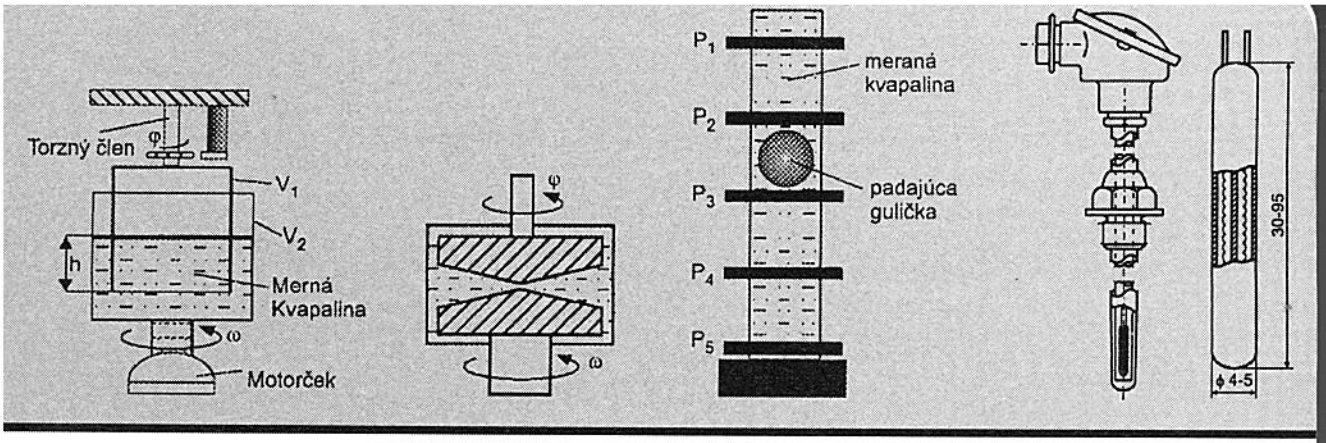


JÁN ŠTURCEL

SNÍMAČE A PREVODNÍKY

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Obsah

PREDHOVOR 9

ZOZNAM POUŽITÝCH A POUŽÍVANÝCH SKRATIEK 10

1 ÚVOD 11

2 INFORMAČNÝ PODSYSTÉM AUTOMATICKÝCH RIADIACICH SYSTÉMOV 13

2.1 Analógový merací kanál 14
2.2 Číslicový merací kanál 19
2.3 Kvalita IPS a MČ 27
2.3.1 Metrologické vlastnosti meracích členov *28*
2.3.1.1 Statické vlastnosti MČ 28
2.3.1.2 Dynamické vlastnosti a parametre MČ, dynamická chyba 35
2.3.2 Prevádzkové vlastnosti a zabezpečenie IPS a MČ *40*

3 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY TEPLOTNÝCH VELIČÍN 44

3.1 Základné pojmy, rozdelenie 44
3.2 Snímače pre dotykové meranie teploty 46
3.2.1 Dilatačné snímače teploty *46*
3.2.2 Odporové kovové snímače teploty *47*
3.2.2.1 Vyhodnocovacie obvody odporových snímačov teploty 50
3.2.2.2 Linearizácia charakteristík kovových odporových snímačov teploty 54
3.2.3 Odporové polovodičové snímače teploty *55*
3.2.3.1 Vyhodnocovacie obvody pre odporové polovodičové snímače teploty 60
3.2.3.2 Linearizácia charakteristiky polovodičového snímača teploty 61
3.2.4 Termoelektrické články *63*
3.2.4.1 Vyhodnocovacie obvody termočlánkov 67
3.2.5 Meranie nízkych teplôt. *70*
3.3 Bezdotykové meranie teplôt (pyrometria) 72
3.3.1 Odporové snímače infračerveného žiarenia *72*
3.3.2 Termoelektrické snímače *74*
3.3.3 Pyroelektrické snímače *75*
3.3.4 Pyrometre *76*

4 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY TLAKU, SILY A MOMENTU 78

4.1 Snímače a meracie členy tlaku a tlakovej diferencie 78
4.1.1 Základné tvary deformačných prvkov *79*
4.1.2 Odporová tenzometria *81*
4.1.2.1 Základné pojmy 81
4.1.2.2 Rozdelenie tenzometrov a používané materiály 84
4.1.2.3 Vyhodnocovacie obvody pre odporové tenzometre 87
4.1.3 Piezorezistívne snímače tlaku *91*
4.1.4 Kapacitné snímače tlaku *93*
4.1.5 Rezonančné snímače tlaku *95*
4.2 Snímače a meracie členy sily 97
4.2.1 Nepriame meranie síl *98*

4.2.2 Priame meranie síl ... *101*
4.2.3 Iné princípy merania síl ... *102*
4.3 Snímače a meracie členy momentu sily ... 102

5 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY PRIETOKU ... 105

5.1 Základné pojmy ... 105
5.2 Objemové a dávkovacie prietokomery ... 109
5.3 Rychlostné snímače ... 110
5.3.1 Lopatkové a turbínkové snímače prietoku *110*
5.3.2 Termoanemometrické snímače *112*
5.3.3 Plavákové snímače, rotametre *115*
5.3.4 Indukčné snímače prietoku *116*
5.3.5 Ultrazvukové snímače prietoku *119*
5.3.6 Vírové snímače prietoku *124*
5.4 Prierezové prietokomery, škrtiace zariadenia ... 125
5.4.1 Prietok tekutiny zúženým prietočným prierezom v potrubí *125*
5.4.2 Škrtiace zariadenia, orgány *129*
5.4.2.1 Clona ... 130
5.4.2.2 Dýza ... 130
5.4.3 Prandtlova a Pitotova rúrka *131*
5.4.3.1 Pitotova rúrka ... 132
5.4.3.2 Prandtlova rúrka ... 132
5.4.4 Merací člen prietoku so snímačom Annubar *133*
5.5 Hmotnostné prietokomery ... 135
5.5.1 Coriolisov hmotnostný prietokomer *135*
5.5.2 Tepelné meradlá hmotnostného prietoku *139*
5.5.2.1 Tepelné prietokomery merajúce oteplenie tekutiny ... 139
5.5.2.2 Tepelné prietokomery s termoanemometrickým princípom ... 140
5.6 Tok sypkých látok ... 142

6 MERANIE MNOŽSTVA TEPLA ... 144

6.1 Základné pojmy ... 144
6.2 Meranie množstva tepla ... 145

7 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY VISKOZITY A HUSTOTY TEKUTÍN ... 149

7.1 Snímače viskozity, základné pojmy ... 149
7.2 Snímače viskozity ... 150
7.3 Snímače hustoty, základné pojmy ... 153
7.4 Priame snímače hustoty ... 153
7.5 Nepriame snímače hustoty ... 154

8 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY POLOHY ... 156

8.1 Spojité snímače polohy ... 156
8.1.1 Spojité odporové snímače *156*
8.1.2 Indukčné snímače *161*
8.1.2.1 Indukčnostné ... 161
8.1.2.2 Indukčné - transformátorové ... 165
8.1.3 Kapacitné snímače *169*
8.2 Nespojité snímače polohy ... 175
8.2.1 Nespojité odporové snímače (elektrokontaktné) *175*

8.2.2
8.2.3
8.2.4
8.2.
8.2.
8.2.

9 MERA

9.1 Z
9.2 S
9.3 S
9.4 K
9.5 S
9.6 E
9.7 C

10 MERA

10.1 Z
10.2 F
10.3 M
10.4 S
10.4.1
10.4.2
10.5 M
10.5.1
10.5.2
10.5.3

11 INTEL

11.1 I
11.1.1
11.1.2
11.2 I
11.3 V
11.4 S

12 ZVYŠ PRO

12.1
12.1.1
12.1.2
12.1.3
12.
12.
12.2
12.2.1
12.2.2
12.2.3
12.2.4
12.3

8.2.2 Oscilátorové snímače 178
8.2.3 Magnetické, snímač s Hallovou sondou 180
8.2.4 Optoelektronické snímače 182
8.2.4.1 Optrónové 183
8.2.4.2 Relatívne (inkrementálne) 185
8.2.4.3 Absolútne (číslicové) 188

9 MERANIE VÝŠKY HLADINY V NÁDOBÁCH 190

9.1 Základné pojmy, rozdelenie 190
9.2 Snímače s plavákom 191
9.3 Snímače s ponorným telesom 195
9.4 Kapacitné snímače 196
9.5 Snímače s meraním hydrostatického tlaku 201
9.6 Bezdotykové snímače 205
9.7 Ostatné používané princípy 207

10 MERANIE VLHKOSTI 209

10.1 Základné pojmy 209
10.2 Psychrometer 210
10.3 Metóda merania rosného bodu (kondenzačná) 212
10.4 Sorpčné snímače vlhkosti 214
10.4.1 Vlasový vlhkomer 214
10.4.2 Absorpčný elektrolytický vlhkomer 214
10.5 Mikroelektronické senzory vlhkosti 215
10.5.1 Vodivostný senzor vlhkosti 216
10.5.2 Kapacitný senzor vlhkosti 217
10.5.3 Senzory vlhkosti pevných látok 217

11 INTELIGENTNÉ MERACIE ČLENY V AUTOMATIZÁCII 219

11.1 Inteligentné senzorové systémy 219
11.1.1 Úlohy primárneho spracovania informácií v ISS 219
11.1.2 Diagnostika a autokalibrácia v ISS 222
11.2 Komunikácia na procesnej úrovni a ISS 225
11.3 Vlastnosti ISS štandardných procesných veličín 226
11.4 Súčasné trendy rozvoja senzorovej techniky 228

12 ZVYŠOVANIE SPOĽAHLIVOSTI AUTOMATIZAČNÝCH PROSTRIEDKOV NA PROCESNEJ ÚROVNI 230

12.1 Automatizované technológie v prostrediach s nebezpečím výbuchu 231
12.1.1 Klasifikácia nebezpečných prostredí (SNV) 232
12.1.2 Ochranné techniky v prostrediach SNV 233
12.1.3 Technika IS v riadiacich systémoch 235
12.1.3.1 Zenerove bariéry 236
12.1.3.2 Galvanické oddeľovače 238
12.2 Prepäťové ochrany v obvodoch RS na procesnej úrovni 241
12.2.1 Prepätie a jeho vplyv na elektrické zariadenia 241
12.2.2 Koncepcia ochrany pred prepätím všeobecne 242
12.2.3 Prepäťové ochrany v obvodoch riadiacich systémov procesnej úrovne 244
12.2.4 Príklady riešení ochrany pred prepätím v RS 247
12.3 Normy a normotvorná činnosť v automatizácii – v meraní 248

4.2.2 Priame meranie síl ... *101*
4.2.3 Iné princípy merania síl ... *102*
4.3 Snímače a meracie členy momentu sily ... 102

5 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY PRIETOKU ... 105

5.1 Základné pojmy ... 105
5.2 Objemové a dávkovacie prietokomery ... 109
5.3 Rychlostné snímače ... 110
5.3.1 Lopatkové a turbínkové snímače prietoku *110*
5.3.2 Termoanemometrické snímače *112*
5.3.3 Plavákové snímače, rotametre *115*
5.3.4 Indukčné snímače prietoku *116*
5.3.5 Ultrazvukové snímače prietoku *119*
5.3.6 Vírové snímače prietoku *124*
5.4 Prierezové prietokomery, škrtiace zariadenia ... 125
5.4.1 Prietok tekutiny zúženým prietočným prierezom v potrubí *125*
5.4.2 Škrtiace zariadenia, orgány *129*
5.4.2.1 Clona ... 130
5.4.2.2 Dýza ... 130
5.4.3 Prandtlova a Pitotova rúrka *131*
5.4.3.1 Pitotova rúrka ... 132
5.4.3.2 Prandtlova rúrka ... 132
5.4.4 Merací člen prietoku so snímačom Annubar *133*
5.5 Hmotnostné prietokomery ... 135
5.5.1 Coriolisov hmotnostný prietokomer *135*
5.5.2 Tepelné meradlá hmotnostného prietoku *139*
5.5.2.1 Tepelné prietokomery merajúce oteplenie tekutiny ... 139
5.5.2.2 Tepelné prietokomery s termoanemometrickým princípom ... 140
5.6 Tok sypkých látok ... 142

6 MERANIE MNOŽSTVA TEPLA ... 144

6.1 Základné pojmy ... 144
6.2 Meranie množstva tepla ... 145

7 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY VISKOZITY A HUSTOTY TEKUTÍN ... 149

7.1 Snímače viskozity, základné pojmy ... 149
7.2 Snímače viskozity ... 150
7.3 Snímače hustoty, základné pojmy ... 153
7.4 Priame snímače hustoty ... 153
7.5 Nepriame snímače hustoty ... 154

8 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY POLOHY ... 156

8.1 Spojité snímače polohy ... 156
8.1.1 Spojité odporové snímače *156*
8.1.2 Indukčné snímače *161*
8.1.2.1 Indukčnostné ... 161
8.1.2.2 Indukčné - transformátorové ... 165
8.1.3 Kapacitné snímače *169*
8.2 Nespojité snímače polohy ... 175
8.2.1 Nespojité odporové snímače (elektrokontaktné) *175*

8.2.2
8.2.3
8.2.4
8.2
8.2
8.2

9 MERA

9.1
9.2
9.3
9.4
9.5
9.6
9.7

10 MERA

10.1
10.2
10.3
10.4
10.4.
10.4.
10.5
10.5.
10.5.
10.5.

11 INTEI

11.1
11.1.
11.1.
11.2
11.3
11.4

12 ZVYŠ
PRO

12.1
12.1.
12.1.
12.1.
12.
12.
12.2
12.2.
12.2.
12.2.
12.2.
12.3

8.2.2 Oscilátorové snímače 178
8.2.3 Magnetické, snímač s Hallovou sondou 180
8.2.4 Optoelektronické snímače 182
8.2.4.1 Optrónové 183
8.2.4.2 Relatívne (inkrementálne) 185
8.2.4.3 Absolútne (číslicové) 188

9 MERANIE VÝŠKY HLADINY V NÁDOBÁCH 190

9.1 Základné pojmy, rozdelenie 190
9.2 Snímače s plavákom 191
9.3 Snímače s ponorným telesom 195
9.4 Kapacitné snímače 196
9.5 Snímače s meraním hydrostatického tlaku 201
9.6 Bezdotykové snímače 205
9.7 Ostatné používané princípy 207

10 MERANIE VLHKOSTI 209

10.1 Základné pojmy 209
10.2 Psychrometer 210
10.3 Metóda merania rosného bodu (kondenzačná) 212
10.4 Sorpčné snímače vlhkosti 214
10.4.1 Vlasový vlhkomer 214
10.4.2 Absorpčný elektrolytický vlhkomer 214
10.5 Mikroelektronické senzory vlhkosti 215
10.5.1 Vodivostný senzor vlhkosti 216
10.5.2 Kapacitný senzor vlhkosti 217
10.5.3 Senzory vlhkosti pevných látok 217

11 INTELIGENTNÉ MERACIE ČLENY V AUTOMATIZÁCII 219

11.1 Inteligentné senzorové systémy 219
11.1.1 Úlohy primárneho spracovania informácií v ISS 219
11.1.2 Diagnostika a autokalibrácia v ISS 222
11.2 Komunikácia na procesnej úrovni a ISS 225
11.3 Vlastnosti ISS štandardných procesných veličín 226
11.4 Súčasné trendy rozvoja senzorovej techniky 228

12 ZVYŠOVANIE SPOĽAHLIVOSTI AUTOMATIZAČNÝCH PROSTRIEDKOV NA PROCESNEJ ÚROVNI 230

12.1 Automatizované technológie v prostrediach s nebezpečím výbuchu 231
12.1.1 Klasifikácia nebezpečných prostredí (SNV) 232
12.1.2 Ochranné techniky v prostrediach SNV 233
12.1.3 Technika IS v riadiacich systémoch 235
12.1.3.1 Zenerove bariéry 236
12.1.3.2 Galvanické oddeľovače 238
12.2 Prepäťové ochrany v obvodoch RS na procesnej úrovni 241
12.2.1 Prepätie a jeho vplyv na elektrické zariadenia 241
12.2.2 Koncepcia ochrany pred prepätím všeobecne 242
12.2.3 Prepäťové ochrany v obvodoch riadiacich systémov procesnej úrovne 244
12.2.4 Príklady riešení ochrany pred prepätím v RS 247
12.3 Normy a normotvorná činnosť v automatizácii – v meraní 248

12.3.1 Technické normy pre riadiace systémy a procesné meranie 250

13 LITERATÚRA **253**

13.1 Monografie 253
13.2 Odborné periodiká - procesná meracia technika 254

14 PRÍLOHY **255**

14.1 Tab. P1. Pevné body teplotnej stupnice ITS-90 255
14.2 P2. Základné jednotky sústavy SI 256
14.3 Tab. P3. Násobky a diely 256
14.4 Tab. P4. Základné snímače teploty 257
14.5 Tab. P5. Bimetelové snímače teploty - príklad parametrov 258
14.6 Tab. P6. Základné vlastnosti odporových snímačov teploty 258
14.7 Tab. P7. Hodnoty mer. odporu Pt100 podľa IEC 258
14.8 Tab. P8. Termoelektrické napätie termoel. článkov podľa IEC 259
14.8.1 Termoelektrický článok typu S (Pt10Rh-Pt) 259
14.9 Tab. P9. Termoelektrické napätie termoel. článkov podľa IEC 259
14.9.1 Termoelektrický článok typu B (Pt30Rh-Pt6Rh) 259
14.10 Tab. P10. Termoelektrické napätie termoel. článkov podľa IEC 260
14.10.1 Termoelektrický článok typu J (Fe-CuNi) 260
14.11 Tab. P11. Termoelektrické napätie termoel. článkov podľa IEC 260
14.11.1 Termoelektrický článok typu K (NiCr-NiAl) 260
14.12 Tab. P12. Konštanty na určenie termoel. napätia pri inej vzťažnej teplote 261
14.13 Tab. P13. Prevodová tabuľka jednotiek tlaku 261
14.14 Tab. P14 Technické údaje jednoduchých a dvojitých odpor. vysielačov ZPA 261
14.15 Tab. P15. Hodnoty plynovej konštanty pre technické plyny 262

Predhovor

Skriptum *Snímače a prevodníky* sú svojou formou a obsahom určené pre disciplínu s rovnakým názvom, ktorá patrí k povinným predmetom v bakalárskom štúdiu odboru *Automatizácia* na FEI STU. Skriptum možno odporučiť aj pre voliteľný fakultný predmet *Senzorové systémy technických zariadení* ako podpornú študijnú literatúru. Základné znalosti z oblasti meracej techniky pre automatizačné a monitorovacie úlohy by mal však získať každý absolvent technického vysokoškolského štúdia, hlavne elektrotechnického zamerania. Preto toto skriptum môže byť užitočnou pomôckou aj pre študentov iných odborov, prípadne inžinierov z praxe, ktorí si chcú znalosti z uvedenej oblasti obnoviť alebo rozšíriť.

Za ťažiskový problém v oblasti meracej techniky pre riadenie a monitorovanie možno pokladať *návrh a realizáciu* meracích kanálov s požadovanými metrologickými a prevádzkovými vlastnosťami z komerčne dostupných prvkov podľa požiadaviek praxe. V súčasnosti je veľmi dôležité zavádzanie modernej prvkovej základne pri praktických aplikáciách, a to najmä *číslicových meracích kanálov*, ale aj uplatňovanie prvkov v informačných podsystémoch riadiacich systémov s aplikáciou mikropočítačov, tj. *smart alebo inteligentných meracích členov*. Na zabezpečenie týchto zámerov musí riešiteľ poznať základné princípy merania dôležitých fyzikálnych a procesných veličín, metrologické a prevádzkové vlastnosti komerčne dostupných meracích členov, prípadne ich špecifické úžitkové hodnoty, k čomu by malo pomôcť práve toto skriptum.

Literárne zdroje uvádzané na záver študijnej pomôcky zachytávajú odbornú literatúru z tejto oblasti v slovenskom alebo českom jazyku vydanú v poslednom desaťročí. Žiaľ, zdroje v anglickom a nemeckom jazyku nie sú väčšinou dostupné v našich knižniciach, a ani v predajniach odbornej literatúry. Vážnym záujemcom o podrobnejšie informácie z oblasti meracej techniky pre automatizačné úlohy odporúčam hlavne zdroje pod číselným označením 1, 2, 4, 5, 10, 11.

Na záver by som sa rád poďakoval recenzentom prof. Vladimírovi Chudému a Ing. Jánovi Ivaničovi za pripomienky ku pracovnému originálu študijnej pomôcky. Ďakujem tiež Ing. M. Mišejemu a Bc. M. Kamenskému za pomoc pri kreslení obrázkov.

Pretože je to prvé skriptum pre túto disciplínu na FEI STU, predpokladám, že v texte budú niektoré prehliadnutia alebo nepresnosti. Všetkým, ktorí ma na takéto nedostatky upozornia, budem povďačný.

Bratislava, november 2001 Autor

Zoznam použitých a používaných skratiek

ADC analógovo-číslicový prevodník
µC, MM mikropočítač (monolitický)
CEN/CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization, *spojená európska normalizačná inštitúcia*
ČMČ číslicový merací člen
ČMK číslicový merací kanál
DCS Distributed Control System, *distribuovaný riadiaci systém*
EMC Electromagnetic Compatibility, *elektromagnetická kompatibilita*
Ex Explosion, *značka prístrojov vhodných pre prostredia s nebezpečím výbuchu*
FIELDBUS/Process Fieldbus *priemyselná zbernica*
IEC International Electrotechnical Commission, *medzinárodná elektrotechnická komisia*
IP International Protection, *ochrana krytí elektrotechnických prístrojov*
IPC Industrial Personal Computer, *priemyselné PC*
IPS informačný podsystém RS
IS Intrinsic Safety, *vlastná, vnútorná bezpečnosť, prostredie SNV*
ISO International Organization for Standardization, *celosvetová organizácia zabezpečujúca medzinárodnú normalizačnú činnosť*
ISS inteligentný senzorový systém
LAN Local Area Networks, *lokálne číslicové siete*
MČ merací člen
MK merací kanál
NAMUR NORMEN – Arbeitsgemeinschaft für Mess und Regeltechnik in der Chemischen Industrie, *nemecké normy pre chemický priemysel*
OSI Open Systems Interconnection, *otvorený komunikačný systém*
PCS Process Control System, *riadiaci systém*
PSI primárne spracovanie informácií
RS riadiaci systém
S&H Sample and Hold, *vzorkovací zosilňovač*
STN Slovenské technické normy
TD technická diagnostika
ÚADC úplný analógovo-číslicový prevodník
VP výrobný proces
WD – Watch Dog diagnostické hodiny

1 Úv

Cieľ
alebo javu
rozdeliť na
•
•
•

Výsledok
hodnotu,
meranie v
Mera
o objektív
výrobného
meraciu te
z ich použi
Prvky
systémov
meraciu t
limitujúcin
riadiaceho
techniky
výsledkov
mikropočít
techniky.
distribuova
a komfortu
aj monito
v blízkej b
riadenia a
Skript
podsystém
meracích k
najdôležite
tj. ich de
s potlačení
množstvo),
a viskozit
vlhkosť pl

1 Úvod

Cieľ merania je prezentovaný snahou určiť kvantitatívnu charakteristiku istého predmetu alebo javu, pričom najčastejšie ide o určenie hodnoty fyzikálnej veličiny. Každé meranie možno rozdeliť na tri úzko súvisiace časti:

- zber informácií,
- spracovanie informácií,
- interpretácia výsledku merania.

Výsledok merania má vhodnú výpovednú hodnotu len ak je úplný, tj. ak obsahuje nameranú hodnotu, meraciu jednotku, odhad chyby merania, prípadne podmienky, pri ktorých bolo meranie vykonané.

Meranie má nezastupiteľnú rolu v procese poznávania pri získavaní informácií o objektívnej realite okolitého sveta, čiže aj pri získavaní informácií o stave technologického, či výrobného procesu. Z toho vyplýva, že automatizačná a monitorovacia technika vyžaduje meraciu techniku prispôsobenú kvalitou a svojím vyhotovením podmienkam vyplývajúcich z ich použitia.

Prvky meracej techniky, ktoré vytvárajú informačnú časť automatizovaných riadiacich systémov na prevádzkovej úrovni predstavujú ***prevádzkovú, priemyselnú*** alebo tiež ***procesnú meraciu techniku***. Kvalitatívne vlastnosti prostriedkov prevádzkovej meracej techniky sú limitujúcim faktorom realizácie systémov automatického riadenia najmä z hľadiska kvality riadiaceho procesu. Základný zdroj výrazných kvalitatívnych zmien v oblasti automatizačnej techniky predstavuje prudký rozvoj mikroelektroniky, ktorý umožňuje priame aplikácie výsledkov tohoto výskumu do meracej techniky (senzorová technika) a aplikácie mikropočítačov pri riešení úloh spracovania informácií pre oblasť prevádzkovej meracej techniky. Rozširovanie takejto techniky významne podporil rozvoj v oblastiach, ako sú napr. distribuované riadiace systémy, robotizácia výrobných procesov, zvyšovanie úžitkovej hodnoty a komfortu obsluhy predmetov dlhodobej spotreby (automobilová a iná spotrebná technika), ale aj monitorovanie parametrov životného prostredia, a pod. V súčasnosti sa už rozbieha, a v blízkej budúcnosti sa predpokladá, zásadné rozšírenie používania meracej techniky v oblasti riadenia a monitorovania prevádzky motorových vozidiel a zariadení spotrebnej techniky.

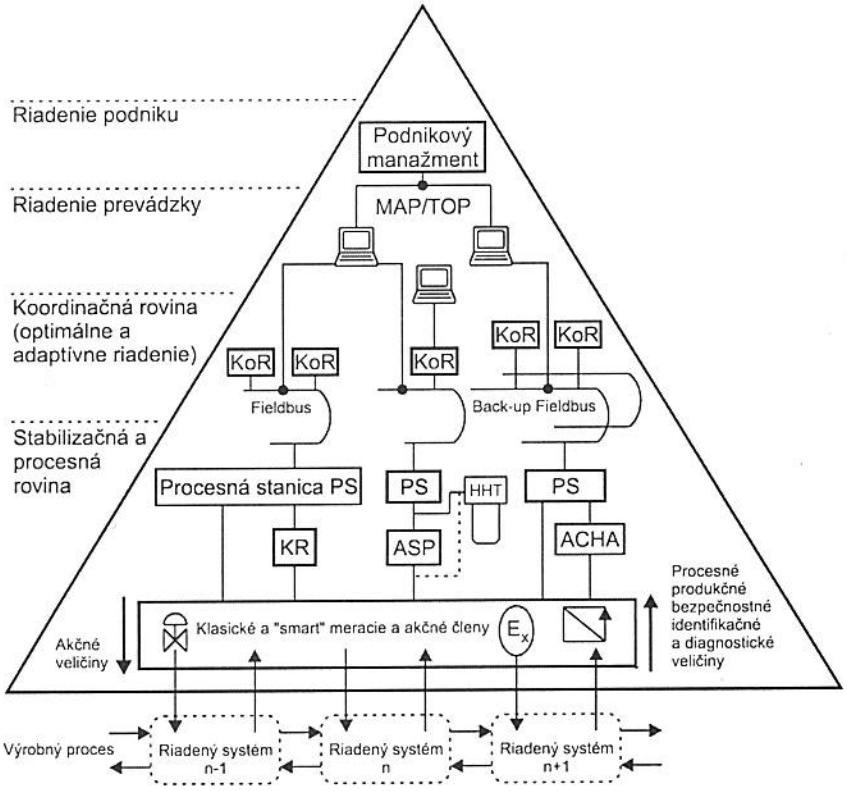
Skriptum je obsahovo rozdelené na štyri časti. Prvá časť *(kap. 2)* sa venuje informačnému podsystému riadiaceho systému. Tu sú charakterizované štruktúry analógových a číslicových meracích kanálov procesných veličín, ich metrologické a prevádzkové vlastnosti. Meracie členy najdôležitejších neelektrických procesných veličín sú prezentované v druhej časti *(kap. 3 až 10)*, tj. ich definície, popisy princípov činnosti snímačov, analýza poruchových veličín spolu s potlačením ich vplyvu. Skriptum obsahovo pokrýva procesné tepelné veličiny (teplota, tepelné množstvo), mechanické veličiny (tlak, sila, krútiaci moment; prietok kvapalín a plynov; hustota a viskozita tekutín, poloha, vzdialenosť, rozmer, rýchlosť, výška hladín v zásobníkoch) a vlhkosť plynov a tuhých látok. V tretej časti *(kap. 11)* je pozornosť venovaná prezentácii

moderných prvkov informačného podsystému riadiacich systémov – inteligentným (smart) meracím členom a systémom, tj. ich funkčným vlastnostiam, ale tiež vlastnostiam z pohľadu prevádzkovateľa. V závere kapitoly sú naznačené vývojové trendy v tejto oblasti. Posledná časť *(kap. 12)* charakterizuje vlastnosti riadiaceho systému a jeho informačného podsystému vzhľadom na bezpečnosť riadenia výrobného procesu tak, aby ich činnosť neohrozovala ľudské zdravie, životné prostredie a technologické zariadenia. Pri plnení týchto úloh sú rozhodujúce vlastnosti riadiaceho systému vzhľadom na riadenú technológiu, ako napr. ochrana proti explózii vo výrobných zariadeniach a zodpovedajúce IP krytie elektrických prvkov. Nepriamo na bezpečnosť riadenia vplývajú aj ochrany riadiaceho systému pred vplyvmi poveternostných porúch (napr. blesky) a prepäťovými vlnami v rozvodoch a prenosových cestách. Moderné systémy s hustou integráciou elektronických súčiastok (napr. číslicové automatizačné prostriedky na najnižších úrovniach riadiaceho systému) sú mimoriadne citlivé na elektromagnetickú interferenciu, čiže na vplyv rušivých elektromagnetických dejov. Ich účinky môžu viesť k zničeniu informačných a technologických systémov, čo vo všeobecnosti prináša často veľké materiálne škody. Preto je veľmi dôležité si uvedomovať uvádzané vplyvy v ich súčinnosti a poznať základy ochrán proti ich účinkom na prvky riadiaceho, ale i riadeného systému.

Skriptum si nekladie nároky na úplnosť, skôr je to podporný študijný materiál k prednáškam z oboch predmetov uvádzaných v predhovore. Vzhľadom k rozsiahlosti a interdisciplinarite danej problematiky, ako aj vzhľadom na obmedzenie rozsahu učebnice (jej počtu strán), nebolo možné do jej obsahu zahrnúť niektoré fyzikálne a procesné veličiny vyskytujúce sa pri riadení technologických procesov. Tieto však budú obsahom časti prednášok oboch disciplín.

2 Informačný podsystém automatických riadiacich systémov

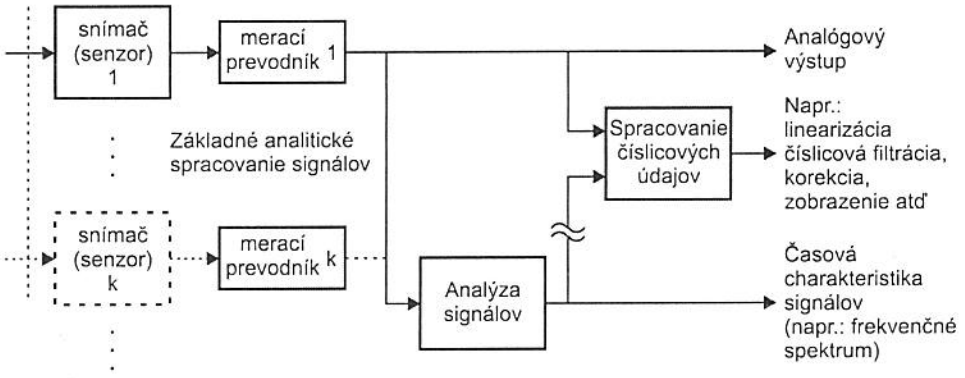
Priemyselné distribuované riadiace systémy (DCS) majú stále komplexnejšiu, ale aj rozsiahlejšiu štruktúru (obr. 2.1). Riadiaca pyramída, ktorá veľmi výstižne charakterizuje tento stav, znázorňuje vlastne DCS ako ***počítačový systém s rôznymi komunikačnými zbernicami.*** Z toho vyplýva, že aj na nižších úrovniach sú používané technické prostriedky s číslicovým spracovaním informácií od inteligentných senzorov, akčných členov a analyzátorov, až po kompaktné a modulárne "mikro" regulátory, PLC systémy a pracovné stanice. Na najnižšej procesnej úrovni je súčasný stav charakterizovaný používaním ***tradičných (klasických) meracích a akčných členov spolu s inteligentnými (smart) prvkami, ktoré sú schopné spolupracovať prostredníctvom priemyselných komunikačných sietí.***



KR	kompaktný regulátor, PCC, PLC	MAP	Manufacturing Automation Protocol
ASP	adaptér pre "smart" prostriedky	TOP	Technical and Office Protocol
KoR	koordinačné riadenie	HHT	ručný terminál pre "smart" prvky
PS	procesná stanica	ACHA	adaptér pre chemické analyzátory
E_x	iskrovo bezpečné zariadenia		

Obr. 2.1. Distribuovaný riadiaci systém

Merací systém všeobecne predstavuje súhrn prvkov, ktoré zabezpečujú úlohu merania (obr. 2.2). Snímač spolu s meracím prevodníkom vytvára analógový merací člen alebo kanál s príslušnou úpravou výstupného signálu (zosilnenie, posunutie, jednoduché aritmetické operácie). Pomocou analýzy signálov sa interpretuje najmä priebeh meraných signálov v určitých (ťažiskových) bodoch amplitúdového, časového a frekvenčného zobrazenia. Z týchto charakteristík je možné získať výpoveď o procese, ktorú by nebolo možné zachytiť pomocou základných funkcií spracovania signálov. Sem patria spracovania stredných hodnôt údajov, určenia ich rozdelení, vzájomné korelácie, transformácie a tiež funkcie, ktoré sú potrebné na popis deterministických alebo stochastických signálov pri statických procesoch alebo v prechodových dejoch. Analýzy signálov sa riešia najčastejšie externým výpočtovým zariadením *(host computer)* bez požiadavky na činnosť v reálnom čase. Ako príklad môže slúžiť určenie doby vzorkovania procesnej veličiny na základe analýzy frekvenčného spektra meraného signálu podľa Shannonovho alebo Kotelnikovho teorému.



Obr. 2.2. Všeobecná štruktúra meracieho systému

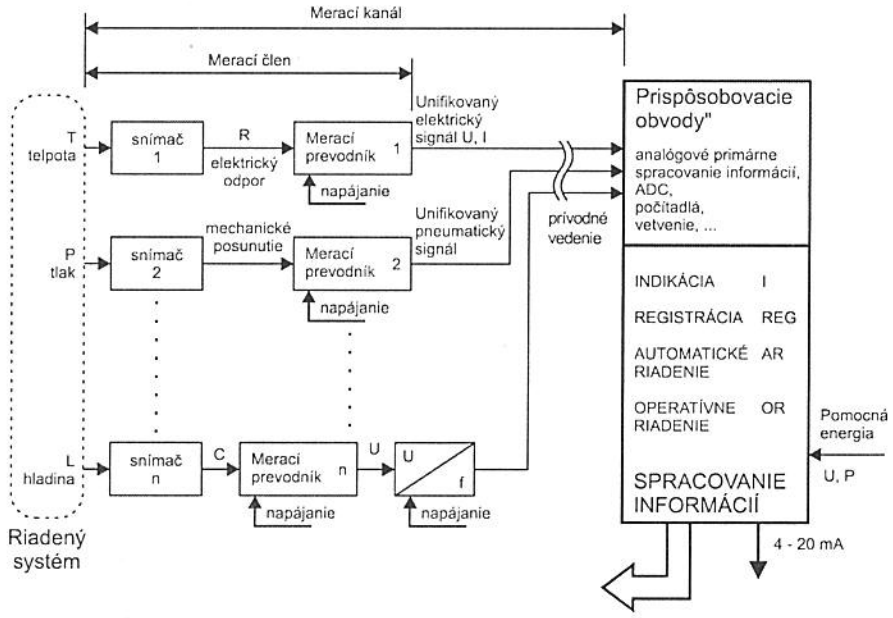
Základnou funkciou informačného podsystému (IPS, obr. 2.3) je získavanie aktuálnych procesných (technologických) informácií o stave a časovom priebehu parametrov riadeného procesu v požadovanej kvalite pre účely najmä automatického, operatívneho a ručného riadenia. V moderných DCS sa pripájajú k základnej úlohe informačného podsystému aj funkcie zabezpečenia informácií o produkčných, bezpečnostných, identifikačných a diagnostických veličinách s cieľom zvýšiť kvalitu riadenia a spoľahlivosť celého výrobného komplexu.

2.1 Analógový merací kanál

Základnou funkčnou jednotkou informačného podsystému je merací člen (MČ), ktorý v spojení s prívodnými vedeniami vytvára merací kanál (merací reťazec), tak ako je to znázornené na obr. 2.3.

Snímač tvorí vstupný citlivý prvok meracieho reťazca, ktorý nepretržite sleduje (meria) určenú fyzikálnu veličinu v pracovnom prostredí. Snímač svojimi fyzikálnymi vlastnosťami predstavuje filter druhu a veľkosti meranej veličiny. Prípadné poruchové vplyvy ostatných

nedokonale odfiltrovaných procesných veličín sú potláčané konštrukciou snímača alebo vhodným predspracovaním signálu v meracom reťazci. Z toho vyplýva, že snímač realizuje prvý stupeň účelovo orientovanej redukcie informácií z výrobného procesu. ***Snímač*** má v štruktúre meracieho reťazca ***dominantné postavenie,*** lebo svojimi vlastnosťami zásadne ovplyvňuje parametre celého meracieho kanála.



Obr. 2.3. Informačný podsystém riadiaceho systému

Snímač transformuje sledovanú fyzikálnu veličinu na tzv. ***prirodzený signál charakterizovaný nízkou energetickou úrovňou***, ktorý vo väčšine prípadov nie je vhodný pre prenos informácií na miesto spracovania. Podľa prirodzeného signálu možno rozlišovať ***pasívne*** a ***aktívne*** snímače. Pasívne snímače vyžadujú zdroj pomocnej energie, preto musia byť zapojené do energetického obvodu, v ktorom zmenou svojich parametrov (zmenou meranej veličiny) ovplyvňujú informačný parameter tohto vyhodnocovacieho obvodu. Vhodným príkladom je nepriame meranie odporu odporového snímača teploty mostíkovou metódou (obr. 2.6). Aktívne snímače sa vplyvom meranej veličiny správajú ako nízkoenergetické zdroje, ktorých výstupné signály spravidla bývajú upravované elektronickým spracovaním do vhodnej formy. Klasickými príkladmi sú snímače teploty – termočlánky alebo snímače obrátok – tachogenerátory. V technickej praxi v podsystéme IPS prevažujú snímače s pasívnym charakterom.

Prevažná väčšina procesných veličín, ktoré sleduje IPS, má neelektrický charakter, ale pri riešení meracích kanálov moderných RS sa jednoznačne uprednostňujú snímače s prirodzeným elektrickým signálom, tj. so zmenou elektrického parametra, ako napr. R, U, C, Q, L. V prípade, že prirodzený signál je reprezentovaný mechanickou veličinou (mechanický posuv

alebo napätie) musí sa elektrický merací kanál doplniť o prevodník prirodzeného signálu mechanického charakteru na elektrický signál (najčastejšie opäť nízkoenergetický).

Snímače umiestnené v meracích bodoch (miestach) vo výrobnom procese sú v priamom kontakte so sledovaným prostredím, avšak nie sú vždy s ním v bezprostrednom styku. V prípade potreby musia byť chránené pred mechanickými, chemickými a inými účinkami prevádzkového prostredia najčastejšie ***ochrannými puzdrami***. Takáto úprava snímača má vplyv najmä na jeho ***dynamické vlastnosti***. Snímač spolu s meracím prevodníkom tvorí často jeden konštrukčný a priestorový celok – ***merací člen***, ktorý je umiestnený v štandardných moduloch, tj. meracích armatúrach, hlaviciach a pod.

V súčasnej dobe býva termín ***snímač*** často nahradzovaný pojmom ***senzor***. Senzor bol najskôr chápaný len ako synonymum výrazu snímač. K špecifikám senzorov v tomto ponímaní patrilo najmä použitie technológie hromadnej výroby polovodičových elektronických obvodov pri ich realizácii, použitie nových materiálov, využitie nových princípov činnosti, miniaturizácia a integrácia spolu s elektronickými obvodmi na vyhodnocovanie, nízka cena a hromadnosť nasadenia. V súčasnosti sa však presadzuje v odbornej literatúre názor, že termín senzor (senzorový systém) reprezentuje napr. aj celý merací člen a kanál alebo merací systém.

Merací prevodník, vysielač je funkčný prvok, ktorý transformuje prirodzený signál zo snímača na požadovaný (dohodnutý) ***druh a hodnotu (rozsah) fyzikálnej veličiny*** (elektrická, pneumatická, optická, a pod.), ktorá je vhodná na ďalší prenos informácie alebo na jej spracovanie. Výstupné signály z meracích členov možno podľa ich charakteru (obr. 2.4) rozdeliť na:

a/ spojité (analógový, intenzitný)

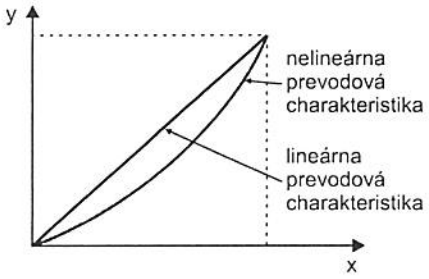
b/ nespojité (v IPS častejšie)

- impulzný (šírkovo alebo frekvenčne modulovaný),
- logický (binárny),
- číslicový (kódovo–impulzne modulovaný).

Informačný parameter (elektrické napätie, prúd, tlak v pneumatickom systéme, a pod.) sa môže meniť len v unifikovanom (normovanom, dohodnutom) rozsahu alebo dohodnutých úrovniach, tak aby bola zabezpečená kompatibilita medzi prvkami riadiaceho systému rôznych výrobcov. ***Unifikácia signálov*** zabezpečuje funkčnú zlučiteľnosť (nadväznosť) jednotlivých konštrukčných celkov, najmä pri stavebnicových, modulových alebo otvorených systémoch (obr. 2.1). Pre meracie členy takýchto systémov, bez ohľadu na použitý princíp merania, má unifikácia signálov dôležitý význam pri ich realizácii a využití, najmä v zásadnom zjednodušení ich projektovania, údržby i prevádzky.

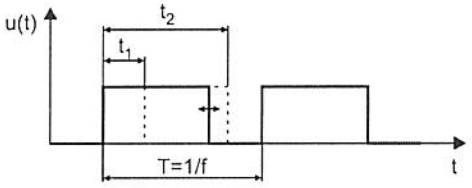
Rozvoj polovodičovej techniky v sedemdesiatych rokoch umožnil rozšíriť unifikáciu elektrických signálov v RS o ***jednosmerné prúdové signály***. V súčasnosti už tieto signály jednoznačne dominujú pre svoje zásadné prednosti z hľadiska potláčania rušenia informačného signálu pri jeho prenose na väčšie vzdialenosti. ***Napäťové*** (aj unifikované) ***signály*** sa používajú hlavne v centrálnej časti riadiaceho systému v tzv. velíne alebo dozorni, ďalej v rámci konštrukcie prístroja alebo v nenáročnom (neprevádzkovom) prostredí, napr. v laboratóriu.

a) spojitý **(analógový, intenzitný)**

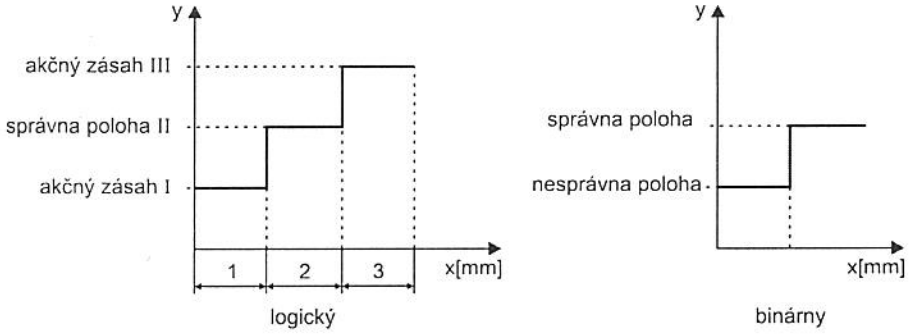


b) nespojitý impulzný

- **šírková modulácia** (informačný parameter t_i)



- **logický a binárny**



Obr. 2.4. Výstupné signály z meracích členov

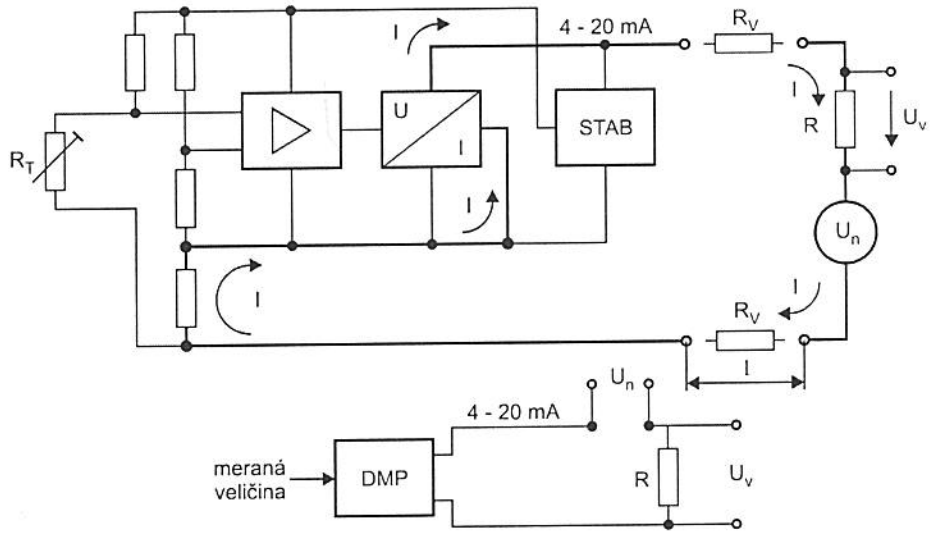
Prúdový unifikovaný jednosmerný signál (4 – 20) mA je charakterizovaný najmä:

- nízkou záťažovacou impedanciou (pôsobí ako filter na napäťové špičky),
- dvojvodičovou technikou,
- tzv. živou nulou.

Norma STN IEC 381–1 (18 0110) *Analógové signály pre systémy riadenia procesov. Časť 1– jednosmerné prúdové signály* udáva, že napr. záťažová impedancia na výstupe môže byť max. 300 Ω, hodnoty mimo unifikovaný rozsah sú určené pre hlásenie poruchy (napr. prerušenie prívodných vedení) a že signál (0 až 20) mA nie je odoporúčaný, pretože sa s ním nepočíta do

budúcnosti. Posledná podobná norma v ČSFR bola ČSN 18 0102 *Automatizácia–Elektrické analógové technické prostriedky.*

Vytvorenie tzv. ***dvojvodičovej techniky*** umožnil vývoj elektronických súčiastok, a to najmä zníženie ich spotreby, malý napäťový drift a ich schopnosť pracovať v prevádzkovom prostredí. Dvojvodičové meracie prevodníky (meracie členy) pracujú s informačným signálom (4 až 20) mA, napr. v mostíkovom zapojení (obr. 2.5). Elektronické obvody meracieho prevodníka sú umiestnené v blízkosti snímača, najčastejšie v hlavici meracieho člena, pričom aj na napájanie a aj na prenos informácie o procesnej veličine sú použité len dva vodiče.



Obr. 2.5. Dvojvodičový merací prevodník (4 až 20) mA

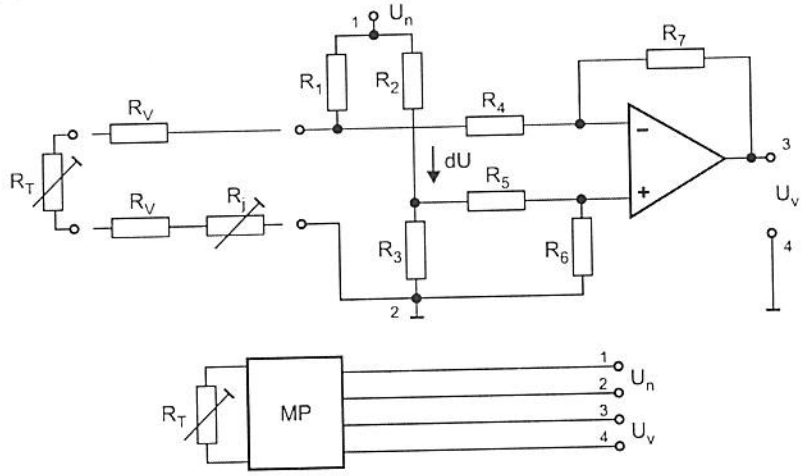
Pri zmene procesnej veličiny sa mostík rozváži, čím vznikne rozdielové napätie v jeho uhlopriečke. Regulačný obvod v prevodníku (zosilňovač, prevodník U/I) mení prúd v obvode v takom zmysle, aby sa potlačilo rozváženie mostíka. Nová ustálená hodnota prúdu zodpovedá aktuálnej hodnote procesnej veličiny. Vlastná spotreba zosilňovača, stabilizátora a mostíka musí byť nižšia ako 4 mA, preto aby aj pri najnižšej hodnote procesnej veličiny dvojvodičový prevodník bol schopný funkcie. Hlavné výhody tohto prevodníka reprezentuje prúdový výstup, úspora spojovacích vodičov a príslušného materiálu, nezávislosť výstupnej informácie od zmien odporu prívodných vedení a jednoduchá identifikácia prerušenia vedenia alebo straty napájacieho napätia (ak prúd v obvode je nulový, potom je porušená tzv. živá nula, minimálny prúd v obvode 4 mA).

Napäťový unifikovaný jednosmerný signál je predmetom normy STN IEC 381–2 (18 0111) *Analógové signály pre systémy riadenia procesov. Časť 2–jednosmerné napäťové signály.*

Ich definované rozsahy sú :

- 0 až 10 V nesymetrický,
- -10 až 10 V symetrický,
- 0/1 až 5 V (prevod z prúdového signálu (4 až 20) mA cez teplotne nezávislý odpor 250 Ω),

pri podmienke najmenšieho odporu ***10 kΩ*** na vstupe vyhodnocovacieho zariadenia. Obvod výstupného signálu musí byť galvanický oddelený od striedavej siete napájacieho zdroja. Príklad zapojenia snímača teploty v tzv. klasickom štvorvodičovom vyhotovení je na obr. 2.6.

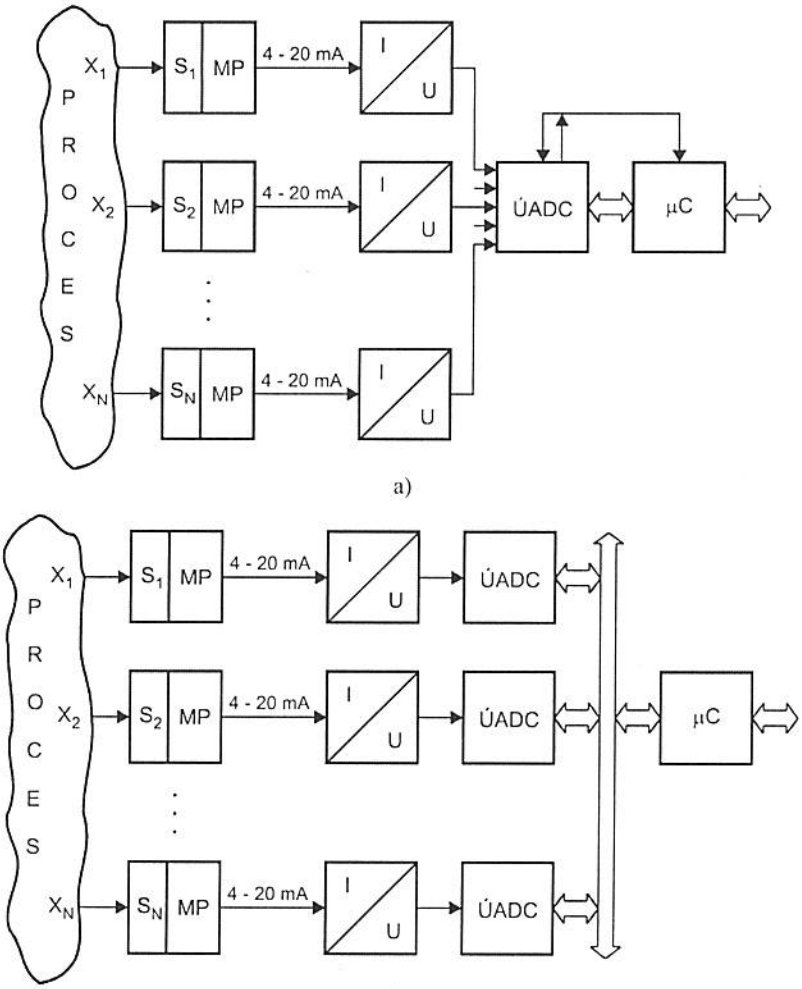


Obr. 2.6. Klasický štvorvodičový merací člen (prevodník)

Pre úplnosť, unifikované úrovne analógového pneumatického signálu uvádza norma IEC 382:1991 *Analógový pneumatický signál pre automatizáciu,* tj. pre prenos analógovej informácie sa používa signál (20 až 100) kPa a pre napájanie tlak od (130 až 150) kPa.

2.2 Číslicový merací kanál

Číslicový merací kanál (ČMK) vzniká rozšírením analógového kanála o časť, ktorá zabezpečuje prevod analógovej veličiny na číslo vo vhodnej forme (kóde), pričom vstupná veličina býva spravidla elektrické napätie. Používané štruktúry ČMK sú tzv. pomalé a rýchle (obr. 2.7). Vzhľadom na časové konštanty väčšiny riadených sústav (rádovo niekoľko sekúnd až minút) sú pomalé ČMK vzhľadom na svoju štruktúru a z toho plynúcu cenu, najpoužívanejšie riešenia v RS.

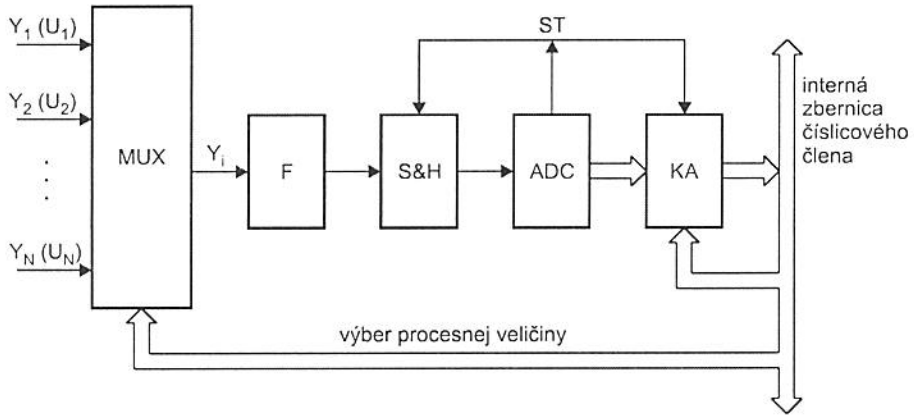


Obr. 2.7. Štruktúry číslicových meracích kanálov
a) pomalá štruktúra
b) rýchla štruktúra

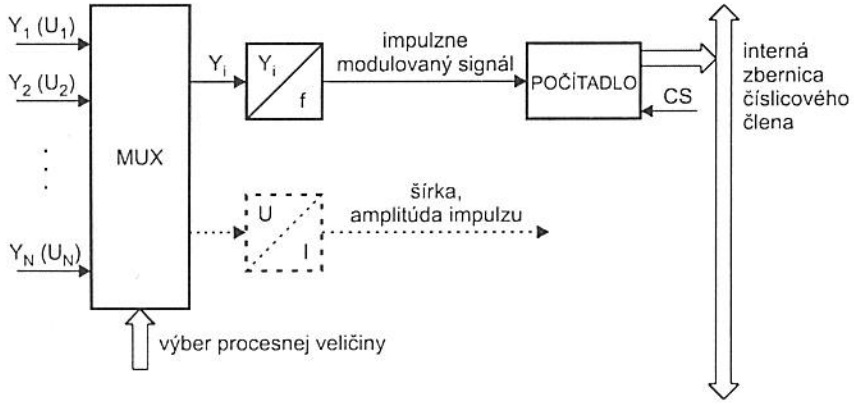
Úplný analógovo-číslicový prevodník (ÚADC) je v tomto zapojení spoločným prvkom a zásadne zjednodušuje celkovú štruktúru meracieho kanála. Rýchle ČMK sú charakterizované autonómne pracujúcimi paralelnými kanálmi s vlastnými, jednoduchšími ÚADC, ktoré neobsahujú multiplexerový prepínač. V tomto prípade komunikačné adaptéry predstavujú číslicový multiplexer, tj. časť mapovanej pamäte napr. mikropočítača. Takéto štruktúry sa uplatňujú v RS len v odôvodnených prípadoch, napr. pri rýchlych polohovacích systémoch.

Úplný analógovo–číslicový prevodník (obr. 2.8) predstavuje vhodnú zostavu technických prostriedkov na realizáciu analógovo-číslicového prevodu v meracom kanáli. Vo všeobecnosti štruktúru ÚADC tvorí analógový multiplexer MUX, analógový filter F, vzorkovací zosilňovač S&H, analógovo-číslicový prevodník ADC a komunikačný adaptér KA. Prítomnosť

jednotlivých prvkov v štruktúre závisí od použitia ČMK, ale aj od vlastností prvkov v zostave. Napríklad, analógový multiplexer je nevyhnutný pre pomalé kanály a analógový filter zasa pri použití ADC s postupnou aproximáciou. Štruktúra ÚADC pre integrované senzorové systémy je na obr. 2.9. Neobsahuje ADC, ale prevodník napätia na frekvenciu alebo šírku impulzu, ktorých výstupy sú jednoducho spracovateľné "zaintegrovaným" μC pomocou jeho počítadiel. Takýmto zapojením sa zjednoduší prevod na číslo a integrovaná forma potláča hlavnú poruchovú veličinu takejto štruktúry – teplotu.



Obr. 2.8. Úplný AD prevodník



Obr. 2.9. ÚADC pre integrované senzorové systémy

Analógový multiplexer (MUX) je prvok, ktorý zabezpečuje prepínanie výstupov z meracích členov v definovanej postupnosti podľa riadiaceho centra (postupne alebo na základe požiadaviek riadiaceho algoritmu) do spoločnej časti ÚADC. Pri pravidelnej postupnosti prepínania je doba vzorkovania procesných veličín odvodená od intervalu prepínania MUX. Dôležitou požiadavkou na činnosť MUX je minimálne ovplyvňovanie prepínaných analógových signálov, čomu odpovedajú jeho ideálne parametre:

- nulový prechodový odpor v zopnutom stave,
- nekonečný prechodový odpor vo vypnutom stave,

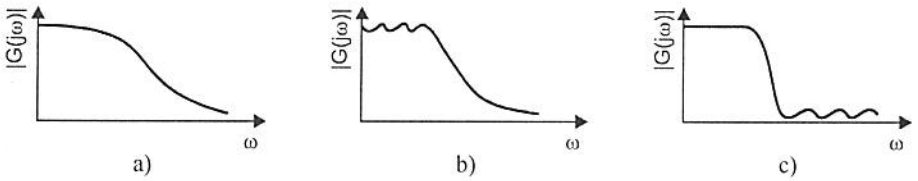
- žiadny zdroj šumu,
- nekonečne krátka spínacia doba.

V ČMK sa používajú najmä polovodičové MUX, ktoré na potlačenie vplyvu prechodového odporu v zopnutom stave obsahujú emitorové sledovače. V automatizačnej technike sa v špeciálnych prípadoch používajú aj kontaktné konštrukcie MUX so suchým alebo ortuťovým jazýčkovým relé, ktoré sa niektorými svojimi parametrami blížia k ideálnym.

Dôležité technické parametre MUX:

- rozsah prenášaných napätí,
- základná rýchlosť prepínania určuje počet meracích kanálov, ktoré môže MUX v priebehu jednej sekundy sledovať.

Analógový frekvenčný filter F slúži na oddelenie užitočných a nežiaducich (rušivých) zložiek v signáli, ak sú frekvenčne odlíšiteľné. Pred vzorkovaním signálu pre ADC je potrebné potlačiť vysokofrekvenčné zložky sledovaného signálu, ako je napr. sieťové rušivé napätie. Prenosové vlastnosti filtrov sa vyjadrujú predovšetkým amplitúdovou frekvenčnou charakteristikou. Obyčajne sa od filtrov vyžaduje, aby ich priepustné a nepriepustné časti charakteristiky boli oddelené dostatočne strmým prechodom. V ČMK sa využívajú najmä analógové filtre charakteru dolného alebo pásmového priepustu. Podľa priebehu frekvenčnej charakteristiky sú známe niektoré typové filtre, ako napr. Butterworthov alebo Čebyševov, obr. 2.10. Na realizáciu analógových filtrov sú vhodné pasívne (vyššie frekvencie) a aktívne štruktúry (nižšie frekvencie, vhodnejšie charakteristiky).

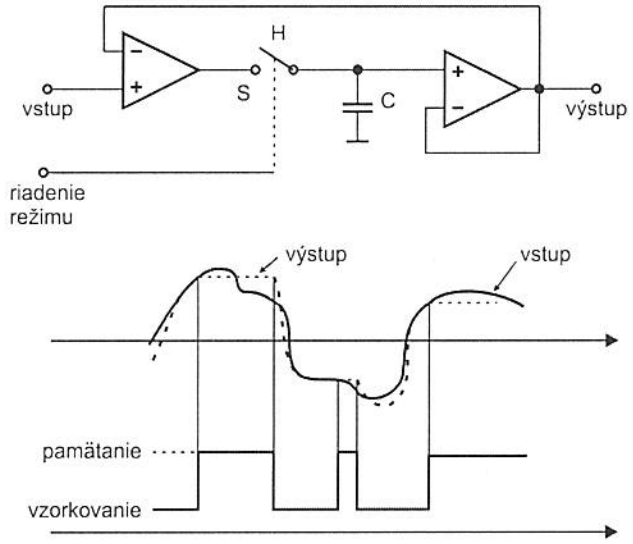


Obr. 2.10. Amplitúdové frekvenčné charakteristiky typových filtrov
a) Butterworthov typ
b) Čebyševov typ
c) Čebyševov typ druhého rádu

Možné ***použitie číslicového filtra*** je podmienené dostatkom času na jeho realizáciu v rámci doby vzorkovania jednotlivých procesných veličín (prepínanie MUX). Výhody číslicovej filtrácie oproti analógovej sú najmä v jednoduchej modifikácii vlastností filtra, v práci s nízkymi frekvenciami a tiež v nezávislosti na poruchových veličinách, ako je napr. teplota.

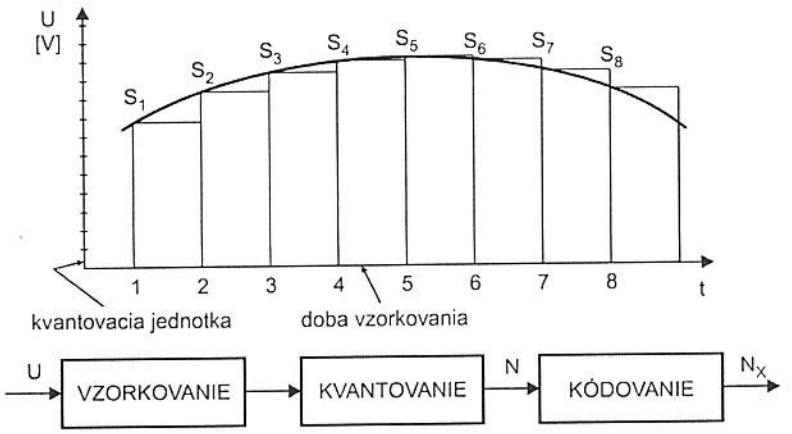
Vzorkovací zosilňovač s analógovou pamäťou *(Sample and Hold, S&H)* zabezpečuje zapamätanie *(vzorkovanie)* analógového signálu počas doby AD prevodu. S&H je dôležitý hlavne pri AD prevodníkoch, ktoré spracovávajú okamžitú hodnotu analógového signálu. Schéma vzorkovacieho zosilňovača a priebehy napätí na jeho vstupe a výstupe v závislosti od režimu činnosti sú na obr. 2.11. Vlastná schéma predstavuje obvod vhodný na impedančné prispôsobenie s jednotkovým alebo iným požadovaným zosilnením. Kvalitný kondenzátor

reprezentuje analógovú pamäť, ktorá udrží po dobu niekoľkých milisekúnd úroveň poslednej hodnoty napätia. Po prepnutí do režimu *vzorkovanie* a po ukončení prechodového procesu je úroveň výstupného signálu zo S&H úmerná úrovni vstupnému signálu. Počas doby pamätania má tento signál konštantnú hodnotu rovnajúcu sa výstupnej hodnote v okamihu prepnutia z režimu ***vzorkovanie*** *(sample)* do režimu ***pamätanie*** *(hold)*. Vzorkovací zosilňovač umožňuje presnejšie určiť okamih AD prevodu analógového signálu a umožňuje vhodné riadenie súčinnosti režimu činnosti S&H a prepínania MUX na ďalší analógový kanál, tj. vtedy, keď ešte nebol ukončený AD prevod, a tak urýchľuje činnosť ÚADC ako celku.



Obr. 2.11. Štruktúra S&H a priebeh napätí na jeho vstupe a výstupe

Prevodníky ADC menia analógovú veličinu na číslicový kód, pričom v ČMK sa ako vstupná veličina pre ADC používa jednosmerný napäťový signál. Všeobecný princíp AD prevodu je naznačený na obr. 2.12. Skladá sa zo vzorkovania, kvantovania a kódovania. Vzorkovanie reprezentuje diskretizáciu sledovaného signálu v čase. Spravidla je rovnomerné, pričom sa vyžaduje splnenie vzorkovacieho teorému Shannona alebo Koteľnikova, tj. vzorkovacia frekvencia musí vyhovovať podmienke $f_v \geq 2.f_m$, kde f_v je frekvencia vzorkovania a f_m medzná alebo najvyššia frekvencia v signále. Ak je táto podmienka splnená, potom možno číslicovú postupnosť spätne transformovať na analógový signál.



Obr. 2.12. Všeobecný princíp AD prevodu

Pri kvantovaní sa vstupná analógová veličina U nahradí podľa svojej hodnoty reprezentovanej stupňom S_i, jednou z konečného počtu odstupňovaných hodnôt výstupnej veličiny N. Chyba kvantovania sa zmenšuje zväčšovaním počtu kvantovacích úrovní, tj. zmenšovaním kvantovacej jednotky. Po kvantovaní sa hodnote N_i priradí kombinácia zvoleného kódu. Najčastejšie používaný kód je prirodzený (priamy) dvojkový kód tvorený bitmi, ktorých váha je monotónne odstupňovaná po celistvých mocninách dvoch, teda pri n–bitovom čísle v slede

$$2^{n-1}, 2^{n-2}, ..., 2^1, 2^0$$

V číslicovej technike sa často používa aj kód BCD 8421, tzv. binárne kódovaná dekadická sústava. V meracej technike, napr. pri priamych prevodníkoch poloha-číslo sa využíva Grayov kód, pri ktorom sa susedné kódové kombinácie líšia len v jednom bite.

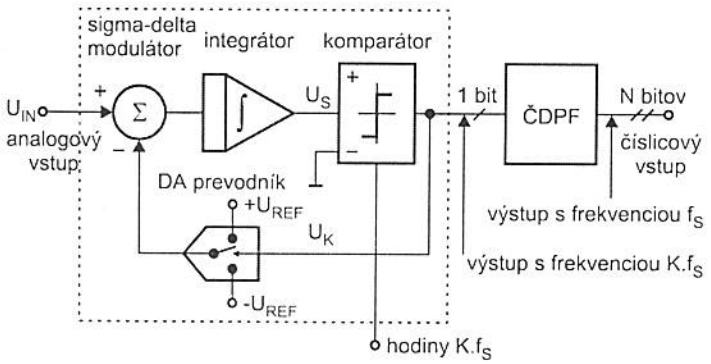
Dôležité vlastnosti prevodníkov ADC predstavujú parametre ako sú linearita, diferenciálna linearita, rýchlosť alebo doba prevodu, počet bitov, tj. citlivosť alebo chyba kvantovania. Na analógovo-číslicový prevod sa v automatizačných prostriedkoch používajú najmä dva základné princípy – ***kompenzačný*** a ***integračný***, ale tiež moderné prevodníky s ***moduláciou sigma-delta***.

ADC – kompenzačný s postupnou aproximáciou umožňuje prevod okamžitej hodnoty vstupného napätia, pričom sa predpokladá spolupráca so vzorkovacím zosilňovačom S&H vzhľadom k vysokej rýchlosti prevodu. Princíp činnosti je charakterizovaný postupnou aproximáciou meraného napätia kompenzačným napätím. Presnosť prevodníka je daná počtom použitých binárnych rádov (10^{-3} až 10^{-4}, 8 až 12 bitov). Rýchlosť, tj. počet prevodov za sekundu dosahuje až 10^6. Tento ADC vyžaduje kvalitné filtrovanie šumu vstupného signálu a zabezpečenie analógovej časti pred externými poruchami.

ADC – s dvojitou integráciou sa vyznačujú veľkou presnosťou (bežná rozlišovacia schopnosť 1 μV), ale malou rýchlosťou prevodu – max. 100 za sekundu. Prevodník pôsobí ako čiastočný filter vstupného signálu, preto nie vždy sa vyžaduje v štruktúre číslicového meracieho kanála S&H.

ADC s moduláciou sigma–delta sú moderné prevodníky s niekoľkými zásadnými výhodami oproti klasickým ADC. Ich výhody možno stručne charakterizovať vysokou rozlišovacou schopnosťou, vhodnými šumovými charakteristikami, zvýšenou spoľahlivosťou a vysokou stabilitou parametrov. Klasické prevodníky musia pri diskretizácii signálu spĺňať Shannonovo kritérium, z čoho plynie, že pred vlastný ADC treba často zaradiť kvalitný filter (pozri ÚADC). Všeobecne platí, že ak sa má dosiahnuť pri klasickom prevodníku vysoká rozlišovacia schopnosť, musia sa používať kvalitné komponenty justované už vo výrobnom procese.

Naproti tomu ADC pracujúci so sigma–delta moduláciou využíva len 1-bitový kvantovací obvod so vzorkovacou frekvenciou mnohokrát vyššou, než je maximálna, ktorú obsahuje spektrum signálu na vstupe. Digitalizátory signálu na tomto princípe kombinujú obidve základné požiadavky na zmenšovanie kvantovacieho šumu, tj. zvýšenie vzorkovacej frekvencie i tvarovanie spektra jednoduchým obvodom. Tým sa znižuje frekvenčný rozsah výstupného signálu a zvyšuje sa presnosť AD prevodu. Základom ADC s moduláciou sigma-delta je vlastný sigma-delta modulátor (SDM) vyznačený čiarkovane na obr. 2.13. SDM mení vstupný analógový signál na jednobitový digitálny signál, pričom sériová postupnosť jednotiek a núl vystupuje s frekvenciou danou vzorkovacími hodinami $K.f_s$. Hlavnými časťami prevodníka sú sumačný integrátor a komparátor. Komparátor je v skutočnosti jednobitový AD prevodník, generuje zmiešaný jednobitový výstupný signál a v uvádzanom zapojení určuje znamienko analógového výstupu integrátora. Jednotka na jeho výstupe charakterizuje kladný stav na výstupe integrátora, nula zasa indikuje zápornú hodnotu. Postupnosť jednotiek a núl sa v rámci bloku vedie späť do jednobitového DA prevodníka. Jeho výstup predstavuje kladné alebo záporné referenčné napätie, ktoré sa na vstupe do sumačného integrátora odčíta od vstupného analógového signálu.



Obr. 2.13. Princíp prevodníka so sigma-delta moduláciou

Jedna nula alebo jednotka, ktorú vygeneroval komparátor pre určitú hodnotu vstupného signálu v jednom vzorkovacom cykle, nemá z hľadiska AD prevodu skoro žiadny význam. V skutočnosti sa vyhodnocuje výstupná postupnosť vzoriek v rámci určitého časového intervalu a určuje sa priemerná hodnota týchto postupností *(tab. 2.1)*. Blok, ktorý tento priemer určuje je vlastne číslicový dolnopriepustný filter (ČDPF), v najjednoduchšom variante napr. binárne

počítadlo. Čím sa viac výstupných vzoriek (jednotiek a núl v postupnosti) berie do priemeru, tým sa dosiahne vyšší dynamický rozsah. Napr. "priemerovaním" štyroch vzoriek sa dosiahne dvojbitové číslicové rozlíšenie na výstupe, "priemerovaním" 8. vzoriek trojbitové, atď. Dĺžka časového intervalu čítania súvisí s frekvenciou vzorkovacích hodín *(K.f$_V$)*. Výstup z ČDPF je k dispozícii s požadovanou rozlišovacou schopnosťou až po prebehnutí určitého počtu vzoriek *(tab. 2.1)*. Frekvencia čítania číslicového výstupu ČDPF a vzorkovacích hodín je rozdielna a ich vzájomný vzťah udáva konštanta *K*, ktorá sa obyčajne označuje ako *koeficient prevzorkovania*. Pre *N* bitové rozlíšenie platí vzťah $K=2^N$. Preto zložitejšie ČDPF vytvárajú priemer z niekoľkých po sebe idúcich vzorkovacích intervalov (postupností), pričom prevzorkovanie nebýva väčšie ako 128. Na dokreslenie činnosti prevodníka pracujúceho so sigma-delta moduláciou je v *tab. 2.1* uvedená jedna postupnosť vzoriek (za komparátorom) pre ADC prevodník so vstupom (0 až 5) V, pre aktuálnu vstupnú hodnotu 4 V, pre komparačnú úroveň zodpovedajúcu stredu rozsahu, tj. 2,5 V a pre $+U_{REF}$ = 5 V a $-U_{REF}$ = 0 V. Výstupná postupnosť desiatich vzoriek (napr. *i až i+9*, (nie je to číslo 2^n, ale poskytuje lepšiu názornosť)), tj. osem jednotiek a dve nuly, zodpovedá hodnote vstupného signálu alebo jeho doplnku (4/5 . 10 = 8 alebo 1/5 . 10 = 2).

Tab. 2.1 Prevod sigma-delta prevodníka

krok	U_S [V]	U_{IN} [V]	U_K
i-2	1	4	0
i-1	5	4	1
i	4	4	1
i+1	3	4	1
i+2	2	4	0
i+3	6	4	1
i+4	5	4	1
i+5	4	4	1
i+6	3	4	1
i+7	2	4	0
i+8	6	4	1
i+9	5	4	1
i+10	4	4	1

Komunikačný adaptér KA umožňuje vo všeobecnosti pripojenie MK na zbernicu číslicového člena, najčastejšie mikropočítača (μC). ČMK predstavuje pre μC prídavné zariadenie a na riadenie prenosu údajov s takýmto zariadením musí byť forma prenosu prispôsobená jeho vlastnostiam. Preto prenos informácií z ČMK do pracovného registra číslicového člena sa môže uskutočňovať niekoľkými spôsobmi:

1. ***nepodmienený prenos*** údajov možno vykonať len s takým prídavným zariadením, ktoré je pripravené na prenos v príslušnom čase. Takýmto prvkom je napr. ÚADC pracujúci autonómne a zakončený záchytným registrom KA na výstupe. Podmienkou úspešnej

činnosti je, že v KA musí byť v reálnom čase pripravená aktuálna hodnota zvolenej procesnej veličiny. Činnosti v ČMK a ÚADC sú vykonávané v poradí:

- výber meracieho kanála (adresa na MUX, adresná zbernica μC),
- autonómna činnosť ÚADC, číslo v KA (aktualizácia trvá určitý čas),
- výber záchytného registra KA ČMK (napr. výberový signál CS, adresná zbernica μC),
- presun údajov z periférie do pracovných registrov μC.

2. ***podmienený prenos*** údajov je vhodný pre prídavné zariadenia, ktoré potrebujú na vykonanie vstupno-výstupnej operácie dlhší čas. V tomto prípade je okamih prenosu podmienený stavom periférie, tj. μC musí počkať, až bude prídavné zariadenie pripravené na prenos. Po príprave analógovej časti a odštartovaní prevodníka ADC čaká ÚADC na ukončenie AD prevodu. V štruktúre ÚADC sa spravidla nevyžaduje záchytný register KA, využíva sa výstupný register ADC. Činnosti v ČMK a ÚADC sú vykonávané v poradí:
   - výber meracieho kanála,
   - štart ADC, testovanie pripravenosti, tj. ukončenie AD prevodu (log. signál z ADC),
   - presun údajov z periférie do pracovných registrov μC.
3. ***prenos údajov s využitím prerušenia*** rieši problém efektívneho využitia výpočtovej kapacity μC pri riadení pomalších periférií. Princíp metódy spočíva v tom, že pri požiadavke na obsluhu prídavného zariadenia, konkrétne ČMK (ÚADC), sa proces merania naštartuje z μC (obsluha MUX, štart ADC), ale hlavný program v μC beží ďalej. Po ukončení AD prevodu sa prostredníctvom logického signálu z ADC vyvolá prerušenie činnosti μC a vykoná sa obsluha MK, tj. presun aktuálnych údajov z ADC do číslicovej časti ČMK. Z toho vyplýva, že μC sa venuje MK len vtedy, keď je tento pripravený na prenos spracovaných údajov, a tak nestráca čas čakaním na pripravenosť periférie.

Vo všeobecnosti možno na realizáciu komunikačného adaptéra KA použiť viacero stykových integrovaných obvodov. Pri riešeniach ČMK prostredníctvom monolitického mikropočítača (MM) bývajú už v ich štruktúre vytvorené ÚADC, ktoré sú ovládané príslušným inštrukčným súborom. Vhodné príklady takýchto MM predstavujú napr. mikropočítače Intel 8051, 80515 (Siemens), 80552 (Philips), Motorola MC68HC11, MC68HC16, atď.

informačný podsystém PS

2.3 Kvalita IPS a MČ

Kvalitu IPS možno vo všeobecnosti chápať ako súhrn jeho vlastností, na základe ktorých je IPS, vzhľadom k spôsobu a podmienkam použitia, spôsobilý vykonávať funkciu, na ktorú je určený. Táto definícia platí rovnako aj pre kvalitu meracieho člena - základného prvku IPS. Najvýznamnejšie skupiny vlastností MČ určujúce jeho kvalitu možno usporiadať podľa ich významu, a to na ***technické a funkčné vlastnosti, spoľahlivosť činnosti,*** *materiálovú a energetickú náročnosť, technologičnosť, estetické, ergonomické a ekologické vlastnosti, atď.*

Významné kvalitatívne znaky reprezentujú hlavne prvé dve skupiny, tj.:

- funkčné a technické znaky MČ, medzi ktoré patria predovšetkým metrologické a funkčné vlastnosti spolu s technickými parametrami,
- prevádzkové vlastnosti, ku ktorým patrí spoľahlivosť, prevádzkové zabezpečenie a ochrany *(pozri kap. 12)*, jednoduchá obsluha a bezpečnosť pri manipulácii.

2.3.1 Metrologické vlastnosti meracích členov

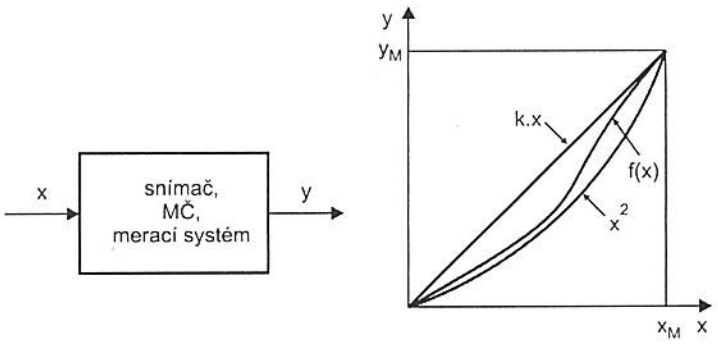
Metrologické vlastnosti meracích členov reprezentujú ich statické a dynamické vlastnosti. Predstavujú základné informácie o MČ, ktoré sú dostupné v katalógoch, katalógových listoch alebo v iných informačných materiáloch. Základné metrologické vlastnosti meracieho reťazca ovplyvňuje hlavne ***snímač***, pretože chyby spôsobené snímačom sa dajú ťažko odstrániť. Len čiastočne sa potláčajú vhodným spracovaním ich výstupného signálu. Aj preto sú snímače najdôležitejšie prvky meracích reťazcov, a preto náklady na ich výskum, vývoj a výrobu sú podstatne väčšie ako náklady na všetky ostatné prvky celého reťazca.

Metódy hodnotenia meracích členov pre automatizáciu sú uvedené v norme STN IEC 770. Norma obsahuje jednotné skúšobné metódy na hodnotenie prevádzkovej schopnosti meracích členov (snímačov, vysielačov) s unifikovanými elektrickými alebo pneumatickými výstupnými signálmi. Metódy hodnotenia špecifikované v tejto norme sú vhodné pre výrobcov na určenie metrologických vlastností ich výrobkov, ale aj pre užívateľov alebo pre nezávislé skúšobné orgány na overenie týchto vlastností meracích členov uvádzaných výrobcami. Preto definície metrologických vlastností a parametrov MČ v ďalšej podkapitole odpovedajú STN IEC 770.

2.3.1.1 Statické vlastnosti MČ

Statické vlastnosti meracieho člena (reťazca) charakterizujú jeho chovanie v časovo ustálených stavoch (prakticky pri kváziustálených zmenách) a sú dané statickými vlastnosťami jednotlivých prvkov meracieho člena.

Statická prevodová charakteristika meracieho prvku, člena alebo systému vyjadruje vzťah medzi vstupnou (nezávisle premennou) a výstupnou závisle premennou veličinou prvku v časovo ustálených stavoch.



Obr. 2.16. Prevodové charakteristiky MČ, príklady

Všeobecne platí:

$$y = f(x)$$

Táto závislosť sa dá často vyjadriť polynómom

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + ... + a_n x^n$$

V najjednoduchšom prípade platí lineárny vzťah

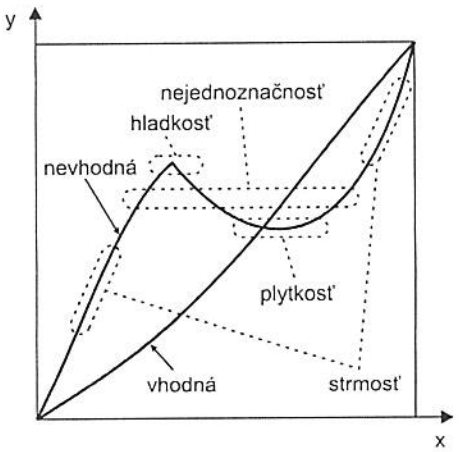
$$y = K \cdot x \quad \text{alebo} \quad y = K \cdot x + q$$

kde K je zosilnenie prvku alebo tiež konštanta prenosovej funkcie a q je posunutie priamky pri unifikovanom prúdovom signáli.

Charakteristika snímača musí spĺňať určité kritéria a niektoré požadované vlastnosti sú naznačené na obr. 2.17:

- strmosť – charakterizuje sklon prevodovej charakteristiky; nie je vhodné aby sa jej strmosť v rôznych častiach meracieho rozsahu veľmi odlišovala,
- hladkosť – charakteristika má na celom svojom definičnom obore definovanú deriváciu, ktorá je spojitá,
- plytkosť – gradient charakteristiky v jej lokálnych častiach nesmie byť zásadne menší ako citlivosť systému,
- monotónnosť – senzorová charakteristika je v celom rozsahu meranej fyzikálnej veličiny rastúca alebo klesajúca,
- jednoznačnosť – žiadna hodnota výstupného signálu nezodpovedá viac ako jednej hodnote vstupného signálu.

V katalógových listoch meracích prvkov, členov alebo systémov ***musí*** byť uvedená ich prevodová charakteristika buď formou funkcie, grafickej závislosti alebo tabuľky.



Obr. 2.17. Vlastnosti prevodových charakteristík MČ

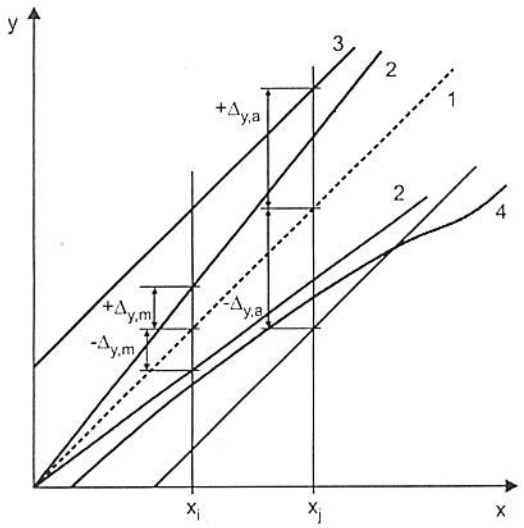
Presnosť meracieho člena (snímača) je vlastnosť, ktorá charakterizuje jeho schopnosť udávať na výstupe pravé hodnoty signálu (tj. hodnoty, ktoré sa zanedbateľne líšia od skutočnej, pravej hodnoty). Presnosť meracieho člena je daná jeho celkovou chybou, tj. súčtom ***základnej*** a ***vedľajšej*** chyby. Základná chyba člena je taká, ktorá je udávaná výrobcom a je určená pri definovaných, referenčných podmienkach (určených normou alebo výrobcom, napr.: teplota okolia, barometrický tlak, vlhkosť vzduchu, frekvencia napájacieho zdroja a pod.). Vedľajšie chyby (dodatkové, prídavné) sú spôsobené inými ako referenčnými podmienkami pri meraní. Hodnoty najdôležitejších z nich by sa mali dať určiť z katalógových údajov, napr. vplyv teploty prostredia na meranie a pod.

Podľa spôsobu vyjadrenia sa chyby delia na absolútne Δ a relatívne (pomerné) δ. Platí

$$\Delta_y = |y_N - y_S|; \quad \delta_y = \frac{\Delta_y}{y_S}; \quad \delta_y = \frac{\Delta_y}{y_M}; \quad \delta_T = \frac{\Delta_T}{y_M}$$

kde
- y_N je nameraná hodnota výstupnej veličiny,
- y_S konvenčne pravá hodnota výstupnej veličiny (určená na základe konvencie, napr. štatistickým spracovaním),
- y_M merací rozsah výstupnej veličiny, tj. $y_{max} - y_{min}$,
- Δ_y absolútna chyba merania,
- Δ_T najväčšia možná absolútna chyba, napr. MČ,
- δ_y relatívna chyba merania (vztiahnutá na údaj y_N; rozsah y_M),
- δ_T najväčšia možná relatívna chyba, napr. MČ.

Aditívne a multiplikatívne chyby – toto teoretické rozdelenie chýb je dané závislosťou (multiplikatívne chyby) alebo nezávislosťou (aditívne chyby) chyby merania Δ_y na hodnote meranej veličiny, obr. 2.18.



Obr. 2.18. Statické charakteristiky MČ, aditívna a multiplikatívna chyba

Závislosť 1 predstavuje ideálnu (menovitú) charakteristiku definovanú konštantou prenosovej funkcie

$$K_S = \frac{y}{x} \tag{2.1}$$

Charakteristika 2, ktorá nemá rovnaký sklon ako menovitá charakteristika, predstavuje zmenu citlivosti alebo zosilnenia meracieho prvku, tj. *multiplikatívnu chybu*. Hodnota multiplikatívnej chyby je potom závislá na hodnote meranej veličiny x. Platí

$$\Delta_{y,m} = \Delta_K \cdot x\,; \quad \delta_{y,m} = \frac{\Delta_{y,m}}{y} = \Delta_K \frac{x}{y} = \frac{\Delta_K}{K} = \delta_K = \text{konšt.}, \tag{2.2}$$

čiže hodnota relatívnej multiplikatívnej chyby merania je konštantná.

Multiplikatívna chyba je spôsobená napr. zmenou hodnôt odporovej siete zosilňovačov vplyvom poruchových veličín, ako je ich teplota. Táto chyba je prezentovaná ako ***relatívna chyba z nameranej hodnoty, resp. údaja.***

Charakteristika 3 je vytvorená posunom od menovitej, lineárnej charakteristiky, tj. *aditívnou chybou*. Jej hodnota $\Delta_{y,a}$ *je* nezávislá na meranej veličine x, no chyba merania $\delta_{y,a}$ závisí hyperbolicky na x. Aditívnu chybu spôsobuje najčastejšie posun nulovej alebo počiatočnej úrovne výstupnej veličiny vplyvom teplotného, časového, napájacieho alebo iného driftu. Ak platí

$$\Delta_{y,i} \le \Delta_T\,,$$

potom aj tieto chyby patria medzi aditívne, ako napr.:

- relatívna chyba MČ (presnosť, trieda presnosti),
- chyba konformnosti (linearity),

- kvantovacia chyba AD prevodu.

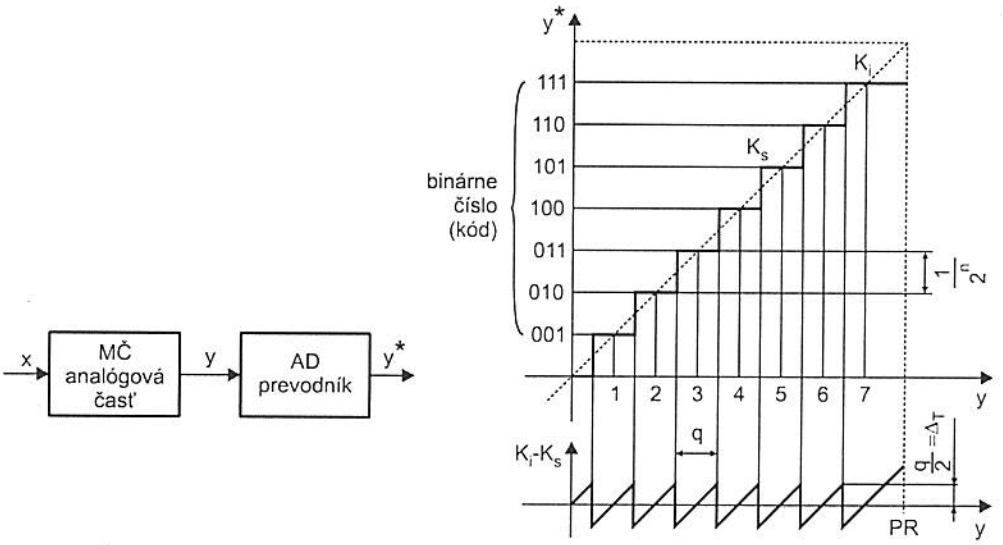
Táto chyba sa najčastejšie ako relatívna, v ***percentách meracieho rozsahu.***

Charakteristika 4 reprezentuje všeobecnú prevodovú charakteristiku snímača alebo meracieho člena.

Pri číslicových MČ je potrebné skontrolovať a prípadne uvažovať aditívnu kvantovaciu chybu prevodníka AD (obr. 2.19). Platí, že ideálna kvantovacia prevodová charakteristika je ohraničená teoretickou maximálnou hodnotou kvantovacej chyby. Potom pre absolútnu kvantovaciu chybu platí

$$\Delta_T = \frac{\Delta_q}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n} \cdot y_{roz} \tag{2.3}$$

kde $\Delta_q = 1/2^n$. y_{roz} je tzv. šírka pásma a $y_{roz} = y_{max} - y_{min}$ je merací rozsah.



Obr. 2.19. Aditívna kvantovacia chyba pri číslicovom výstupe MČ

Pre maximálnu relatívnu kvantovaciu chybu MČ s číslicovým výstupom platí

$$\delta_{MC} = \frac{\Delta_T}{y_{max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n} = r_č \tag{2.4}$$

kde $r_č$ je rozlišovacia schopnosť ADC.

V prípade vyjadrenia číslicového slova v prirodzenom binárnom kóde, šírka pásma zodpovedá analógovej váhe najmenej významnému bitu (LSB – *Least Significant Bit*). Preto sa chyby MČ s číslicovým výstupom často vyjadrujú v celých násobkoch 1/2 LSB.

Ak je známa multiplikatívna a aditívna chyba MČ, výsledná chyba merania MČ sa určí podľa vzťahu

$$\delta_y = \pm\left(\left|\delta_{y,m}\right| + \left|\delta_{y,a} \cdot \frac{y_M}{y_N}\right|\right) \tag{2.5}$$

Tento vzťah platí aj pre samostatné (jednotlivé) zložky výslednej chyby.
Pri klasických, analógových MČ, výrobca v katalógových listoch udáva ***triedu presnosti*** alebo len ***presnosť***. Je to maximálna relatívna chyba vztiahnutá na rozsah prístroja, tj.

$$\delta_{MC} = \frac{\Delta_T}{y_M} \cdot 100\,[\%] \tag{2.6}$$

Podľa vzťahu (2.5)

$$\delta_{MC} = \pm\left(\left|\frac{\Delta_T}{y_M}\right|\right) \cdot 100\,[\%]$$

Pre precízne MČ

$$\delta_{MC} = \frac{\Delta_T}{y_M} \cdot 10^6\ [\text{ppm}]$$

kde skratka *ppm (part per milion)* odpovedá *miliónтine* a Δ_T je maximálna hodnota absolútnej chyby na danom rozsahu zaručovaná výrobcom a y_M je rozsah MČ. Pre užívateľa býva dôležité určiť ***maximálnu absolútnu chybu MČ pre daný merací rozsah.***
Pri číslicových a vo všeobecnosti elektronických meracích prístrojoch sa na vyjadrenie hraníc chýb zaručovaných výrobcom používa tzv. ***dvojčlenný vzorec***. Maximálna chyba sa počíta ako súčet maximálnej chyby vztiahnutej na údaj a chyby vztiahnutej na rozsah MČ. Čiže platí

$$\Delta_T = \Delta_{T,m} + \Delta_{T,a} \tag{2.7}$$

a

$$\delta_T = \delta_{T,m} + \delta_{T,a} \cdot \frac{y_M}{y_N} \tag{2.8}$$

pričom

$$\delta_{T,m} = \frac{\Delta_{T,m}}{y_N} \cdot 100\,[\%];\quad \delta_{T,a} = \frac{\Delta_{T,a}}{y_M} \cdot 100\,[\%] \tag{2.9}$$

kde $\Delta_{T,m}$ a $\Delta_{T,a}$ sú maximálne absolútne multiplikatívne a aditívne chyby MČ.
V katalógoch sú uvádzané údaje o presnosti MČ v tvaroch, napr.:

I. ± 0,2% údaja, ± 0,06% rozsahu
II. ± 50 ppm, ± 4 digit,

čiže

I. $\delta_{T,m}$= 0,2 %; $\delta_{T,a}$= 0,06 %
II. $\delta_{T,m}$=50 ppm; $\Delta_{T,a}$= 4 digit

kde *digit* je *n*-násobok hodnoty jednotky na poslednom mieste displeja.
Z týchto údajov možno vypočítať ***maximálnu absolútnu a relatívnu chybu*** zaručovanú výrobcom pomocou vzťahov 2.5 až 2.9.

Niektoré ďalšie statické parametre MČ podľa STN IEC 770

Konformnosť krivky určuje stupeň priblíženia sa k špecifikovanej krivke, napr. lineárnej, parabolickej, odmocninovej funkcii, atď.

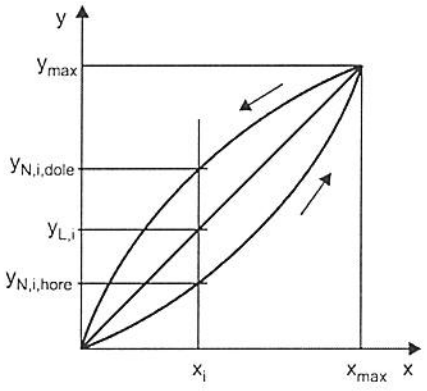
Poznámky

V podstate sa určuje ***stupeň nekonformnosti***, ale vyjadruje sa tento parameter pojmom konformnosť (zvyklosť, ako pri chybách), tj. maximálna odchýlka medzi priemernou a špecifikovanou krivkou. Priemerná krivka je určená priemernými hodnotami z viacerých meracích cyklov – postupných prechodov cez celý rozsah v jednom i druhom smere. Hodnota konformnosti sa vo všeobecnosti vzťahuje k rozpätiu výstupu.

> ***Konformnosť*** sa vyjadruje buď ako nezávislá, vztiahnutá ku koncovým bodom, alebo ako konformnosť vztiahnutá k počiatočnému bodu. V praxi prevažuje konformnosť vztiahnutá ku koncovým bodom.
>
> ***Linearita*** je špecifický, ale často používaný prípad konformnosti, pri ktorej špecifikovanou krivkou je priamka. Potom chyba linearity sa určí podľa vzťahu (obr. 2.20)

$$\delta_L = \left(\frac{y_{N,i,hore(dole)} - y_{L,i}}{y_{max} - y_{min}} \right)_{max} \cdot 100\,[\%]$$

Určenie $y_{N,i,hore(dole)}$ podľa normy STN IEC 770!



Obr. 2.20. Chyba linearity a hysteréza

Mŕtve pásmo udáva najväčšiu zmenu vstupného signálu, ktorá ešte nespôsobí zistiteľnú zmenu výstupného signálu.

Chyba hysteréza je časť hysterézy spôsobená absorbciou energie prvkami MČ. V zásade sa určuje odpočítaním vplyvu mŕtveho pásma od maximálneho nameraného odstupu (rozdielu)

medzi údajmi nameranými pri postupe v celom rozsahu od nižších hodnôt meranej premennej (veličiny) ku vyšším a od vyšších hodnôt k nižším.

Poznámka

Toto je bežne používaná definícia zahrňujúca chybu hysterézy a mŕtveho pásma. Tá časť, ktorá závisí na postupnosti predchádzajúcich odchýlok je chyba hysterézy, zatiaľ čo chyba spôsobená mŕtvym pásmom môže byť stanovená konvenčnou skúškou mŕtveho pásma (IEC 770). Na určenie chyby hysterézy vo väčšine prípadov možno použiť vzťah (zanedbané mŕtve pásmo)

$$\delta_H = \left(\frac{y_{N\uparrow} - y_{N\downarrow}}{y_{max} - y_{min}} \right)_{max} \cdot 100\,[\%]$$

Určenie $y_{N\uparrow}$, $y_{N\downarrow}$ podľa normy STN IEC 770!

Opakovateľnosť je vyjadrená číselnou hodnotou, ktorá charakterizuje tesnosť zhody medzi postupnosťou po sebe nasledujúcich meraní výstupného signálu pre rovnakú hodnotu vstupného signálu pri rovnakých prevádzkových podmienkach a pri zmenách vstupného signálu v tom istom smere a v celom rozsahu.

$$\text{OPAK.} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{N,i} - \bar{y}_N \right)^2} \quad ; \quad \bar{y}_N = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} y_{N,i}$$

kde $y_{N,i}$ je súbor nameraných hodnôt výstupnej veličiny pre i–tu hodnotu vstupného signálu,

$\bar{y}_N$ stredná hodnota $y_{N,i}$,

n počet meraní.

Takto určená hodnota opakovateľnosti sa používa na porovnanie prevádzkovej schopnosti podobných meracích členov. Nie je myslená ako štatisticky významná miera opakovateľnosti, ktorá môže byť v prevádzke pozorovaná.

Statické metrologické parametre MČ sa v zásade vyjadrujú v percentách rozpätia výstupu.

2.3.1.2 Dynamické vlastnosti a parametre MČ, dynamická chyba

Meraná hodnota fyzikálnej veličiny sa neustále mení s časom. Z tohoto dôvodu v mnohých technologických a výrobných procesoch nestačí pri sledovaní procesnej veličiny požadovať len spoľahlivosť a staticky stanovenú presnosť meracieho reťazca. Najmä meracie členy indikujúce medzné stavy procesu (ochrany, alarmy, blokovania) alebo zaradené do rýchlych regulačných obvodov musia byť navrhnuté tak, aby výstupný signál $y(t)$ z MČ sledoval s minimálnym skreslením vstupný signál $x(t)$. Dynamické vlastnosti meracích členov sú dôležité pre analýzu a

syntézu regulačných obvodov, avšak v odôvodnených prípadoch aj na určenie dynamickej chyby meracieho reťazca.

Obr. 2.21. Merací člen ako dynamický prvok

Dynamická chyba (Δ_D, δ_D) je chyba stanovená pri referenčných podmienkach a je definovaná v Laplaceovej transformácii ako odchýlka medzi skutočným (reálnym) prenosom meracieho člena *F(s)* a ideálnym prenosom *K*.
Platí

$$\Delta_D(s) = F(s)\cdot X(s) - K\cdot X(s) = X(s)\cdot[F(s)-K]$$

resp.

$$\delta_D(s) = \frac{\Delta_D(s)}{K\cdot X(s)} = \frac{F(s)}{K} - 1$$

Z definície dynamickej chyby je zrejmé, že na jej určenie je treba poznať okrem ***časových konštánt a zosilnenia*** MČ (totožné s konštantou prenosovej funkcie statickej charakteristiky), tiež ***časový priebeh meranej veličiny***, tj. *X(s)*. Preto je dôležité pri posudzovaní dynamickej chyby poznať dominantné časové zmeny meranej veličiny v sledovanej technológii. V praxi sa vyskytujú najčastejšie zmeny blížiace sa k rampovej funkcii (rovnomerne narastajúca alebo klesajúca veličina), ku skokovej zmene alebo k harmonicky sa meniacim signálom.

a) Dynamická chyba pri konštantnej rýchlosti zmeny meranej veličiny

Tento prípad (obr. 2.22) je pomerne častý v tepelno-technických zariadeniach, pri ktorých platí pre prenos MČ vzťah

$$F(s) = K\frac{1}{(1+sT_1)\cdot(1+sT_2)\ldots(1+sT_n)}$$

a potom

$$\Delta_D = \frac{w}{s^2}\cdot[F(s)-K],$$

kde *w* je rýchlosť zmeny vstupnej veličiny.
Použitím vety o limite

$$\Delta_{D\max} = \lim_{t\to\infty}\Delta_D = \lim_{s\to 0} s\cdot\Delta_D(s)$$

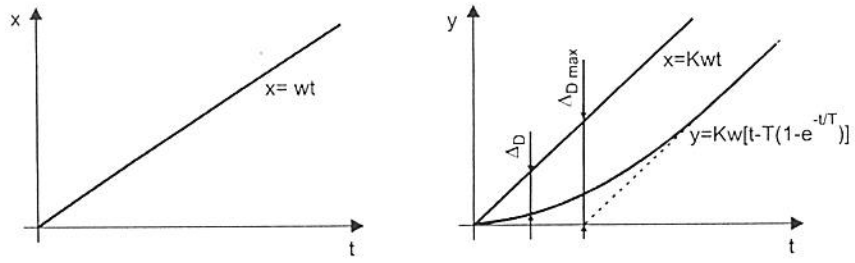
a po úprave platí

$$\Delta_{D\max} = -w\cdot K\cdot(T_1+T_2+\ldots+T_n)$$

alebo pre sústavu prvého rádu F(s) = K /(1+sT)

$$\Delta_{D\max} = -w \cdot K \cdot T$$

Priebeh dynamickej chyby je na obr. 2.22.



Obr. 2.22. Dynamická chyba pri rampovej zmene vstupnej veličiny

V prípade, že sa v reťazci MČ vyskytuje aj dopravné oneskorenie T_D, ktorého veľkosť je porovnateľná s najväčšou časovou konštantou platí pre dynamickú chybu

$$\Delta_{D\max} = -w \cdot K \cdot (T_D + T_1 + T_2 + ... + T_n) \text{ pre } n \geq 1$$

alebo

$$\Delta_{D\max} \approx -0.915w \cdot K \cdot (T_D + t_{63,2}) \text{ pre } 2 \leq n \leq 8$$

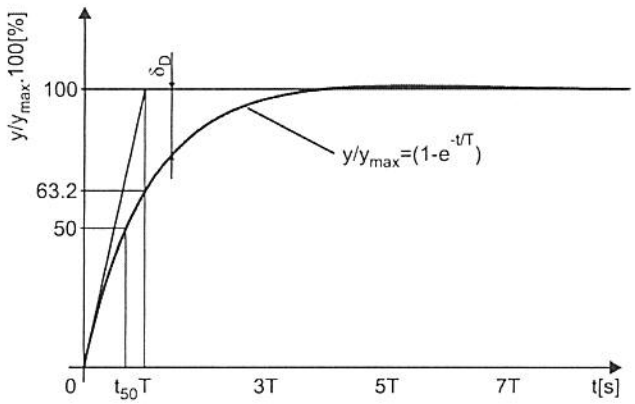
kde n je rád prenosu a $t_{63,2}$ je čas, za ktorý výstupná hodnota z MČ dosiahne 63,2 % konečnej veľkosti.

b) Dynamická chyba pri skokovej zmene vstupnej veličiny

Pokiaľ sa meraná veličina mení tak, že sa ustáli v čase $t << t_{50}$ (obr. 2.23), možno túto zmenu považovať za skokovú. Pre prenos MČ prvého rádu je možné použiť na výpočet relatívnej dynamickej chyby *tab. 2.2* alebo vzťah

$$\delta_D(t) = \left(\frac{y(t)}{y_{max}} - 1\right) \cdot 100[\%]$$

Z *tab. 2.2* a predchádzajúceho vzťahu vyplýva, že pre $\delta_D(t) < 1$ % je nutné odčítať nameranú veličinu v čase $t \geq 5T$.



Obr. 2.23. Dynamická chyba pri skokovej zmene meranej veličiny, MČ sústava prvého rádu

Tab. 2.2. Numerické vyjadrenie prechodovej charakteristiky

y/y_{max} 100 [%]	t/T	y/y_{max} 100 [%]	t/T
10	0,104	*70*	1,20
20	0,224	*80*	1,61
30	0,356	*90*	2,303
40	0,511	*95*	3,00
50	0,694	*99,0*	4,606
60	0,916	*99,9*	6,909
63,2	1,00	*99,99*	9,212

c) Dynamická chyba v číslicových MČ

Dynamická chyba je závislá aj od číslicového spracovania signálu. Prírastok chyby je spôsobený podstatou kvantovania, tj. vzorkovaním vstupnej veličiny. Výstupná hodnota AD prevodníka zodpovedá hodnotám vstupnej veličiny *y(t)* v určitých časových okamihoch. Čas potrebný na prevod vzorky vstupnej analógovej veličiny *y(t)* do číslicovej formy (kódové slovo) sa označuje ako čas prevodu T_p. Počas T_p sa nesmie hodnota *y(t)* zmeniť o viac ako je dovolená absolútna chyba kvantovania určená rozsahom merania a rozlišovacou schopnosťou ADC, tj. $r_č$

$$\Delta_V = (y_{max} - y_{min}) \cdot r_č$$

Ak je doba T_p menšia ako perióda vzorkovania T_v a plní sa podmienka

$$T_V \leq \frac{\Delta_V}{\left(\frac{dy}{dt}\right)_{max}}$$

kde $(dy/dt)_{max}$ je maximálna rýchlosť zmeny vstupnej veličiny, bude prídavná dynamická chyba dosahovať maximálne hodnotu kvantovacej chyby.

d) Korekcia dynamickej chyby MČ

Úpravu dynamických vlastností MČ možno riešiť zaradením korekčného člena do meracieho reťazca. Jeden z vhodných príkladov je na obr. 2.24, kde je do série zaradený derivačný člen. Pre prenosy jednotlivých prvkov platí:

snímač

$$F(s) = \frac{K}{1 + s \cdot T_1}$$

korekčný člen

$$F_k(s) = K \frac{1 + s \cdot T_2}{1 + s \cdot T_3}$$

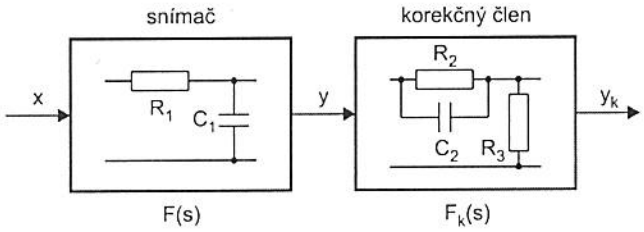
kde

$$T_3 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} C_2$$

Ak sa zvolia časové konštanty tak, aby platilo $T_1 = T_2$, potom výsledný prenos celého reťazca je daný vzťahom

$$F_C(s) = F(s) \cdot F_k(s) = K \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_3}$$

Dynamické vlastnosti celého reťazca budú určené len korekčným členom, pričom voľbou R_3 sa dá pomerne jednoducho dosiahnuť toho, že $T_3 << T_1$. Korekcia dynamickej chyby touto metódou predpokladá stálosť konštanty T_1 v čase. Dôležité si je tiež uvedomiť, že zmenšovaním časovej konštanty T_3 sa zväčšuje šum korekčného člena, čo môže spôsobiť vyrovnanie úrovní užitočného a rušivého signálu.



Obr. 2.24. Príklad pripojenia korekčného člena

Súčasné prístupy potláčania dynamických chýb v meracích členoch vychádzajú z číslicovej rekonštrukcie signálu na vstupe MČ. Napríklad, zo znalosti postupného radu niekoľkých výstupných vzoriek sa určí časové skreslenie výstupného signálu a rieši sa jeho korekcia (pri znalosti modelu MČ alebo aj bez neho).

d) Určenie niektorých dynamických parametrov MČ podľa STN IEC 770

Kroková odozva

Na vstup MČ sa aplikuje postupnosť krokových zmien. Doba vzostupu a poklesu každej krokovej vstupnej zmeny musí byť malá v porovnaní s dobou odozvy MČ (čiže má to byť skoková zmena). Pre bežné kontroly dynamických parametrov možno odporučiť prvú uvádzanú skúšku v norme, tj. krokovú zmenu (jeden impulz) odpovedajúcu 80% rozpätia výstupu a aplikovanú od 10% výstupu do 90%, potom od 90% do 10%. Kontrolované rozpätie pri MČ s prestaviteľným rozsahom je reprezentované polovičkou maximálneho rozsahu a je umiestnené v jeho strede. Vyhodnocuje sa doba potrebná na to, aby výstup dosiahol tolerančné pásmo ±1% ustálenej hodnoty. Tento čas sa určuje pre každú zmenu na vstupe, tj. pre vzostup aj pre pokles. Protokol by mal obsahovať informáciu aj o veľkosti mŕtveho pásma a času prekmitu (čas prvého maxima), ak existuje.

Frekvenčná odozva

Frekvenčná odozva MČ predstavuje meranie veľmi náročné najmä na prístrojové vybavenie, lebo generátory harmonických signálov rôznych fyzikálnych veličín so zmenou frekvencie v širokom pásme sú často konštrukčne veľmi náročné, častokrát až neriešiteľné.

Výsledky týchto skúšok sa vyhodnocujú graficky nasledujúcim spôsobom:

- zosilnenie vzťahujúce sa k zisku (zosilneniu) pri nulovej frekvencii sa vynesie v závislosti od frekvencie, ktorá sa vynáša na logaritmickú stupnicu,
- fázový posun medzi výstupom a vstupom sa vykreslí v závislosti od frekvencie, ktorá sa vynáša na logaritmickú stupnicu.

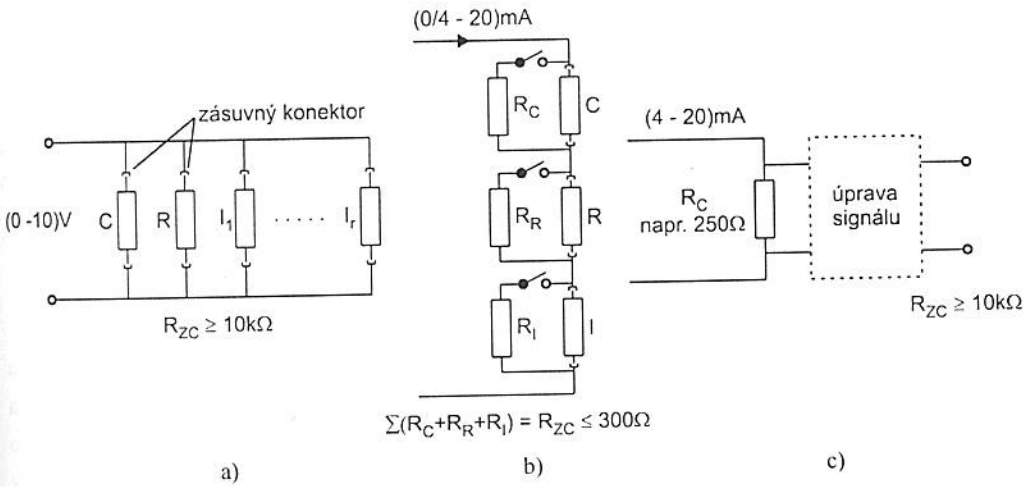
Z charakteristík sa určia nasledujúce parametre:

- frekvencia, pri ktorej sa vytvára relatívny zisk 0,7 (pomer amplitúd vstupného a výstupného signálu),
- frekvencia, pri ktorej dosahuje fázový posun 45°.

2.3.2 Prevádzkové vlastnosti a zabezpečenie IPS a MČ

Informačný podsystém IPS ako celok v moderných RS musí riešiť aj niektoré úlohy na zabezpečenie jeho správnej činnosti prostredníctvom prídavných funkcií. K nim patria najmä zabezpečenie ochrany meracích kanálov, identifikácia a vyhodnocovanie porúch IPS, prípadne primárne spracovanie informácií (PSI). Podsystém IPS pozostáva z viacerých meracích kanálov, ktoré sú navzájom obvodovo prepojené, a preto je dôležité aby sa tieto navzájom neovplyvňovali, a to už či pri správnej činnosti jednotlivých kanálov alebo pri poruche niektorého z nich (skrat alebo prerušenie obvodu). Veľmi dôležitou časťou IPS je aj jeho napájanie pomocnou pracovnou energiou (najčastejšie elektrickou alebo pneumatickou). Zdroje tejto energie musia spĺňať prísne kritériá vzhľadom na ich funkčné parametre (stabilita, zaťažiteľnosť) a rozvody energie musia predstavovať spoľahlivý prenosový prostriedok. Na

zabezpečenie správnej činnosti všetkých meracích kanálov v podsystéme IPS sa často vytvárajú obvody kontroly rozptylu hodnôt jednotlivých parametrov zdrojov pomocnej energie (napr. napätie, prúd, napájací tlak), ale aj kontroly stavu, tj. skratu alebo prerušenia obvodu v niektorom meracom kanále s nasledujúcim odpojením sa od napájacieho rozvodu. Vetvenie informačných signálov je dôležité z hľadiska ich ďalšieho spracovania alebo využitia na viacerých miestach RS (indikácia, registrácia, riadenie). Pri vetvení signálov musí byť zaistené korektné a jednoduché odpojenie, pripojenie alebo výmena ľubovoľného zariadenia pre spracovanie informácií (C – regulátor, I – indikátor, REG – zapisovač), a to pri napäťovom i prúdovom elektrickom alebo pneumatickom unifikovanom signáli bez negatívneho účinku na celkovú funkciu IPS, alebo jeho časti. Vetvenie napäťových unifikovaných signálov sa rieši paralelným usporiadaním použitých prvkov pri dodržaní podmienky podľa normy STN IEC 381-1 a 2, a to tak, že výsledný vstupný odpor zostavy nesmie byť menší ako 10 kΩ. Prúdový signál sa môže vetviť buď systémom podľa obr. 2.25*b*, tj. udržaním prúdového obvodu prostredníctvom jeho premostenia (spínací prvok) pri odpojení prvku meracieho systému alebo použitím prevodníka I/U (obr. 2.25) spolu s úpravou úrovne signálu a vetvením podľa verzie na obr. 2.25*a* (najčastejšie riešenie).

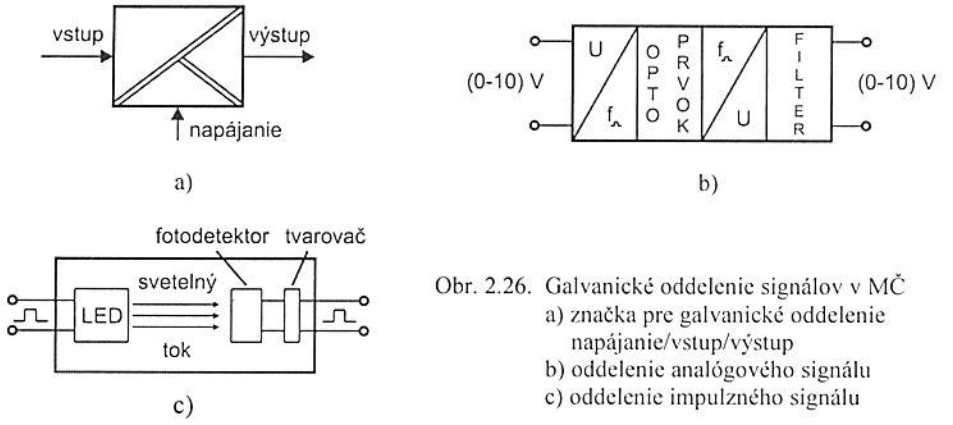


Obr. 2.25. Vetvenie unifikovaných signálov
a) napäťových
b) prúdových s prepojením obvodu
c) prúdových s prevodníkom I/U

Jednotlivé časti elektrického RS sú navzájom prepojené galvanickou väzbou – spojovacími vedeniami. Z tohto dôvodu je možné vzájomné ovplyvňovanie informačnej časti RS jeho výkonovou zložkou alebo inými zdrojmi rušenia v prevádzke, a to ako pri normálnej činnosti týchto prvkov, tak aj pri kritických poruchách niektorých zariadení v systéme automatického riadenia. Zabránenie týchto vplyvov (ich účinkov) na podsystém IPS sa rieši galvanickým oddelením obvodov v MČ. V jednoduchších prípadoch sa problém rieši oddelením len

vstupných obvodov MČ od výstupných, v odôvodnených prípadoch aj v rôznych kombináciách vstup – napájanie, napájanie – výstup, vstup – výstup.

Náklady na takéto riešenia najmä v analógových častiach MČ sú však vyššie. Prvky pre galvanické oddelenie spojitého signálu pracujú najčastejšie na princípe diskrétnych oddeľovačov. Diskrétne oddelenie vyžaduje najskôr moduláciu vstupného analógového signálu, ktorý je kvantovaný a transformovaný na frekvenciu závislú od hodnoty vstupného signálu. Takto upravený nespojitý signál je potom prenášaný optickou alebo indukčnou (transformátorovou) väzbou do výstupnej časti oddeľovača, kde sa frekvenčne modulovaný signál opäť upraví na dohodnutý (unifikovaný) spojitý signál. Vlastné galvanické oddelenie signálu zabezpečujú práve optické alebo indukčné väzby. Vo výstupnej časti oddeľovača sa užitočný signál zbavuje vzniknutých superponovaných a nežiaducich vyšších frekvencií analógovým filtrom. Priaznivejšia situácia je v oblasti impulzných logických alebo číslicových signálov vďaka nižším nákladom na oddeľovacie obvody, napr. optróny.

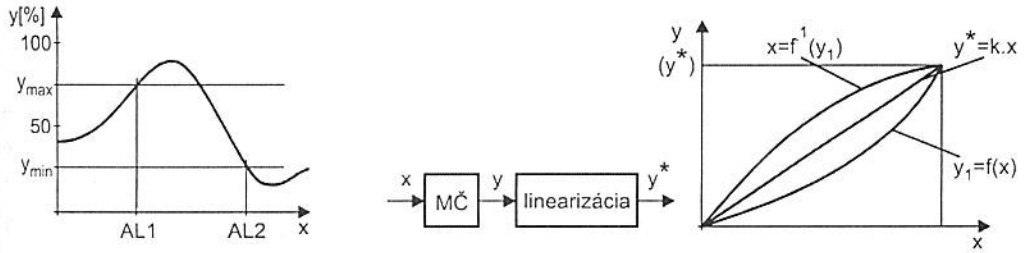


Obr. 2.26. Galvanické oddelenie signálov v MČ
a) značka pre galvanické oddelenie napájanie/vstup/výstup
b) oddelenie analógového signálu
c) oddelenie impulzného signálu

Vzhľadom k mimoriadnej dôležitosti podsystému IPS v rámci RS – identifikácia a vyhodnocovanie porúch prvkov alebo častí IPS nadobúda na význame najmä z hľadiska bezpečnosti obsluhujúceho personálu, ale aj z hľadiska spoľahlivosti a bezpečnosti riadeného systému (rozsiahle technologické celky – veľké finančné hodnoty). Na identifikáciu poruchy meracieho kanála, člena alebo prvku meracieho reťazca sa uplatňuje prevádzková (vnútorná) diagnostika podsystému IPS, ktorá sa periodicky v čase aktivuje, najčastejšie však tesne pred načítaním procesných veličín. Výsledky diagnostiky sa ďalej spracujú a v prípade negatívneho hodnotenia prvku alebo časti IPS sa prejavia buď formou pasívnej (optická, akustická informácia obsluhe) alebo aktívnej poruchovej signalizácie. Podľa druhu poruchy sa upraví alebo redukuje riadiaci algoritmus alebo sa aktivujú redundantné prvky nesprávne pracujúceho meracieho člena, prípadne sa "odvedie" riadený systém do definovaného – bezpečného stavu.

Pod primárnym spracovaním informácií v podsystéme IPS sa rozumie úprava informácií z riadeného systému v takom zmysle, že sú z podsystému IPS prenášané tzv. "čisté" informácie, ktoré môžu vstupovať priamo do riadiaceho algoritmu bez ďalších úprav, čím sa zefektívni a urýchli jeho vykonávanie. Z uvedených dôvodov sa v súčasnosti presadzuje tendencia

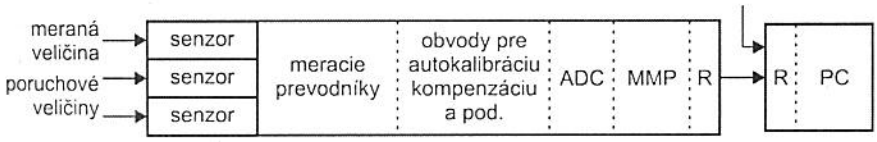
primárneho spracovania informácií v blízkosti miesta ich získania. Avšak primárne spracovanie informácií sa v klasicky riešených podsystémoch IPS ((nie inteligentné MČ, ale analógová technika – intenzitné signály) obmedzuje na funkcie ľahko realizovateľné touto technikou a presúva sa často až do miesta spracovania (dozorňa, velín). Najčastejšie sú to funkcie kontroly hraničných hodnôt (AL alarm), jednoduché aritmetické operácie, výber extrému z viacerých signálov, prípadne linearizácia prevodových charakteristík MČ (obr. 2.27).



a) b)

Obr. 2.27. Predspracovanie informácií v klasickom (analógovom) IPS
a) kontrola hraničných hodnôt
b) linearizácia prevodovej charakteristiky MČ pripojením analógového člena s približne inverznou charakteristikou

Podstatne širšie spektrum úloh pri kvalitatívne vyšších účinkoch z uvedenej oblasti zabezpečujú riešenia tzv. ***inteligentných MČ*** alebo ***inteligentných senzorových systémov (ISS)***, čo umožňuje využitie mikropočítačovej techniky v časti pre primárne spracovanie informácií IPS, najčastejšie priamo v štruktúre MČ (obr. 2.28).



Obr. 2.28. Inteligentný merací člen procesnej veličiny

Z doterajších úvah vyplýva mimoriadna dôležitosť podsystému IPS vzhľadom na dosiahnutie cieľového správania sa riadeného systému. Požiadavky kladené na tento podsystém možno splniť len ***zvýšením úrovne a kvality podsystému IPS***, t.j. zvýšením kvality jeho prvkov a rozšírením jeho štruktúry o prvky umožňujúce ***číslicové spracovanie informácií*** (primárne spracovanie informácií, autodiagnostika, autokalibrácia, komunikácia, a pod.), čiže uplatnením ***inteligentných prvkov v jeho štruktúre***.

3 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY TEPLOTNÝCH VELIČÍN

3.1 Základné pojmy, rozdelenie

Teplota patrí k najdôležitejším stavovým veličinám ***prírodných a technických systémov***, preto jej meranie je pri mnohých ľudských činnostiach nevyhnutné. V automatizačnej technike patrí teplota k najsledovanejším veličinám v procesoch výrobnej i nevýrobnej povahy a na presnosti jej určenia závisí veľmi často ***kvalita a výrobná cena*** mnohých výrobkov a služieb. Teplota je súčasne ***najčastejšou poruchovou veličinou*** pôsobiacou pri meraní fyzikálnych a chemických veličín, preto je často nevyhnutné kompenzovať jej vplyv na meranie prvotnej veličiny, čo vyžaduje jej meranie.

Teplota je termodynamická stavová veličina definovaná na základe účinnosti vratného termodynamického (Carnotovho) cyklu, ktorého účinnosť nezávisí od použitej teplomernej látky. ***Termodynamická (absolútna) teplotná stupnica*** je definovaná na základe trojného bodu vody, tj. na základe rovnovážneho stavu troch skupenstiev vody (ľadu, vody a nasýtenej vodnej pary). Základnou jednotkou termodynamickej teploty je ***kelvin*** [K] určený ako 273,16-tá časť termodynamickej teploty trojného bodu vody. Okrem termodynamickej teploty sa používa Celsiova teplota (***stupeň Celsia*** [°C]) definovaná vzťahom

$$\vartheta = T - T_0 \quad [^\circ C, K]$$

kde $T_0 = 273{,}15$ K, pričom platí

$$\Delta\vartheta = \Delta T \quad [^\circ C, K]$$

Tab. 1.1.

Veličina		Základná jednotka		Vedľajšia jednotka	
	značka	názov	značka	názov	značka
Termodynamická teplota	T	Kelvin	K		
Celsiova teplota	ϑ, (t)			Stupeň Celsia	°C

Realizácia termodynamickej stupnice je veľmi náročná (len na špecializovaných pracoviskách), preto sa pri určovaní bodov teplotnej stupnice pre praktické úlohy používajú závislosti fyzikálnych veličín na teplote. Volia sa také fyzikálne javy, pri ktorých sa dá teplotná závislosť veličín matematicky vyjadriť s minimálnou odchýlkou od termodynamickej stupnice teploty. Na základe takýchto úvah vznikla v roku 1927 ***Medzinárodná praktická teplotná stupnica***, ktorá sa postupne upravovala a doplňovala. Jej posledná úprava je z roku 1990 a má označenie ***ITS-90*** *(The International Temperature Scale of 1990)*. Táto empirická stupnica je určená pomocou 17-tich pevne definovaných teplotných bodoch v termodynamickej stupnici,

ktoré odpovedajú rovnovážnym stavom medzi fázami vybraných látok. Medzi týmito bodmi boli definované interpolačné rovnice a na ich realizáciu zasa špecializované interpolačné prístroje. ***ITS-90*** je podľa interpolačných prístrojov rozdelená do štyroch rozsahov, a napríklad tretí (najčastejší) *teplotný rozsah od 13,8033 K až do 961,8 °C* je definovaný rovnicami platnými pre etalónový platinový odporový teplomer.

V anglicky hovoriacich krajinách sa teplota udáva prevažne vo Fahrenheitových stupňoch [°F], pričom platí, že teplote 0 °C odpovedá 32 °F, teplote 100 °C zasa 212 °F. Prevodový vzťah je daný rovnicou x [°C] = 5/9·(y [°F] - 32).

Priamo merať teplotu telesa alebo prostredia nie je možné. Teplota sa určuje iba podľa zmien fyzikálnych vlastností inej, tzv. teplomernej látky, ktorá je v priamom alebo nepriamom styku so sledovaným telesom alebo prostredím. Prenos tepelnej energie vo všeobecnosti medzi objektami prebieha ***vedením, prúdením*** alebo ***žiarením***. Pri snímačoch teploty sa zvyčajne uplatňujú všetky druhy prenosov tepla, pričom z hľadiska merania býva len jeden funkčný, ostávajúce potom pôsobia ako poruchové a často spôsobujú chybu merania. Snímač teploty predstavuje rušivý element v sledovanom teplotnom poli, a preto je potrebné venovať dostatočnú pozornosť výberu snímača teploty a jeho zabudovaniu do technológie, aby nevznikali z uvedených príčin ***systematické chyby merania***. Dynamické vlastnosti snímača teploty priamo ovplyvňujú jeho ***dynamickú chybu***, ktorá môže mať zásadný vplyv na kvalitu riadiaceho procesu. Dynamická chyba (časť 2.3.1.3) závisí od časových konštánt, zosilnenia a priebehu zmeny vstupnej veličiny. Snímače teploty sú spravidla chránené pred nepriaznivými účinkami prostredia ***ochrannými puzdrami***, a tak ich oneskorenie výstupného voči vstupnému signálu závisí od materiálu puzdra (špecifická vodivosť tepla vedením, jeho rozmery), od povrchu puzdra a jeho kvality (špecifická vodivosť tepla prúdením) a od druhu prúdenia meraného prostredia. Puzdra snímačov teploty tvoria sústavu s minimálne dvoma tepelnými kapacitami, čo spôsobuje pomerne veľké časové oneskorenie, preto stena ochranného puzdra by mala byť čo najtenšia, pokiaľ to neohrozí činnosť meracieho člena a bezpečnosť prevádzky.

Najčastejšie používané snímače teploty využívajú ***teplotnú závislosť odporu kovových*** a ***polovodičových materiálov*** alebo ***Seebeckov jav*** (termoelektrické články). Ďalšie, tzv. ***dilatačné snímače teploty*** sa uplatňujú pre svoju relatívne nízku cenu najmä v komerčných tepelných zariadeniach, ako sú domáce elektrické spotrebiče (napr. chladničky, práčky, žehličky). ***Kryštálové (frekvenčné) teplomery*** vyhodnocujú zmenu rezonančnej frekvencie kryštálu vplyvom meranej teploty (rozsah -80 až +250 °C, rozlíšenie až 10^{-4} °C) a sú vhodné pre kalibračné alebo etalónové prístroje. V automatizačných prostriedkoch sa používajú aj ***senzory teploty*** (pozri terminológiu *snímač-senzor*, kap. 1.) najmä pre menej náročné merania, avšak často už v integrovaných formách spolu s meracím prevodníkom.

Snímače teploty možno rozdeliť do dvoch základných skupín:

- ***dotykové:***
  - elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, polovodičové s PN prechodom, termoelektrické),
  - dilatačné (bimetalové, tlakové, sklenené),
  - špeciálne (akustické, šumové, tekuté kryštály, teplomerné farby).
- ***bezdotykové:***
  - pyrometre (napr. jasové, radiačné, fotoelektrické),
  - termovízia,
  - infrafotografia.

Pre účely automatického riadenia sa snímače a meracie členy teploty používajú na jej priame a diaľkové meranie, monitorovanie a regulačné úlohy hlavne v rozsahu -200 až +1300 °C. V praxi prevládajú

- odporové snímače teploty (*Resistance Temperature Detectors,* RTD),
- termočlánky (*Thermocouples,* TC),
- integrované senzory teploty (*Integrated Sensors for Temperature,* IST).

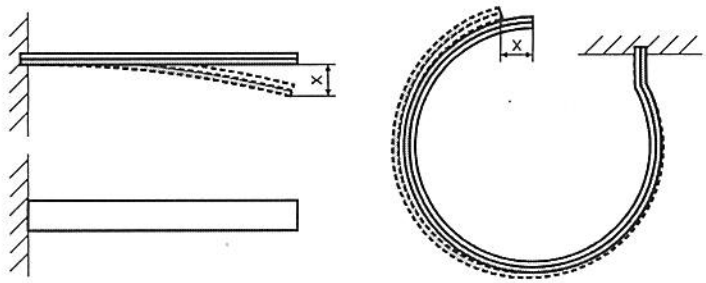
3.2 Snímače pre dotykové meranie teploty

3.2.1 Dilatačné snímače teploty

Činnosť ***dilatačných snímačov teploty*** je založená na rozťažnosti látok všetkých skupenstiev. Zmenou teploty látok dochádza ku zmene ich objemu, resp. rozmeru a vyvolaný účinok (sila, posuv) sa spracováva ako informácia o teplote. Tieto snímače alebo meracie členy pracujú hlavne s výstupným signálom logického alebo binárneho charakteru. Podľa použitého materiálu možno hovoriť o dilatačných snímačoch

- s plynovou náplňou,
- s kvapalnou náplňou,
- s pevnou látkou (tzv. dvojkov).

Najčastejšie sa používajú vhodne vytvarované ***dvojkovy (bimetaly)***, ktoré sa skladajú z dvoch vrstiev rôznych kovov s rozdielnym koeficientom teplotnej rozťažnosti (obr. 3.1). Vhodný pasívny materiál (s malou rozťažnosťou) predstavujú zliatiny Fe-Ni (invar) a aktívny materiál (s veľkou teplotnou rozťažnosťou) sa obvykle vytvára zo zliatiny Cu-Ni alebo Fe-Ni iného pomeru ako invar.



Obr. 3.1. Princíp činnosti bimetalového snímača teploty a jedno konštrukčné vyhotovenie

V mnohých technických aplikáciách (napr. automatické práčky) sa používajú ***tlakové teplomery*** s teplomerným médiom (najčastejšie na báze liehu) v uzavretom objeme, ktorého tlak reprezentuje hodnotu sledovanej teploty.

3.2.2 Odporové kovové snímače teploty

Odporové snímače teploty sú založené na princípe zmeny elektrického odporu v závislosti od teploty. Pri elektrických vodičoch odpor s rastúcou teplotou rastie a pri polovodičoch zvyčajne klesá (obr. 3.2). Odporové kovové teplomery sú vo všeobecnosti určené na meranie ***teplôt v rozsahu od -200 do +1000 °C***. K základným požiadavkám na materiál odporových snímačov teploty patrí dostatočne veľká hodnota a stálosť teplotného koeficienta odporu a minimálna hodnota špecifického odporu samotného vodiča.

Pre pomerne ***malý rozsah teplôt od 0 °C do 100 °C (presnosť merania okolo 1 %)*** možno určiť strednú hodnotu koeficienta odporu kovu podľa vzťahu

$$R = R_0(1+\alpha\vartheta) \tag{3.1}$$

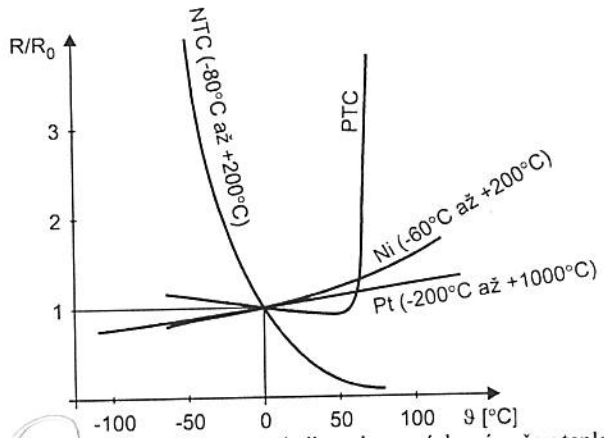
kde α [K^{-1}] je teplotný koeficient odporu, pričom

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \tag{3.2}$$

kde R_{100} je odpor pri teplote $\vartheta = 100$ °C,
R_0 odpor pri teplote $\vartheta = 0$ °C.

Pre väčšie rozsahy teplôt platia nelineárne rovnice v závislosti od použitého materiálu.

Z kovových materiálov sa pri výrobe snímačov teploty uplatňuje najmä ***platina***, pre menej náročné aplikácie aj ***nikel, meď*** a ***molybdén***. Na obr. 3.2 sú naznačené normované charakteristiky (0 °C, 100 Ω) vybraných kovových a polovodičových materiálov vhodných pre odporové snímače teploty. Platinu charakterizuje mimoriadna chemická odolnosť, stabilnosť parametrov, vysoká teplota tavenia a známa technológia na dosiahnutie vysokej čistoty. Pre snímače teploty sa používa tzv. ***fyzikálne čistá*** platina, ktorej čistota sa pohybuje od 99,93 % do 99,99 %.

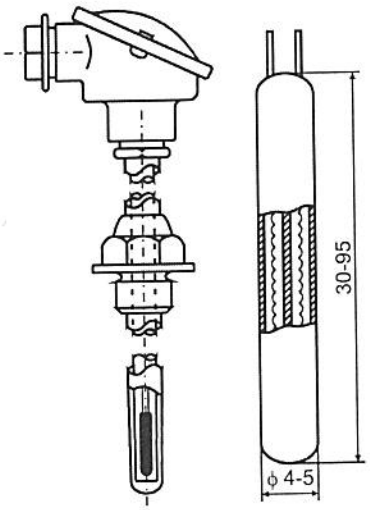


Obr. 3.2. Prevodové charakteristiky odporových snímačov teploty Pt-platinový, Ni-niklový, PTC-pozistor, NTC-negastor, termistor

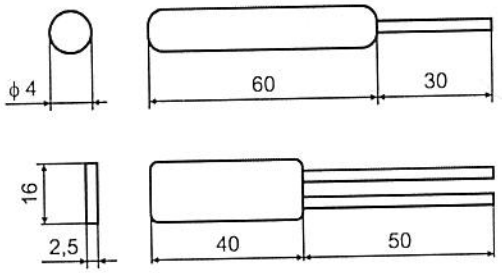
Meracie odporové články, ktoré tvoria základnú konštrukčnú časť snímača, sa vyrábajú

- drôtikovou technológiou (v súčasnosti najčastejšie riešenie),
- tenkovrstvovou technológiou,
- hrubovrstvovou technológiou.

Drôtikový merací odpor je vytvorený špirálovito stočeným platinovým drôtikom (priemer od 0,01 mm do 0,05 mm) zataveným do keramického alebo sklenéného telieska. Ich celkové usporiadanie reprezentujú hlavne keramické (valčekové) alebo ploché meracie články.



Obr. 3.3. Platinový odporový snímač teploty Pt100, konštrukčné usporiadanie a merací článok

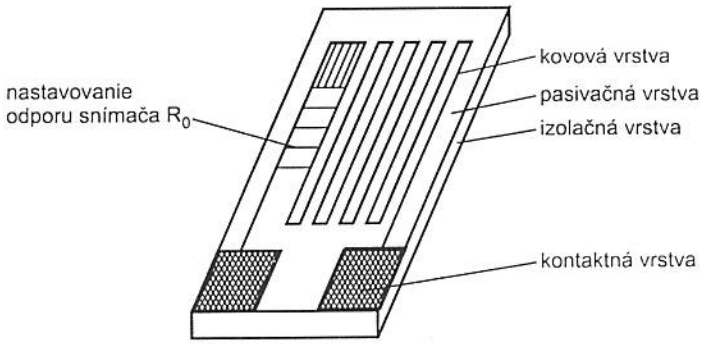


Obr. 3.4. Príklady keramických platinových meracích odporov Pt 100, ich rozmery

Keramické meracie odpory sa skladajú z valčeka s dvoma (jednoduché meracie odpory), alebo štyrmi (dvojité meracie odpory) kanálikmi, v ktorých sú uložené špirálky z platinového drôtu.

Ku stenám valčeka sú upevnené sklovinou s vysokým bodom tavenia. Na jednom konci telieska sú špirálky privarené k striebornému drôtu s priemerom, napr. 0,4 mm (zanedbateľný odpor prívodov) alebo k plochému drôtu (0,7 x 0,1) mm zo špeciálnej zliatiny (odpor prívodov je v tomto prípade vyznačený na štítku MČ), ktoré tvoria vývody. Na opačnom konci telieska sú špirálky vodivo spojené (obr. 3.3). Iné usporiadanie predstavuje navinutý drôtik na pertinaxovej alebo sľudovej podložke.

Tenkovrstvovou technológiou sa realizujú platinové snímače teploty na podložke Al_2O_3 (korundová keramika) technikou naparovania a iontovým leptaním. Príklad usporiadania je na obr. 3.5.



Obr. 3.5. Tenkovrstvový odporový senzor teploty

Čistota platiny pre prevádzkové teplomery je určená podmienkou pre tzv. redukovaný odpor W_{100} (v ITS-90 $W(T_{90})$)

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1{,}385 \qquad (3.3)$$

kde R_{100} je odpor pri teplote $\vartheta = 100$ °C,

R_0 odpor pri teplote $\vartheta = 0$ °C.

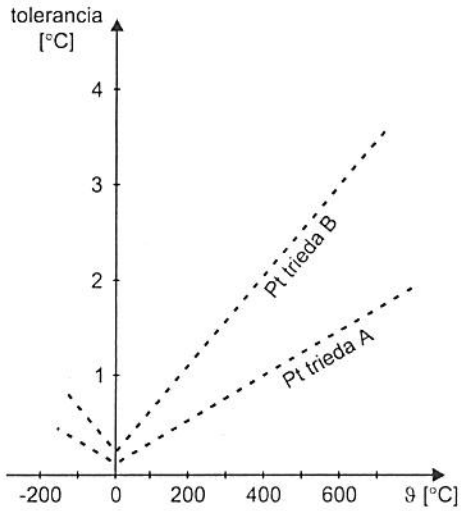
Tejto hodnote vyhovuje už čistota platiny okolo 99,93 %. Pre špecializované interpolačné prístroje (napr. etalónový teplomer pre ITS-90) sú na čistotu platiny prísnejšie požiadavky – až 99,999%.

Pre prevádzkové platinové snímače teploty je dôležitá ***zameniteľnosť*** umožňujúca zostavovať meracie obvody zo snímačov a prevodníkov tak, aby bolo možné merať s chybami v určitých dohodnutých medziach bez overovania presnosti meracieho kanála (napr. aj pri výmene snímača). Z tohto dôvodu boli národnými normami určené základné parametre platinových meracích odporov, vrátane prípustných odchyliek (napr. u nás dlho platná ČSN 356720). V súčasnosti, v rámci harmonizácie noriem, sú určujúce normy IEC, preto podľa normy IEC 751 (STN 25 8306 Prevádzkové odporové snímače teploty) sa platinové meracie odpory (W_{100}=1,385) delia na dve tolerančné triedy (obr. 3.6.). ***Trieda A*** je určená pre rozsah od -200 °C do 650 °C a ***trieda B*** pre rozsah teploty od -200 °C do 850 °C. Štandardná hodnota odporu snímača ***Pt 100 pri 0 °C je 100 Ω***. Okrem toho sa vyrábajú snímače typu Pt 50, 200, 500, 1000 a 2000 Ω. Pre merací rozsah od -200 °C do 850 °C platí pre prevodovú charakteristiku Pt 100 vzťah

$$R_\vartheta = R_0\left[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C(\vartheta - 100)\vartheta^3\right] \tag{3.4}$$

kde je (podľa IEC)

W_{100} = 1,385, R_0 = 100 Ω,
ϑ teplota v °C,
A konštanta ($3{,}90802.10^{-3}$ K^{-1}),
B konštanta ($-5{,}802.10^{-7}$ $1\ K^{-1}$),
C konštanta ($-4.27350.10^{-12}\ K^{-4}$) pre $\vartheta < 0$ °C,
$C = 0$ pre $\vartheta > 0$ °C.



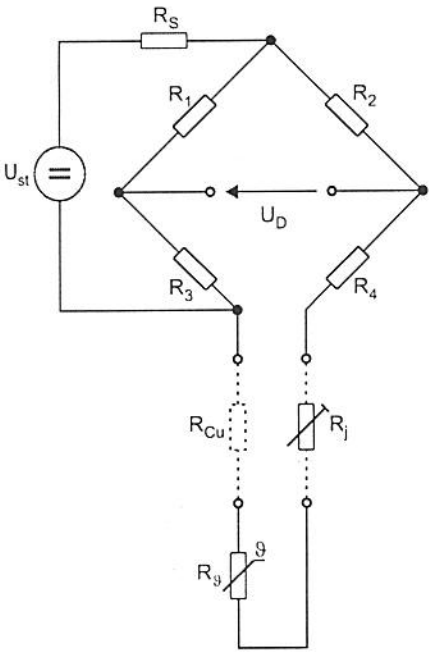
Obr. 3.6. Tolerancie Pt meracích odporov podľa IEC

Chyba pri 0 °C v tolerančnej ***triede A*** má hodnotu ± 0,125 °C, t.j. ± 0,06 Ω a ± 0,25 °C, t.j. ± 0,12 Ω v ***B triede***. Tolerančné priamky (hranice) sú na obr. 3.6. Dlhodobá stabilita Pt meracích odporov závisí na čistote materiálu a pohybuje sa pri prevádzkových snímačoch okolo 0,05 %/1000 h. *U. S. Standard* predpisuje pre snímače čistejšiu platinu (pre W_{100}= 1,391), preto sú interpolačné rovnice a tolerančné priamky iné ako podľa IEC. Okrem uvedených rozsahov teplôt vyrábajú sa aj "vysokoteplotné" snímače do teploty 1100 °C.

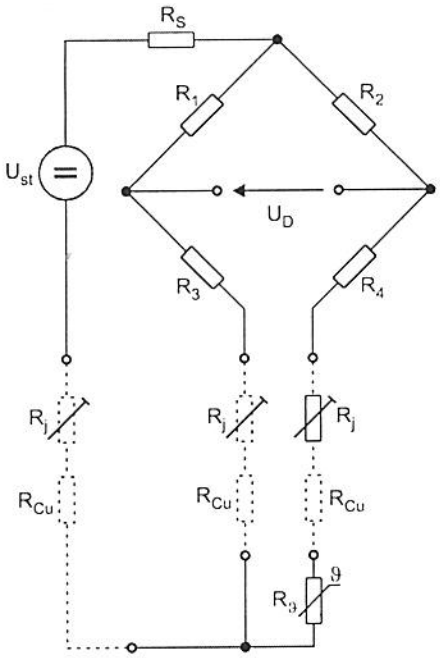
3.2.2.1 Vyhodnocovacie obvody odporových snímačov teploty

Meracie (vyhodnocovacie) obvody odporových snímačov teploty predstavujú hlavne nevyvážené Wheatstonove mostíky, pričom merací odpor R_ϑ je zapojený do jednej vetvy odporového mostíka. Jeho zmena vplyvom teploty spôsobuje rozváženie mostíka, ktoré sa prejavuje zmenou výstupného napätia U_D. Odporové platinové snímače sa vyrábajú s dvoma alebo štyrmi vývodmi. Pri prevedeniach s dvoma vývodmi sa používa tzv. dvojvodičové (obr. 3.7.) a trojvodičové (obr. 3.8.) pripojenie snímača k vyhodnocovaciemu obvodu. Pri presných meraniach teploty (pod 0,5 %) je potrebné použiť štvorvodičové zapojenie (obr. 3.9).

V uvedených schémach je U_{st} stabilizovaný zdroj napätia, R_J je justačný, resp. vyrovnávajúci odpor, R_ϑ je merací odpor (platinový), R_{Cu} je náhradný odpor vedenia. Odpor prívodného vedenia R_V (tj. skutočný odpor vedenia R_{Cu} a vyrovnávací odpor R_J) je vo výrobe pri vyvažovaní mostíka nastavený na hodnotu R_V = 20 Ω alebo 50 Ω. Preto je nutné pri montáži takto usporiadaných meracích členov skutočný odpor medeného vedenia R_{Cu} doplniť na požadovanú hodnotu R_V vyrovnávacím odporom R_j (pri dvojvodičovom zapojení, pri trojvodičovom zasa na rovnakú hodnotu vo všetkých prívodných vetvách, ako je uvedené v pokynoch výrobcu).



Obr. 3.7. Dvojvodičové zapojenie snímača Pt 100



Obr. 3.8. Trojvodičové zapojenie snímača Pt 100

Pre vyvážený mostík (napr. spodný bod rozsahu, stred, horný bod rozsahu) platia za predpokladu, že $R_1 = R_2$, tieto vzťahy

- pre dvojvodičové zapojenie odporového teplomera : $R_4 + R_\vartheta + R_V = R_3$
- pre trojvodičové zapojenie odporového teplomera : $R_4 + R_\vartheta + R_V = R_3 + R_V$

Ak sa zavedie

pre dvojvodičové zapojenie : $R_4' = R_4 + R_\vartheta + R_V$

$R_3' = R_3$

pre trojvodičové zapojenie : $R_4' = R_4 + R_\vartheta + R_V$

$R_3' = R_3 + R_V$

potom pre vyvážený mostík s odpormi R_1, R_2, R_3, R_4 platí $R_1.R_4 = R_2.R_3$, čiže pre mostíky na obr. 3.7 a 3.8

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3'}{R_4'} \tag{3.5}$$

a pre dvojvodičové zapojenie

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4 + R_\vartheta + R_v} \tag{3.6}$$

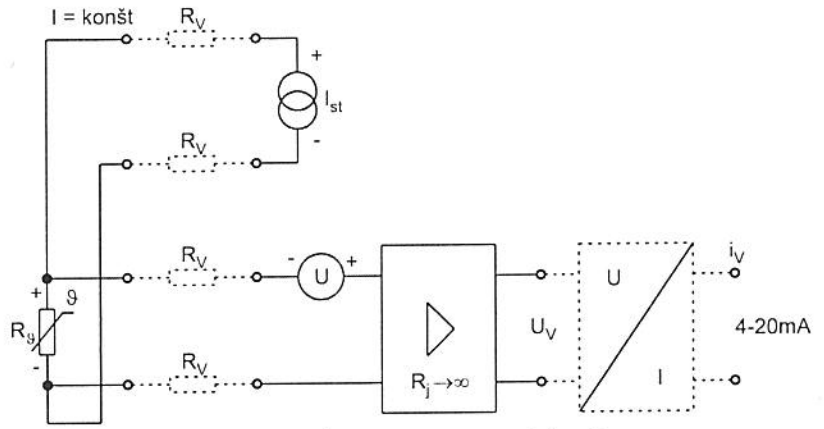
a trojvodičové zapojenie

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3 + R_v}{R_4 + R_\vartheta + R_v} \tag{3.7}$$

Z posledných rovníc vyplýva, že ***pri dvojvodičovom zapojení*** sa uplatní odpor prívodných vedení R_V, ale najmä jeho zmena vplyvom zmien teploty okolia, pri sledovaní výslednej zmeny odporu R_4'. Táto chyba merania dosahuje hodnoty až ± 0,5 °C. Vplyvom teplotnej závislosti odporu R_{Cu} medeného vedenia je zrejmé, že dvojvodičové zapojenie je použiteľné len pre ***kratšie vzdialenosti*** a ***vyššie teploty,*** kde reatívna mutiplikatívna chyba dosahuje menšie hodnoty. Pri meraní ***teplôt blízkych teplotám okolia*** (napr. od –20 °C do 100 °C) a ***pre väčšie vzdialenosti*** snímača od vyhodnocovacieho prístroja (od mostíka) je nutné použiť ***trojvodičové pripojenie***, ktoré potláča vplyv prívodných vedení (neúplne, vzťah 3.7), čo väčšinou vyhovuje pri požadovanej presnosti okolo 1 %.

Vplyv odporu prívodných vedení sa neuplatní pri ***štvorvodičovom zapojení*** odporového kovového snímača teploty (obr. 3.9) za predpokladu, že $R_i > 10^5\ \Omega$ (vstupný odpor OZ). Potom pre zapojenie štvorvodičového meracieho obvodu so zdrojom konštantného prúdu I_{st} a pomocným zdrojom napätia U platí

$$U_v = I_{st}.(R_{\vartheta p} - \Delta R_\vartheta) + U \tag{3.8}$$



Obr. 3.9. Štvorvodičový merací obvod

Ak platí, že $U = I_{st}.R_{\vartheta p}$, kde $R_{\vartheta p}$ je počiatočná hodnota odporu snímača (spodný bod rozsahu teploty), je možné nastaviť pomocou U počiatok stupnice rozsahu, čiže

$$U_v = I_{st} \cdot R_\vartheta$$

V uvádzaných vyhodnocovacích zapojeniach musí z princípu činnosti pretekať meracím odporom prúd, ktorý spôsobuje ***chybu merania vplyvom ohrievania samotného snímača.*** Chybu možno vyjadriť vzťahom

$$\Delta\vartheta = \frac{R_t \cdot I^2}{D} \tag{3.9}$$

kde D [$W.K^{-1}$] je zaťažovacia konštanta.

Z tohto dôvodu výrobcovia udávajú maximálny prípustný prúd pre nimi vyrábaný odporový snímač teploty, napr. pre Pt 100 (pri 0 °C) najčastejšie ***10 mA.*** Ak sa však vyžaduje chyba merania menšia ako 0,1 °C, nesmie byť merací prúd väčší ako ***1 mA.***

V súčasnej dobe sa na vyhodnotenie odporových snímačov teploty používajú aktívne mostíky, tj. mostíky zapojené v odporovej sieti operačného zosilňovača. Na obr. 3.10. je príklad takéhoto zapojenia. Pre výstupné napätie U_z neinvertujúceho zapojenia ideálneho operačného zosilňovača za predpokladu $R_{v1} = R_{v2} = R_{v3} = R_v$ platí

$$U_z = U_{st} \frac{2R_v + R_\vartheta + R_3}{R_3}$$

Pri uvažovaní veľkého vstupného odporu zosilňovača ($R_i \geq 10^6\,\Omega$) platí pre napätie na odpore R_2

$$U_{R2} = \frac{U_z \cdot R_2}{R_1 + R_2} = U_{st} \frac{(2R_v + R_\vartheta + R_3)R_2}{R_3(R_1 + R_2)}$$

Pre napätie U_A platí

$$U_A = U_{st} + \frac{U_{st}}{R_3} R_v = U_{st} \frac{R_3 + R_v}{R_3}$$

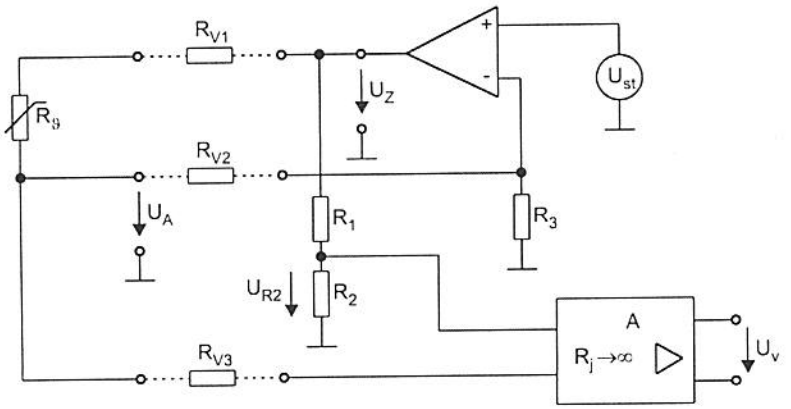
a pre výstupné napätie

$$U_v = A\,(U_{R2} - U_A) = A \cdot U_{st} \frac{R_v R_2 - R_v R_1 + R_\vartheta R_2 - R_3 R_1}{R_3(R_1 + R_2)}$$

Ak platí, že $R_1 = R_2 = R$, potom

$$U_v = A \cdot U_{st} \frac{R_\vartheta \cdot R_3}{2R_3},$$

čiže ***vplyv prívodného vedenia sa neuplatní.***



Obr. 3.10. Trojvodičové zapojenie odporového snímača teploty v aktívnom mostíku ($R_v = R_{CU}$)

Nakoniec pre $R_3 = R_{\vartheta z}$ a voľbu $R_\vartheta = R_{\vartheta z} + \Delta R_\vartheta$ nadobudne výsledný vzťah tvar lineárnej závislosti

$$U_v = A \cdot U_{st} \frac{\Delta R_\vartheta}{2R_{\vartheta z}}$$

Ďalší kovový materiál vhodný na realizáciu odporových teplomerov je ***nikel***. Používa sa pre rozsah teplôt od -60 do +150 °C, krátkodobo do 180 °C, pretože medzi 300 a 400 °C vykazuje štruktúrne zmeny, ktoré spôsobuje nevratné zmeny odporu. Nikel však neodoláva kyselinám a čpavku. Jeho výhodu prezentuje vyšší teplotný koeficient odporu ako má platina a je lacnejší, čo býva v mnohých prípadoch rozhodujúce pre jeho použitie.

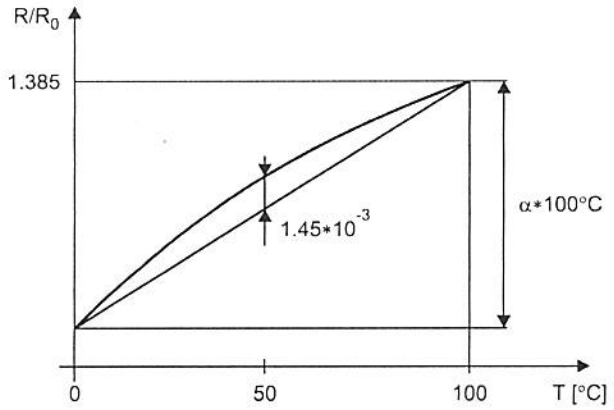
3.2.2.2 Linearizácia charakteristík kovových odporových snímačov teploty

Na obr. 3.11 je naznačená statická charakteristika odporového snímača Pt 100 pre rozsah 0°C až 100 °C. Pre tento rozsah sa obyčajne zanedbáva chyba linearity, čo nemusí platiť pri prísnejšej požiadavke na presnosť merania. Z obrázku je jasné, že pre stred rozsahu, tj. pre 50 °C absolútna chyba linearity dosahuje hodnotu $\Delta(R/R_0) = 1{,}45.10^{-3}$ a relatívna hodnota aditívnej chyby merania

$$\delta = \frac{\Delta\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\frac{R_{100}}{R_0}} \cdot 100 = 0{,}377 \quad [\%]$$

z čoho vyplýva, že pri požiadavke na presnosť menšej ako 0,5 % sa vyžaduje linearizácia prevodovej charakteristiky MČ so snímačom Pt 100. V zásade to rieši výrobca v rámci

spracovania signálu v meracom prevodníku (analógovo alebo číslicovo v IMČ), o čom je vhodné sa presvedčiť v katalógovom liste.



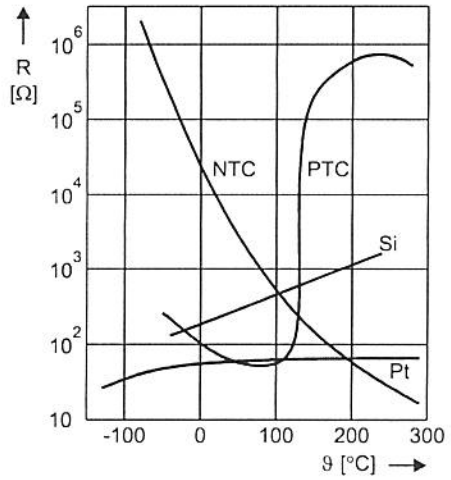
Obr. 3.11 Závislosť odporu Pt 100 pre rozsah teplôt od 0 °C do 100 °C

3.2.3 Odporové polovodičové snímače teploty

Polovodičové odporové snímače teploty využívajú, podobne ako kovové, závislosť odporu na teplote. Hodnota teplotného koeficienta odporu polovodičov býva niekoľkonásobne väčšia ako pri kovoch, pričom podľa jeho charakteru sa tieto prvky delia na:

- ***termistory*** – negastory,
  – pozistory,
- ***monokryštalické*** odporové snímače.

V priemyselnej automatizačnej technike sa používajú na priame meranie teploty len ***termistory – negastory*** *(NTC, Negative Thermal Coefficient)* vzhľadom na zložité pracovné prostredia (striedavé tepelné namáhanie, vlhkosť, otrasy, a pod.), v ktorom dosahujú dostatočnú opakovateľnosť merania. Ostatné polovodičové snímače plnia túto úlohu len v odôvodnených prípadoch, a to najmä pri sledovaní teploty ako poruchovej veličiny v aktívnych automatizačných prvkoch.



Obr. 3.12 Prevodové charakteristiky polovodičových snímačov teploty

Negastory sú termistory so záporným teplotným koeficientom odporu. Vyrábajú sa práškovou technológiou zo zmesi oxidov kovov (napr. $Fe_2O_3 + TiO_2$, MnO + CoO a pod.) a spevňujú sa zlisovaním za vysokých teplôt. Teplotné rozsahy termistorov sa pohybujú od bežných -50 °C do 150 °C až do extrémnych rozsahov v oblastiach nízkych teplôt od 4,2 K a vysokých teplôt do 1000 °C. Závislosť odporu negastora na teplote, tj. jeho fyzikálna prevodová charakteristika, je daná približným vzťahom

$$R = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

a po úprave

$$\frac{R_1}{R_2} = e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \qquad (3.10)$$

čo je vhodnejší tvar pre výpočet jedného z parametrov. Na usporiadanie termistorov napr. v katalógoch sa používa výraz vztiahnutý na referenčnú hodnotu teploty T_r

$$R_1 = R_r e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r}\right)} \qquad (3.11)$$

kde R_1 [Ω] je odpor termistora pri teplote T_1,
R_2 [Ω] odpor termistora pri referenčnej teplote T_2,
R_r [Ω] odpor termistora pri referenčnej teplote Tr,
B [K] teplotná konštanta (závisí od materiálu),
A [Ω] konštanta závislá na geometrickom tvare materiálu.

Konštanta B v skutočnosti nie je konštantou, lebo jej hodnota mierne vzrastá s teplotou.

Výrobcovia v Európe udávajú hodnotu B pre teplotu ϑ_1 = 25°C; ϑ_2 = 85°C (t.j. T_1 = 298,15 K; T_2 = 358,15 K). Nepresnosť výrazu (3.10) spôsobuje absolútnu chybu v rozmedzí teplôt 0°C až 100°C

$$\Delta \leq |1{,}5°C|$$

Pre presnejšie vyjadrenie teplotnej závislosti možno použiť vzťah

$$1/T = a + b \cdot \log R + c[\log(R)]^3 \tag{3.12}$$

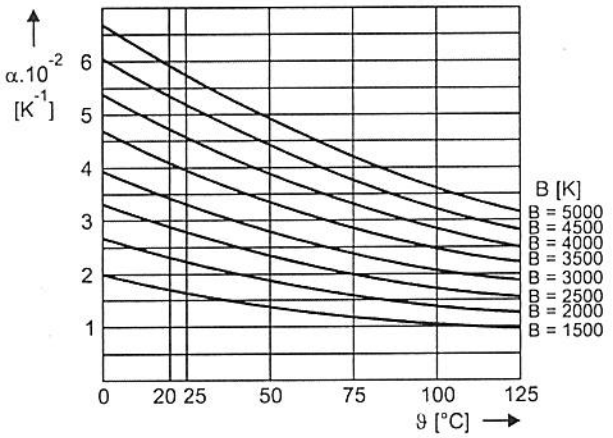
kde *a, b, c* sú konštanty a určujú sa pri teplotách 25 °C, 40 °C a 70 °C. Podľa vzťahu (3.12) je možné merať teploty v rozsahu od -50 °C do +150 °C s chybou ± 0,15 K a v rozsahu od 0 °C do 100 °C s chybou ± 0,1 K.

Teplotný koeficient odporu termistorov je daný výrazom

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{dT} \tag{3.13}$$

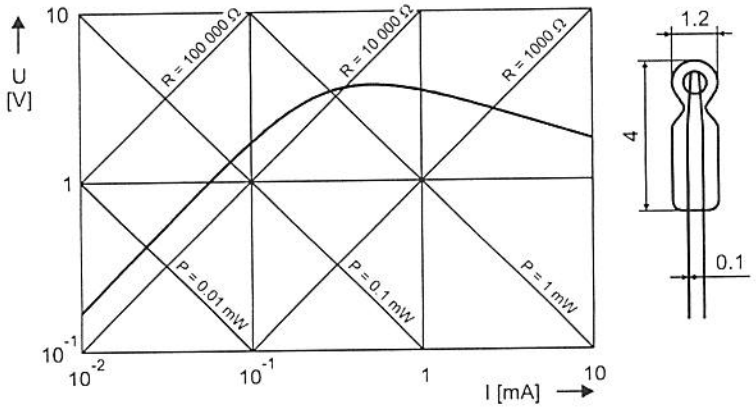
Dosadením z rovnice (3.10) pre teplotný koeficient odporu (obr.3.13) platí

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \tag{3.14}$$



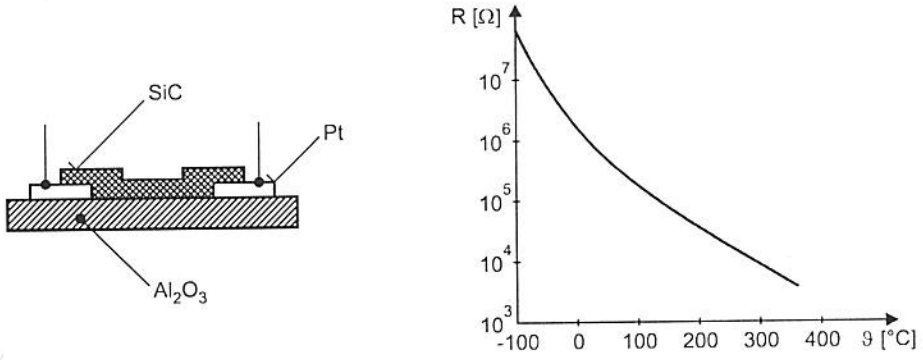
Obr. 3.13. Závislosť α na teplote a materiálovej konštante B

Ak termistorom preteká ***elektrický prúd*** (napr. pri meraní jeho odporu) dochádza ku zvýšeniu jeho teploty a rov. 3.10 neplatí. Odpor termistora je potom funkciou prechádzajúceho prúdu *I*, tj. funkciou teploty prostredia *Tp* a funkciou koeficientu prestupu tepla medzi termistorovým snímačom a meraným prostredím, čo možno vyjadriť, napr. aj voltampérovou charakteristikou termistora (obr. 3.14) alebo rov. 3.18.



Obr. 3.14. Voltampérová charakteristika termistora v nepohyblivom vzdušnom prostredí a konštrukčné riešenie termistora

Na obr. 3.15 je naznačená štruktúra a prevodová ***charakteristika tenkovrstvového negastora SiC na podložke Al_2O_3.*** Tento polovodičový senzor, ktorý sa vyrába technológiou IO - naparovaním, je vhodný pre teploty od -100 °C do +450 °C. Referenčná hodnota odporu SiC senzora pri 25 °C sa pohybuje v rozpätí (1600 až 3400) MΩ.



Obr. 3.15. Senzor teploty SiC a jeho prevodová charakteristika

Pozistory *(PTC)* sú termistory s kladným teplotným koeficientom odporu. Vyrábajú sa z polykryštalickej feroelektrickej keramiky, napr. z titaničitanu bárnatého ($BaTiO_3$). Odpor pozistora so stúpajúcou teplotou najprv mierne klesá (obr. 3.2 a 3.12), potom prudko rastie (cca o 3 rády) a nakoniec opäť mierne klesá. Referenčná hodnota zlomu ϑ_l je voliteľná podľa chemického zloženia od 60 °C do 180 °C. Pozistory sa obvykle používajú ako snímače s binárnym výstupom napr. pri signalizácii prekročenia maximálne prípustnej teploty.

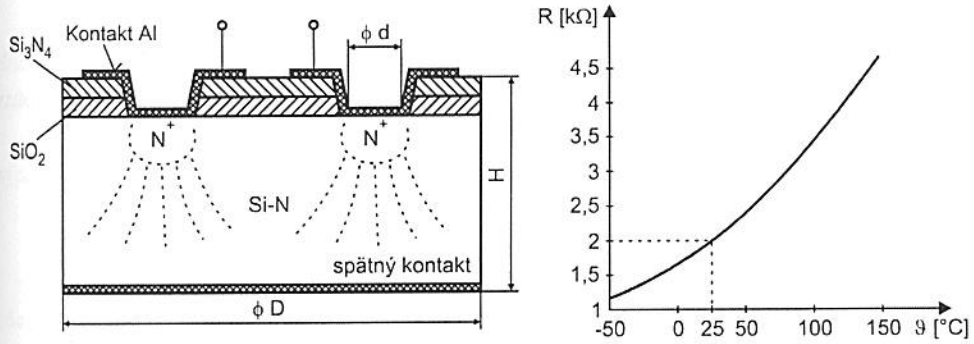
Polovodičové monokryštalické senzory teploty sa zhotovujú z kremíku, germania, india a ich zliatin. V priemyselnej praxi sa sériovo vyrábajú *Si* senzory pre meranie teplôt v rozsahu od -50 °C do +150 °C. Odpor senzora sa s teplotou zvyšuje podobne ako u kovov, ale jeho prevodová charakteristika má tvar paraboly

$$R = R_r + k(\vartheta - \vartheta_r)^2 \qquad (3.15)$$

kde R_r je odpor senzora pri referenčnej teplote ϑ_r.

Pre kremíkové senzory obvykle platí, že ϑ_r = -241,52 °C, R_r = 16 Ω a k = 2,7931.10^{-2} Ω.K^{-2}. Potom odpor senzora R_{25} = 2000 Ω a pre stredný teplotný koeficient odporu α (pozri kovové snímače) platí

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot k \cdot R_0} = 0{,}01 \quad \left[K^{-1}\right]$$

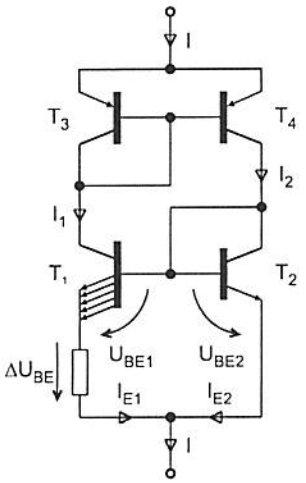


Obr. 3.16. Štruktúra Si senzora teploty a jeho prevodová charakteristika

Diodové senzory teploty využívajú teplotnú závislosť úbytku napätia na dióde, ktorou preteká konštantný prúd. Meracie členy s diódovým senzorom pracujú s chybou linearity (0,5 až 1,5) %, podľa požadovaného teplotného rozsahu. ***Tranzistorové senzory teploty*** sú podobné diódovým, t.j. sú založené na závislosti napätia U_{BE} (báza–emitor) na teplote tranzistora, tj. na teplote okolia. V súčasnosti sa v oblasti komerčných zariadení a prístrojov presadzujú ***integrované senzory teploty*** (*IST*), pri ktorých senzory a elektronické vyhodnocovacie obvody tvoria jeden monolitický prvok. Príklad takéhoto senzora teploty s PN prechodom je na obr. 3.17. Teplotne citlivé PN priechody tranzistorov reprezentujú BE (báza–emitor) priechody tranzistorov T_1 a T_2. Tieto tranzistory sú napájané dvoma zhodnými prúdmi I_1 a I_2 z tzv. prúdového zrkadla tvoreného tranzistormi T_3 a T_4. Pre výsledný prúd I platí

$$I = K \cdot T$$

kde K je konštanta integrovaného senzora.



Obr. 3.17. Integrovaný polovodičový senzor teploty

3.2.3.1 Vyhodnocovacie obvody pre odporové polovodičové snímače teploty

Na vyhodnocovacie obvody meracích členov s polovodičovými odporovými snímačmi sú kladené nasledovné požiadavky:

- minimalizácia vplyvu meraného prúdu, tj. prúdu prechádzajúceho snímačom (senzorom),
- analógová alebo číslicová linearizácia.

Prechodom meracieho prúdu odporovým senzorom teploty, napr. pri vyhodnocovaní odporu mostíkovou metódou, dochádza ***ku chybe merania vplyvom oteplenia senzora***. Chybu je možné vyjadriť vzťahom (podobne ako pri kovových odporových snímačoch)

$$\Delta T = \frac{RI^2}{D} \tag{3.16}$$

kde D [W.K^{-1}] je zaťažovacia konštanta, čiže

$$D = \frac{P}{\Delta T} \quad [W \cdot K^{-1}; W; K] \tag{3.17}$$

Zaťažovacia konštanta D vlastne reprezentuje elektrický príkon potrebný na zvýšenie teploty odporového senzora o $\Delta T = 1K$ nad teplotu okolitého prostredia. Konštanta D závisí na viacerých fyzikálnych veličinách prostredia a na prestupe tepla do tohoto prostredia, teda aj na geometrických rozmeroch snímača.

Vo všeobecnosti pre závislosť odporu senzora na pracovnom prúde platí

$$R = f(I)_{\vartheta_p} = f(S, \alpha, \lambda, c, \rho, w, \vartheta_p, \ldots)_{\vartheta_p} \tag{3.18}$$

kde S je vonkajší povrch senzora,
α koeficient prestupu tepla,
λ tepelná vodivosť prostredia,
c špecifická tepelná kapacita prostredia,
ρ hustota prostredia,
w rýchlosť prúdenia prostredia,
ϑ_p teplota prostredia.

Hodnoty zaťažovacích konštánt väčšina výrobcov uvádza len pre prostredie neprúdiaceho vzduchu.

Pri návrhu termistorového meracieho člena teploty sa uplatní ***zaťažovacia konštanta D*** pri výpočte dovoleného prúdu pre prípustnú chybu oteplením

$$I_{dov} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta \cdot D}{R}} \tag{3.19}$$

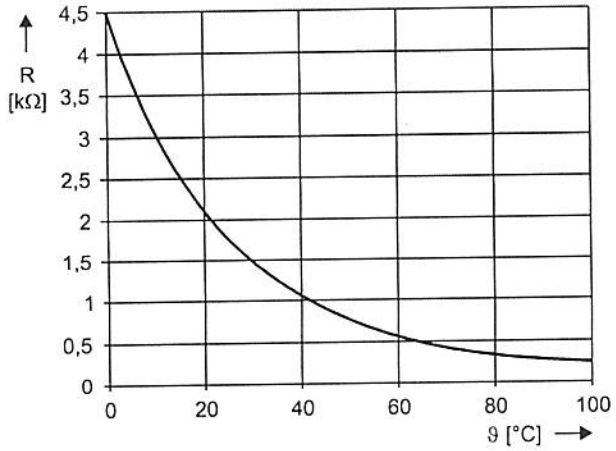
kde R je maximálny odpor snímača v rámci daného rozsahu teplôt.

Pre porovnanie, pri snímačoch typu Pt 100 (R_0 = 100 Ω) je pri maximálnej dovolenej chybe oteplením (0,1 °C) $I_{dov} \leq 1$ mA. Pri termistoroch, ktorých hodnoty odporov sú rádovo v kΩ, maximálny merací prúd vychádza rádovo v μA. Vyhodnocovacie obvody termistorových meracích členov sú štrukturálne podobné ako obvody s platinovými meracími odpormi, len ich návrh býva zložitejší. Základnou nevýhodou termistorov pri meraní teplôt je ich nelineárna závislosť odporu na teplote.

3.2.3.2 Linearizácia charakteristiky polovodičového snímača teploty

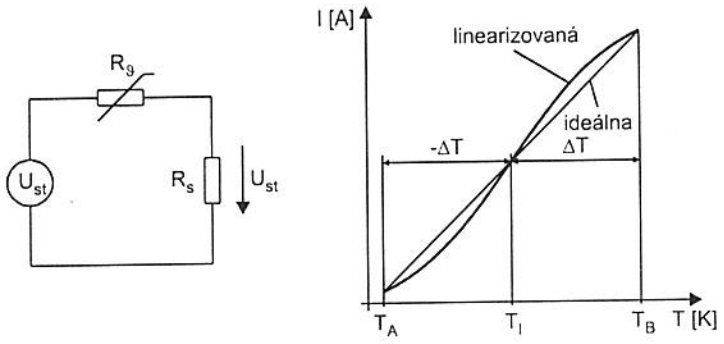
Prevodová charakteristika ***termistora*** so záporným teplotným koeficientom odporu – ***negastora***, vhodného na riešenie meracieho člena teploty, je na obr. 3.18. Jej charakter je zásadne nelineárny, preto pri spojitom vyhodnocovaní teploty sa vyžaduje linearizácia prevodovej charakteristiky meracieho člena ako celku. Charakteristiky polovodičových snímačov majú spravidla konkávny priebeh, a preto na linearizáciu celkového zapojenia sú vhodné metódy spočívajúce v pripojení paralelnej, sériovej alebo sériovoparalelnej kombinácie teplotne nezávislých odporov R_S so senzorom teploty R_ϑ.

Schéma linearizačného zapojenia senzora teploty a sériového odporu s priebehom už upravenej závislosti prúdu I a teploty ϑ pre negastor, je na obr. 3.19. Ako reprezentatívny príklad je uvedená linearizácia sériovým odporom R_S, pričom U_{st} predstavuje zdroj stabilizovaného napájacieho napätia.



Obr. 3.18. Teplotná závislosť odporu negastora

Riešenie spočíva v dimenzovaní odporu R_S tak, aby linearizovaná charakteristika obsahovala inflexným bod (T_I) , ktorého umiestnenie v rámci meracieho rozsahu je voliteľné.



Obr. 3.19. Linearizácia negastoru sériovým odporom

Týmto spôsobom možno dosiahnuť ***potlačenie chyby linearity z hodnoty niekoľkých desiatok percent na hodnotu niekoľkých percent, i menej***. Analogicky možno použiť aj ďalšie kombinácie teplotne nezávislých odporov, pričom pri sério-paralelnom zapojení sa rozšíri lineárne pásmo. Všetky uvedené metódy však ***potláčajú pôvodnú citlivosť samotného snímača***.

Ďalšia nevýhoda termistorových senzorov teploty je ich ***časová nestálosť*** určená vzťahom (napr. za rok)

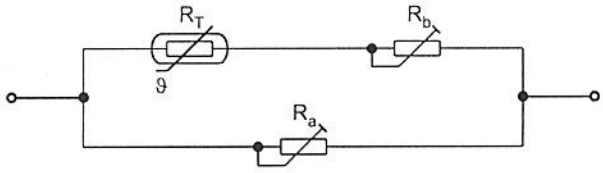
$$\frac{\Delta R_{25°C}}{R_{25°C}} \leq 1 \cdot 10^{-2}$$

a veľký výrobný rozptyl týchto senzorov, napr. $\frac{\Delta R_{25°C}}{R_{25°C}} = 0{,}1$ až $0{,}2$.

Vplyv výrobného rozptylu je možné odstrániť za cenu zmenšenia citlivosti senzora teploty zapojením podľa obr. 3.20, pričom platí

$$R_a = \frac{R_0}{1-\sqrt{\frac{B_0 \cdot R_0}{B \cdot R}}} \qquad R_b = R_0\sqrt{\frac{B \cdot R}{B_0 R_0}} - R$$

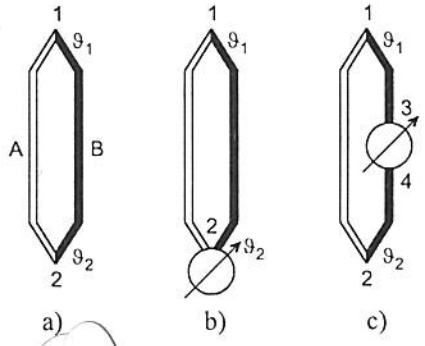
kde R_0, B_0 sú požadované hodnoty odporu a materiálovej konštanty pri danej (meranej) teplote a R, B sú skutočné hodnoty vkladaného termistora



Obr. 3.20. Korekčné zapojenie termistorov

3.2.4 Termoelektrické články

Termoelektrické články, skrátene termočlánky, sú založené na Seebeckovom alebo termoelektrickom jave, tj. na jave, ktorý spôsobuje v tomto systéme prevod tepelnej energie na elektrickú. Termočlánky pozostávajú z dvoch vodičov rôznych kovových alebo polovodičových materiálov, ktoré sú na jednom konci spolu pevne spojené zváraním alebo spájkovaním.



Obr. 3.21. Princíp termoelektrického článku

V uzavretom termoelektrickom obvode preteká elektrický prúd v tom prípade, ak majú oba konce *1* a *2* termočlánku rozdielnu teplotu (obr 3.21*a,c*). V prípade rozpojenia toho obvodu, na vytvorených svorkách vznikne elektrické tzv. ***Seebeckove napätie***, (obr. 3.21*b*)

$$U = \alpha_1(\vartheta_1 - \vartheta_2) - \alpha_2(\vartheta_1 - \vartheta_2) = (\alpha_1 - \alpha_2)(\vartheta_1 - \vartheta_2) = \alpha_{12}(\vartheta_1 - \vartheta_2) \qquad (3.20)$$

Hodnoty koeficientov α_1, α_2 sa určujú porovnaním s referenčnými materiálmi, najčastejšie Pb alebo Pt. Termoelektrický koeficient α_{12} predstavuje hodnotu rádovo jednotky až

desiatky μV/°C, pri polovodičoch je to však viac ako 100 μV/°C. Pre presnejšie vyjadrenie termoelektrického napätia platí

$$U = (\alpha_1 - \alpha_2)(\vartheta_M - \vartheta_Z) + (\beta_1 - \beta_2)(\vartheta_M - \vartheta_Z)^2 \qquad (3.21)$$

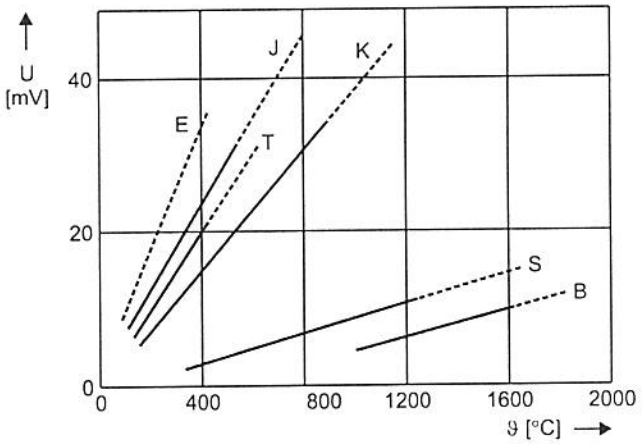
kde ϑ_M je teplota meracieho spoja, (napr. ϑ_1),
ϑ_Z zrovnávacia (referenčná, vzťažná) teplota, (napr. ϑ_2),
α, β experimentálne zistené konštanty jednotlivých materiálov vzhľadom na referenčný kov (Pb, Pt).

Presné vyjadrenie závislosti $U=f(\Delta\vartheta)$ vyjadruje vzťah

$$U = \sum_{i=0}^{n} a_i \cdot \Delta\vartheta^i \qquad (3.22)$$

kde n je číslo od 2 až do 14 – podľa požadovanej presnosti, rozsahu teplôt, typu termočlánku, prípadne použitej normy a a_i príslušný koeficient člena radu.

Podľa požiadaviek na voľbu dvojíc materiálov (tj. definovateľnosť a stabilitu závislosti $U=f(\Delta\vartheta)$, rozsah teplôt, odolnosť proti korózii a chemickým vplyvom) sú páry materiálov pre vytváranie termočlánkov normalizované. Podľa odporúčania IEC (*IEC 584 Termoelektrické články)* sa termočlánky označujú ***veľkými písmenami*** (tab. 3.2) a nie podľa skratky materiálov, ako to bolo v národných normách.



Obr. 3.22. Prevodové charakteristiky vybratých typov termočlánkov (prerušovaná časť len pre krátkodobé použitie)

Prednostne sa používajú ***termočlánky druhu J, K a S***. Označenie *Fe-ko* (konštantánový vodič je zliatinou 45 % Ni a 55 % Cu, odpovedá približne termočlánku J) sa môže použiť pri výrobkoch dodávaných ako náhradné diely.

Použitie termočlánku podmieňuje jeho konštrukčné riešenie. V automatizačnej technike sa uplatňujú tieto konštrukčné riešenia

- termoelektrické články v ochrannom puzdre,

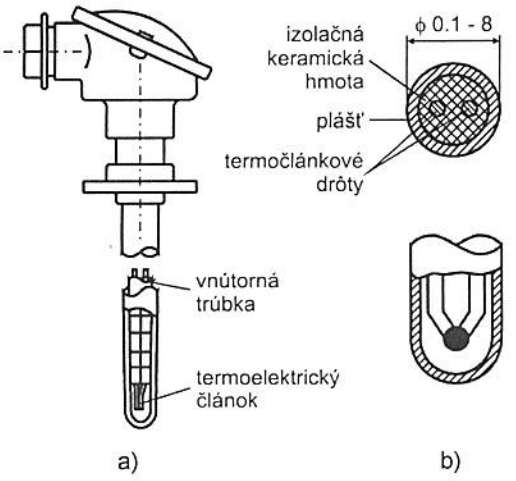
- plášťové termočlánky,
- priame termoelektrické články (bez ochrany puzdrom).

V prvom prípade sú termočlánky vytvorené spojením (zvarením, tvrdým spájkovaním) dvoch kovov, ktoré sú umiestnené v ochrannom puzdre, čím sú články chránené pred nepriaznivými vplyvmi prostredia, čo predlžuje ich technický život (obr. 3.23). Spôsoby spojenia vodičov termoelektrických článkov sú na (obr. 3.24).

Tab.3.2. Normalizované termoelektrické články, výňatok z IEC

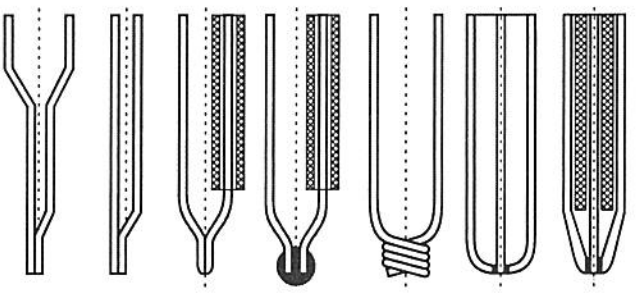
Označenie druhu termoelektrického článku a jeho základných hodnôt	Druh termoelektrického článku (materiály)	Merací rozsah pri dlhodobom použití [°C]	Maximálna teplota pri krátkodobom použití [°C]
M	meď–kopel	-200 až +100	-
T	meď–meď-nikel (meď–konštantán)	-200 až +400	-
J	Železo–meď-nikel	-200 až +700	900
Fe-ko (nie IEC)	(železo–konštantán)	200 až +650	900
L	chromel–kopel	-200 až 600	800
E	nikel-chróm–nikel-hliník (chromel–konštantán)	-100 až +700	900
S	platinarhodium 10%–platina	0 až +1300	1600
R	platinarhodium 13%–platina	0 až +1300	1600
A	wolframrhenium 5%–wolframrhenium 20%	0 až +2200	2500

Články sa zhotovujú z drôtov s minimálnym priemerom 0,35 mm, pre presnejšie merania sa používajú priemery 0,5 až 0,6 mm. Samotné vodiče termočlánku sú izolované keramikou a vyvedené na svorkovnicu. Merací spoj je buď vodivo spojený s dnom ochranného púzdra (neizolovaný termočlánok), alebo je od neho izolovaný (izolovaný termočlánok).



Obr. 3.23. Termoelektrické snímače
a) tyčový priemyselný termočlánok s ochranným puzdrom,
b) plášťový termočlánok s izolovaným meracím koncom.

Plášťové termočlánky sú vytvorené tak, že dvojica kovov v tvare drôtu je umiestnená v plášti, tj. v tenkej rúrke, od ktorej je táto dvojica izolovaná keramickým práškom. V niektorých prípadoch je jeden vodič v tvare rúrky a druhý je izolovaný v jej vnútri (obr. 3.24, dva snímače vpravo). Plášťové termoelektrické snímače sa vyznačujú dlhodobou stabilitou a malou časovou konštantou. Od tohto typu sú odvodené tzv. vpichovacie termočlánky, ktoré majú ukončenie plášťa v tvare hrotu. Priame termočlánky (bez puzdra) sa používajú len výnimočne, a to vtedy, ak sa požaduje malá časová konštanta meracieho člena. Materiály termočlánkov musia byť vhodne tepelne spracované a v priebehu prevádzky chránené pred účinkami látok obsahujúcich síru a redukčné plyny (NO_2, SO_2). Životnosť článku možno predĺžiť zväčšením prierezu vodičov, pretože hĺbka povrchového pôsobenia (oxidácia, korózia, odparovanie a difúzia) nezávisí na priemere vodičov. Zväčšovanie prierezu vodiča je však obmedzené odvodom tepla a cenou termočlánku. Z hľadiska spoľahlivosti získanej informácie je dôležitá časová stálosť prevodovej charakteristiky *(drift),* preto sa musia termočlánky v predpísaných časových intervaloch kalibrovať. Najmä tie, ktoré pracujú pri veľmi nízkych, ale najmä pri vysokých teplotách.



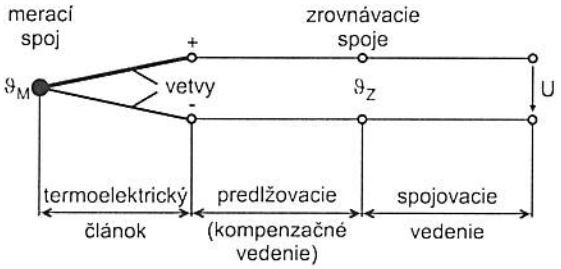
Obr. 3.24. Spôsoby vytvárania spojov termočlánkov

3.2.4.1 Vyhodnocovacie obvody termočlánkov

Na vyhodnocovacie obvody termočlánkov sú kladené hlavne tieto požiadavky:

- minimalizácia vplyvu kolísania zrovnávacích teplôt, tj. konštantná teplota zrovnávacieho spoja,
- minimalizácia vplyvu odporu prívodných vedení,
- potlačenie rušivých signálov (napr. kompenzácia parazitných termoelektrických napätí).

Usporiadanie meracieho reťazca s termočlánkom je na obr. 3.25. Termočlánok vyhodnocuje rozdiel teplôt ϑ_M, ϑ_Z, a tak, pokiaľ nie je tento rozdiel cieľom merania, je nevyhnutné vplyv kolísania teploty ϑ_Z eliminovať. Ak vyhodnocovacie elektronické obvody nie sú v blízkosti meracieho miesta, je vhodné ***termočlánok predĺžiť prostredníctvom predlžovacieho (kompenzačného) vedenia po zrovnávacie spoje.*** Kompenzačné vedenie vlastne predlžuje obe vetvy termočlánku až po zrovnávacie spoje, čím sa zabráni vzniku poruchového termonapätia z parazitného termočlánku, ktorý vznikne pripojením iného materiálu do termoelektrického obvodu. Tento ďalší termočlánok reprezentuje jedna vetva termočlánku a jedna vetva predlžovacieho vedenia, čo môže spôsobiť ***chybu merania až do hodnoty niekoľkých percent.*** Z tohoto dôvodu je kompenzačné vedenie spravidla zhotovené z rovnakého materiálu ako termočlánok alebo je kompenzačné vedenie vytvorené zo vzácnych kovov. Z ekonomických dôvodov však býva toto vedenie z lacnejších zliatin s podobnými termoelektrickými vlastnosťami ako vlastný termočlánok.



Obr. 3.25. Zapojenie meracieho reťazca s termočlánkom, ϑ_M meraná teplota, ϑ_Z zrovnávacia teplota

Pokiaľ by teplota ϑ_Z nebola konštantná a presne definovaná (napr. v príslušnej norme), alebo by nebola použitá automatická kompenzácia jej zmien, vzniká vo vyhodnocovacom obvode relatívna systematická chyba merania

$$\delta_\vartheta = \frac{\vartheta_M - \vartheta'_M}{\vartheta_M} \cdot 100 \quad [\%] \tag{3.23}$$

kde ϑ'_M je nameraná teplota,
ϑ_M reálna teplota v mieste merania.

Ak sa bude ale merať pri inej referenčnej teplote ako je dané normou alebo vyhodnocovacím prístrojom, je nevyhnutné korigovať nameraný výsledok. Charakteristika vplyvu kolísania zrovnávacej teploty je na obr. 3.26, a z nej plynie, že

$$\vartheta_M = \vartheta'_M + \frac{\alpha_Z}{\alpha_M} \cdot (\vartheta'_Z - \vartheta_Z) \tag{3.24}$$

a

$$U_M = U'_M + \Delta U = U'_M + \alpha_Z \cdot (\vartheta'_Z - \vartheta_Z) \tag{3.25}$$

kde $\alpha_M = \frac{\Delta U}{\vartheta_M - \vartheta'_M}$; $\alpha_Z = \frac{\Delta U}{\vartheta'_Z - \vartheta_Z}$,

ϑ'_Z je skutočná teplota zrovnávacích spojov,

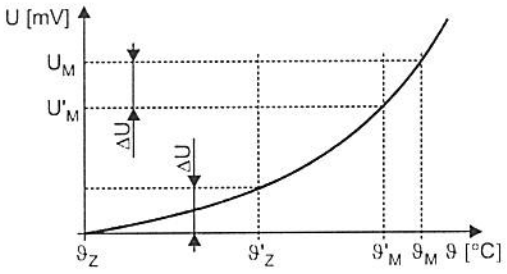
ϑ_Z zrovnávacia teplota pre daný MČ podľa normy (tabuliek).

Napríklad, ak v meracom člene je použitá prevodová tabuľka, kde $\vartheta_Z = 20$ °C, správne (korigované) termoelektrické napätie sa určí zo vzťahu 3.25, tj.

$$U = U_{NAM} + \alpha_Z.(\vartheta'_Z - 20) \tag{3.26}$$

kde U_{NAM} je hodnota z vyhodnocovacieho prístroja,

U korigovaná hodnota napätia na určenie teploty ϑ_M.

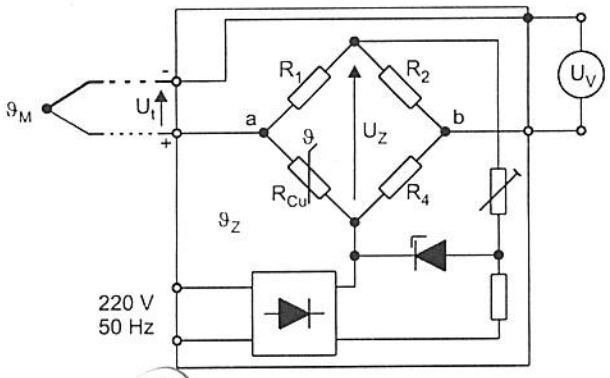


Obr. 3.26. Vplyv kolísania teploty ϑ_Z

Klasickú a stále používanú kompenzáciu kolísania zrovnávacej teploty rieši tzv. ***kompenzačná skrinka***. Patrí k automatickej aktívnej kompenzácii, čiže v obvode termočlánku sa riadi napätie s podporou pomocného zdroja, tak aby odpovedalo konštantnej a požadovanej teplote zrovnávacieho spoja. Zapojenie kompenzačného obvodu je na obr. 3.27. Tvorí ho odporový mostík, v ktorom rezistory R_1, R_2 *a* R_4 sú z manganinového drôtu, preto sú na teplote takmer nezávislé. Odpor R_{cu} je umiestnený v blízkosti zrovnávacieho spoja, a preto mení svoju hodnotu odporu s teplotou okolia rovnako, ako zrovnávacie spoje. Tým sa naruší rovnováha v mostíku a do termoelektrického obvodu sa pripočíta alebo odpočíta hodnota kompenzačného napätia. Správna funkcia mostíka je daná vzťahom

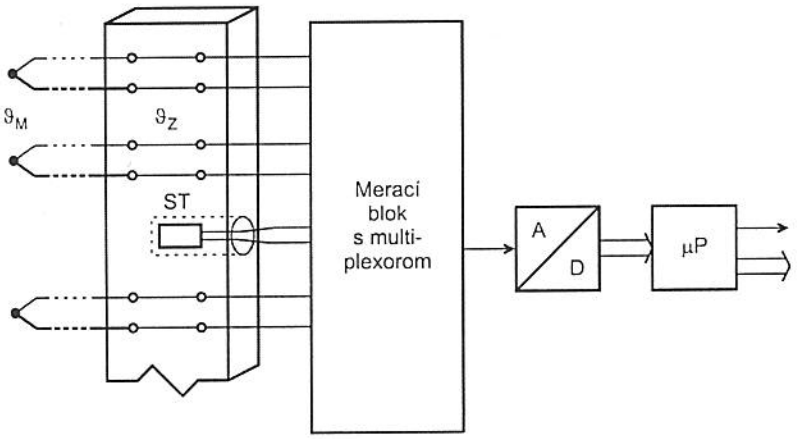
$$\frac{dU_{ab}}{d\vartheta_z} = \frac{dU_t}{d\vartheta_z}$$

kde $dU_t = U_v - U_t$ a U_v je výstupné napätie *(mV)*. Ak sa zmení teplota ϑ_z od zrovnávacej hodnoty 20 °C, vznikne na meracej diagonále mostíka napätie dU_{ab} korigujúce túto chybu. Kompenzačné obvody sa bežne vyrábajú pre určitý typ termoelektrického článku a pre teplotu zrovnávacieho spoja, napr. 20 °C alebo 50 °C.



Obr. 3.27. Zapojenie kompenzačnej skrinky

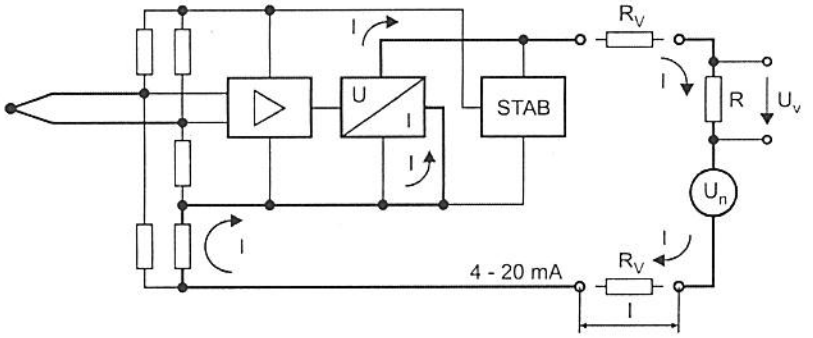
V číslicových meracích kanáloch s termočlánkami sa obyčajne rieši kompenzácia kolísania zrovnávacej teploty ϑ_Z priamo jej meraním, tj. meraním teploty pripojovacej svorkovnice, (obr. 3.28). Teplota sa sníma senzorom ST (PN-senzor, odporový kovový senzor) a korekcia sa vyhodnotí číslicovo podľa vzťahov (3.24), (3.25).



Obr. 3.28. Meranie teploty pripojovacej svorkovnice v ČMČ teploty

Kompenzačným zapojením je tiež tzv. ***dvojvodičové zapojenie prevodníka***, ktorý pracuje s unifikovaným výstupným signálom (4 až 20) mA. Na obr. 3.29 je bloková schéma takéhoto meracieho kanála s termočlánkom a vyhodnocovacím mostíkom (kap. 2, obr. 2.5). Elektronické obvody prevodníka sú umiestnené v blízkosti snímača (napr. v hlavici armatúry), pričom pre

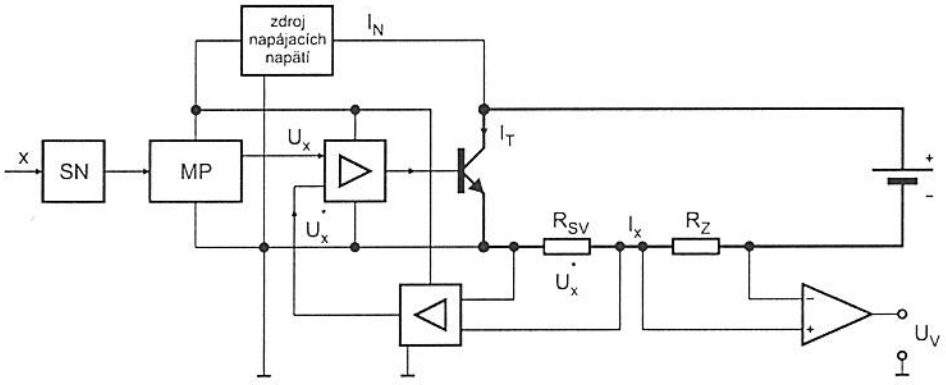
napájanie a výstupný signál sa používajú dva spoločné vodiče. Vlastná spotreba elektronických obvodov (zosilňovača, stabilizátora napätia) musí byť menšia ako 4 mA. Vyváženému mostíku, tj. spodnej hodnote meranej veličiny (teploty) zodpovedá prúd 4 mA.



Obr. 3.29 Bloková schéma dvojvodičového meracieho prevodníka teploty s termočlánkom

Zapojenie dvojvodičového prevodníka, ktoré viac zodpovedá reálnym vyhotoveniam, je na obr. 3.30. Meraná procesná veličina x je snímaná napr. termočlánkom (snímač SN) a meracím prevodníkom MP upravený signál U_x sa porovnáva so signálom U^*_x zo spätnej väzby regulátora prúdu vo výstupnom obvode. Pri nulovej regulačnej odchýlke ($U_x - U^*_x = 0$) sa prúdový signál (4 až 20) mA ustáli, pričom na zaťažovacom odpore R_Z sa vytvára výstupný napäťový signál U_v.

Medzi hlavné výhody takýchto zapojení patria prúdový výstup, úspora materiálu v rozvodoch a ľahká identifikácia prerušenia prívodného vedenia.



Obr. 3.30. Dvojvodičový prevodník s termočlánkom

3.2.5 Meranie nízkych teplôt.

Meranie nízkych teplôt (1 K až 273,15 K) nadobúda s rozvojom kryogénnej techniky *(technika veľmi nízkych teplôt)* stále väčší význam. Podobne, ako pri meraní stredných teplôt, aj pri tomto meraní sa využívajú teplotné fyzikálne vlastnosti látok (tlak plynu, nasýtenej pary,

rýchlosť zvuku v plyne, elektrické vlastnosti látok) alebo teplotne závislé fyzikálne javy (šum, magnetická rezonancia). Z hľadiska automatizačných prostriedkov sú dôležité len snímače s elektrickým výstupom. Prehľad používaných snímačov a ich metrologické vlastnosti sú uvedené v tab. 3.3, pričom prvý snímač je kovový, ďalšie sú polovodičové a tri posledné sú termočlánky.

Tab. 3.3. Snímače nízkych teplôt s elektrickým výstupom

Typ	Rozsah [K]	Presnosť [K]	Opakovateľnosť [K]
platinový Pt	od 2,1	10^{-2} až 10^{-3}	10^{-2} až 10^{-3}
germániový Ge	2 až 20	10^{-2}	10^{-4}
termistor	od 20	10^{-2}	10^{-1}
uhlíkový C	0.01 až 20	10^{-2}	10^{-3}
Ga-As diódy	od 1	10^{-2}	10^{-2}
Cu –ko	od 4.2	10^{-1}	0.3
Au +2.1% Co-Cu	od 1	10^{-1}	0.5
Au +0.07% Fe-ch	od 1	10^{-1}	1

Platinové snímače sa vyznačujú vhodnými metrologickými i mechanickými vlastnosťami. Ich prevodové charakteristiky sú vyjadrené interpolačnými funkciami pre rôzne rozsahy. ***Uhlíkové snímače*** nízkych teplôt majú rovnako ako polovodičové snímače klesajúcu (negatívnu) charakteristiku $R = f(T)$ a ***germániové*** vynikajúcu reprodukovateľnosť. Negatívna charakteristika je pri germaniových snímačoch závislá na dotovaných nečistotách, a preto možno voliť optimálnu charakteristiku snímača podľa požadovaného teplotného rozsahu. Pomerne veľká závislosť odporu na intenzite magnetického poľa, oproti platinovým a uhlíkovým snímačom, je zasa ich nevýhoda. Pri ***termistoroch*** sa využíva, na rozdiel od bežných termistorov (intrinzická, vlastná vodivosť), vodivosť extrinzická, daná elektrónmi uvoľnenými z nečistôt. Pri extrinzickej vodivosti dochádza k uvoľňovaniu elektrónov pri nízkych energiách, a teda aj pri nízkych teplotách. Tieto špeciálne termistory musia byť dotované nečistotami. Vzťahy definujúce klesajúcu charakteristiku $R = f(T)$ sú rovnaké ako pri termistoroch pracujúcich pre kladné teploty [°C]. ***Gálium-arzenidové diódy*** majú približne lineárnu závislosť napätia v priepustnom smere od teploty pri konštantnom prúde. Hlavnou prednosťou Ga-As snímačov nízkych teplôt je ich malá citlivosť na vonkajšie magnetické pole, čo má význam pre meranie v blízkosti supravodivých magnetov. ***Termoelektrické snímače*** nízkych teplôt vyžadujú vysokú stálosť zrovnávacej (porovnávacej) teploty ϑ_z, lebo zmena termolektrického napätia od teploty (citlivosť) je oveľa nižšia ako pri bežných teplotách. Ďalšia nevýhoda je ich nestálosť daná nehomogenitou materiálu, ktorá môže byť spôsobená aj počas prevádzky vplyvom teploty, prostredím a pod. Okrem toho je termoelektrické napätie závislé aj na intenzite magnetického poľa v mieste merania. Ich výhodou je jednoduchosť, malé rozmery, malá časová konštanta a nízka cena.

3.3 Bezdotykové meranie teploty (pyrometria)

Bezdotykové meranie teploty je založené na vyhodnocovaní tepelného – infračerveného žiarenia v oblasti od 0,8 μm do 30 μm, čo reprezentuje rozsah teplôt od -40 °C do 10 000 °C. Infračervené žiarenie patrí k elektromagnetickým žiareniam, a tak sa vyznačuje rovnakými vlastnosťami ako svetelné žiarenie. To znamená, že sa šíri priamočiaro, odráža sa, láme, polarizuje a interferuje. Výhody bezdotykového merania teploty možno zhrnúť do týchto bodov

- zanedbateľný vplyv meracieho prvku na meraný objekt,
- možnosť merania teploty pohybujúceho sa (rotujúceho) telesa,
- možnosť merania rýchlych zmien teploty,
- plošné snímanie teploty objektu (termovízia).

Medzi nevýhody tohoto merania patria hlavne nižšia presnosť merania (celkovú chybu merania spôsobuje nepresnosť určenia emisivity meraného telesa), nejednoznačná priechodnosť infračerveného žiarenia prostredím a odrazy tohoto žiarenia od okolitého prostredia.

Snímače infračerveného žiarenia možno rozdeliť do dvoch základných skupín

1. ***fotoelektrické snímače*** (kvantové) – využívajú fotoelektrický jav
   - fotorezistory,
   - fotodiódy.
2. ***teplotné snímače*** – využívajú absorpciu infračerveného žiarenia na zmenu svojej teploty
   - bolometre,
   - termoelektrické snímače,
   - pyroelektrické snímače,
   - špeciálne snímače.

Fotoelektrické snímače majú selektívnu frekvenčnú charakteristiku a nedajú sa použiť pre širší spektrálny rozsah. Naopak, teplotné snímače majú väčšinou širokú spektrálnu charakteristiku vlnových dĺžok. Používajú sa v rozsahu (1 až 100) μm a viac. Väčšina uvedených snímačov generuje viac druhov šumov, ktoré ovplyvňujú ich vlastnosti, ale len niektoré sú dominantné a treba ich pri meraní potláčať.

3.3.1 Odporové snímače infračerveného žiarenia

Predstavujú najjednoduchšie snímače infračerveného žiarenia. Možno ich rozdeliť do dvoch základných skupín:

1. ***fotoelektrické snímače*** - fotorezistory, fotodiódy,
2. ***teplotné snímače*** - bolometry kovové, polovodičové.

Spoločným znakom oboch skupín je zmena odporu snímača pri dopade infračerveného žiarenia.

Fotorezistory – patria medzi najčastejšie používané snímače infračerveného žiarenia pre svoju konštrukčnú a prevádzkovú jednoduchosť a pomerne veľkú citlivosť. Najčastejšie sa používa

fotorezistor PbS
veľký šum, pričo
Fotodiódy – kre
(0,4 až 1,8) μm.
Kovové bolometr
odporu, ktorý vz
relatívnu zmenu
o ΔT, platí

kde α_T je teplotn
Konštrukčne
vedľa seba v kry
používa platina, n
povrch je pokrytý
časová konštanta
Absorbčná vrstva
žiarenie v spektrá
teploty okolia sa
odporové články s
Polovodičové bol
- polykryš
- monokry

Polykryštalické (
mangánu apod. Kc
väčšia (až 10 μm)
styku s atmosférou
snímač umiestnen
šošovky. Týmto ri

fotorezistor PbS až do vlnových dĺžok okolo 2,6 μm, Nechladené meracie prvky majú pomerne veľký šum, pričom optimálna prevádzková teplota je okolo 78 K.

Fotodiódy – kremíkové fotodiódy sú citlivé v rozsahu (0,8 až 1,1) μm, germániové v rozsahu (0,4 až 1,8) μm. Zasahujú teda aj do infračervenej oblasti.

Kovové bolometre – patria do skupiny teplotných snímačov a ich činnosť je založená na zmene odporu, ktorý vzniká pri ohreve snímača v dôsledku dopadajúceho infračerveného žiarenia. Pre relatívnu zmenu odporu bolometra spôsobenú dopadajúcim žiarením, pri zmene jeho teploty o ΔT, platí

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_T \Delta T$$

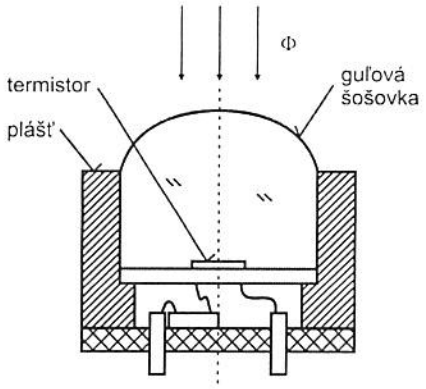
kde α_T je teplotný koeficient odporu.

Konštrukčne je snímač riešený tak, že sa skladá z dvoch kovových pásikov, umiestnených vedľa seba v kryte s okienkom pre vstup infračerveného žiarenia. Ako citlivý materiál sa používa platina, nikel, vizmut, antimon a pod. Merané žiarenie dopadá na jeden pásik, ktorého povrch je pokrytý čerňou na zabezpečenie vhodnej absorpcie. Týmto usporiadaním sa dosiahne časová konštanta okolo 1 ms, pričom hodnota odporu bolometra je niekoľko desiatok Ω. Absorbčná vrstva je väčšinou vytvorená zlatou alebo platinovou čerňou, ktorá dobre absorbuje žiarenie v spektrálnom rozsahu (1 až 15) μm vlnovej dĺžky žiarivého toku. Pre kompenzáciu teploty okolia sa používa pásik rovnakej konštrukcie, na ktorý však nedopadá žiarivý tok. Oba odporové články sú zapojené do mostíka.

Polovodičové bolometre – sa delia podľa materiálu na

- polykryštalické,
- monokryštalické.

Polykryštalické (termistorové) bolometre sú tvorené tenkými vrstvami oxidu niklu, kobaltu, mangánu apod. Konštrukčne sa podobajú kovovým bolometrom, iba hrúbka odporovej vrstvy je väčšia (až 10 μm). Hodnota odporu býva až desiatky megaohmov. Ak je snímač v priamom styku s atmosférou, vzniká šum spôsobený jej prúdením (snímač sa ochladzuje). Preto musí byť snímač umiestnený v ochrannom kryte. Na obr. 3.31 je termistor umiestnený v ohnisku guľovej šošovky. Týmto riešením sa dá citlivosť zväčšiť až 4 krát.



Obr. 3.31. Termistorový bolometer

Chladené bolometre sa delia na

- supravodivé bolometre,
- nízkoteplotné bolometre.

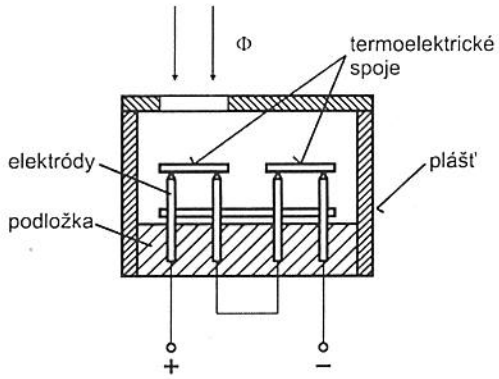
Pri supravodivých bolometroch sa jedná o zväčšenie citlivosti kovového bolometra v rámci supravodivého stavu. Pri niektorých kovoch alebo ich zliatinách sa pri znižovaní teploty odpor pomaly zmenšuje až do teploty T_0, pri ktorej dochádza k rýchlej zmene odporu (až 500 %.K^{-1}). Tato teplota T_0 je veľmi nízka, napr. pre Pb je to T_0 = 7,2 K, pre Sn len T_0 = 3,7 K. Výhodou supravodivých bolometrov je velmi malý teplotný šum a malá časová konštanta. Teplotný koeficient odporu pri teplote T_0 je veľký a zväčšuje sa znižovaním teploty. Existujú bolometre uhlíkové, germániové, kremíkové, ale najčastejšie sa používajú legované polovodiče, napr. Ge typ P legovaný gáliom.

Tab. 3.4. Druhy kovových bolometrov

Materiál	Plocha [mm^2]	Odpor [Ω]	Integrálna citlivosť' [V.W^{-1}]	Prah citlivosti [W]	Časová konštanta [s]	Pracovná teplota [K]
Ni	5	40 až 130	2	9.10^{-6}	5.10^{-3}	300
Au	3	200	4,3	10^{-7}	3.10^{-3}	300
Pt	0,8	20	1,0	3.10^{-8}	4.10^{-3}	300
Bi	-	150	-		5.10^{-3}	300

3.3.2 Termoelektrické snímače

Vďaka svojej jednoduchosti a stabilite sa používajú v širokom rozsahu infračerveného spektra, aj keď ich citlivosť je nižšia ako pri ostatných snímačoch infračerveného žiarenia. Pri meraní sa využíva termoelektrický jav, čiže sa jedná o snímač generátorový alebo aktívny, a tak pracuje bez pomocného napájania.



Obr. 3.32. Termočlánkový bolometer

Na zabezpečenie čo najväčšej citlivosti sa vyžaduje zvýšenie termoelektrického napätia termoelektrického článku a zníženie prenosu tepla do okolia. Zmenšenie časovej konštanty sa rieši zmenšením tepelnej kapacity snímača a zväčšením prenosu tepla do podložky. Termoelektrické snímače sa zhotovujú z Cu, Al, Ni, Co, Zn alebo Ag. Z polovodičových materiálov sa používa selén, kremík a antimon. Zvýšenie citlivosti snímača sa dosiahne sériovým zapojením snímačov (termočlánková batéria). Na obr. 3.32 je naznačená jednoduchá konštrukcia snímača. Voľba materiálu elektród vychádza z požiadavky maximálnej citlivosti (Cu, Ag, Te, Se), ktorá dosahuje 240 $\mu V.K^{-1}$. Snímač má dva spoje z fólie Au. Prvý, ktorý meria teplotu generovanú žiarením, je pre dokonalú absorbciu žiarenia čiernený. Druhý spoj je porovnávací a je umiestnený mimo dopadajúceho žiarenia. Vnútro snímača býva vákuované.

Tab. 3.5. Základné parametre bolometra vákuovaného a plneného plynom

Termoelektrický snímač		vo vákuu	vo vzduchu
Citlivá plocha	[mm^2]	1 až 5	1 až 10
Odpor	[Ω]	10 až 100	30 až 300
Citlivosť f=5Hz	[$V.W^{-1}$]	20 až 90	3
Časová konšt.	[ms]	30	5 až 20

3.3.3 Pyroelektrické snímače

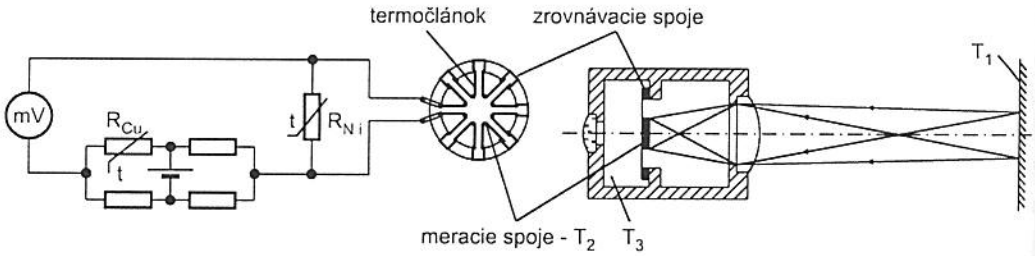
Pyroelektrické snímače využívajú pyroelektrický jav, tzv. spontánnu polarizáciu feroelektrických kryštálov pri zmene ich teploty. Ak sa zmení teplota pyroelektrického materiálu umiestneného medzi dvoma doskami kondenzátora, vznikne zmena polarizácie. Toto platí pre časovo premenné zmeny žiarivého toku, ktorých perióda je kratšia ako tepelná časová konštanta snímača. Jedná sa teda o generátorový (aktívny) snímač kapacitného charakteru, ktorý na zmenu teploty reaguje zmenou elektrického náboja. Pyroelektrické snímače nevyžadujú chladenie, avšak meraný žiarivý tok musí byť prerušovaný. Spektrálny rozsah je veľmi široký a je obvykle obmedzený materiálom ochranného okienka.

3.3.4 Pyrometre

Pyrometre sú prístroje vyhodnocujúce teplotu telesa na základe jeho žiarenia, preto obsahujú vhodný ***snímač infračerveného žiarenia*** spolu s optickým systémom na usmernenie a koncentráciu tohoto žiarenia smerom ku snímaču. Rozdelenie pyrometrických metód (aj pyrometrov) odpovedá spracovávanému spektru vlnových dĺžok vyžarovaného svetelného toku

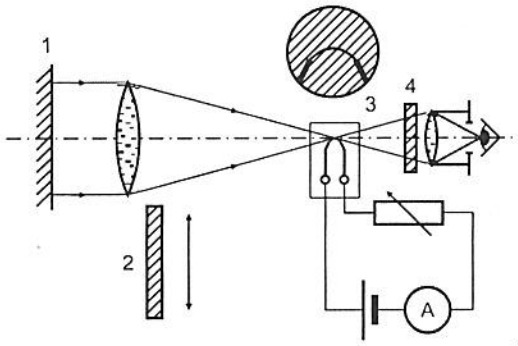
- úhrnné (tzv. radiačné),
- spektrálne: pásmové, pomerové,
- pre termovíznu techniku.

Úhrnné pyrometre – sú prístroje, ktoré vyhodnocujú teplotu na základe Stefan-Boltzmannovho zákona. Teoreticky spracovávajú celé spektrum. Tepelné žiarenie sa prenáša a sústreďuje na snímač (batéria termočlánkov) sústavou šošoviek zo špeciálneho materiálu (prepúšťajúce infračervené svetlo, obr. 3.33) alebo na "fokusovanie" sa používajú guľové zrkadlá. Pyrometre sú kalibrované výrobcom prostredníctvom absolútne čierneho telesa.



Obr. 3.33. Radiačný pyrometer

Zo spektrálnych pyrometrov sa najčastejšie používajú jasové pyrometre, obr. 3.34. Pri manuálnej obsluhe sa zrakom (cez vzájomný jas) porovnávajú toky meraného žiarenia *1* a žiarenia vlákna etalónovej žiarovky *3* (v detaile). Hodnota meranej teploty sa odvádza od prúdu žiarovky pri rovnakom jase oboch tokov žiarenia. V niektorých prípadoch sa zaraďuje do svetelného toku vhodný filter *2*. Pri automatizovanej obsluhe fotoelektrický snímač striedavo sníma merané žiarenie a žiarenie etalónovej žiarovky. Regulátor prúdu žiarovky nastavuje jej prúd tak, aby oba toky žiarenia boli rovnaké. Spektrálna oblasť merania sa vymedzuje spektrálnou charakteristikou snímača a príslušného filtra *4*.



Obr. 3.34. Jasový spektrálny pyrometer

Termovízia (temovízna technika) – umožňuje snímať teplotné obrazce, tj. premieňať neviditeľné infračervené žiarenie na obrazové signály televíznej obrazovky. Na rozdiel od pyrometrov, termovízia rieši zobrazovanie celého teplotného poľa aj pri pohybe predmetov (zdrojov tepla). Termovízia sa uplatňuje v mnohých technických odboroch, ale aj v zdravotníctve, napr. na diagnostiku. V energetike je možné diagnostikovať priamo v prevádzke nekvalitné kontakty, vadné izolátory, ale aj sledovať kvalitu tepelnej izolácie napr. obytných budov.

4 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY TLAKU, SILY A MOMENTU

4.1 Snímače a meracie členy tlaku a tlakovej diferencie

Tlak je jednou zo základných fyzikálnych veličín a patrí k najčastejšie sledovaným procesným veličinám v riadení spojitých i nespojitých výrobných procesov. Od hodnoty tlaku závisia vlastnosti väčšiny látok, priebehy fyzikálnych a chemických procesov. Tlak spolu s teplotou je dominantnou veličinou v tepelnej technike.

Ak prostredie, v ktorom sa nevyskytujú šmykové napätia, vytvorí na ploche dS silu dF, potom pomer

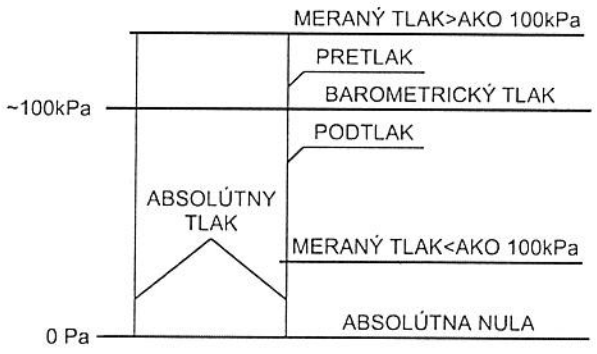
$$p = \frac{dF}{dS}$$

sa nazýva tlak prostredia. Jednotkou tlaku je ***pascal*** [Pa], pričom platí

$$1\text{Pa} = 1\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

Pri meraní je vhodné vychádzať z tzv. ***nulového tlaku***, ktorý je definovaný v priestore bez hmoty (absolútne vákuum). Potom možno zaviesť podľa obr. 4.1

- absolútny tlak – tlak meraný od absolútnej tlakovej nuly,
- barometrický tlak – tlak zemského ovzdušia pri zemskom povrchu, meria sa od absolútnej nuly a má charakter absolútneho tlaku (platí $p_b = 1{,}01325.10^5$ Pa),
- pretlak – rozdiel okamžitého absolútneho tlaku, ktorý je vyšší než barometrický tlak, a barometrického tlaku,
- podtlak – rozdiel barometrického tlaku a okamžitého absolútneho tlaku, ktorý je nižší než je barometrický tlak,
- vákuum – veľký podtlak (malý absolútny tlak).



Obr. 4.1 Grafické znázornenie tlakových oblastí

Vo výrobných procesoch sa najčastejšie meria statický pretlak, ktorý okrem základnej jednotky *Pa* býva vyjadrený aj v odvodených alebo doplnkových jednotkách. Pri meraní tlaku v prúdiacich tekutinách je často dôležité okrem statického tlaku sledovať aj dynamický a celkový tlak *(pozri kap. 5, časť Prandlova a Pitotova rúrka)*.

Merané prostredie pôsobí svojim tlakom ***priamo*** alebo cez ***oddeľovací člen*** na aktívny prvok, v ktorom sa mení stav mechanického napätia alebo jeho elektrický parameter. Najčastejšie sa sledujú prejavy zmien tlaku ***nepriamym meraním***, tj. prostredníctvom deformačného (transformačného) prvku. Zmena rozmeru citlivej časti snímača (celkové predĺženie Δl alebo relatívne $\Delta\varepsilon$) sa transformuje na elektrickú veličinu a podľa použitého princípu tejto premeny sa snímače tlaku pre priemyselné použitie delia na ***odporové*** (potenciometrické a tenzometrické), ***kapacitné, indukčnostné a rezonančné***.

V súčasnosti sa v oblasti priemyselnej automatizácie uplatňujú najmä senzory s ***piezotenzometrami*** (piezorezistormi, *pozri časť Odporová tenzometria*). Merací rozsah týchto snímačov sa pohybuje medzi (10^{-7} až 10^{8}) Pa. Ich hlavnou nevýhodou je vyššia teplotná závislosť (10^{-3} %.K^{-1}). ***Kapacitné snímače*** tlaku majú podstatne menšiu teplotnú závislosť (až o dva rády) a vyššiu citlivosť (tiež o dva rády). V porovnaní s piezorezistívnymi snímačmi majú kapacitné snímače väčší rozsah meraných tlakov (MPa až GPa). Výstupná nelineárna závislosť kapacity na tlaku sa upravuje v meracom prevodníku a chyba linearity nedosahuje väčšej hodnoty ako 0,2 %. ***Indukčnostné a transformátorové*** (indukčné) snímače tlaku sú určené na meranie hlavne malých tlakov a tlakových diferencií. ***Rezonančné snímače*** sú vplyvom svojej vyššej ceny používané iba v obmedzenom okruhu aplikácii vyžadujúcich vyššiu presnosť merania. Spolu s rastúcimi nárokmi na presnosť merania tlaku sa rozširuje ich oblasť použitia.

Snímače ***priamo merajúce*** tlak pracujú napr. s piezoelektrickým prvkom, na ktorý musí pôsobiť dynamicky sa meniaci tlak. V priemysle je to spravidla špeciálne meranie (napr. meranie dynamického tlaku vo valci spaľovacieho motora), preto nebýva časté.

4.1.1 Základné tvary deformačných prvkov

Základné tvary deformačných prvkov používané v moderných snímačoch tlaku sú na obr. 4.2. ***Votknutá kruhová doska (tuhá membrána)*** sa pre malú celkovú deformáciu používa ako citlivý prvok najmä v snímačoch s meraním relatívnej deformácie. Pôsobením tlaku p sa membrána deformuje v radiálnom i tangenciálnom smere a jej relatívne deformácie sú mierou pôsobiaceho tlaku. Tuhé membrány sú podstatne hrubšie ako mäkké, preto pri ich namáhaní sa nevytvárajú skoro žiadne ťahové napätia, ale len napätia od priehybu – radiálne a tangenciálne, (obr. 4.9). V prostriedku membrány sa vytvára maximálny priehyb w(0), pričom pre w(0) >> h platí

$$w(0) = \frac{3 \cdot R^4}{16 \cdot E \cdot h^3} \left(1 - \mu^2\right) \cdot p \qquad (4.1)$$

kde p je tlak pôsobiaci na membránu,
R polomer membrány,
E modul pružnosti (*časť Odporová tenzometria*),
h hrúbka tuhej membrány,
μ Poissonova konštanta (*časť Odporová tenzometria*).

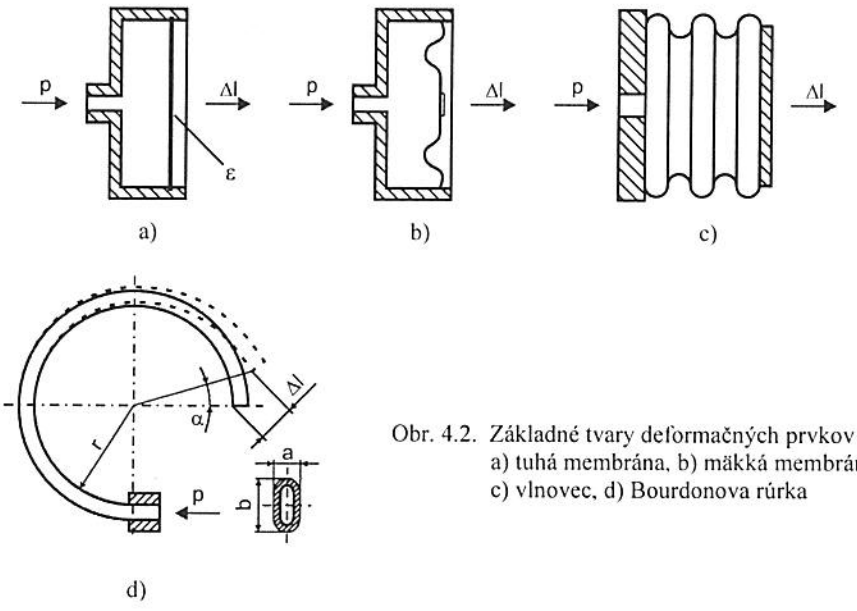
Ak pôsobí na votknutú membránu tlak p, vznikne na jej povrchu pomerné predĺženie, ktorého veľkosť v tangenciálnom smere je

$$\varepsilon_t = \frac{3}{8} \cdot \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{R^2}{h^2} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R}\right) \cdot p \qquad (4.2)$$

a v radiálnom smere

$$\varepsilon_r = \frac{3}{8} \cdot \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{R^2}{h^2} \cdot \left(1 - 3\frac{r^2}{R}\right) \cdot p \qquad (4.3)$$

kde r je aktuálny polomer.



Obr. 4.2. Základné tvary deformačných prvkov
a) tuhá membrána, b) mäkká membrána,
c) vlnovec, d) Bourdonova rúrka

Ostatné deformačné prvky sú ***tenkostenné pružné členy*** s významnou celkovou deformáciou. ***Zvlnená (mäkká) membrána*** s kruhovým zvlnením má zlepšenú linearitu oproti jednoduchej membráne. ***Vlnovec*** v porovnaní s mäkkou membránou má vyššiu presnosť

prevodu, tj. lepšiu linearitu a opakovateľnosť. Historicky najdôležitejšia je ***Bourdonova rúrka*** (patentovaná v r. 1848 E. Bourdonom), ktorá zohrala dôležitú úlohu pri priemyselnom meraní tlaku až do vzniku prísnejších podmienok na presnosť prevádzkového merania (pod 2,5 %). Pre zosilnenie účinku tlaku na deformáciu prvku sa vytvárali rôzne formy Bourdonovej rúrky (skrutkovice, špirály, ale najmä tvar *C*-rúrky). Pre zaujímavosť, existuje merací prístroj, ktorý obsahuje rúrku tvaru *C* z kryštálu kremeňa a dosahuje celkovú chybu merania tlaku 0,005 %.

4.1.2 Odporová tenzometria

4.1.2.1 Základné pojmy

Zmena vodivosti kovov pri ich deformácii bola objavená Kelvinom už v roku 1856. Používanie napnutého odporového vodiča na meranie tlaku sa začína objavovať už okolo roku 1928. Od tejto doby dosiahol rozvoj meracích systémov využívajúcich deformáciu kovového alebo polovodičového odporového prvku veľké rozšírenie a v súčastnej dobe predstavuje ***odporová tenzometria*** samostatný odbor.

Tenzometrické odporové snímače sa používajú buď pri experimentálnej analýze mechanického napätia strojov a štruktúr strojných zariadení alebo ako súčasť meracích členov tlaku, sily, krútiaceho momentu, rýchlosti, prietoku a MČ parametrov mechanického kmitavého pohybu. Využívajú sa pritom fyzikálne princípy umožňujúce snímanie mechanických veličín (napr. deformácia, mechanické napätie, priehyb) v spojení s prevodom na elektrickú veličinu, čiže sa jedná o nepriame meranie mechanických veličín. Vďaka pomerne dlhému vývoju a hromadnej výrobe, tenzometre vyhovujú väčšine aplikácií z hľadiska ceny i poskytovanej kvality. Tento stav sa dosiahol hlavne prostredníctvom vhodných konštrukčných riešení samotného snímača, použitými materiálmi a integrovanými meracími prevodníkmi. V súčasnej dobe sú k dispozícii aj meracie členy mechanických veličín vo vyhotovení inteligentných meracích členov (ISS).

Odporový tenzometer – je snímač, ktorého zmena elektrického odporu je závislá od zmien spôsobených jeho ***deformáciou***. To znamená, že zmena odporu je určená ***zmenami geometrických rozmerov*** a ***zmenami kryštalografickej orientácie*** vlastného tenzometra. Vo veľkej väčšine prípadov pôsobí súčasne hlavná poruchová veličina – ***teplota okolia***, ktorá vytvára nežiadúcu zmenu teploty meracieho prvku, a tým aj zmenu jeho ***odporu.***.

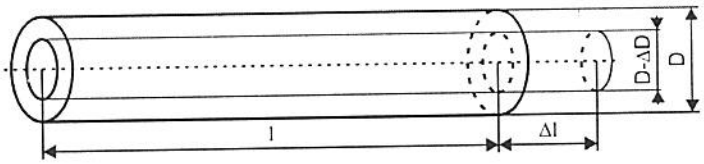
Pod pojmom ***deformácia*** (obr. 4.3) sa vzhľadom na malé rozmery snímača uvažuje len deformácia ťahom alebo tlakom v medziach Hookovho zákona (vratný dej). Tento zákon popisuje lineárnu oblasť závislosti mechanického napätia σ od relatívneho predĺženia alebo skrátenia ε, tj.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

kde E je modul pružnosti a udáva vzťah medzi σ a ε, pričom pre pomerné predĺženie platí $\varepsilon = \Delta l/l$.

Elektrický odpor (Ohmov zákon) homogénneho vodiča dĺžky l s plošným prierezom S a špecifickým odporom ρ je daný vzťahom

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \tag{4.4}$$



Obr. 4.3. Mechanické deformácie ťahom namáhaného vodiča (predĺženie a zúženie)

Totálny diferenciál dR, za predpokladu spojitých diferencovateľných funkcií, má tvar

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial S} dS \tag{4.5}$$

a po úpravách pre konečné relatívne zmeny odporu $\Delta R/R$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta S}{S} \tag{4.6}$$

Pri mechanickom namáhaní vodiča ťahovou silou (obr. 4.3) dochádza ku geometrickým deformáciám a k mikroštrukturálnym zmenám materiálu (vplyv na ρ). Pri použití odporových tenzometrov je potrebné zabezpečiť, aby nenastala nevratná deformácia (za medzu pružnosti podľa Hookovho zákona) a nereverzibilné mikroštrukturálne zmeny. Obe vedú k znehodnoteniu snímača.

Podľa teórie pružnosti platí (pri zanedbaní vyšších členov rozvoja)

$$\frac{\Delta S}{S} \cong -2\mu \frac{\Delta l}{l} \tag{4.7}$$

kde μ je Poissonovo číslo (od 0 do 0,5).

Potom po dosadení výrazu 4.7 do rov. 4.6 vychádza

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{4.8}$$

pričom posledný člen rov. 4.8 možno považovať (pri materiáloch vhodných pre tenzometre) úmerný pomernému predĺženiu, čiže $\Delta\rho/\rho \cong \tau.\varepsilon$, z čoho plynie

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \tau)\cdot\varepsilon = K\cdot\varepsilon = (K_1 + K_2)\cdot\varepsilon \qquad (4.9)$$

kde τ je piezorezistívny koeficient.

Konštanta $K = (1+2\mu+\tau)$ reprezentuje ***koeficient deformačnej citlivosti***, ktorý vyjadruje závislosť relatívnej zmeny odporu od relatívnej deformácie a predstavuje ***všeobecný parameter tenzometrov*** vhodný na ich katalógové usporiadanie. Výraz $K_1=(1+2\mu)$ vyplýva zo zmien geometrických rozmerov tenzometra a prevláda u kovových odporových tenzometrov. Hodnota τ závisí od mikroštrukturálnych zmien materiálu (tzv. piezorezistencia) a je dominantná pri polovodičových tenzometroch (K_2). Pre kovové zliatiny dosahuje koeficient K hodnotu od 2 do 4 a pre čisté kovy od -12 (Ni) do +6 (Pt). Pre polovodičové materiály to býva hodnota až 10 krát vyššia. Rovnica 4.4 platí v obmedzenom rozsahu deformácií a je závislá na materiále tenzometra. Ak platí, že $\varepsilon \leq 3.10^{-3}$, potom možno považovať prevodovú charakteristiku kovového tenzometera za lineárnu.

Vo všeobecnosti je vhodnejšie vyjadriť závislosť relatívnej zmeny odporu na relatívnej zmene deformácii polynómom

$$\frac{\Delta R}{R_{0,0}} = C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 + \ldots \qquad (4.10)$$

kde $R_{0,0}$ je hodnota odporu snímača pri nulovej deformácii a počiatočnej teplote (obyčajne $\vartheta_0 = 25$ °C), pričom C_1, C_2 ,C_3,... sú konštanty.

Meranú (vstupnú) veličinu reprezentuje relatívna deformácia tenzometra ε, výstupnú veličinu zasa relatívna zmena jeho odporu $\Delta R/R$, a tak prevodová charakteristika tenzometra je určená vzťahom

$$K_{\varepsilon,0} = \frac{d\left(\Delta R / R_{0,0}\right)}{d\varepsilon} = C_1 + 2C_2\varepsilon + 3C_3\varepsilon^2 + \ldots \cong C_1 + 2C_2\varepsilon \qquad (4.11)$$

Veličina $K_{\varepsilon,0}$ je tzv. ***tenzometrická konštanta***, ktorá je daná predovšetkým vlastnosťami materiálu a predstavuje všeobecnejšie definovaný ***koeficient deformačnej citlivosti tenzometra.***

Teplotná závislosť tenzometrickej konštanty $K_{\varepsilon,0}$ je vyjadrená teplotným ***koeficientom*** α_K

$$\alpha_K = \frac{\Delta K / K_{0,0}}{\Delta\vartheta}$$

ktorý dosahuje pri tenzometroch (vhodných pre činnosť aj pri vysokých teplotách do 800 °C, napr. Nichrome V) hodnotu okolo 2.10^{-4} K^{-1}.

Teplotný koeficient odporu charakterizuje závislosť odporu tenzometra od teploty

$$\alpha_R = \frac{\Delta R / R_{0,0}}{\Delta\vartheta}$$

a jeho hodnota dosahuje pri najčastejšie používaných konštatánových tenzometroch 10^{-5} K^{-1}. Vhodnou kombináciou prísad a tepelným spracovaním materiálu možno dosiahnuť záporných aj kladných hodnôt tohoto ***koeficienta***.

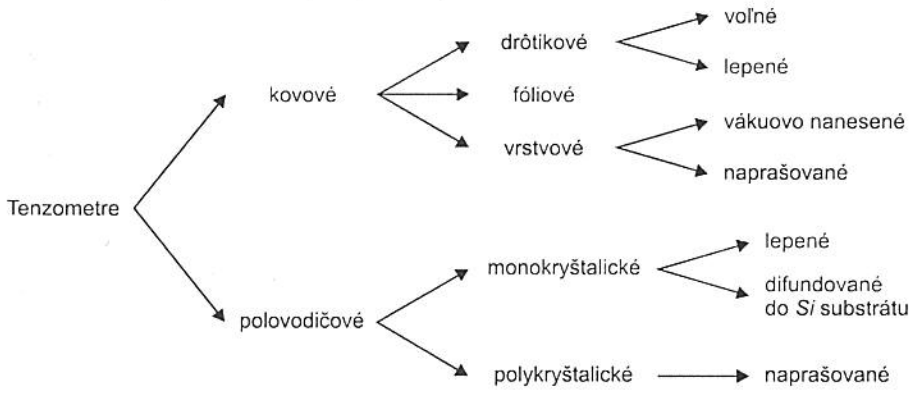
Okrem priameho vplyvu teploty na odpor tenzometrického snímača vytvára sa pripojením prívodných vodičov k tenzometru možnosť vzniku ***rušivých termoelektrických napätí*** (vznik termoelektrických parazitných článkov). Často je ovplyvnená ***tenzometrická konštanta*** $K_{\varepsilon,\vartheta}$ rozdielnosťou teplotného koeficientu dĺžkovej rozťažnosti meraného objektu α_m a telieska snímača α_s. Tak vzniká systematická chyba merania mechanického napätia. Zdanlivá deformácia vyvolaná teplotnými vplyvmi je daná

$$\varepsilon_\vartheta = \left(\alpha_m - \alpha_s + \frac{\alpha_R}{K} \right) \Delta\vartheta \qquad (4.12)$$

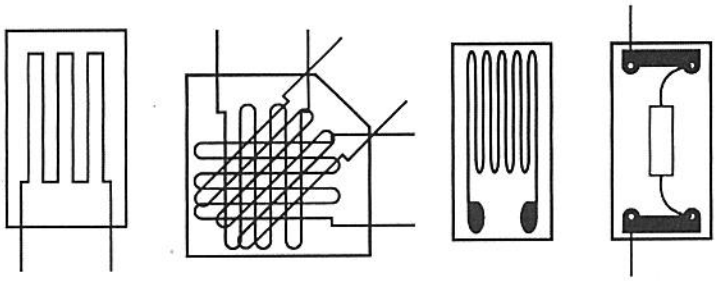
Samokompenzujúce tenzometre sú vytvorené vhodnou voľbou materiálov, tj. teplotných koeficientov α_m, α_s a α_R, tak aby potláčali systematickú chybu vyvolanú deformáciou ε_ϑ. Musia však byť aplikované iba na objekty s daným koeficientom α_m.

4.1.2.2 Rozdelenie tenzometrov a používané materiály

Podľa materiálu, konštrukčného tvaru a spôsobu upevnenia na meraný objekt možno odporové tenzometre rozdeliť podľa nasledujúcej schémy



Kovové tenzometre sa vyrábajú najmä zo zliatin Cu-Ni (konštantán), Ni-Cr (nichrom), Ni-Cr-Fe-Al (karma). Drôtikové snímače sú obyčajne vytvorené z vodičov s priemerom (10 až 40) μm. Najpoužívanejšie kovové tenzometre v súčasnosti sú fóliové lepené. Vyrábajú sa odleptaním fólie hrúbky (1 až 10) μm naparenej na podložke (od 5 μm). Možno ich zaťažovať značnými prúdovými hustotami a po nalepení dobre kopírujú sledovanú deformáciu (do ±0,15 %). Ich životnosť je približne 10^7 cyklov. Naprašované kovové vrstvové tenzometre sa používajú takmer výlučne v snímačoch tlaku. Majú podobné vlastnosti ako fóliové typy, dosahujú však lepšiu časovú a teplotnú stabilitu.



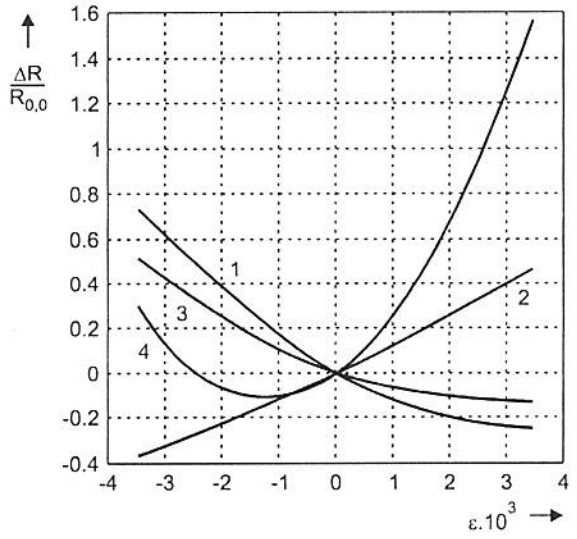
Obr. 4.4. Odporové tenzometre
a) drôtikový tenzometer
b) drôtiková tenzometrická ružica
c) fóliový tenzometer
d) polovodičový tenzometer

Koeficient deformačnej citlivosti sa pri kovoch mení v závislosti od typu materiálu od 6,5 pre zliatinu Pt-Ir až po -10 pre Ni. Pri aplikácii kovových tenzometrov je vhodné použiť materiály vykazujúce minimálne mikroštrukturálne zmeny spolu s minimálnym teplotným koeficientom odporu. Pri výbere sa uprednostňujú kovové materiály, ktoré majú závislosť relatívnej zmeny odporu od meranej deformácie približne lineárnu (nelinearity sa prejavujú až pri väčších deformáciách).

Tab. 4.1. Najpoužívanejšie zliatiny pri výrobe odporových tenzometrov

Názov materiálu	Približné zloženie [%]	Priemerná hodnota K
konštantán	57 Cu, 43 Ni	2,05
karma	73 Ni, 20 Cr, resp. Fe + Al	2,1
nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
platina - wolfrám	92 Pt, 8 W	4

Polovodičové odporové tenzometre – sa vyznačujú teplotne závislou a nelineárnou prevodovou charakteristikou. Vyrábajú sa z kremíka, ktorý má z hľadiska odporovej tenzometrie (relatívne malá chyba linearity, zanedbateľná mechanická a kryštalografická hysterézia, použiteľnosť pre väčší rozsah teplôt) optimálny súhrn meracích a mechanických vlastností v širokom rozsahu teplôt, pričom je aj ľahko dostupný. Konštanty C_1 a C_2 vo všeobecnej rov. 4.11 sú závislé na type vodivosti a dosahujú kladné hodnoty pre polovodič z kremíka typu P a záporné pre typ N. Najrozšírenejšie sú monokryštalické tenzometre vytvorené difúznou technológiou na Si substráte tvoriacom súčasne pružný člen napr. snímača tlaku. Chybu linearity možno zmenšovať zväčšovaním vodivosti, súčasne však klesá citlivosť snímača. Pri tomto type tenzometra vyvolaná zmena odporu je spôsobená predovšetkým mikroštrukturálnymi zmenami.



Obr. 4.5. Závislosť relatívnej zmeny odporu od relatívnej deformácie pre kremík
1-P-typ s $\rho>10^{-3}$ Ωm 3-N-typ s $\rho>10^{-3}$ Ωm
2-P-typ s $\rho=2.10^{-4}$ Ωm 4-N-typ s $\rho=3,1.10^{-4}$ Ωm

V praxi, pri deformáciach pod 0,1% a dovolenej chybe do 5% sa nelineárny člen C_2 zanedbáva. Koeficient deformačnej citlivosti dosahuje pri polovodičových tenzometroch hodnoty 50 až 175. V porovnaní s kovovými tenzometrami sú polovodičové omnoho citlivejšie, ich nevýhodou je však veľká chyba linearity a veľká teplotná závislosť, a tak obe vyžadujú, pri prísnejšej požiadavke na presnosť merania, špeciálne vyhodnocovacie obvody alebo riešenie typu ISS.

Tab. 4.2. Porovnanie vlastností polovodičových a kovových materiálov pre tenzometre

Vlastnosť	P-typ Si	Drôtik Karma	pomer
koeficient K	125	2,0	62,5
$\alpha_R (K^{-1})$	12.10^{-6}	$0,2.10^{-6}$	60
$\alpha_K (K^{-1})$	16.10^{-6}	5.10^{-6}	3,2
$\alpha_s (K^{-1})$	600	40	15

Kovové i polovodičové tenzometre sa vyrábajú v typických odporových skupinách pre nezaťažený stav (približne) ***120 Ω, 350 Ω, a 1000 Ω*** Vyššie hodnoty odporov umožňujú potlačiť vplyv prívodných vedení, avšak za cenu zväčšenia rozmerov snímača. V tomto prípade sa sníma priemerná hodnota deformácie materiálu pokrytého snímačom a zhoršujú sa aj dynamické vlastnosti meracieho prvku. Dôležitá je tiež tzv. ***smerová citlivosť tenzometra***, ktorá je definovaná ako pomer citlivosti pri deformácii v smere hlavnej osi (rovnobežne s dlhšími úsekmi odporového materiálu tenzometra) a osi kolmej k hlavnej orientácii.

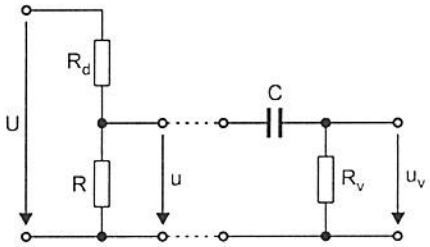
4.1.2.3 Vyhodnocovacie obvody pre odporové tenzometre

Rozlišovacia schopnosť snímačov mechanického napätia odpovedá hodnotám pomernej deformácie okolo $\varepsilon = 10^{-6}$. Pri hodnotách $K = 2$, napájacom napätí mostíka rádovo jednotky voltov a odporoch tenzometrov okolo 100 Ω je výstupné napätie vyhodnocovacieho obvodu len niekoľko jednotiek μV. Okrem toho, merané zmeny odporu sú rádovo $\mu\Omega$, z čoho vyplýva, ***že na vyhodnocovacie obvody meracích členov s odporovými tenzometrami sú kladené mimoriadne nároky***, pričom sa veľmi často musí riešiť potlačenie vplyvu prívodných vedení a prepínačov meracích miest. Ďalším závažným zdrojom rušenia sú ***termoelektrické napätia*** z termočlánku vznikajúceho spojením materiálu tenzometra a prívodného vedenia. Z hľadiska elektrických vlastností je potrebné považovať tenzometer za pasívny dvojpól charakterizovaný veličinami $R_{0,0}$, $R_{0,\vartheta}$, C_1, C_2, ε ***a parazitnými kapacitami.***

Najčastejšie používané vyhodnocovacie metódy pre tenzometre sú:

- potenciometrické,
- Wheatstonové mostíky,
- porovnávacie metódy.

Potenciometrické zapojenie (menej časté, špecifické) sa používa pri sledovaní dynamických hodnôt relatívnej deformácie, (obr. 4.6). Zapojenie tvorí napäťový delič, v ktorom je zaradený predradený odpor R_d pred tenzometer s odporom R.



Obr. 4.6. Potenciometrické zapojenie tenzometra

Potom pre okamžitú hodnotu výstupného napätia platí

$$u = \frac{R}{R + R_d} \cdot U \tag{4.13}$$

Pre dynamické hodnoty ε je potrebné upraviť tento vzťah pre zmenu R (derivovaním vzťahu 4.13)

$$\frac{du}{dR} = \frac{R_d}{(R + R_d)^2} \cdot U \tag{4.14}$$

čiže pre konečné hodnoty $\Delta R/R$ platí

$$\Delta u = \frac{R \cdot R_d}{(R + R_d)^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot U \tag{4.15}$$

Pre optimálnu hodnotu predradeného odporu vychádza $R_d = R$, takže

$$\Delta u = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot U \tag{4.16}$$

Výstupný signál ($u + \Delta u$) sa privádza na indikačný prístroj cez kondenzátor, aby sa sledovala iba dynamická zložka Δu.

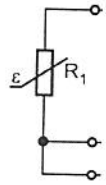
Wheatstonov mostík patrí k najčastejším aplikáciám vyhodnocovacích obvodov tenzometrov, pričom je vyvážený pri nezaťažených tenzometroch. Rôzne zapojenia sú na obr. 4.7. Jednosmerné mostíky patria k najrozšírenejším v štandardných aplikáciách najmä pre tzv. plný mostík, čiže pre štyri aktívne prvky. Nestálosť nuly jednosmerných zosilňovačoch a termoelektrické poruchové napätia obmedzujú možnosti použitia jednosmerných mostíkov. Uvedené problémy rieši mostík so striedavým napájaním, avšak častokrát za cenu nutných riešení vplyvov parazitných impedancií vedení i vlastných tenzometrov. Pre striedavé napájanie s nosnou frekvenciou pod 200 Hz obyčajne možno zanedbať vplyvy parazitných kapacít tenzometrov a vedenia. Striedavé mostíky však nie sú vhodné na meranie premenného mechanického napätia s vyššou frekvenciou. Impulzné napájanie mostíka sa uplatňuje len pri potláčaní tepelného preťaženia meracieho systému, čiže keď nie je možné použiť vyššie napájacie napätie.

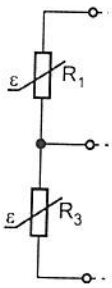
Pre výpočet napätia u_D (obr. 4.7*c*) možno použiť vzťah

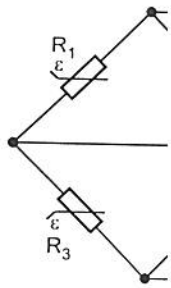
$$u_D = U \cdot K_U \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right] \cdot (1 - N) \cdot P \cdot D \tag{4.17}$$

kde $K_U = \dfrac{R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}$

Člen N je koeficient vyjadrujúci chybu linearity výstupného napätia u_D. Pre deformácie do $\varepsilon = 5.10^{-2}$ má koeficient N zanedbateľnú hodnotu. Člen P rešpektuje vplyv odporu vedenia R_v, pričom jeho významné zmeny môžu vznikať aj kolísaním prechodových odporov spojovacích svoriek na vedeniach alebo prechodových odporov prepínačov meracích miest pri väčšom množstve tenzometrov pripájaných do obvodu centrálneho mostíka. Člen D rešpektuje vplyv vstupného odporu R_z, tj. vplyv naväzujúceho meracieho prevodníka alebo indikátora.



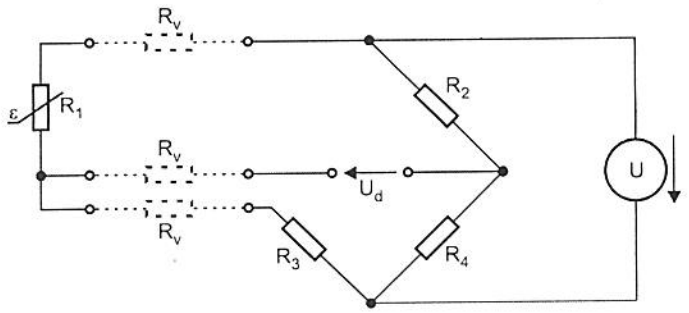




a) trojvo
b) trojvo
c) štvorv

Z hľadiska potlačenia
obvodov je výhodnejšie po
obr. 4.7*c* s prúdovým napája

$u_D = I \cdot k$



Obr. 4.7. Tenzometrické mostíky
a) trojvodičové pripojenie s jedným tenzometrom (štvťmostík)
b) trojvodičové pripojenie s dvoma tenzometrami (polmostík)
c) štvorvodičové pripojenie so štyrmi tenzometrami (plný mostík)

Z hľadiska potlačenia chyby linearity a obmedzenia teplotnej závislosti vyhodnocovacích obvodov je výhodnejšie používať prúdový mostík (napájaný prúdom). Pre zapojenie podľa obr. 4.7*c* s prúdovým napájaním platí podobný vzťah ako je 4.17

$$u_D = I \cdot K_1 \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right] \cdot (1 - N_1) \cdot P_1 \cdot D \qquad (4.18)$$

kde $K_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$

Príklady zapojenia tenzometrov do mostíka (obr. 4.7)

a) - R_1 merací (aktívny) tenzometer,
- R_2, R_3, R_4 presné, teplotne nezávislé odpory
- zapojenie podľa obr. 4.7*a*.

V tomto zapojení sa prejavuje hlavne teplotná závislosť meracieho tenzometra. Pri kovovom aktívnom prvku je vhodné použiť tzv. samokompenzujúci tenzometer. Pri polovodičových sa táto metóda dá uplatniť len pre typ N. Chybu linearity nie je potrebné uvažovať pri kovových tenzometroch do $\varepsilon \leq 3.10^{-3}$, v ostatných prípadoch (kovové, aj polovodičové tenzometre) sa musí prevodová charakteristika linearizovať v analógovej alebo číslicovej časti spracovania signálu.

b) - R_1 merací (aktívny) tenzometer,
- R_3 kompenzačný tenzometer,
- $R_2 = R_4 = R$ presné, teplotne nezávislé odpory,
- zapojenie podľa obr. 4.7*b*.

Kompenzačný tenzometer je vyberaný (párovaný), tak aby mal podobné vlastnosti ako merací, tj. zhodné charakteristické parametre. Je prilepený rovnakým lepidlom na rovnaký materiál (podložku), je rovnako ovplyvňovaný teplotou okolia ako merací, len nie je mechanicky namáhaný. Kompenzačný tenzometer má byť umiestnený čo najbližšie k meraciemu tenzometru tak, aby bolo zachované rovnaké teplotné pole tenzometrov. Tým sa aj nepriamo potláča vplyv odporov prívodných vedení a v prípade použitia striedavého mostíka, aj vplyv parazitných kapacít a prívodov.

c) - R_1 merací tenzometer namáhaný ťahom,
- R_3 merací tenzometer namáhaný tlakom,
- $R_2 = R_4 = R$ presné, teplotne nezávislé odpory,
- zapojenie opäť podľa obr. 4.7*b*.

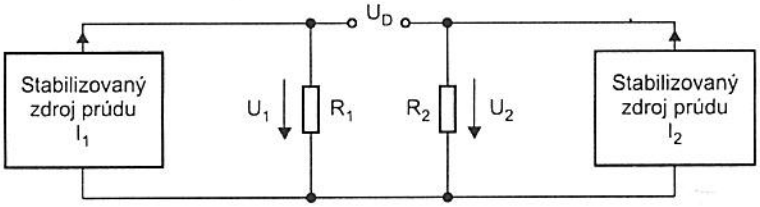
Diferenciálne zapojenie meracích tenzometrov zvyšuje citlivosť na dvojnásobok, kompenzuje chybu linearity v okolí pracovného bodu, ako aj vplyv teplotnej závislosti pri rovnakých vlastnostiach meracích tenzometrov (vyberané tenzometre). Zapojenie je vhodné aj pre polovodičové snímače. Chyba merania pri napájaní Wheatstonového mostíka s dvoma aktívnymi vetvami s polovodičovými tenzometrami je pri vhodne navrhnutom mostíku menšia ako 1%.

d) - $R_1 = R_4$ meracie tenzometre namáhané ťahom,
- $R_2 = R_3$ meracie tenzometre namáhané tlakom,
- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ (pri $\varepsilon = 0$)
- zapojenie podľa obr. 4.7*c*.

Je to veľmi často používané zapojenie pri polovodičových tenzometroch (v protiľahlých vetvách sú zapojené tenzometre s rovnakou polaritou zmeny odporu), napr. pri piezoelektrických snímačoch tlaku. Ich nastavenie a potlačenie poruchových vplyvov je naznačené a komentované v časti *Piezorezistívne snímače tlaku.*

Okrem uvedených zapojení sa používajú aj iné kompenzačné zapojenia, napr. teplotná kompenzácia pomocou sériovo zaradeného NTC termistora.

Porovnávacia metóda je charakterizovaná zapojením podľa obr. 4.8. Jej základná výhoda spočíva v potlačení vplyvu odporov prívodných vedení a v čiastočnom potlačení chyby linearity.



Obr. 4.8. Porovnávacia metóda merania zmeny odporu tenzometra

Cez merací tenzometer R_1 preteká stabilizovaný jednosmerný prúd I_1, kompenzačným tenzometrom R_2 preteká stabilizovaný prúd I_2. Prechodom prúdov cez odpory R_1, R_2 vznikajú úbytky napätia U_1, U_2 , ktoré sa porovnávajú. Ak platia nasledovné predpoklady:

- $I_1 = I_2$,
- pre $\varepsilon = 0$ platí $R_1 = R_2$ (tj. za rovnakých pracovných podmienok sú odpory R_1, R_2 rovnaké),
- zmeny odporov R_1, R_2 v závislosti od teploty sú rovnaké,

potom je rozdiel U_1 - U_2 úmerný meranej deformácii ε

$$U_D = \Delta R_1 I_1 = k \cdot \varepsilon \cdot R_1 \cdot I_1$$

Pri aplikovaní tejto metódy je nevyhnutné napájať meracie a kompenzačné tenzometre z nezávislých stabilizovaných zdrojov prúdu.

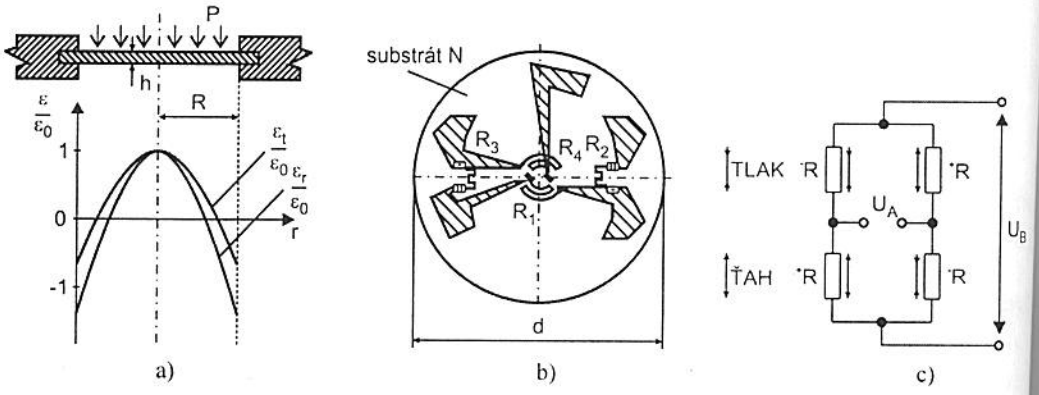
4.1.3 Piezorezistívne snímače tlaku

Piezorezistívne snímače predstavujú novšiu vývojovú etapu tlakových snímačov, ktoré svojimi parametrami reprezentujú vhodné riešenie mnohých požiadaviek automatizačnej techniky. Snaha o zvýšenie citlivosti tlakových odporových tenzometrických snímačov viedla v súčasných konštrukčných riešeniach k náhrade kovových tenzometrov polovodičovými. Ako deformačný člen sa používa tuhá membrána z polovodiča, zvyčajne z kremíka (Si), na ktorej sú vytvorené v difúznych vrstvách polovodičové tenzometre. Uvedený typ snímača je teda založený na využití ***piezorezistencie v polovodiči a difúznej vrstve polovodiča.*** Pôsobením mechanického namáhania v určitej kryštalografickej osi monokryštálu polovodiča alebo

v difúznej vrstve polovodiča dochádza ku zmene vodivosti – ***piezorezistencii***. Vzhľadom k mnohým výhodám sa predovšetkým využíva piezorezistívny jav v difúznych vrstvách polovodiča. Toto riešenie umožňuje:

- vytvoriť miniatúrne (až subminiatúrne) snímače tlaku,
- podstatne zlepšiť mechanické vlastnosti membrány (hysterézia, dopružovanie a pod.),
- vytvoriť na membráne väčší počet aktívnych piezorezistívnych prvkov (zväčšiť citlivosť meracieho prvku),
- zväčšiť frekvenčný rozsah tlakového snímača.

Obr. 4.9 charakterizuje usporiadanie prvkov a konštrukčné riešenie piezorezistívneho snímača tlaku. Deformačným prvkom je tuhá *Si* membrána, v ktorej vznikajú pri tlakovom namáhaní radiálne a tangenciálne napätia. Na základe analýzy priebehov týchto napätí sú rozmiestnené dvojice piezotenzometrov (tzv. *S-krivka*) na ploche membrány.



Obr. 4.9. Kremíkový snímač tlaku
a) závislosť relatívnych hodnôt radiálnej deformácie ε_r a tangenciálnej deformácie ε_t na vzdialenosti od osi membrány ($\varepsilon_0 = \varepsilon_{r0} = \varepsilon_{t0}$ je deformácia membrány v osi)
b) kremíková membrána s piezorezistormi typu P
c) zapojenie tenzometrov do mostíka

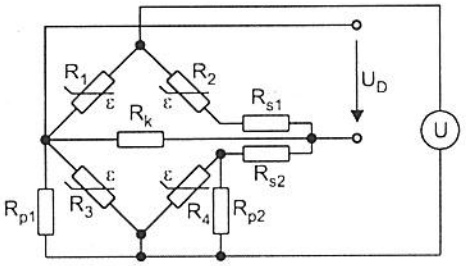
Vyhodnocovacie obvody pre piezorezistory sú zväčša založené na aplikácii Wheatstonovho mostíka vyváženého pri nezaťažených tenzometroch. Pre striedavé napájanie s nosnou frekvenciou $f < 200$ Hz možno v mostíku zanedbať parazitné kapacity tenzometrov a vedení. Potlačenie nelinearity statickej charakteristiky a teplotnej závislosti koeficienta deformačnej citlivosti sa rieši vhodnou voľbou koncetrácií prímesí do polovodičov. Hlavným problémom zostáva vplyv teploty na odpor tenzometrov. Príklad riešenia eliminácie tejto poruchovej veličiny je na obr. 4.10. Pri nulovom mechanickom napätí platí pre výstupné napätie z mostíka

$$u_D \cong \frac{U}{4}\left(\frac{\Delta r_1}{R_1} - \frac{\Delta r_2}{R_2} + \frac{\Delta r_3}{R_3} - \frac{\Delta r_4}{R_4}\right)$$

pričom nezávislosť napätia u_A na teplote je daná podmienkou

$$\Delta r_1 + \Delta r_3 = \Delta r_2 + \Delta r_4$$

Vzhľadom na rozdielnosť hodnôt Δr_i (aj pri monolitickej technológii) možno túto podmienku dodržať napr. úpravou teplotných koeficientov tenzometrov R_3 a R_4 pripojením teplotne nezávislých rezistorov R_P. Návrh a doplnenie odporov R_p, R_k, R_s do štruktúry meracieho člena tlaku rieši jeho výrobca. Pri použití polotovaru snímača tlaku treba uvedené odpory určiť a doplniť podľa doporučenia výrobcu.



Obr. 4.10. Kompenzácia teplotnej závislosti piezotenzometrov
R_k –kalibračný rezistor, R_P – kompenzačný rezistor,
R_S – vyvažovací rezistor

4.1.4 Kapacitné snímače tlaku

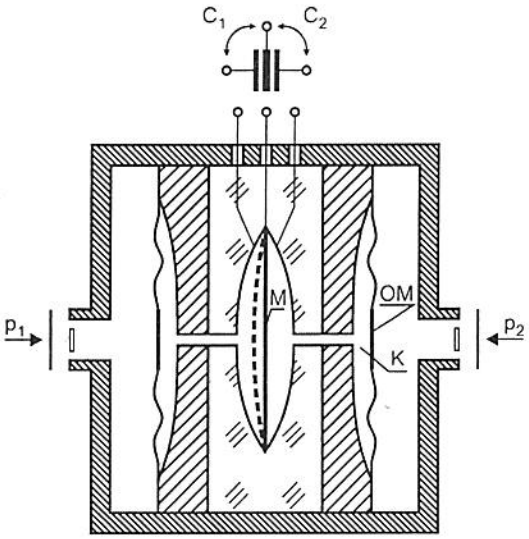
Základným prvkom kapacitných snímačov tlaku je pružný člen, ktorý je spojený aspoň s jednou elektródou snímacieho kondenzátora. Najčastejšie sa využíva deformácia polovodičových (kremík), izolačných a kovových votknutých membrán a tenkovrstvových nosníkov. Na zvýšenie citlivosti a pre malé alebo dynamické tlaky sa používa mäkká membrána alebo vlnovec. Len zriedka sa uplatňujú iné princípy založené napr. na zmene permitivity dielektrika meraným tlakom.

Princíp využívajúci zmenu kapacity snímača tlaku má svoje obmedzenia dané teplotnou dilatáciou konštrukčných prvkov snímača, nelineárnou závislosťou kapacity na tlaku, „nepiestovým" pohybom membrány, atď. Preto väčšina kapacitných snímačov tlaku je riešená ako diferenciálna, lebo diferenciálne snímače z princípu svojej činnosti potláčajú poruchové veličiny pôsobiace na obe časti diferenciálneho meracieho prvku, ako je napr. teplotná dilatácia.

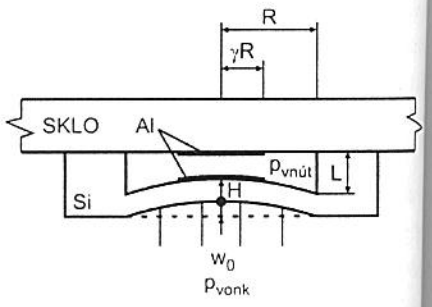
Kapacitné snímače tlaku sa v prevádzkovom meraní uplatňujú menej často ako piezorezistívne, ale niektoré renomované firmy s tradíciou v tejto oblasti úspešne konkurujú odporovým snímačom. Ilustračný príklad je na obr. 4.11, tzv. „kapacitná meracia bunka" vhodná svojim prevedením do náročných prevádzkových podmienok, tj. s oddeľovacím membránovým systémom, ktorý chráni meraciu membránu pre účinkami agresívnych tekutín. Meracia membrána je tiež chránená pred preťažením opornou oblúkovou stenou v meracej komore. Takáto prevádzková meracia technika má výborné kvalitatívne parametre, ale aj

vysoké nadobúdacie ceny a pomerne veľké rozmery (podobné ochranné úpravy majú aj prevádzkové meracie členy tlaku pracujúce na iných princípoch, napr. piezorezistívne).

V súčasnej dobe sa začínajú uplatňovať aj ***senzory tlaku***, tj. miniaturizované aktívne prvky vyrábané technológiami IO, často integrované spolu s vyhodnocovacou elektronikou. Kremíkové membrány, ktoré sú hrubé len niekoľko mikrometrov, sa získavajú elektrochemickým leptaním kremíkového substrátu, pričom epitaxná vrstva určuje hrúbku membrány. Kapacitné senzory tlaku zatiaľ nemajú presnosť a opakovateľnosť zrovnateľnú s uvedenou klasickou prevádzkovou technikou. Uplatňujú sa však vzhľadom na vysokú citlivosť, vďaka malým rozmerom a nižšej cene. Príklad kapacitného senzora tlaku je na obr. 4.12. Senzor tlaku (obr. 4.12) sa skladá z kremíkovej membrány votknutej do kremíkovej obruby hermeticky uchytenej na hrubej sklenenej podložke. V strede membrány a oproti na sklenenej podložke sú hliníkové elektródy vzduchového kondenzátora C_V. Činnosť tohto senzora je podmienená deformáciou (priehybom) kremíkovej membrány s hliníkovou elektródou vonkajším tlakom pôsobiaceho prostredia, pričom sa mení kapacita vzduchového kondenzátora. Zmeny kapacity sú relatívne malé (rádovo pF), preto je spracovanie tohoto signálu veľmi náročné, najvhodnejšie v blízkosti jeho vzniku. Preto je senzor často integrovaný s vyhodnocovacími obvodmi na spoločnom čipe.



Obr. 4.11. Diferenciálny kapacitný snímač s oddelovacou kvapalinou
OM – oddelovacie membrány
K – chemicky stála a neagresívna kvapalina
M – meracia membrána



Obr. 4.12. Senzor tlaku

4.1.5 Rezo

Rezonančn
kmitania rezona
rezonátora je
mechanickým
prevodový mech
veľkosti meran
frekvencie prvku

Mechanické
elektromechanick
nepretržite ladí b
tlaku na vstupe
piezoprvok.

Podstatou p
rezonančných prv
rezonátora. Výho
merania a stabilita
v číslicových syst
cena. Snímače tla
v náročných regul
kvalitu riadenia, p

Strunový rez
Ako rezonančný p
v bronzovej memb
kmitá priečnym
pôsobiaceho na me
sa mení rezonanč
mechanický systén
sledovaním amplitú

Snímač je vhc
priečnych kmitov s
snímača tlaku býva
kusov až 0,1 % z me

4.1.5 Rezonančné snímače tlaku

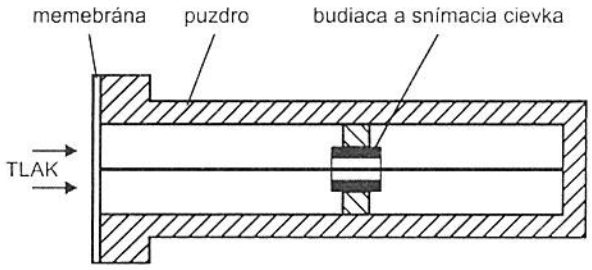
Rezonančné snímače tlaku využívajú závislosť rezonančnej frekvencie mechanického kmitania rezonančného prvku v závislosti na jeho mechanickom napätí. ***Vlastná frekvencia*** rezonátora je daná najmä jeho tvarom, rozmermi, hustotou (mernou hmotnosťou), ***mechanickým napätím*** a ďalšími faktormi. Meraný tlak pôsobí buď priamo alebo cez prevodový mechanizmus na rezonančný prvok a vyvolá v ňom mechanické napätie úmerné veľkosti meraného tlaku. Zmena mechanického napätia spôsobuje ***zmenu rezonančnej frekvencie prvku***, a táto je funkciou meraného tlaku.

Mechanické kmitanie rezonančného prvku je budené elektronicky pomocou elektromechanických meničov. Prostredníctvom elektronického spätnoväzobného obvodu sa nepretržite ladí budiaca frekvencia na rezonančnú frekvenciu pracovného prvku (podľa zmeny tlaku na vstupe). Vhodné elektromechanické meniče predstavujú elektromagnet alebo piezoprvok.

Podstatou poruchovou veličinou pri rezonančných metódach je teplotná závislosť rezonančných prvkov, lebo zmeny okolitej teploty ovplyvňujú modul pružnosti a rozmery rezonátora. Výhodou rezonančných snímačov tlaku je ich malá hysterézia, vysoká presnosť merania a stabilita charakteristík v čase. Výstupný signál je frekvencia, vhodný na spracovanie v číslicových systémoch. K nevýhodám patrí relatívne pomalá odozva, náročná výroba a vyššia cena. Snímače tlaku pracujúce na tomto princípe sú pre svoje vlastnosti perspektívne hlavne v náročných regulačných obvodoch (napr. v leteckej technike) pri vysokých požiadavkách na kvalitu riadenia, prípadne monitorovania procesnej veličiny.

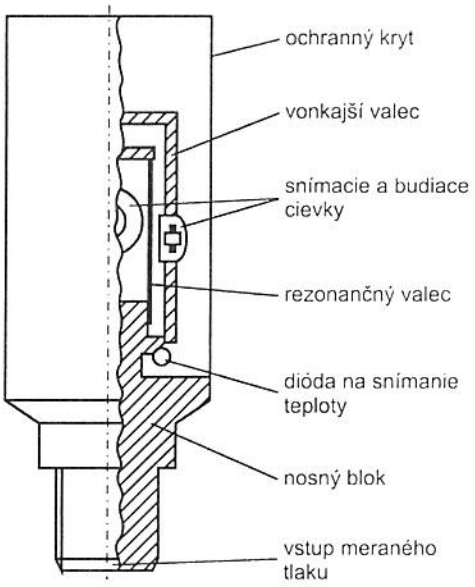
Strunový rezonančný snímač tlaku (obr. 4.13) je určený na meranie absolútneho tlaku. Ako rezonančný prvok sa používa napnutá oceľová struna namáhaná ťahom, ktorá je ukotvená v bronzovej membráne, na ktorú pôsobí meraný tlak. Struna je budená elektromagneticky a kmitá priečnym kmitaním s frekvenciou odpovedajúcou rezonančnej. Pri zmene tlaku pôsobiaceho na membránu sa táto zmena prenáša na strunu a mení jej mechanické napätie, čím sa mení rezonančná frekvencia celého mechanického systému. Na túto novú hodnotu je mechanický systém vybudený pripojeným spätnoväzobným elektronickým obvodom, napr. sledovaním amplitúdy.

Snímač je vhodný na meranie v rozsahu od (0 ÷ 0,1 až 5) MPa. Frekvencia vlastných priečnych kmitov struny sa pohybuje v rozmedzí (700 až 2 000) Hz. Teplotná chyba takéhoto snímača tlaku býva -2.10^{-4} % .°C^{-1}. Celková presnosť merania dosahuje 0,5 %, u vybraných kusov až 0,1 % z meracieho rozsahu.



Obr. 4.13. Strunový rezonančný snímač tlaku

Snímač tlaku s rezonančným valcom je určený na meranie absolútneho tlaku, existuje však aj diferenciálne prevedenie. Rez snímačom je na obr. 4.14. Rezonančný element tohto snímača je vlastne tenkostenný valec z feromagnetického materiálu. Meraný tlak sa privádza do dutiny rezonančného valca, pričom priestor medzi rezonančným a vonkajším valcom je vákuovaný. Zmena tlaku vo vnútri rezonančného valca vyvolá v jeho stene zmenu mechanického napätia, ktorá vedie k zmene vlastnej frekvencie kmitajúceho prvku. Priečne kmitanie valca je budené štvoricou cievok.

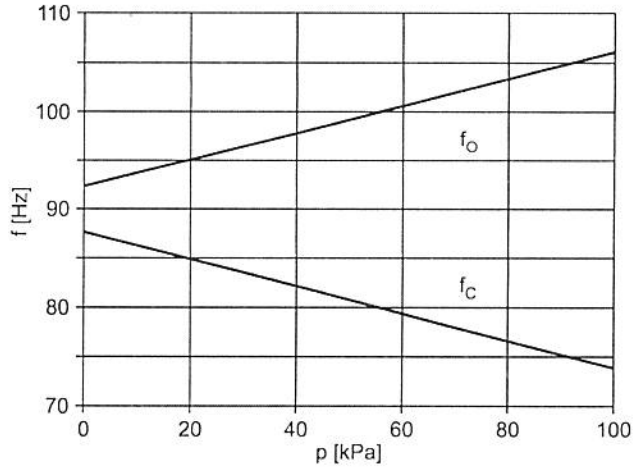


Obr. 4.14. Rezonančný snímač tlaku s kmitajúcim valcom

Snímač je možné konštruovať pre meranie v rozsahoch od (0 ÷ 0,2 až 1) MPa. Frekvencia vlastných priečnych kmitov valca sa pohybuje v rozmedzí (5000 až 7000) Hz. Presnosť merania po teplotnej korekcii dosahuje 0,02.

Prvý priemyselný smart (inteligentný) rezonančný snímač tlaku bol uvedený v 90-tych rokoch, a to v diferenciálnom prevedení s výbornými metrologickými a prevádzkovými vlastnosťami. Dva rezonátory, umiestnené v poli permanentného magnetu sú striedavým

signálom vybudené na vlastnú frekvenciu. Vhodným rozmiestnením rezonátorov na meracom čipe sa dosiahlo, že rezonátor v strede čipu je namáhaný tlakovými silami a „ladí" sa smerom dole, zatiaľ čo rezonátor na okraji je ťahaný a svoju frekvenciu zvyšuje pri zvyšovaní tlaku, obr. 4.15. Charakteristika rezonátorov je lineárna, súčtom frekvencii sa získava údaj o statickom tlaku, rozdiel frekvencií je úmerný tlakovej diferencii. Impedancia každého z rezonátorov je úmerná teplote, takže sa dá spoľahlivo určiť teplota senzora a kompenzovať jej vplyv.



Obr. 4.15. Prevodová charakteristika rezonátorov, centrálny rezonátor f_c, okrajový f_o

4.2 Snímače a meracie členy sily

Sila patrí k základným veličinám mechaniky. Spôsobuje zmenu hybnosti telies (ich zrýchlenie alebo spomaľovanie), ako aj ich deformácie. Preto meranie sily je veľmi dôležité v mechanických a elektromechanických systémoch výrobných zariadení, v mechanických systémoch automatizačných prostriedkov, ale aj pri vývoji týchto zariadení. Meranie síl sa vyžaduje hlavne pri

- zrýchľovaní hmôt,
- meraní tiaže, resp. hmotnosti,
- pri pôsobení zaťaženia a pri deformáciách materiálov.

V bežných technických aplikáciách možno považovať hmotnosť sledovaného objektu *m* za konštantnú a potom pre silu, ktorá spôsobí jeho priamočiary rovnomerne zrýchlený pohyb platí Newtonov zákon

$$F = m \cdot a \qquad \left[N; kg; m \cdot s^{-2}\right]$$

kde *a* je zrýchlenie objektu.

Pre tiaž *G*, tj. pre silu, ktorá je prejavom hmoty *m* v gravitačnom poli zeme, platí tzv. statická definícia sily

$$G = m \cdot g$$

kde g je tiažové (gravitačné) zrýchlenie.

Jednotka sily je ***newton*** [N] reprezentujúca silu, ktorá udelí hmote jedného kilogramu zrýchlenie 1 $m.s^{-2}$. Z toho vyplýva, že platí vzťah $1N = 1\ kg.m.s^{-2}$. Z tejto definície vyplýva, že jednotku sily možno realizovať len dynamicky, čo je problematické z hľadiska dodržania rovnakých podmienok pri opakovaných aplikáciách.

Vzhľadom na prevod sily na elektrický signál, snímače sily pracujú na princípoch:

- zmeny elektrického odporu,
- zmeny indukčnosti,
- zmeny kapacity,
- využitia piezoelektrického a magnetostrikčného javu,
- a ďalšie.

V súčasnosti majú najväčší význam snímače s ***nepriamym meraním*** sily. Transformácia meranej sily na elektrický výstupný signál sa uskutočňuje, podobne ako pri snímačoch tlaku, v dvoch krokoch. Deformuje sa citlivý a pružný prvok snímača (deformačné teleso) a súčasne prebieha transformácia deformácie na elektrickú veličinu snímaním relatívnej alebo celkovej deformácie (priehyb, posunutie) pružného prvku. Väčšina aplikácií snímačov síl pokrýva rozsahy (10^{-2} až 10^{8}) *N*, čo reprezentuje veľmi široké rozpätie a rôznorodé konštrukčné riešenia, ako napr. viaczložkové snímače síl používané v robototechnike.

Snímače dynamických síl využívajú piezoelektrický a magnetický jav, tj. sú to ***priame snímače sily***.

4.2.1 Nepriame meranie síl

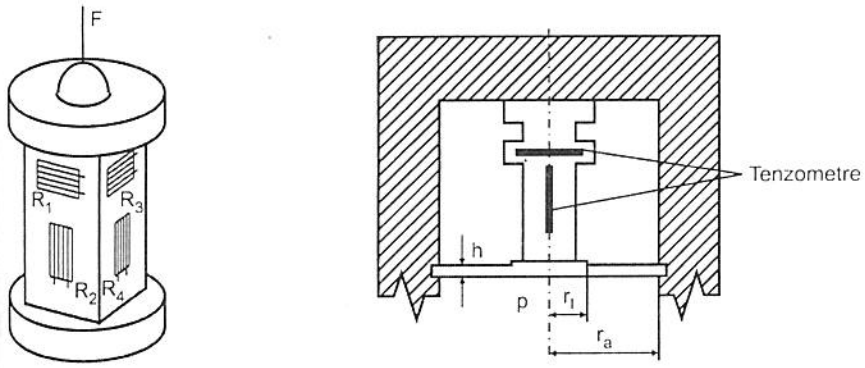
Väčšina snímačov síl využíva účinok meranej sily na pružný prvok na premenu na elektrický signál. Transformačné prvky sa vyznačujú deformáciami objemu alebo povrchu. Pri konštrukčnom riešení deformačných prvkov sa dodržujú zásady ***jednoliatosti*** (každá deliaca plocha je zdrojom trenia, ktoré nepriaznivo ovplyvňuje výstupný signál), ***integračnosti*** (vytvorí sa definované mechanické pole tak, aby pôsobisko sily na deformačné teleso bolo čo najďalej od meracích miest deformácie, sila pôsobí bodovo a vyžaduje sa symetrický tvar deformačného prvku) a ***princípu symetrie*** (vonkajšie poruchové veličiny (napr. teplota) sa v takto usporiadanom meracom systéme kompenzujú z princípu činnosti).

Pružné členy sa delia podľa typu namáhania na:

- tlakovo (ťahovo) deformačné prvky,
- ohybovo deformačné prvky,
- šmykovo deformačné prvky.

Na obr. 4.16 sú ukážky pružných prvkov prvej skupiny, ktoré vyhodnocujú vstupný signál (sila, tlak s prevodom na silu) prostredníctvom deformácie pružného prvku a cez zmenu odpor

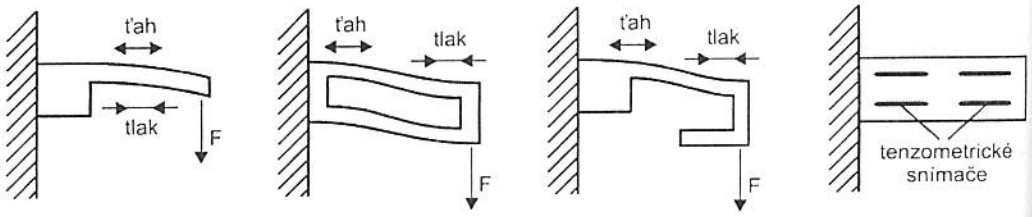
(tenzometer) na elektrický signál. Príklad na obr. 4.16*a* znázorňuje usporiadanie snímača tlakovej sily s kompenzačnými tenzometrickými snímačmi alebo snímačmi ťahu (R_1, R_3) a „pracovnými" snímačmi tlaku (R_2, R_4). Obr. 4.16*b* predstavuje zasa membránový snímač tlaku s prevodom na deformáciu stĺpika s meracími tenzometrami. Zapojenie tenzometrov môže byť však rôzne, podľa prevádzkových požiadaviek (pozri časť *Odporová tenzometria*).



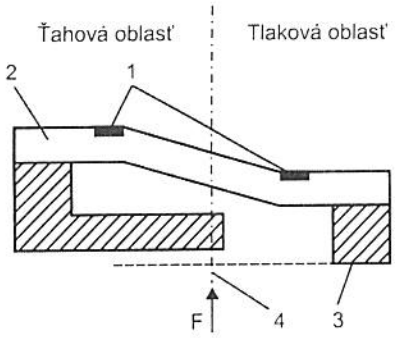
a) b)

Obr. 4.16. Snímače sily s pružnými prvkami namáhanými tlakovými a ťahovými mechanickými napätiami

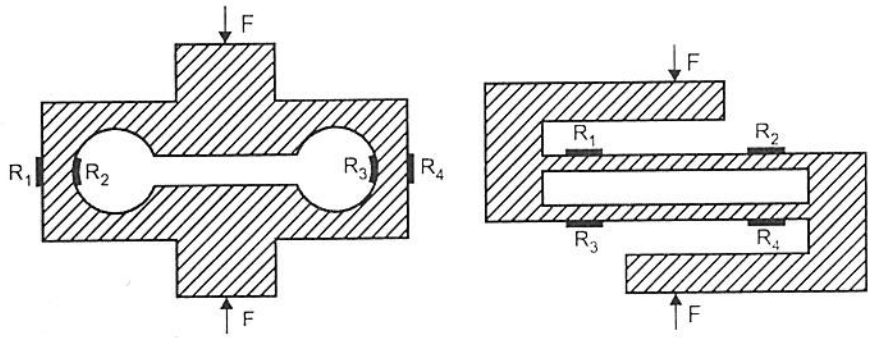
Pre menšie sily je vhodnejší ohybom namáhaný a odľahčený tvar pružného prvku s tenzometrami umiestnenými na najviac deformovaných miestach, obr. 4.17*a*. Časté je aj usporiadanie podľa obr. 4.17*b, c, d* s odľahčeným prierezom, pri ktorom sa v otvoroch alebo drážkach vytvára zvýšené mechanické napätie na ohyb. Takéto usporiadanie umožňuje v určených miestach vytvoriť lepšie deformačné pomery, vyžadované pre plné mostíkové zapojenie. Tenzometre umiestnené vo vnútri telesa sú chránené voči vonkajšiemu poškodeniu. Príklad snímača sily alebo tlaku je na obr. 4.17*b*. Deformačný prvok vytvára jednoduchý votknutý nosník *2*, na ktorý pôsobí sledovaná sila *F* v mieste *4*. Nosník (kovový alebo kremíkový) je upevnený na prsteň *3* a namáhaný tak, že sa esovito prehýba, čím sa na ňom vytvárajú miesta s ťahovou a tlakovou deformáciou. V týchto miestach sú potom umiestnené tenzometre *1*.



a)



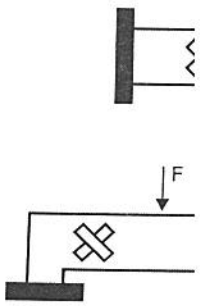
b)



c) d)

Obr. 4.17. Snímače sily s ohybovým deformačným prvkom

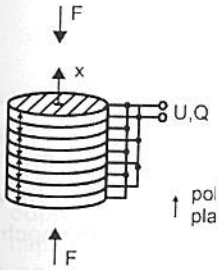
Najjednoduchšie usporiadanie ***prvku deformovaného v šmyku*** predstavuje jednoduch votknutný nosník (obr. 4.18*a*), avšak lepšie vlastnosti vykazujú symetrické konštrukci (obr. 4.18*b,c,d*), pri ktorých dochádza ku kompenzácii vonkajších poruchových veličín. V všeobecnosti sú meracie tenzometre umiestňované vzájomne naprieč a pod uhlom 45° voč pozdĺžnej osi pracovného materiálu. Šmykové pružné prvky sa používajú pre silové snímač v rozsahu 10 kN až 1 MN.



c)

4.2.2 Priame mera

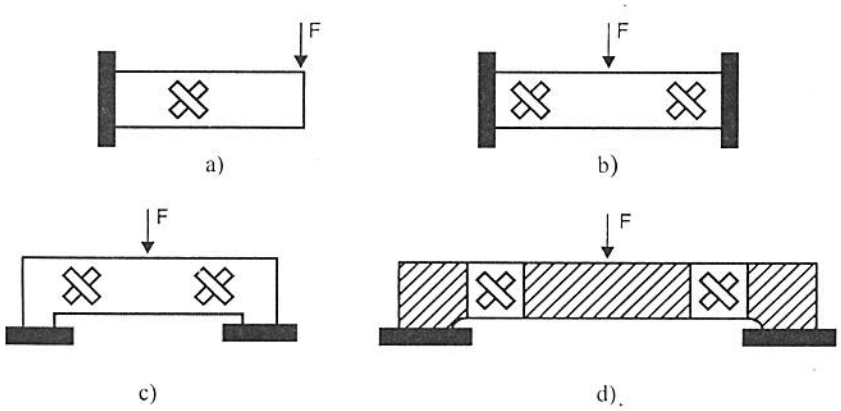
Piezoelektrické sním
dynamicky sa meniacich
meranie statických síl. Cit
tvaru platničky a na zväčš
obr. 4.19*a* (doštičky s opa
v rôznych tvaroch pre ťah
naznačené veľmi často pou
Medzi piezoelektrickými p
dotyková časť *5*. Pružný ob
dotykovým krúžkom *4*. Piez
meniacich síl a momentov v



a)

Obr. 4.1

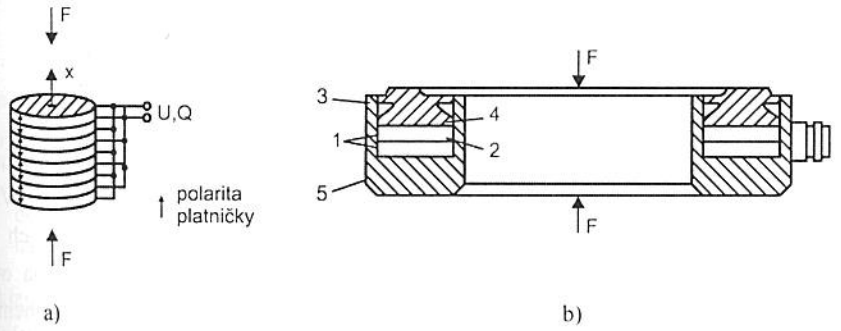
Magnetoelastické sním
deformácii od pôsobiacej sil
čo potláča účinok zložiek si



Obr. 4.18. Šmykové pružné prvky s tenzometrami

4.2.2 Priame meranie síl

Piezoelektrické snímače využívajú piezoelektrický jav, ktorý je vhodný na meranie dynamicky sa meniacich vstupných silových signálov. Tento princíp však nie je vhodný na meranie statických síl. Citlivý prvok snímača je vytvorený z kryštálu kremíka vyrezaného do tvaru platničky a na zväčšenie citlivosti zapájaný do diferenciálnej zostavy platničiek podľa obr. 4.19*a* (doštičky s opačnou orientáciou proti sebe). Piezoelektrické snímače sa vyrábajú v rôznych tvaroch pre ťahové a tlakové sily s rozsahom 10kN až 10 MN. Na obr. 4.19*b* je naznačené veľmi často používané riešenie pre montáž do konštrukcie so strediacim hriadeľom. Medzi piezoelektrickými platničkami *1* je umiestnená jedna elektróda *2*, pričom druhú tvorí dotyková časť *5*. Pružný obal *3* vytvára požadované predpätie platničiek a je doplnený horným dotykovým krúžkom *4*. Piezoelektrické priame meranie sa uplatňuje pri sledovaní dynamicky sa meniacich síl a momentov v tzv. viackomponentných zostavách.



Obr. 4.19. Piezoelektrický snímač sily, platničková zostava

Magnetoelastické snímače sily využívajú zmenu vlastností feromagnetika pri jeho deformácii od pôsobiacej sily. Mierou snímanej sily je objemová deformácia pružného prvku, čo potláča účinok zložiek sily, ktoré v jednozložkovom snímači sily pôsobia nepriaznivo ako

poruchové veličiny. Sú to meracie členy sily pre náročné prevádzkové podmienky. Vyrábajú sa pre maximálne zaťaženie 25 kN, pracujúce s presnosťou do 1 %.

4.2.3 Iné princípy merania síl

Na realizáciu prevodu výchylky (priehybu, posunutia) pružného prvku na elektrický signál sa požívajú rovnaké princípy ako pri snímačoch polohy. Najčastejšie ide o indukčnostné a kapacitné snímače.

Indukčnostné snímače sú vhodné na meranie malých síl. Používajú indukčnostné prvky s malou vzduchovou medzerou a otvoreným magnetickým obvodom. Môžu pracovať buď ako snímače polohy alebo deformácie niektorej časti pružného prvku. Používajú sa na meranie síl od 10^{-2} N do 10 MN s presnosťou merania len (1 až 3) %.

Kapacitné snímače polohy v silových meracích členoch sa uplatňujú väčšinou pri použití membránového pružného prvku, tj. ak membrána tvorí jednu elektródu meracieho kondenzátora. Snímače takéhoto vyhotovenia sú jednoduché a vhodné aj na sledovanie dynamických síl. Ich nevýhodou je nízky užitočný signál, čiže jeho obtiažne spracovanie. Poruchové veličiny, ako je zmena kapacity s teplotou, vlhkosťou a pod., obmedzujú ich rozšírenie.

4.3 Snímače a meracie členy momentu sily

Moment sily je príčinou uhlového zrýchlenia (spomalenia) telies, resp. ich deformácie. Súvislosť medzi momentom M a uhlovým zrýchlením telesa ε s momentom zotrvačnosti charakterizuje vzťah

$$M = J \cdot \varepsilon$$

Zo základných zákonov fyziky o pohybe telesa okolo pevnej osi vyplýva, že

$$M = F \cdot r$$

kde F je sila a r rameno sily. Jednotkou momentu sily je ***newtonmeter*** [N.m].

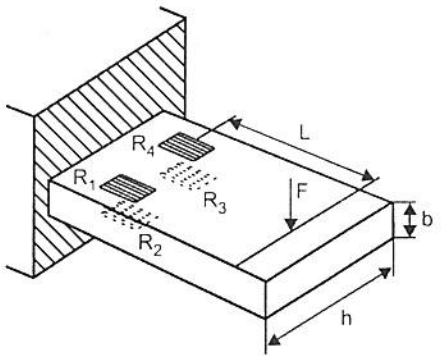
Meranie momentu súvisí s prenosom mechanickej energie v rámci mechanických systémov a slúži na určovanie okamžitého výkonu strojov a meranie ich účinnosti. Vzhľadom na rotačný charakter účinku momentu sily na konštrukčné prvky v mechanizmoch prevláda namáhanie ***krútiacim momentom***. Príklad pôsobenia ***ohybového momentu*** je na obr. 4.2. Snímače krútiaceho momentu sa v automatizačnej technike používajú hlavne v kinematických systémoch automatizačných prostriedkov, napríklad v akčných členoch alebo robotických systémoch pri nepriamom sledovaní silových pomerov vo výstupnej hlavici. Znalosť krútiaceho momentu je veľmi dôležitá aj pri určovaní vlastností akčných členov (elektrických, pneumatických a hydraulických motorov).

Pri snímaní krútiaceho momentu sa používajú väčšinou pružné prvky, ktorými sa sledovaný krútiaci moment mení na deformáciu alebo výchylku. Podľa typu výstupného signálu možno rozdeliť snímače do troch základných skupín:

- mechanické snímače,
- elektrické snímače,
- optické snímače.

Mechanické princípy majú obmedzené použitie a v automatizácii sa neuplatňujú. ***Elektrické snímače***, tj. s elektrickým výstupným signálom, sú významné tým, že umožňujú automatizované spracovanie výstupných signálov, vysokú presnosť merania a tiež dynamické snímanie krútiaceho momentu. Preto sa používajú v automatizačných prostriedkoch najčastejšie. ***Optické snímače*** (prípadne optoelektronické) predstavujú perspektívne riešenia v tejto oblasti.

Ako pružný prvok snímačov krútiaceho momentu sa často využíva priamo hriadeľ, ktorým sa meraný moment prenáša (jeho pomerné predĺženie alebo uhlové pootočenie). Metódy prevodu deformácie hriadeľa na elektrický signál sú úplné analogické, ako pri snímačoch sily. Najčastejšie sa používajú odporové snímače, snímače fotoelektrické a kapacitné, menej často indukčnostné a magnetické.



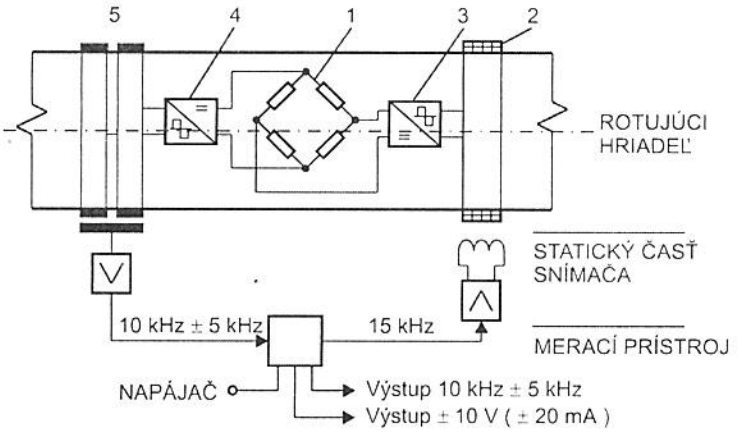
Obr. 4.20. Príklad snímania ohybového momentu od sily F

Odporové snímače sa používajú najčastejšie a deformáciu hriadeľa snímajú dvomi spôsobmi:

- potenciometrom, ktorý pracuje ako snímač uhlovej výchylky.
- odporovým tenzometrom, ktorý pracuje ako snímač šmykového alebo ohybového napätia.

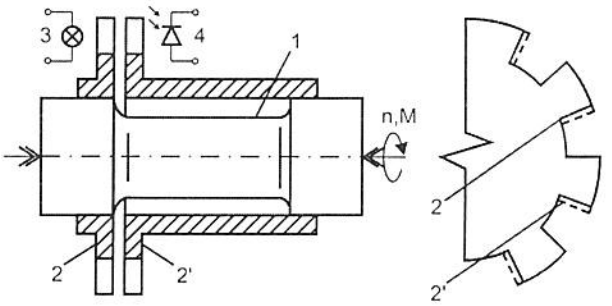
Príklad merania prenášaného krútiaceho momentu otáčajúcim sa hriadeľom prostredníctvom bezkontaktného prenosu napájacej energie a výstupných signálov je na obr. 4.21. Tenzometrický mostík *1* je napájaný z transformátora *2*. Z rotujúceho sekundárneho vinutia sa odoberá napätie, ktoré po usmernení a stabilizácii v bloku *3* napája mostík so štyrmi aktívnymi tenzometrami umiestnenými pod uhlom 45°voči osi hriadeľa. Výstupný signál

z mostíka sa spracováva v napäťovo-frekvenčnom prevodníku *4* a bez priameho kontaktu (kapacitný prenos *5*) sa prenáša do vyhodnocovacej časti meracieho člena.



Obr. 4.21. Meranie krútiaceho momentu na otáčajúcom sa hriadeli

Príklad ***optoelektronického snímača*** krútiaceho momentu je na obr. 4.22. Na oboch koncoch meracieho hriadeľa *1* sú umiestnené rovnaké dve kruhové clony *2* a *2'*, ktorých zárezy sú pri nulovom momente zriadené presne proti sebe. Pôsobením momentu *M* sa clony voči sebe pootáčajú, čo spôsobuje presvit svetelných lúčov zo zdroja svetla *3* ku snímaču *4*. Elektrický prúd fotodiódy je úmerný pôsobiacemu momentu *M*.



Obr. 4.22. Princíp optoelektronického snímača momentu

5 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY PRIETOKU

5.1 Základné pojmy

Meranie prietoku tekutín (tj. kvapalín, plynov a pár) patrí k najčastejším činnostiam v oblasti merania procesných veličín v priemyselných prevádzkach. Nejedná sa však len o merania prietokov určených pre automatizáciu procesov, či monitorovanie tekutinových pomerov v systémoch, ale aj o produkčné merania vo výrobných prevádzkach a merania pre bezpečnostné účely výrobného procesu. Meranie prietoku sa používa aj pri nepriamych meraniach niektorých dôležitých fyzikálnych (tepelno-technických) a chemických veličín vo výrobných procesoch.

Senzory, snímače, či meracie členy prietoku tekutín určujú ***objemové množstvo*** Q_V alebo ***hmotnostné množstvo*** Q_M pretekajúce zvoleným prierezom za jednotku času. Pri ***ustálenom prietoku*** zo známej plochy prierezu S a strednej rýchlosti pretekajúcej tekutiny $\bar{v}$ v tomto priereze možno určiť prietoky Q_V a Q_M podľa vzťahov

$$Q_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \bar{v} \cdot S \quad \left[m^3 \cdot s^{-1}\right]; \quad Q_M = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \rho \cdot \bar{v} \cdot S \quad \left[kg \cdot s^{-1}\right] \tag{5.1}$$

kde V je objem pretekajúcej tekutiny,
M hmotnosť pretekajúcej tekutiny,
t čas sledovania prietoku tekutiny,
ρ hustota pretekajúcej tekutiny.

Ak nie je prietok ustálený, potom pre okamžitú hodnotu prietoku cez prierez S platí

$$q_v = \frac{dV}{dt} \text{ alebo } q_m = \frac{dM}{dt}$$

a pre pretečený objem látky za konečný časový interval $(t_2 - t_1)$ zasa

$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_v \, dt \quad \text{alebo} \quad M = \int_{t_1}^{t_2} q_m \, dt \tag{5.2}$$

To znamená, že pomocou snímačov prietoku sa určuje stredná rýchlosť prúdu pretečenej tekutiny za určitý časový interval cez určený prierez alebo priamo objem (hmotnosť) tejto tekutiny za časový úsek. Preto je snímač prietoku často označovaný ako ***integračný merací prístroj*** alebo jednoduchšie ***merač prietoku***. Pri určovaní hmotnostného prietoku Q_M z objemového Q_V sa predpokladá znalosť a tiež stálosť hustoty tekutiny ρ.

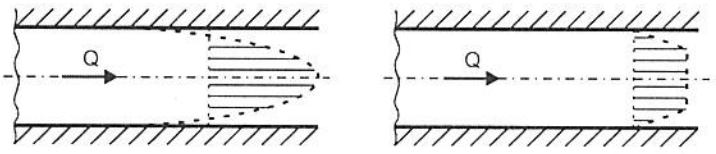
Charakter prúdenia tekutiny sa mení podľa rýchlosti prúdenia, hustoty tekutiny, viskozity tekutiny a charakteristického prierezu. Mechanický charakter prúdenia vzhľadom na uvedené vlastnosti (na základe teórie podobnosti) charakterizuje bezrozmerné tzv. ***Reynoldsovo číslo***

(Re), ktoré udáva pomer medzi zotrvačnými a trecími silami vo vnútri tekutiny. Pre potrubie kruhového prierezu je definované vzťahom

$$\mathrm{Re} = \frac{D \cdot \bar{v}}{\nu}$$

kde D je priemer potrubia [m],
$\bar{v}$ rýchlosť prúdenia tekutiny [m.s^{-1}],
ν kinematická viskozita pretekajúcej tekutiny [m^2. s^{-2}], pozri kap. *Snímače a meracie členy viskozity a hustoty tekutín.*

Číselná hodnota kritického Reynoldsového čísla, pri ktorom dochádza ku zmene laminárneho na turbulentné prúdenie pretekajúcej tekutiny kruhovým potrubím, je 2300. Pokiaľ platí, že $Re < 2300$ prúdenie má laminárny charakter a pre $Re > 2300$ zasa turbulentný, pričom nemožno toto rozhranie považovať za „ostré". To znamená, že prúdenie je s veľkou pravdepodobnosťou laminárne, ak Re < 2000 a turbulentné, ak Re > 3000. Všeobecne v praxi, v technických zariadeniach, prevláda turbulentné prúdenie (väčšie rýchlosti, malé viskozity, prúdenie sa rozpadáva na víry), pre ktoré je charakteristický približne lichobežníkový rýchlostný profil v potrubí s kruhovým prietočným prierezom, obr. 5.1*b*. Pri laminárnom prúdení sa častice tekutiny pohybujú po dráhach, tzv. prúdniciach, ktoré sú navzájom rovnobežné a vytvárajú parabolický rýchlostný profil. Pre optimálny návrh snímačov prietoku je vhodné poznať druh prúdenia v priestore umiestnenia meracieho člena.



a) b)

Obr. 5.1. Tvary rýchlostných profilov v kruhovom potrubí
a) laminárne prúdenie
b) turbulentné prúdenie

Pre korektné vyhodnocovanie merania prietoku tekutín je potrebné ***uvažovať stavové veličiny tekutiny v mieste merania***. Pokiaľ sa hmotnostný prietok ***kvapaliny*** meria nepriamo podľa vzťahu $Q_M = \rho . Q_V$, musí sa teoreticky rešpektovať teplotná závislosť hustoty $\rho = f(\vartheta)$, avšak praktický význam to má len do prevádzkového tlaku 3 MPa. ***Pri plynoch*** je nevyhnutné rozlišovať meranie Q_M alebo Q_V. Najvýhodnejšie by bolo merať priamo hmotnostný prietok, ale väčšina komerčne využívaných princípov určuje práve objemový prietok. Ak sa hmotnostný prietok plynov meria nepriamo cez vzťah $Q_M = \rho . Q_V$, potom treba rešpektovať závislosť $\rho = f(p, \vartheta)$ a namerané hodnoty objemového prietoku plynu prepočítať na referenčné alebo vzťažné podmienky, pre ktoré bol merací člen navrhnutý alebo určený výrobcom. Za vzťažný stav pri plynoch sa najčastejšie považuje tzv. normálny stav, tj. pre

$$\vartheta_0 = 0\,°\mathrm{C},\ (273{,}15\ \mathrm{K})\ ;\ p_0 = 1{,}013\ .\ 10^5\ \mathrm{Pa}$$

Pre vzťažný, resp. normálny objem tekutiny platí

$$M = V_0 \cdot \rho_0 = V \cdot \rho \quad \text{a} \quad V_0 = V \cdot \frac{\rho}{\rho_0} = V \cdot \frac{v_0}{v} \tag{5.3}$$

kde v_0 [$m^3.kg^{-1}$] je jej hmotnostný objem pri teplote ϑ_0 a tlaku p_0,
ρ_0 [$kg.m^{-3}$] jej hustota pri teplote ϑ_0 a tlaku p_0,
v, p jej hmotnostný objem a tlak pri teplote ϑ.

Suché plyny sa svojimi vlastnosťami blížia k ideálnemu plynu, a tak zo stavovej rovnice plynov platí

$$p_0 \cdot v_0 = R \cdot T_0 \quad ; \quad p \cdot v = R \cdot T \tag{5.4}$$

a po dosadení z rov. 5.4 do rov. 5.3 vyplýva

$$V_0 = V \frac{T_0}{p_0} \cdot \frac{p}{T} \qquad [nm^3 \text{ - normálny } m^3] \tag{5.5}$$

kde V [m^3] je prístrojom meraný objemový prietok suchého plynu,
p [Pa] a T [K] sú prevádzkové parametre tlaku a teploty plynu.

Čiže, pri určovaní referenčného prietoku plynu Q_{V_0} sa musia sledovať okrem vlastného prietoku Q_V aj hodnoty ovplyvňujúcich prevádzkových parametrov, tj. p a $T(\vartheta)$ alebo hustota tekutiny ρ, $[\rho = f(p,T)]$.

Pre vlhký plyn, prehriatu a mokrú paru sa musia korekčné prepočty riešiť cez termodynamické vzťahy, diagramy alebo tabuľky, prípadne empirické rovnice, ktoré však vždy platia len pre úzky rozsah hodnôt stavových veličín.

Z uvedeného vyplýva, že pre korektné určenie prietoku tekutín pri nízkych alebo vyšších hodnotách tlaku či teploty je nutné rozšíriť systém merania hlavnej veličiny o meranie pomocných alebo poruchových veličín a súčasne aj o výpočtový mikropočítačový blok na realizáciu potrebných korekcií. Tieto doplnkové prvky sú najčastejšie lokalizované priamo v bloku merania, tj. meracej hlavici meracieho člena (ISS charakter). Tieto prístroje sú spravidla vyhotovené v dvojvodičovom *Ex* prevedení a vybavené číslicovou komunikáciou so svojím technickým okolím.

Súčasný trend vývoja prietokomerov je zameraný na princípy merania, ktoré si nevyžadujú vo svojej štruktúre ***pohyblivé časti***, nespôsobujú veľké ***trvalé tlakové straty*** v tekutinových obvodoch svojimi vnútornými odpormi a nevyžadujú ***zložitý vyhodnocovací systém***. Všetky uvedené vlastnosti podporujú hlavne zlepšenie spoľahlivostných parametrov prietokomerov a predĺženie ich technického života. Najdôležitejší smer vývoja však charakterizujú riešenia, ktoré umožňujú merať ***priamo hmotnostný prietok***, čiže snímanie prietoku nie je závislé od tlaku, teploty a viskozity pretekajúcej tekutiny.

Priame meranie pretečeného množstva je možné len dávkovacími alebo objemovými meracími členmi, ktoré odmeriavajú presne definované diely tekutiny a „prenášajú" ich v smere prúdenia. Väčšina meračov je ***nepriama***, prietok sa sleduje meraním rýchlosti alebo kinetickej

energie. Prietoky v otvorených prietočných prierezoch (napr. kanáloch) vyžadujú špecifické metódy.

Základné metódy merania prietoku svojím názvom zodpovedajú využitým fyzikálnych princípom:

a) ***objemové, dávkovacie***

$$Q_V = \frac{V}{t}; \quad Q_M = \frac{V}{t} \cdot \rho \tag{5.6}$$

napr.

- spojité - kyvné, bubnové, piestové,

b) rýchlostné

$$Q_V = \bar{v} \cdot S; \quad Q_M = \bar{v} \cdot S \cdot \rho \tag{5.7}$$

napr.

- lopatkové, turbínkové,
- indukčné,
- ultrazvukové,
- vírové,
- prierezové - clona, dýza, Venturiho dýza,
- plavákové,

c) hmotnostné

$$Q_M = \frac{M}{t} \tag{5.8}$$

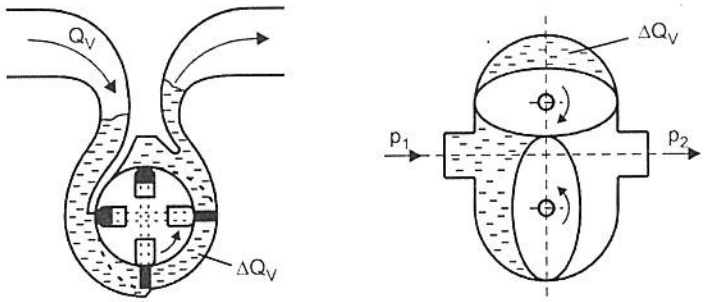
napr.

- Coriolisove,
- tepelné.

Medzi najčastejšie sa uplatňujúce meracie princípy v priemyselných meracích členoch pre malé a stredné prietoky patria prietokomery plavákové (rotametre), turbínkové/lopatkové, indukčné a ultrazvukové. V súčasnosti sa však veľmi rýchlo rozširujú prietokomery typu Vortex (vírové) a Coriolisove hmotnostné prietokomery.

5.2 Objemové a dávkovacie prietokomery

Objemové prietokomery sú jediné, ktoré používajú priame metódy merania, tj vyhodnocujú priamo transportovaný objem. V automatizačnej technike sa obvykle používajú meracie prístroje pracujúce v spojitom režime, pre ktoré je charakteristické samočinné striedanie naplňovania a vyprázdňovanie odmerných objemov (obr. 5.2). Energia potrebná na činnosť meracieho člena sa odoberá priamo z prúdiacej tekutiny, čím vzniká určitá tlaková strata. Výstupný elektrický signál pre ďalšie spracovanie býva obvykle impulzný (frekvenčný).



a) b)

Obr. 5.2. Objemové a dávkovacie prietokomery

Objemové a dávkovacie meradlá sa z princípu činnosti používajú ako presné, kalibrovacie meradlá prietoku (až ako etalóny). Sú určené hlavne na presné meranie prietoku kvapalín v priemysle, ktorých dynamická viskozita η je z intervalu $(6.10^{-4}$ až $3{,}6)$ Pa.s.m^{-2} a pre objemový prietok od (0 až 1) l.h^{-1} do (0 až 2000) l.h^{-1}. Konštrukcia týchto prístrojov je rôzna, avšak spoločným rysom je cyklické plnenie a vyprázdňovanie niekoľkých komôr postupne tak, aby prietok meradlom bol plynulý a meranie spojité. Dávkovacie členy sú v podstate varianty rotačných čerpadiel (obr. 5.2*b*). Je to čerpadlo s dvoma ozubenými oválnymi piestami, ktoré sa po sebe odvaľujú a otáčajú sa vo valcových komorách. Pohyb je generovaný rozdielom točivých momentov vyvolaných tlakmi p_1 a p_2 na príslušné priemety činnej plochy piestov. Údaj objemového prietoku Q_V je odvodený z počtu cyklov za jednotku času. Trieda presnosti týchto prietokomerov v pracovnom rozsahu, tj. (5 až 100) % meracieho rozsahu je podľa vyhotovenia (0.3 až 1) %. Poruchovú veličinu merania predstavuje teplota meranej kvapaliny. Nevýhody tohoto princípu sú hlavne mimoriadne požiadavky na mechanickú čistotu meraného média, meranie objemového prietoku, ďalej to, že vlastný merací systém obsahuje pohyblivé časti a tiež, že systém nezabezpečuje jednoduchý prevod na elektrický signál (napr. indukčnostný snímač, optoelektronický).

5.3 Rychlostné snímače

Činnosť týchto prietokomerov je založená na meraní strednej rýchlosti tekutiny v prietočnom priereze, čiže na nepriamom vyhodnocovaní prietoku z rýchlosti prúdenia podľa rovníc 5.1 alebo 5.7.

5.3.1 Lopatkové a turbínkové snímače prietoku

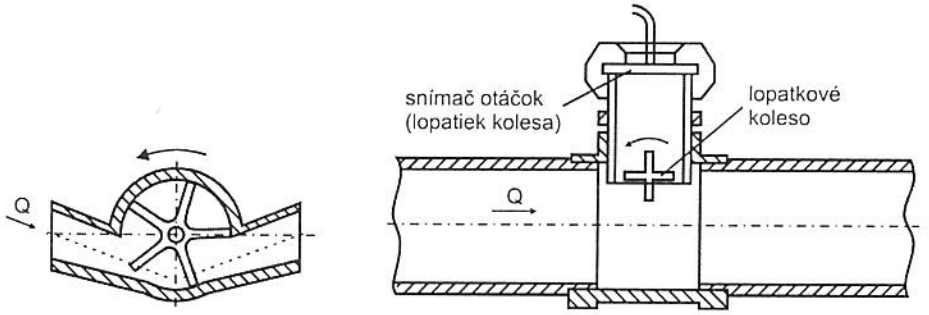
Prúdiaca tekutina pôsobí na pohyblivý prvok snímača (rotor, guličkа), ktorý sa jej účinkom otáča. V častejšom, prvom prípade, tekutina vyvoláva rotačný pohyb lopatkového kolieska alebo turbínky, ktoré majú vhodne usporiadanú sústavu lopatkových plôch umožňujúcich špecifický pohyb tekutiny, napr. skrutkovicový.

Lopatkové snímače prietoku (obr. 5.3) patria k veľmi často používaným prietokomerom v priemysle, ale aj v iných oblastiach pre svoju jednoduchosť a nižšiu cenu. Používajú sa hlavne na meranie prietoku kvapalín. Výstup je spravidla riešený mechanickým počítadlom (nevhodný pre automatizačné a monitorovacie úlohy), na ktorom sa spočítavajú otáčky lopatkového kolesa a integrujú sa jednotlivé prietoky (odbery) v čase. Otáčky n sú priamo úmerné strednej rýchlosti prúdenia tekutiny, čiže aj objemovému prietoku

$$Q_V = k_1 \cdot n + k_2$$

Koeficient k_1 má stálu hodnotu iba v určitom rozsahu prietoku (od 5% až 10% vyššie, podľa vyhotovenia). Koeficient k_2 určuje počiatok rozsahu počítadla.

Prúdiaca tekutina je privádzaná k lopatkovému kolesu jedným (prívodným) kanálom a druhým (odvodným) je odvádzaná.



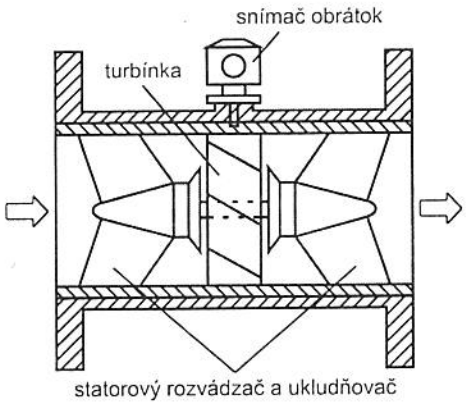
Obr. 5.3. Lopatkový snímač prietoku
a) princíp, napr. s výstupom na mechanické počítadlo
b) s elektrickým impulzným výstupom

Pri otáčaní lopatkového kolesa vznikajú hydrodynamické straty a straty trením v ložiskových častiach kolesa. Preto je obvodová rýchlosť kolesa menšia ako rýchlosť tečúcej tekutiny. Hodnota sklzu kolesa nie je stála, ale zväčšuje sa s klesajúcou rýchlosťou pretekajúceho média.

Túto chybu merania možno zmenšiť vhodnou konštrukciou snímača, pričom výrobca určuje ***minimálne merateľné množstvo*** pri zachovaní základných metrologických vlastností. Niektoré jednoprúdové snímače používajú regulačné dosky, ktoré sú umiestnené vo vnútri komory vedľa lopatkového kolesa. V závislosti od polohy dosky (natočenia) vzhľadom k vstupnému a výstupnému otvoru sa dosiahne úprava hydraulického odporu prietokomera, tj. úprava jeho charakteristiky. Viacprúdové snímače sa vyznačujú tým, že kvapalina pri vstupe do komory prietokomera preteká viacerými otvormi statorového rozvádzača k lopatkovému kolesu a odtiaľ k odtokovým otvorom. Zvýšená citlivosť takto upraveného prietokomera závisí od počtu lopatiek a počtu otvorov v rozvádzači.

Bežné riešenie lopatkových snímačov je vhodné na meranie menších prietočných množstiev plynov a kvapalín. Veľmi často sa používajú na meranie spotreby vody. Vo vyhotoveniach určených pre automatizačné úlohy alebo diaľkové sledovanie prietokov je mechanické počítadlo nahradené bezdotykovým impulzným snímačom obrátok. Najčastejšie sa sníma prechod lopatky definovaným miestom optickým vláknovým senzorom prítomnosti (*Ex* vyhotovenie) alebo Hallovým senzorom (pozri kap. *Snímače a meracie členy polohy*). Takto konštrukčne upravené prietokomery (obr. 5.3*b*) sú vhodné i pre tekutiny s väčšou viskozitou a dosahujú chybu merania okolo 2 % .

Turbínkové (skrutkové) snímače prietoku sa nazývajú aj *Woltmanove*. Os otáčania rotora je zhodná s osou vstupného a výstupného potrubia. Rotor má tvar viacchodej skrutky, tj. turbínky.



Obr. 5.4. Princíp turbinkového snímača prietoku

Na vstupnej strane snímača je statorový rozvádzač na usmernenie prúdiacej tekutiny. Uhlovú rýchlosť turbínky možno vyjadriť zjednodušene vzťahom

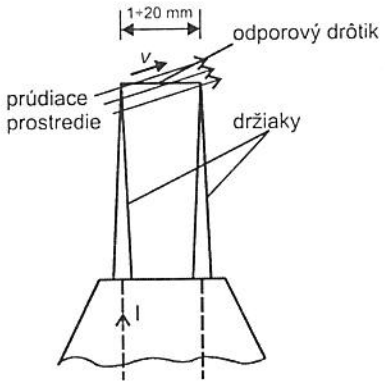
$$\omega = K \cdot Q_V - S$$

kde K je konštanta daná konštrukciou,
S sklz,
Q_v objemový prietok.

Sklz vzniká mechanickou záťažou turbínky (prevodovka, spojka, počítadlo). Je priamoúmerný záťažovému momentu rotora a nepriamo úmerný prietoku Q_v, pričom je funkciou aj *Reynoldsovho čísla*. V dôsledku závislosti sklzu na *Re* sú turbínkové (ale aj lopatkové) prietokomery výrazne nepresné v oblasti nízkych prietokov tj. na začiatku meracieho rozsahu. Preto sa pre každý prístroj uvádza minimálna hodnota prietoku – ***dolná medza správnosti***. Pri turbínkových snímačoch je spravidla riešený výstup informačného signálu bezdotykovým impulzným meraním otáčok turbínky. Tieto prietokomery sú vhodné na meranie väčších prietokových množstiev pri svetlosti potrubia (vnútorný priemer potrubia) od 3 mm do 1m. Chyba linearity dosahuje hodnoty (0,1 až 0,5) %, pričom spodná hranica správnosti je (3 až 5) % meraného prietoku. Pracovné podmienky dosahujú extrémnych hodnôt, tj. pracovný teplotný rozsah od –200 °C do 700 °C a pracovný tlak do 250 MPa. Takýmito prietokomermi možno merať prietoky všetkých kvapalín s kinematickou viskozitou menšou ako 3.10^{-6} $m^2.s^{-1}$ alebo plynov s hustotou väčšou ako 0,2 $kg.m^{-3}$. Prívodné potrubie pred prietokomerom musí obsahovať priamy úsek v dĺžke najmenej 15D a za snímačom 5D (D je priemer potrubia), v opačnom prípade sa chyba merania zväčšuje. Výhodou rychlostných snímačov je impulzný (frekvenčný) výstupný signál.

5.3.2 Termoanemometrické snímače

Tieto merače prietoku malých množstiev v uzavretých prietočných prierezoch alebo rýchlostných profilov v otvorených prierezoch využívajú ***závislosť koeficientu prestupu tepla na rýchlosti prúdenia tekutín***. Väčšinou sa používajú na meranie prietoku plynov.



Obr. 5.5. Detail termoanemometrického snímača

Vlastný snímač termoanemometra reprezentuje tepelne závislý odpor, ktorý je vytvorený buď napnutým kovovým vláknom (Pt alebo Ni) medzi nosníkmi vidličkovitého držiaka (obr. 5.5) alebo tenká vrstva napr. niklu nanesená na vhodnom nosiči (kremík). Okrem kovových materiálov sa používajú aj polovodičové, napr. termistory typu NTC. Odporový vodič je elektricky vyhrievaný na teplotu od 200 °C až do 500 °C, pričom jeho výsledná teplota

je daná energetickou bilanciou medzi elektrickým príkonom a odberom tepelnej energie z vyhrievaného vodiča obtekajúcim prúdom tekutiny.
Pre tepelnú rovnováhu na drôtiku platí

$$R_{S\vartheta} \cdot I^2 = \alpha \cdot S\left(\vartheta_S - \vartheta_P\right)$$

kde $R_{S\vartheta}$ [Ω] je odpor snímačového vodiča, odporového vlákna,
I [A] prúd tečúci vodičom,
α [W.m^{-2}.°C^{-1}] koeficient prestupu tepla prúdením,
S [m^2] plocha, povrch vyhrievaného telesa – drôtika,
ϑ_S [°C] teplota vyhrievaného vodiča,
ϑ_P [°C] teplota prúdiaceho prostredia.

Koeficient prestupu tepla α je funkciou viacerých fyzikálnych premenných charakterizujúcich prúdiacu tekutinu (rýchlosť prúdenia a tepelná vodivosť sledovaného prostredia, viskozita, hustota, atď.), pričom sa určitou, aj keď malou mierou, uplatňujú aj ďalšie formy šírenia tepelnej energie – žiarenie a vedenie. Preto riešenie bilančnej rovnice je veľmi náročné. Pomocou teórie podobnosti a termodynamických zákonov sa experimentálne získali použiteľné vzťahy pre určenie rýchlosti prúdiaceho prostredia, ako napr.

$$\frac{R_{S\vartheta}}{R_{S\vartheta} - R_{SP}} I^2 = A + B \cdot v^{\frac{1}{m}}$$

kde R_{SP} je odpor vodiča pri teplote prúdiacej tekutiny ϑ_P,
A, B, m sú konštanty,
v je rýchlosť prúdenia prostredia.

Najčastejšie používané zapojenia meracieho systému s termoanemometrom sú:

- s konštantným napájacím prúdom,
- s konštantnou teplotou meracieho drôtika.

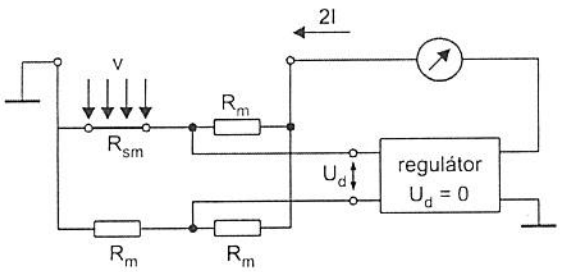
Termoanemometer pracujúci s konštantným prúdom predstavuje snímač zapojený v bežnom odporovom mostíku, ktorý je napájaný konštantným prúdom. Pri nulovej rýchlosti prúdenia je mostík vyvážený, zvyšovanie rýchlosti prúdenia (smer kolmo na os drôtika-vodiča) vyvolá zmenu jeho teploty a súčasne aj zmenu jeho odporu. Uvedené zapojenie je jednoduché, ale vhodné len pre pomaly sa meniace prúdenie tekutín.

Termoanemometer v zapojení s konštantnou teplotou drôtika tvorí jedno rameno mostíka navrhnutého tak, aby pri maximálnej rýchlosti prúdenia v_m, kedy je drôtik zahriaty na teplotu ϑ_m a má odpor R_{Sm}, bol mostík vyvážený. Pri poklese rýchlosti je drôtik menej ochladzovaný a jeho teplota má tendenciu rásť. Regulačný obvod však upraví prúd obvodom *(21)* tak, aby teplota drôtika zostala konštantná. Výstupný prúd regulátora je meranou veličinou a jeho závislosť na hmotnostnom prietoku Q_m možno aproximovať rovnicou

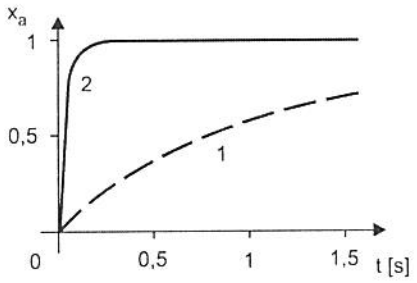
$$I^2 = a + b\sqrt{Q_m}$$

Konštanta a umožňuje rešpektovať prestupy tepla do okolia pri rýchlosti prostredia $v = 0$, a to prúdením i žiarením z drôtika a vedením do držiakov odporového drôtika. Koeficient b závisí od geometrie drôtika, hustoty, viskozity, tepelnej vodivosti a hmotnostnej tepelnej kapacity (mernej tepelnej kapacity) prúdiacej tekutiny.

Doba odozvy na skokovú zmenu rýchlosti v (obr. 5.7) je pre režim s konštantnou teplotou podstatne kratšia, čo dáva možnosti touto meracou metódou sledovať napr. turbulentné alebo dynamicky sa meniace prúdenia. Chyby kolísania teploty tekutiny sa kompenzujú odporovým senzorom teploty zapojeným do protiľahlého ramena mostíka, obr. 5.6. Aby nebol ohrievaný, musí byť jeho odpor podstatne väčší ako odpor meracieho drôtika. Merací obvod potom udržuje konštantný rozdiel teplôt medzi drôtikom a prúdiacou tekutinou (pozri časť *Tepelné prietokomery s termoanemometrickým princípom*).



Obr. 5.6. Merací obvod termoanemometra s konštantnou teplotou drôtika.



Obr. 5.7. Dynamické vlastnosti oboch metód
1. s konštantným prúdom
2. s konštantnou teplotou

$$x_a = \frac{i}{i_m} = \frac{u}{u_m}$$

Termoanemometre sú vhodné pre dynamicky sa meniace prietoky, malé prierezy a otvorené priestranstvá pre rozpätia rýchlosti prostredia od 100 $mm.s^{-1}$ do 100 $m.s^{-1}$. Pracujú s chybou merania od 1 % až po 7 % v závislosti od konštrukcie. Pôsobiace poruchové veličiny na proces merania sú teplota prúdiacej tekutiny a nestabilita elektrických parametrov. Medzi nevýhody týchto prietokomerov patrí nákladná aparatúra, častá porucha – prepálenie odporového drôtika a zdĺhavé opätovné zriaďovanie.

5.3.3 Plavákové snímače, rotametre

Do skupiny dynamických meradiel prietoku (zoškrtený prietočný prierez, pozri časť *Prierezové snímače prietoku, škrtiace zariadenia*) patria aj plavákové prietokomery, známejšie pod názvom ***rotametre***. Rotameter je tvorený zvislou kužeľovou rúrkou, ktorej prierez sa zväčšuje smerom nahor, pričom jej kužeľovitosť býva od 0,01 až 0,1. Pri činnosti prietokomera je plavák v rúrke unášaný dynamickým účinkom pretekajúcej tekutiny, pričom zdvih (poloha) plaváka je úmerný objemovému prietoku tekutiny (obr. 5.8). Na plavák, ktorý je obtekaný tekutinou zo spodu, pôsobí silový systém. Smerom dole je to jeho tiaž G_P a smerom hore pôsobí statická vztlaková sila F_{vz} (teleso v tekutinovom prostredí) a dynamická sila F_{dyn} daná rozdielom tlakov pod a nad plavákom (vplyv zoškrtenia prietočného prierezu) a účinnou plochou, tj. jeho priemetom do horizontálnej roviny. Pri rovnovážnom stave je plavák obtekaný vždy konštantnou rýchlosťou tekutiny, lebo tlakový spád na ňom je stály (G_P, F_{vz}). Naopak, prietočný prierez medzi plavákom a vnútornou stenou rúrky je premenlivý (poloha plaváka). Kvôli vylúčeniu možnosti trenia plaváka o stenu rúrky je jeho poloha stredená rotáciou okolo jeho osi vplyvom vhodného tvarovania plaváka alebo sa požíva vodiaca tyčka.

Ak sa neuvažuje vplyv trenia v meracom systéme, možno základnú rovnicu rotametra odvodiť pomerne jednoducho. Pre tlakový spád na obtekanom plaváku platí

$$\Delta p = \frac{G_p - F_{vz}}{S_p} \tag{5.9}$$

kde S_p je kolmý priemet plaváka vzhľadom k jeho osi otáčania.

Podľa Bernoulliho rovnice (pozri časť *Prierezové snímače prietoku, škrtiace zariadenia*) platí pre konštantnú rýchlosť prietoku medzikružím, ktoré tvorí okraj plaváka a stena rúrky *(D, d)*

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{G_p - F_{vz}}{S_p}} \tag{5.10}$$

Ak sa zavedie pre premennú plochu medzikružia označenie S bude v rovnovážnych stavoch (Q_V = *konšt.*) pre objemový prietok platiť

$$Q_V = S \cdot v \tag{5.11}$$

pričom pre v platí rovnica 5.10.

Zo vzťahu 5.11 možno pre maximálny a minimálny prietok určiť vstupný a výstupný priemer rúrky (svetlosť) a rovnako vytvoriť príslušnú stupnicu prietoku. Avšak, pri reálnom riešení treba zohľadniť to, že v systéme pôsobí niekoľko poruchových veličín, ako je trenie, ďalej reálne pomery pri prúdení v rôznych prietočných prierezoch a pri plynoch aj jeho stlačiteľnosť.

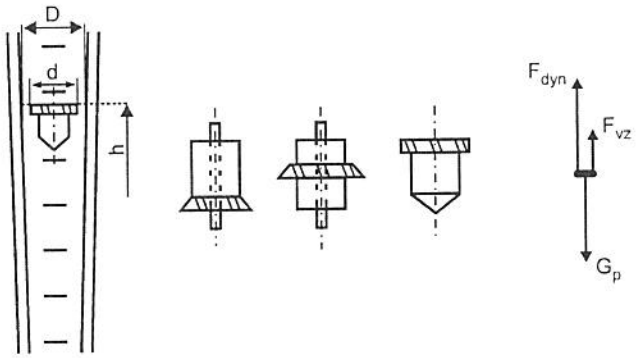
Plavákové prietokomery sú určené najmä pre laboratóriá, vyrábajú sa však aj priemyselné verzie.

Merajú objemový prietok v rozsahoch:

- kvapaliny: od (0 až 0,4) $l.h^{-1}$ do (0 až 1000) $l.h^{-1}$,
- plyny: od (0 až 0,16) $m^3.h^{-1}$ do (0 až 200) $m^3.h^{-1}$, pri teplotách do 500 °C a tlakoch do 30 MPa.

Chyba merania dosahuje hodnoty 1 % až 2 %. Poruchové veličiny pôsobiace na meranie sú hlavne teplota meranej tekutiny a nedokonalosť zvislej polohy pracovnej rúrky. Medzi výhody možno počítať najmä univerzálnosť (hlavne v laboratórnom prevedení, výmenné rúrky a plaváky). Medzi nevýhody patrí meranie Q_V a komplikovaný prevod na elektrický signál.

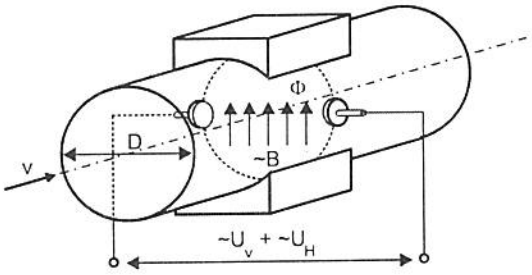
Rotametre vhodné pre automatizačné a monitorovacie úlohy sú vybavené snímaním polohy plaváka, najčastejšie bezdotykovým snímačom polohy (indukčný, kapacitný, fotoelektrický a pod.).



Obr. 5.8. Princíp plavákového snímača prietoku a základné tvary plavákov

5.3.4 Indukčné snímače prietoku

Indukčný snímač objemového prietoku využíva pre svoju činnosť Faradayov zákon. Prúdiacu kvapalinu, ktorej merná vodivosť je väčšia ako 1 $\mu S.cm^{-1}$, si možno predstaviť vo forme paralelne usporiadaných vodivých vlákien. Tieto vlákna sa pohybujú rýchlosťou v naprieč magnetickým tokom ϕ orientovaným kolmo na vektor rýchlosti (obr. 5.9).



Obr. 5.9. Princíp indukčného snímača prietoku

Pre jednotlivé vl
vety

kde Φ je gene
$\overline{B}$ mag
$\overline{v}$ stre
dr elen
Prvá časť výrazu rep
druhá, indukované na
Pre kruhové potrubie

Ak sa vhodne usporia
platilo (pozri obr. 5.9

kde S je plošný obsah
elektrické napätie pla

kde konštanta K re
magnetického poľa, v
Z rozboru indu
zabezpečiť indukciu
vodivosti kvapaliny
dosiahnuteľnou veľ
ovplyvňuje skutočno
rýchlosťou. Podľa po
laminárnemu alebo
možno dokázať, že
kvapaliny.
V konštrukciách
magnetické polia. *Je*
je veľmi vhodné, pr
napätie na elektród
Parazitný vplyv tern
veľmi rušivo. Hodn

Pre jednotlivé vlákna možno naindukované napätie formulovať podľa druhej Maxwellovej vety

$$U = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \oint (\bar{v} \times \bar{B}) \cdot d\bar{r}$$

kde Φ je generované, napr. striedavé magnetické pole,
$\bar{B}$ magnetická indukcia,
$\bar{v}$ stredná rýchlosť tekutiny v potrubí,
$d\bar{r}$ elementárny úsek vodivého vlákna.

Prvá časť výrazu reprezentuje napäťovú zložku vytvorenú striedavým magnetickým poľom a druhá, indukované napätie v teoreticky uvažovanom vlákne (vodiči).

Pre kruhové potrubie snímača podľa obr. 5.9 platí zjednodušená rovnica

$$U = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (\bar{v} \times \bar{B}) \cdot \bar{D} = U_H + U_v$$

Ak sa vhodne usporiadajú snímacie elektródy s prívodnými vodičmi (uzavretá slučka) tak, aby platilo (pozri obr. 5.9)

$$\Phi = \int_S \bar{B} \,.\, d\bar{s} = 0$$

kde S je plošný obsah uzavretej slučky prívodných vodičov, bude napätie $U_H = 0$ a pre snímané elektrické napätie platí

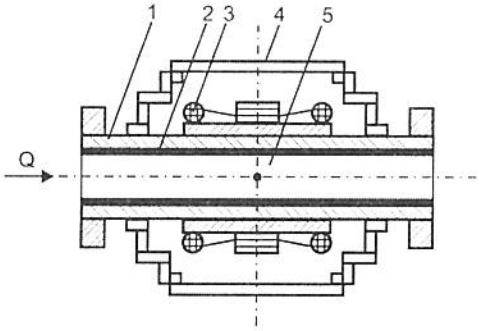
$$U = U_v = \frac{4\,B}{\pi \cdot D} \cdot Q_V \quad \text{alebo} \quad U_v = K \cdot Q_V$$

kde konštanta K rešpektuje ďalšie vplyvy na výstupné napätie, ako je nehomogénnosť magnetického poľa, vplyv vodivého prostredia okolo teoreticky uvažovaného vlákna a iné.

Z rozboru indukčného snímača prietoku vyplýva, že pri jeho činnosti je potrebné zabezpečiť indukciu B konštantnú v čase alebo kompenzovať jej kolísanie. Hranica minimálnej vodivosti kvapaliny je limitovaná možnosťou spracovania výstupného signálu, tj. najmä dosiahnuteľnou veľkosťou vstupného odporu zosilňovača. Presnosť merania prietoku ovplyvňuje skutočnosť, že meraná kvapalina sa v prietokovom kanále nepohybuje rovnakou rýchlosťou. Podľa pomerov zotrvačných a trecích síl kvapaliny, rýchlostný profil odpovedá buď laminárnemu alebo turbulentnému prúdeniu. Pri uvažovaní zjednodušujúcich predpokladov možno dokázať, že v oboch prípadoch indukované napätie je úmerné strednej rýchlosti kvapaliny.

V konštrukciách indukčných snímačov prietoku sa uplatňujú jednosmerné i striedavé magnetické polia. ***Jednosmerné pole***, vytvárané trvalým magnetom alebo elektromagnetom, nie je veľmi vhodné, pretože na elektródach vzniká rušivé elektrochemické napätie. Polarizačné napätie na elektródach, ktoré má nepravidelný charakter sa takmer nedá kompenzovať. Parazitný vplyv termoelektrických napätí pri vyšších teplotách meraného média pôsobí tiež veľmi rušivo. Hodnoty výstupného napätia dosahujú pre malé rýchlosti rádovo jednotky až

desiatky μV a ich spracovanie je náročné. ***Striedavé pole*** s harmonickým priebehom sa používa častejšie. Vznikajú však problémy spôsobené elektromagnetickou indukciou. Rozptylové pole budiacich cievok preniká do slučky tvorenej prívodmi od snímacích elektród ku vstupu zosilňovača. Rušivé napätie je fázovo posunuté o 90° vzhľadom k užitočnej zložke. Jeho potlačenie sa rieši pomocou ***impulzného magnetického poľa***, ktoré umožňuje meranie amplitúdy impulzov výstupného napätia so vzorkovaním s vhodným oneskorením, čo rieši potlačenie prípadných zákmitov na hrane impulzu.



Obr. 5.10. Konštrukčné riešenie indukčného prietokomera

Konštrukčné riešenie indukčného snímača je na obr. 5.10. Prietokový merací kanál *1* je kovový a ukončený na oboch stranách prírubami na zapojenie do potrubia, tj. do meracieho obvodu. Vo vnútri prietokového kanála sa nachádza izolačná vložka *2*, ktorej dĺžka sa rovná niekoľko násobku priemeru meracieho potrubia. Vo vnútri krytu *4* je budiace vinutie *3* a elektródy *5*, pomocou ktorých sa odoberá výstupný signál snímača. Na materiál elektród sa používa napr. platina, titan, zlato, striebro a tantal.

Indukčný snímač meria prietok elektricky vodivých kvapalín a je určený aj pre náročné pracovné podmienky. Svetlosť potrubí sa mení vo veľkom rozsahu od 3 mm až do 2000 mm pre rozsahy do 20 $m^3.s^{-1}$ pri rýchlostiach kvapaliny od 0,5 $m.s^{-1}$ až 50 $m.s^{-1}$ s presnosťou lepšou ako 1%. Snímač neobsahuje pohyblivé časti, nevyžaduje zmenu profilu prietokového kanála (zúženie, tlaková strata), má lineárnu prevodovú charakteristiku a pomer minimálneho a maximálneho prietoku dosahuje hodnoty 100. Správnu činnosť prietokomera neovplyvňuje znečistenie meraného média (pokiaľ je tento vplyv v rozsahu požadovanej vodivosti) a meracie zariadenie umožňuje merať prietok oboma smermi. Výsledok merania je takmer ***nezávislý od fyzikálnych vlastností kvapaliny***, t.j. od menších zmien tlaku, teploty, hustoty a koncentrácie. Znečisťujúce prímesi neovplyvňujú presnosť merania pokiaľ nedochádza ku zanášaniu (k izolovaniu) snímacích elektród. Nedostatok tejto meracej metódy je, že nemeria priamo Q_M, nevyhnutnosť vodivej kvapaliny a vyššie zriaďovacie náklady.

5.3.5 Ultrazvukové snímače prietoku

Využitie ultrazvukového signálu na meranie objemového prietoku tekutín Q_V patrí medzi moderné, ale v súčasnosti už bežne používané princípy merania prietoku v automatizačnej technike. Ultrazvukové prietokomery neobsahujú, podobne ako indukčné, žiadne pohyblivé časti. Merajú prietok nepriamo, cez ovplyvňovanie rýchlosti šírenia sa ultrazvuku prúdiacou tekutinou a vyrábajú sa v pevnom alebo prenosnom vyhotovení. Vhodné sú na meranie prietokov bežných, ale aj znečistených a agresívnych tekutín a dosahujú veľmi dobré metrologické parametre. Podľa vplyvu na ultrazvukový signál možno tieto prietokomery rozdeliť do troch skupín podľa použitej metódy merania:

- zmena rýchlosti šírenia ultrazvukového signálu spôsobená prúdiacou tekutinou (veľmi častá metóda),
- unášanie ultrazvukového signálu prúdom tekutiny,
- využitie Dopplerového javu (odraz signálu).

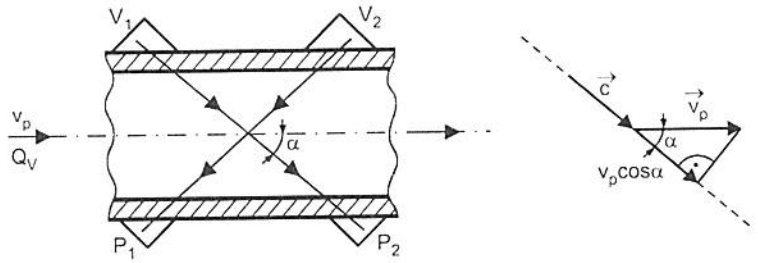
Prvá metóda je charakterizovaná tým, že meraný signál sa získava zo zmeny rýchlosti šírenia sa ultrazvukových vĺn v prúdiacej tekutine. Princíp metódy spočíva vo využití rozdielu rýchlostí šírenia sa ultrazvukových vĺn v smere a proti smeru prúdenia tekutiny. Výsledná rýchlosť vĺn v mieste, kde prostredie prúdi rýchlosťou v_p, je daná vektorovým súčtom rýchlosti šírenia sa ultrazvuku c v prostredí bez pohybu a vektorom rýchlosti v_p. Na obr. 5.11 je znázornený merací systém s dvoma ultrazvukovými kanálmi v potrubí, čiže s dvoma vysielačmi V, od ktorých prechádzajú ultrazvukové vlny k prijímačom signálu P. Potom pre výslednú rýchlosť v_1 prvom kanáli platí

$$v_1 = c + v_p \cdot \cos\alpha$$

a v druhom

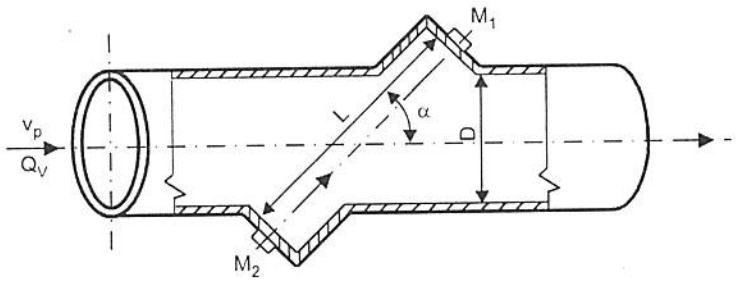
$$v_2 = c - v_p \cdot \cos\alpha$$

kde α je uhol medzi vektorom rýchlosti šírenia ultrazvuku c a vektorom rýchlosti prúdenia v_p. a v_p je stredná rýchlosť prúdenia tekutiny prietočným prierezom.



Obr. 5.11. Zmena rýchlosti šírenia ultrazvukového signálu spôsobená prúdiacou tekutinou

Častejšie konštrukčné usporiadanie tohoto prietokomera (tzv. šikmé) je na obr. 5.12. Ako vyplýva z náhľadu, ultrazvukové signály sú vysielané šikmo pod uhlom α vzhľadom na smer prúdenia tekutiny. Ultrazvuková vlna sa od elektroakustického meniča M_1 k meniču M_2 a opačne (oba meniče pracujú súčasne ako vysielače a prijímače ultrazvukových vĺn) šíri rýchlosťami vyjadrenými v predchádzajúcich rovniciach.



Obr. 5.12. Šikmý ultrazvukový prietokomer

Pre príslušné časové intervaly potrebné na prechod vlny od vysielača k prijímaču platí

$$\Delta t_1 = \frac{L}{c + v_p \cdot \cos\alpha} \quad ; \qquad \Delta t_2 = \frac{L}{c - v_p \cdot \cos\alpha}$$

a pre rozdiel týchto intervalov

$$\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{2L \cdot v_p \cdot \cos\alpha}{c^2 - v_p^{\,2} \cdot \cos^2\alpha}$$

Z posledného výrazu vyplýva nelineárna závislosť vztiahnutá na rýchlosť tekutiny v_p, ktorá však je zanedbateľná vzhľadom k tomu, že platí $c^2 >> v_p^2$, čiže

$$\Delta t = \frac{2L \cdot v_p \cdot \cos\alpha}{c^2}$$

z čoho možno vyjadriť priemernú rýchlosť prúdu tekutiny v potrubí v_p

$$v_p = \frac{c^2}{2L \cdot \cos\alpha} \cdot \Delta t$$

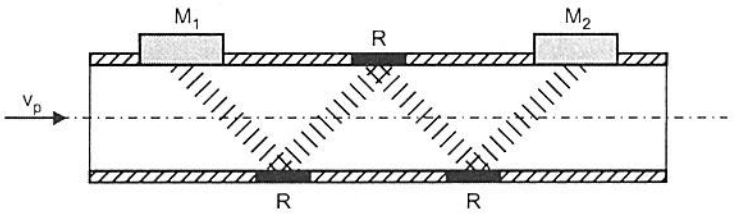
Pri vysokých požiadavkách na presnosť merania je potrebné uvažovať aj ovplyvňovanie výsledku merania kolísaním rýchlosti ultrazvuku c v tekutine. Napríklad, vhodnou úpravou výrazov pre časové intervaly

$$\Delta t_1 \cdot \Delta t_2 = \frac{L^2}{c^2 - v_p^{\,2} \cos\alpha}$$

a ďalším riešením vzťahu pre výpočet rýchlosti v_p. V získanom výraze vystupuje rýchlosť tekutiny nezávisle na rýchlosti ultrazvuku

$$v_p = \frac{L}{2\cos\alpha} \cdot \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_1 \cdot \Delta t_2}$$

Na obr. 5.13 je znázornená ďalšia konštrukcia ultrazvukových prietokomerov. Jej výhoda spočíva v predĺžení dráhy ultrazvuku L pomocou reflektorov R a tým predĺženie času Δt (zväčšenie citlivosti, možnosť merania menších prietokov). Takéto usporiadanie je použiteľné napr. na meranie odberu plynu v domácnostiach.



Obr. 5.13. Ultrazvukový prietokomer s predĺženou meracou dráhou

Iné usporiadanie ultrazvukového snímača prietoku je na obr. 5.14. Z impulzného generátora sa cez reverzný vysielací menič M_1 (na obrázku označený *1a*) vyšle krátky impulz harmonického signálu (v smere prúdenia kvapaliny) v čase t_1. V čase t'_1 zachytí tento impulz reverzný vysielač M_2 (na obrázku označený *1b*). Zachytený signál sa po zosilnení privedie znovu do generátora a cyklus sa opakuje. Časový interval medzi dvoma za sebou idúcimi impulzmi je

$$\Delta t_1 = t_1 - t'_1 = \frac{L}{c + v}$$

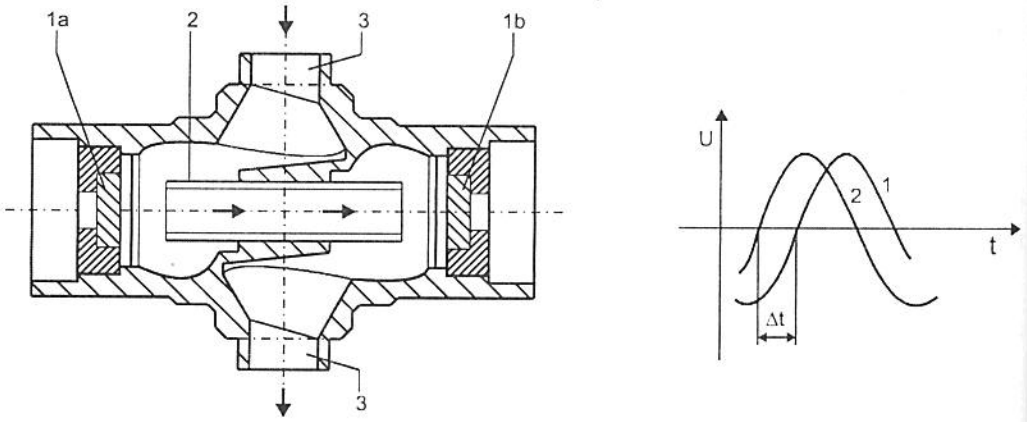
kde c je rýchlosť ultrazvukového signálu v neprúdiacej kvapaline,
v rýchlosť prúdiacej kvapaliny,
L vzdialenosť meničov *1a* a *1b*.

Frekvencia impulzov je daná vzťahom

$$f_1 = \frac{L}{\Delta t_1} = \frac{c + v}{L}$$

Pre druhý prípad, keď reverzný vysielač M_2 vysiela a M_1 prijíma signál, platí analogicky

$$\Delta t_2 = t_2 - t'_2 = \frac{L}{c - v}; \quad f_2 = \frac{1}{\Delta t_2} = \frac{c - v}{L}$$



Obr. 5.14. Konštrukčné usporiadanie ultrazvukového prietokomera s kalibračnou rúrkou a meničmi usporiadanými proti sebe
1. reverzný vysielač ultrazvukových signálov,
2. meracia (kalibračná) rúrka,
3. vtokový a výtokový otvor.

Pre rozdiel frekvencie po spracovaní (získanej v zmiešavači po odfiltrovaní súčtovej frekvencie) platí

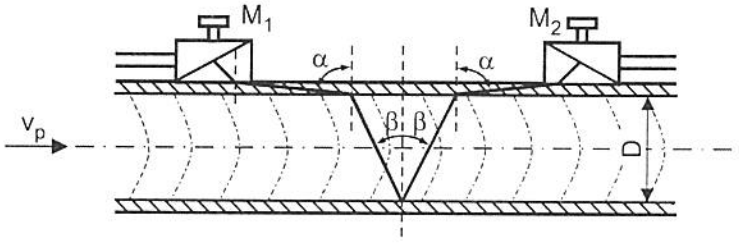
$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2v}{L}$$

a pre objemový prietok za predpokladu približne rovnomernej rýchlosti v celom priereze potrubia (turbulentné prúdenie)

$$Q_V = v \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi D^2 \cdot L}{8} \cdot \Delta f = k \cdot \Delta f$$

Rýchlosť prúdenia v je v tomto prípade vyhodnotená nezávisle na rýchlosti ultrazvuku c.

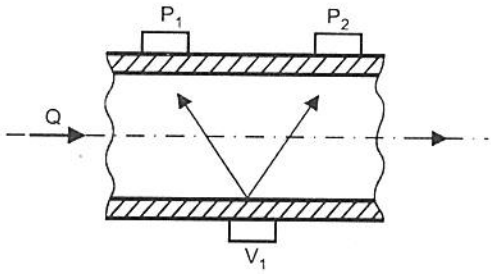
Na ďalšom obrázku (obr. 5.15) je znázornený tzv. ***prenosný ultrazvukový prietokomer***. Jeho zásadnou prednosťou je montáž z vonku na potrubie, v ktorom sa meria prietok.



Obr. 5.15. Ultrazvukový prietokomer - prenosný

Druhá metóda merania prietoku prostredníctvom ultrazvuku spočíva v unášaní ultrazvukového signálu prúdom tekutiny. Princíp zachytáva obr. 5.16, oba výstupné signály sú pri nulovej rýchlosti tekutiny rovnaké. Pretekajúca tekutina unáša oba ultrazvukové signály tak,

že signály zachytené prijímačmi P_1 a P_2 obsahujú vzájomnú nesymetriu úmernú prietoku tekutiny.

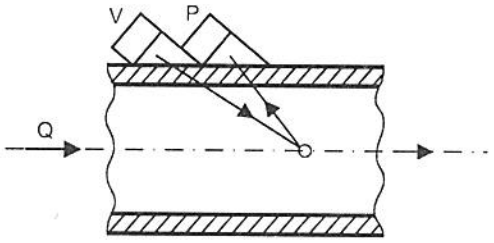


Obr. 5.16. Unášanie ultrazvukového signálu

Tretia metóda sa dá použiť iba pri meraní prietoku tekutín, ktoré obsahujú pevné častice. Využitie Dopplerového javu spočíva v tom, že ultrazvukový signál zo zdroja V sa odráža od pevných častíc v prúdiacej tekutine. Odrazený signál je prijímaný snímačom P (obr. 5.17), pričom frekvencia prijímaného signálu závisí na strednej rýchlosti prúdiacej kvapaliny. Potom pre rozdiel frekvencie vysielaného a prijímaného signálu platí

$$\Delta f = \frac{2f}{c}\bar{v} \quad [\mathrm{Hz}]$$

kde c je rýchlosť šírenia ultrazvuku v meranom prostredí, f frekvencia signálu zdroja a $\bar{v}$ je stredná rýchlosť prúdiacej tekutiny.



Obr. 5.17. Ultrazvukový prietokomer, využitie Dopplerového javu

Prevádzkové ultrazvukové prietokomery sa konštruujú hlavne podľa prvej metódy. Na potlačenie vplyvov poruchových veličín na presnosť merania (teplota, tlak a vlastnosti tekutiny) sa používa diferenciálne usporiadanie meničov pri meraní. Zdroj ultrazvukového signálu a jeho prijímač môžu byť na meranú tekutinu naviazaný priamo alebo cez stenu potrubia (prenosné vyhotovenie). Ultrazvukové prietokomery neobsahujú pohyblivé časti a tvoria kompaktný celok, ktorý neovplyvňuje tok tekutiny. Možno ich použiť na meranie prietoku silne znečistených a agresívnych kvapalín, ale aj na roztavené kovy. Z hľadiska metrologických vlastností sú vhodné na meranie stredných a veľkých prietokov tekutín v potrubiach s priemerom (0,01 až 0,5) m, s rýchlosťou prúdenia tekutiny (0,5 až 30) $m.s^{-1}$ pri teplotách

(90 až 260) °C, krátkodobo až 300 °C. Podľa prevádzkových podmienok dosahujú presnosť merania (0,5 až 3) %.

5.3.6 Vírové snímače prietoku

Vhodne tvarovaný a smerovaný objekt v ceste prúdiacej tekutiny, napr. s osou v kolmom smere na jej vektor rýchlosti, môže vyvolať oscilačný pohyb tekutiny. Parametre tohoto pohybu sú úmerné strednej rýchlosti prúdiacej tekutiny, tj. objemovému prietoku. Na meranie prietoku Q_V sa využívajú dva typy oscilácií tekutiny:

- nútené,
- prirodzené.

Nútené oscilácie vznikajú pri generovaní vírov tesne za tvarovanou (rebrovanou) prekážkou na strane prítoku tekutiny a jej špirálovitý útvar (vír) sa pohybuje v smere prúdenia. Väčšina vírových snímačov pracuje však ***s prirodzenými osciláciami***, keď víry tekutiny sa oddeľujú za prekážkou, tj. vírovým telieskom (striedavo na hornej a dolnej hrane), pretože prúdiaca tekutina nie je schopná sledovať tvar prekážky. Tak vznikajú Karmánové vírové cesty (obr. 5.18), ktoré sa odvíjajú v dvoch vírových radoch a majú rovnomerné striedavé geometrické usporiadanie. Tieto víry vznikajú s dostatočnou opakovateľnosťou až pre $Re > 10000$, pričom medzi rýchlosťou prúdenia tekutiny a frekvenciou vznikajúcich vírov platí v určitom rozsahu lineárna závislosť

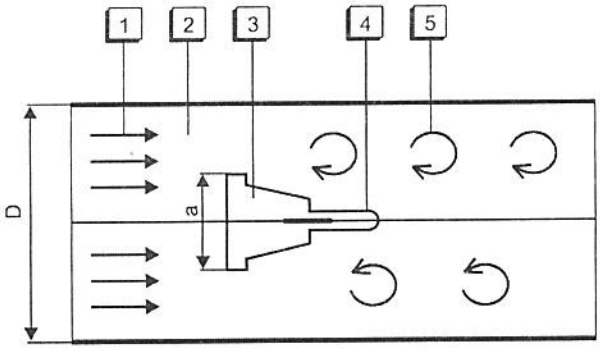
$$f = \frac{S_t \cdot \bar{v}}{a}$$

kde f je frekvencia vznikajúcich vírov,
S_t Strouhalove číslo - konštanta, napr. pre valcovú prekážku $S_t = 0{,}21$,
$\bar{v}$ stredná rýchlosť prúdenia,
a charakteristický rozmer vírového telieska, napr. jeho výška.

Vhodným tvarom telieska možno udržať Strouhalove číslo konštantné aj pri veľkých zmenách Re. Väčšinou sa volia deltoidné a lichobežníkové tvary, pričom sa musí pri riešení uvažovať aj so snímaním vírov (napr. vhodne oslabené miesto). Frekvencia vírov sa sleduje prostredníctvom zmien rýchlosti (tepelné anemometre, útlm ultrazvuku) alebo zmien tlaku (zmeny deformácie pružnej časti prekážky meranej tenzometrami, kapacitne alebo piezoelektricky).

Vírový princíp vhodne potláča poruchové veličiny pôsobiace pri meraní objemového prietoku, ako sú zmeny hustoty, viskozity, teploty, tlaku a aj chemického zloženia prúdiacej tekutiny vo veľkom rozsahu hodnôt prietoku. Okrem valcového telieska sa na vytváranie vírov používajú rôzne zložitejšie profily. Pri vhodnom pomere a/D je vzťah medzi prietokom a frekvenciou vírov lineárny v rozsahu 10^3 až 10^6, nelinearita je menšia ako 0,05 % pre zmenu

meracieho rozsahu v pomere 100 : 1, pričom celková chyba merania dosahuje hodnoty 0,1 % a podstatne neklesá ani pri zmenách tvaru telieska napr. jeho opotrebovaním.



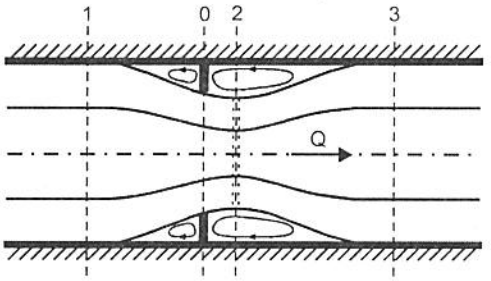
Obr. 5.18. Vírový prietokomer, princíp
1. prúdiaca tekutina
2. meracie potrubie
3. vírové teliesko
4. pružná platnička s tenzometrom
5. prúd vírov

5.4 Prierezové prietokomery, škrtiace zariadenia

Vytvárajú veľkú skupinu s rôznymi typmi škrtiacich zariadení (orgánov, členov). Pri činnosti týchto prietokomerov zostáva zoškrtený prietokový prierez nemenný (porovnaj s plavákovými prietokomermi), ale mení sa rýchlosť pretekajúcej tekutiny. Časť jej tlakovej energie sa na škrtiacom zariadení zmení na kinetickú, a tak sa vytvorí rozdiel potenciálnej tlakovej energie pred a za škrtiacim zariadením. Medzi škrtiacimi zariadeniami je trieda tzv. normalizovaných, pretože tieto meracie prvky reprezentujú dôležitú skupinu prietokomerov vhodnú na meranie veľkých množstiev a odolávajúcu veľmi ťažkým prevádzkovým podmienkam, napr. v energetike (para – metre kubické za sekundu, niekoľko sto °C a tlak niekoľko desiatok MPa) a nemajú vhodnú náhradu.

5.4.1 Prietok tekutiny zúženým prietočným prierezom v potrubí

V prvom priblížení sa pri prúdení zúženým prierezom uvažuje ***ideálna tekutina***, tj. bez vnútorného trenia. V tomto prípade platí, že v prierezoch *1* a *3* (obr. 5.19) je statický tlak a rýchlosť všetkých častíc tekutiny rovnaká – neovplyvnená zúžením, a že prúdnice v týchto rezoch vytvárajú súbor rovnobežných priamok. Pri odvádzaní prietokovej rovnice zúženým prierezom sa ďalej uvažujú zjednodušujúce predpoklady, ktoré sa dotýkajú druhu prúdenia tekutiny a zákonov o zachovaní energie a hmoty pri prúdení.



Obr. 5.19. Prietok tekutiny zoškrteným prierezom

Prúdenie tekutiny v mieste zúženia sa považuje za tzv. ***adiabatické***, ktoré predstavuje energeticky izolovaný termodynamický systém, tj. tepelná energia nie je do systému ani privádzaná, ani odvádzaná. Pre tento dej platí Laplaceov zákon v tvare

$$p \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\chi} = p_1 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1}\right)^{\chi} = \text{konšt.} \qquad (5.12)$$

kde ρ je hustota prúