali paralelno k navitju motorja vežemo primeren RC člen in/ali varistor ustrezne delovne napetosti,
- po možnosti razmaknemo signalne in energetske vode na čimvečjo razdaljo in jih križamo približno pod kotom 90° .

Merilna povezava preko induktivnega sklopa

V primeru na sliki 7.13 zgoraj je signal merilnega pretvornika priključen na vstopne priključne sponke. Pozitivni vodnik nato nadaljuje pot na programirljivi logični krmilnik, regulator, in se zaključi na negativni sponki. Pod podom komandne sobe poteka napajalni vod.

Signalna povezava na sliki 7.13 zgoraj zajema veliko površino (lahko tudi nekaj m^2). Energetski vod se pri prehodu električnega toka oprede z magnetnim (izmeničnim) poljem, ki seže v označeno sklenjeno površino. Inducirana napetost v označeni površini je sorazmerna gostoti magnetnega polja in obsežnosti "napadene" površine. Inducirana napetost v zanki požene izmenični motilni tok, ki se superponira signalnemu toku 4-20 mA. Večina merilno-regulacijskih naprav z vgrajenimi nizkopasovnimi filtri sicer zmanjšuje nivo motenj v sprejetem signalu, vendar pa nižanje frekvenčne meje teh filtrov (povečevanje slabljenja za motilne signale) pogosto upočasni regulacijski sistem - okrni njegovo dinamiko.

Slika 7.13 spodaj prikazuje boljšo izvedbo signalne instalacije. Negativni vodnik namreč na celi poti spremlja pozitivnega. Po možnosti naj bosta prepletena (parica). Na ta način bistveno zmanjšamo efektivno površino, skozi katero lahko



Slika 7.13: Tipična razmestitev elementov merilno-regulacijske opreme za komandnim pultom in delovanje induciranih motenj (zgoraj). Boljša izvedba napeljave (spodaj)

prodrejo motilna magnetna polja. Ta postopek je še posebej pomemben, kadar v bližini signalnih vodov vodimo napajalne vode s tokovi z bogato visokofre-

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave

kvenčno vsebino (npr. izhodne vodnike frekvenčnih pretvornikov za krmiljenje asinhronskih motorjev).

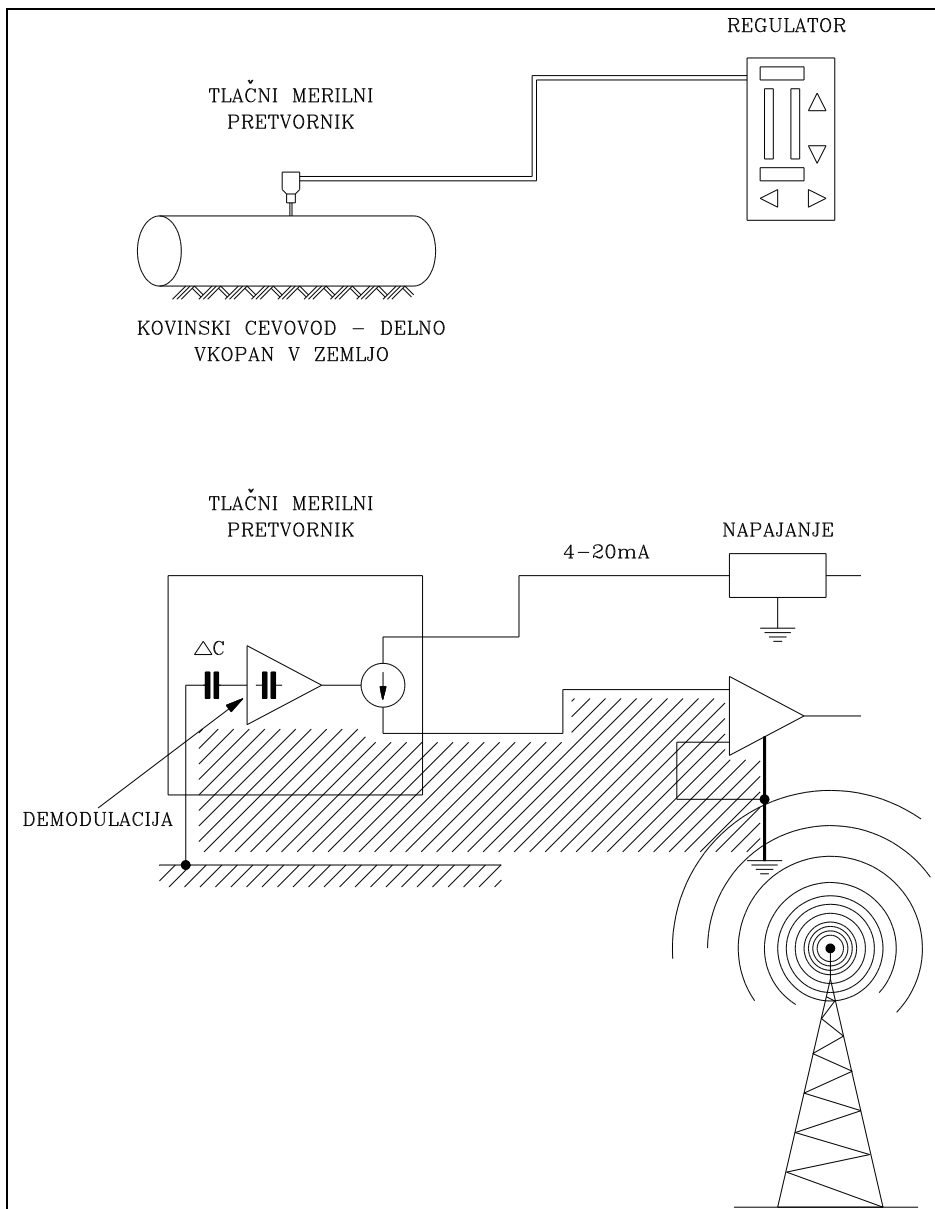
Vstopanje VF motenj v sisteme procesnega vodenja

Večina merilno-regulacijske opreme za vodenje procesov ima izražen nizkopa-sovni značaj. Zgornje mejne frekvence segajo le redko preko 10-20 Hz. Zato je pravzaprav čudno, kako lahko signali radijskih in višjih frekvenc sploh ogrozijo signalni sistem regulacijskega sistema. Enega izmed "mističnih" primerov prikazuje slika 7.14.

V primeru na sliki 7.14 gre za preprosto regulacijo tlaka v zrakovodu. Tlačni (dvožični) merilni pretvornik pošilja tokovni signal regulatorju, ki krmili ustrezne regulacijske lopute. V bližini sistema je močnejši radijski oddajnik. Tlačni merilni pretvornik deluje na principu merjenja spremembe kapacitivnosti zaradi premika merilne membrane. Čeprav elektronski del merilnega pretvornika nima galvanske (direktne) povezave z ohišjem, pa med vezjem in ohišjem običajno izmerimo 3 do 5 nF stresane kapacitivnosti. Ker pa je kovinski cevovod delno položen v zemlji, nastane v signalnem sistemu na sliki 7.14 označena zančna antena, ki lahko sprejema VF signal bližnjega oddajnika. Elektronsko vezje, ki sicer meri spremembe kapacitivnosti pri delovanju merjenega tlaka, poleg merilnega signala visoke frekvence demodulira tudi motilni radijski signal in tako na "eleganten" način izloči njegovo nizkofrekvenčno modulacijsko vsebino. Ta pa je seveda sposobna potovati med elementi regulacijskega sistema in vplivati na njegovo obnašanje.

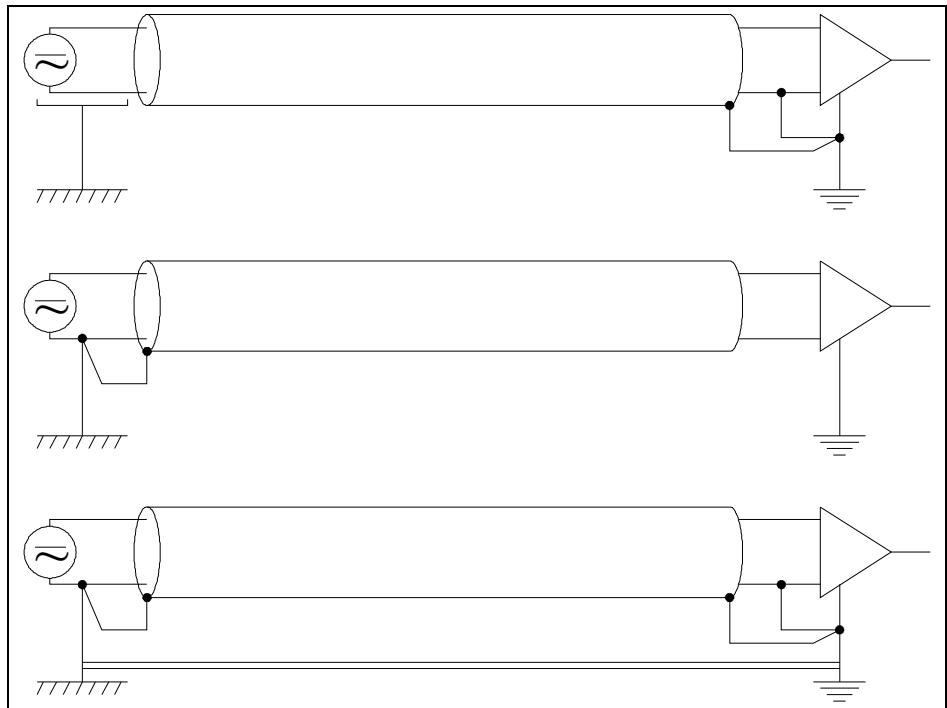
V primerih kot je prikazan na sliki 7.14, zmanjšamo možnosti za zajetje VF motenj s tem, da (slika 7.15):

- izvedemo signalno napeljavo s kvalitetnimi oklopljenimi kabli, oklop pa povežemo na obeh koncih,
- izberemo tlačni merilni pretvornik s kovinskim ohišjem,
- po potrebi v signalni sistem vgradimo pasivne RLC člene, s katerimi znižamo nivo VF signala, ki bi lahko prodril do polprevodniških komponent sistema,
- se izognemo uporabi ročnih radijskih postaj v bližini kritičnih signalnih zank.



Slika 7.14: Primer vpliva VF motenj na sistem regulacije tlaka

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave



Slika 7.15: Primerne vezave oklopa. Zgoraj: sprejemna stran povezana z ozemljitvijo. V sredini: merilni pretvornik povezan z ozemljitvijo, sprejemna stran je diferencialni ojačevalnik. Spodaj: obe strani sta povezani z ozemljitvijo. Poskrbimo za čim boljši ozemljitveni sistem!

Prikazani tipični primeri vstopa motenj v sisteme procesnega vodenja zelo pogosto ogrozijo kvaliteto signalov v teh sistemih. Pri razširitvi, obnovi ali vzdrževanju sistemov se poskušajmo izogniti predstavljenim "nevarnim" situacijam. Če se le temu ne moremo zaradi drugih pogojev popolnoma izogniti, pa poskušajmo vedno iskati kompromis med dovoljenim nivojem motenj, zanesljivostjo sistema, stroški, potrebnim vložnim delom, prostorskimi možnostmi itd.

Primeri

PRIMER 7.1 (PREKORAČITEV VHODNEGA OBMOČJA VHODNE STOPNJE)

V signalnem sistemu kot npr. na sliki 7.5 dodamo nov odjemnik signala z vhodno upornostjo 300Ω . Namestimo ga v negativni vod napajalnika. Ozemljitveno točko postavimo na negativni pol napajalnika. Dodatni upor 300Ω povzroči nov padeč napetosti v višini: $20 \text{ mA} \cdot 300 \Omega = 6 \text{ V}$. Za obstoječi regulator ta padeč napetosti predstavlja sofazno napetost. Preverimo stanje:

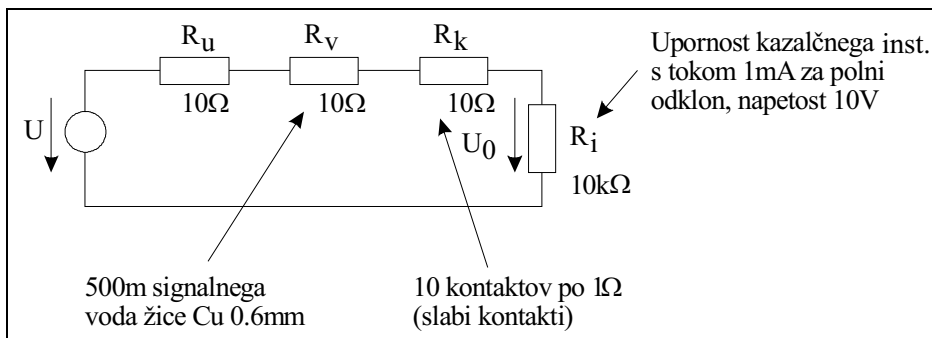
Vhodno delovno območje A/D modula: -10 V do $+10 \text{ V}$

sofazna napetost: $+6 \text{ V}$

diferencialna napetost: padeč napetosti na odjemnem uporu 250Ω (glej sliko 7.5) izračunamo na naslednji način. Skozi odjemni upor teče signalni tok 4 do 20 mA . Ta povzroča padeč napetosti $U_d = 4 \text{ mA} \cdot 250 \Omega$ do $20 \text{ mA} \cdot 250 \Omega$. Območje diferencialne napetosti zato znaša 1 V do 5 V . Pri toku 20 mA vsota sofazne in diferencialne napetosti preseže delovno območje: $U_s + U_d = 6 \text{ V} + 5 \text{ V} = 11 \text{ V} > 10 \text{ V}$

PRIMER 7.2

V tem primeru si oglejmo nastanek odstopanja pri napetostnem prenosu signalov. Nadomestno vezje prikazuje slika 7.16. Napaka pri prenosu znaša:



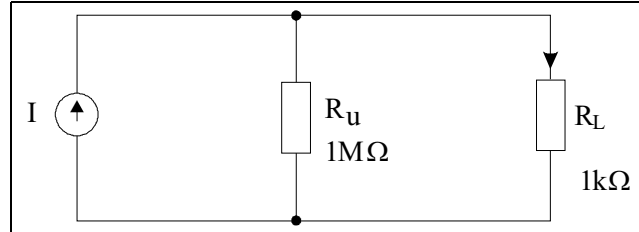
Slika 7.16: Nadomestno vezje napetostne oblike prenosa signalov

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{U_0 - U}{U} \cdot 100\% = -\frac{R_u + R_v + R_k}{R_u + R_v + R_k + R_i} \cdot 100\% \\ &= -\frac{80 \Omega}{10080 \Omega} \cdot 100\% = -0.8\% \end{aligned} \quad (7.3)$$

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave

PRIMER 7.3

V tem primeru si oglejmo odstopanje sprejete od oddane vrednosti pri tokovni obliki prenosa signalov. Nadomestno vezje prikazuje slika 7.17.



Slika 7.17: Nadomestno vezje tokovne oblike prenosa signalov

I : tokovni oddajnik (tokovna končna stopnja).

R_u : izgubna upornost (sestavlja jo izhodna upornost tokovne končne stopnje in izolacijska upornost).

R_L : vhodna upornost vseh sprejemnikov tokovnega signala.

Za $R_L = 1\text{k}\Omega$ in $R_u = 1\text{M}\Omega$ odstopanje znaša:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{I_L - I}{I} \cdot 100\% = -\frac{R_L}{R_L + R_u} \cdot 100\% \\ &= -\frac{1\text{k}\Omega}{1001\text{k}\Omega} \cdot 100\% = -0.1\%\end{aligned}\tag{7.4}$$

Naloge

NALOGA 7.1

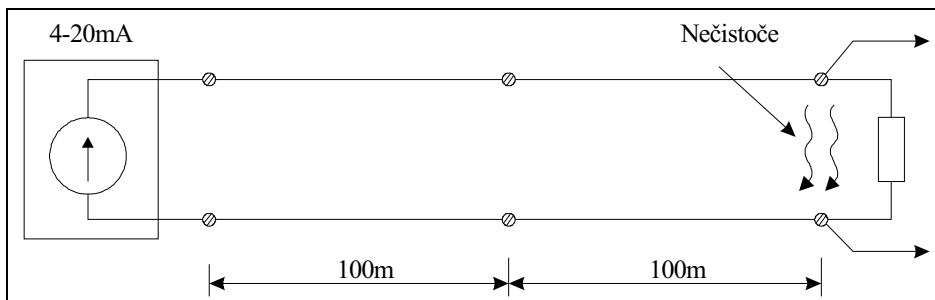
Kaj dosežemo z:

- oklapanjem signalnih vodov;
- s prepletanjem signalnih žic;

- z ozemljevanjem elementov regulacijskih sistemov?

NALOGA 7.2

Signalni pretvornik z izhodnim signalom 4 do 20 mA napaja tokovno zanko (slika 7.18), ki poteka preko treh razdelilnih omaric. Razdalja med omaricami znaša po 100 m, izvedena pa je z žico z dolžinsko upornostjo $0.35 \Omega/\text{m}$. Tokovna zanka je zaključena s standardnim uporom 250Ω , njegovo napetost pa vodimo na A/D pretvornik. V zadnji omarici smo opazili nanos nečistoč med priključnima sponkama, katerih prevodnost smo izmerili ($10 \mu\text{S}$). Kakšni napetosti je dobival A/D pretvornik v obeh mejah tokovnega signala pred odkritjem in odpravo napake? Upornost kontaktov znaša približno 0.4Ω (vsak kontakt).



Slika 7.18: Tokovna zanka

NALOGA 7.3

Navedite nekaj prednosti tokovnega prenosa signalov v merilno regulacijskih sistemih in še posebej prednosti uporabe signalov z "živo ničlo"!

NALOGA 7.4

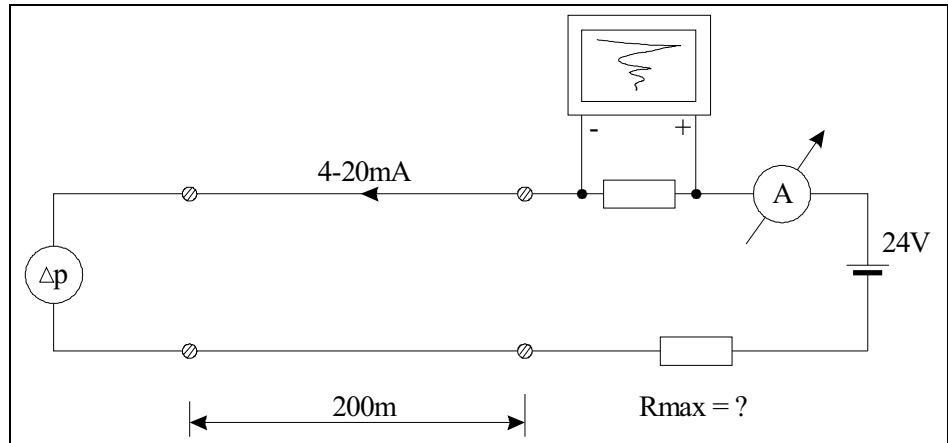
V merilnem sistemu (slika 7.19) s tokovnim prenosom signala 4-20 mA so vključeni:

- merilnik tlaka z dvožično priključitvijo, ki za delovanje potrebuje najmanj 8.5 V napetosti;
- kazalčni instrument z notranjo upornostjo 60Ω ;
- registrator z napetostnim obsegom 0.2 do 1 V in ustreznim souporom;
- napajalni izvor 24 V ter

7.2. Nekateri primeri vstopa motenj v signalne povezave

- 200 m dolg dvožični vod z upornostjo žice $0.05 \Omega/\text{m}$.

Kako velik upor še smemo vključiti v ta sistem (za potrebe povezave na računalniški sistem), da preostane vsaj še 1 V zančne napetosti za pokrivanje morebitnih kontaktnih upornosti?



Slika 7.19: Merilni sistem

NALOGA 7.5

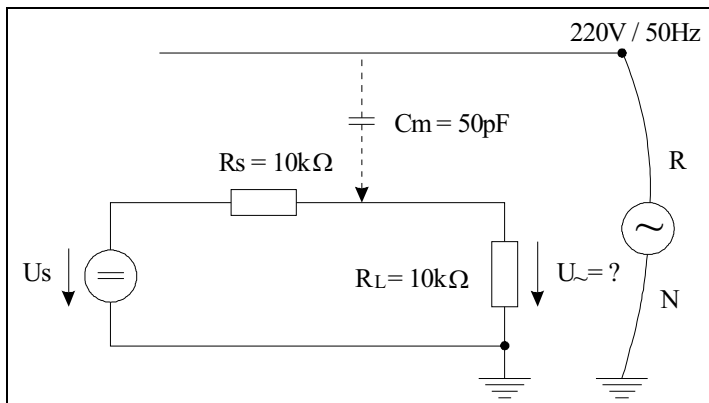
Izračunajte efektivno napetost motnje pri prenosu signala (slika 7.20), ki jo povzroča električno omrežje 230 V/50 Hz s kapacitivnim vplivom!

NALOGA 7.6

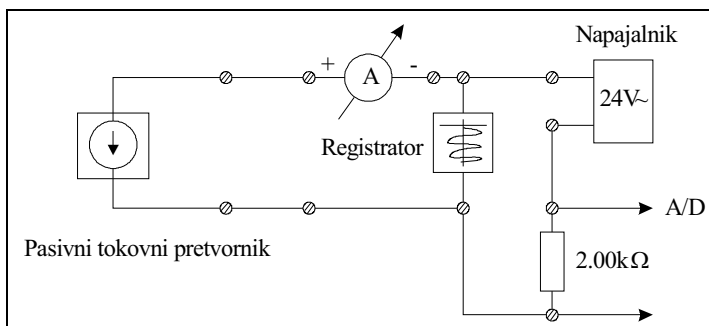
Kaj je narobe na shemi merilnega sistema (slika 7.21) s standardnim tokovnim obsegom 4-20 mA?

NALOGA 7.7

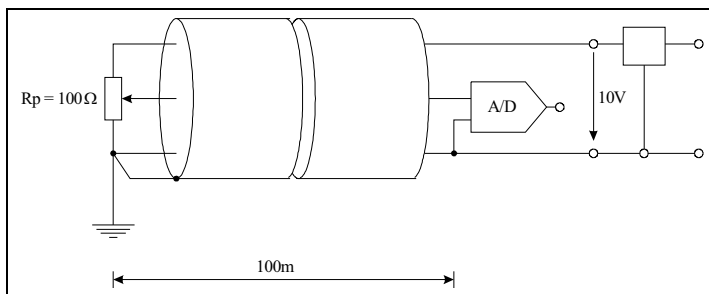
Potenciometer kot dajalnik zasuka povežemo kot na sliki 7.22 (trožično) in ga napajamo z napajalnikom napetosti $U_n=10 \text{ V}$. Koliko znaša napetost na vходу A/D pretvornika z zelo visoko vhodno upornostjo v obeh končnih položajih drsnika potenciometra? Razdalja med potenciometrom in napajalnikom (A/D pretvornikom) znaša 100 m, povezava pa je izvedena s trožilnim oklopljenim kablom z žilami premera 0.6 mm, ki imajo upornost $0.061 \Omega/\text{m}$.



Slika 7.20: Prenos signala



Slika 7.21: Shema tokovnega merilnega sistema. Kaj je narobe?



Slika 7.22: Vezava potenciometra

Literatura

- [1] R. Karba (1994): Gradniki sistemov vodenja, Založba FER, Ljubljana.
- [2] Več avtorjev (1998): Celostni pristop k računalniškemu vodenju procesov, Uredil: S. Strmčnik, Založba FE in FRI, Ljubljana.

Gradniki

- [3] W.G.Andrew, H.B.Williams (1988): Applied Instrumentation in the Process Industries, Vol I, II, III, IV, Gulf Publishing Company, Third Printing.
- [4] DEUTSCHE NORM (1991): DIN 19245 Teil 1, PROFIBUS, Benth Verlag, Berlin.
- [5] J. Fraden (1997): Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, Application, 2. izdaja, AIP Press, Woodbury.
- [6] T.E. Kissel (2000): Industrial Electronics, Applications for Programmable Controllers, Instrumentation & Process Control and Electrical Machines & Motor controls, 2. izdaja, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- [7] M.G.Mylroi, G.Calvert (1984): Measurement and Instrumentation for Control, Peter Peregrinus Ltd., London.
- [8] S. Solomon (1999): Sensors Handbook, McGraw Hill, New York.
- [9] G.Strohrmann (1991/92): Automatisierungstechnik, Band I: Grundlagen, analoge und digitale Processleitsysteme, Band II: Stellgeräte, Strecken, Projektentwicklung, Band III: Messtechnik im Chemiebetrieb, Oldenbourg Verlag, München.

Bližina

- [10] F. Ebel, S. Nestel (1992): Sensors for handling and processing technology, Proximity sensors, Function package FP1110, Textbook, Festo Didactic, Esslingen.
- [11] Rockwell Automation (1999) Sensors, Katalog, Allen-Bradley.

Temperatura

- [12] M.G.Mylroi, G.Calvert (1984): Measurement and Instrumentation for Control, Peter Peregrinus Ltd., London.
- [13] Omega (2002): Complete Temperature Measurement Handbook and Encyclopaedia, Omega Engineering, Inc.
- [14] Prospektni material podjetij Siemens, Rosemount, Endress&Hauser, Degussa.
- [15] R.B.Stockdale (1990): Competition Raises Temperature Products Performance Targets, Control Engineering, Vol 37, No 11, pp. 51-63.
- [16] G.Strohrmann (1991): Messtechnik im Chemiebetrieb - Eine Einfhnhrung, 6. Auflage, R.Oldenbourg Verlag München.

Tlak

- [17] W.G.Andrew, H.B.Williams (1988): Applied Instrumentation in the Process Industries, Vol 1, Second edition, Ch 4, 5, 6, Gulf Publishing Comp., Houston, TX.
- [18] G.J.Blickley (1991): Tank Gaging Transmitter Performs More Functions, Control Engineering, Vol 38, No 11.
- [19] M.G.Mylroi, G.Calvert (1984): Measurement and Instrumentation for Control, Ch. 2, 6, 9, Peter Peregrinus Ltd., London.
- [20] Omega (2002): Complete Pressure, Strain and Force Measurement Handbook and Encyclopaedia, Omega Engineering, Inc.
- [21] Prospektna in tehnična dokumentacija firm: Rosemount, Mannesmann-Hartmann Braun, Omega engineering Vol 26, Endress&Hauser, Valmet, Siemens
- [22] R.B.Stockdale (1990): Has Pressure Sensor Design Kept Pace with Technology, Control Engineering, Vol 37, No 7.
- [23] G.Strohrmann (1991): Messtechnik im Chemiebetrieb - Eine Einfhnhrung, 6. Auflage, Kap 1, 2, 3, 5, R.Oldenbourg Verlag München.

LITERATURA

Pretok

- [24] W.G.Andrew, H.B.Williams (1988): Applied Instrumentation in the Process Industries, Vol. 1, Second edition, Gulf Publishing Comp., Houston.
- [25] G.J.Blickley (1988): Flowmeters Improve with New Technologies, Control Engineering, March 1988, Volume 35, No. 3.
- [26] G.J.Blickley (1994): Mass Flowmeters Shape Up, Control Engineering, December 1994, Volume 41, No. 13.
- [27] R.Karba (1984): Gradniki sistemov vodenja, Založba FER, Ljubljana.
- [28] M.G.Mylroi, G.Calvert, ed.(1984): Measurement and Instrumentation for Control, Peter Peregrinus Ltd. London.
- [29] Omega (2002): Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopaedia, Omega Engineering, Inc.
- [30] Prospektna in tehnična dokumentacija firm: Rosemount, Mannesmann-Hartmann Braun, Endress&Hauser, Velmet, Siemens.
- [31] G. Strohrmann (1991): Messtechnik in Chemiebetrieb, Eine Einfhnung, 6. Auflage Verlag Muenchen.

Signali

- [32] J.Abbott (1980): Transmission Line Drivers and Receivers for EIA Standards RS-422 and RS-423, Application note AN 214, Interface databook, National Semiconductor Corporation.
- [33] D.Djonlagić (1990): Komunikacije v sistemih za avtomatizacijo - Pregled, Zbornik 1. posvetovanja Komunikacije v sistemih za avtomatizacijo, Maribor, str. 1-34.
- [34] J.Petrovčič, A.Bitenc (1990): Povezave večzančnega mikroračunalniškega regulatorja MMC z nadzornim računalnikom, Zbornik 1. posvetovanja Komunikacije v sistemih za avtomatizacijo, Maribor, str. 71-82.
- [35] Standardi EAI-RS232c, CCITT V11, DIN 19245, ISO-1745, ISO-2111, ISO-646, ANSI X3.28-1976.

- [36] D.Tarrer (1980): Summary of Electrical Characteristics of Some Well Known Digital Interface Standards, Application note AN 216, Interface databook, National Semiconductor Corporation.
- [37] Tehnična dokumentacija regulatorjev Siemens DR20/21/22/24, Foxboro 761, Micon P-100 in programirljivih logičnih krmilnikov Siemens in Mitsubishi.
- Motnje**
- [38] G.Brechmann, W.Dzieia, E.Hörnemann, H.Hübscher, D.Jagla, J.Klaue (1994): Elektrotehniški priročnik, Založba Viharnik, Ljubljana.
- [39] CISPR 16-1 (1999): Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and immunity measuring apparatus and methods, Part 1: Radio disturbance measuring apparatus.
- [40] H.W.Denny (1983): Grounding for the Control of EMI, Don White Consultants, Inc.
- [41] EN 50081-2 (1995): Electromagnetic compatibility - Generic emission standard, Part 2: Industrial environment.
- [42] EN 50082-2 (1993): Electromagnetic compatibility - Generic immunity standard, Part 2: Industrial environment.
- [43] EN 55011 (1991): Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment.
- [44] EN 61000-4-2 (1995): Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test, Basic EMC Publication.
- [45] EN 61000-4-3 (1996): Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 3: Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test.
- [46] EN 61000-4-4 (1995): Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 4: Electrical fast transient/burst immunity test, Basic EMC Publication.

LITERATURA

- [47] EN 61000-4-5 (1995): Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 5: Surge immunity test Basic EMC Publication.
- [48] EN 61000-4-6 (1996): Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 6: Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.
- [49] EN 61000-4-12 (1994): Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 12: Oscillatory Waves immunity test Basic EMC Publication.
- [50] EN 61131-2 (1994): Programmable controllers, Part 2: Equipment requirements and test.
- [51] EN 61010-1/A2 (1995): Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use, Part 1: General requirements.
- [52] JUS N.B2.730
- [53] JUS N.B2.741
- [54] M.Mardiguian (1984): Interference Control in Computers and Microprocessor-Based Equipment, Don White Consultants, Inc.
- [55] H.W.Ott (1988): Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, Second Edition, John Wiley & Sons, New York.

Regulacijski ventili

- [56] D. Djonlagić, B. Tovornik (1997): Krmilni ventili, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor.
- [57] ISA (1998): Control Valves, Practical Guides for Measurement and Control, Eds.: G. Borden, Jr., P. G. Friedmann, Instrument Society of America, Research Triangle Park.
- [58] R. Karba (1994): Gradniki sistemov vodenja, Založba FER, Ljubljana.
- [59] B. Rojc (1999): Dimenzioniranje in krmiljenje regulacijskih ventilov, Zaključna naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana.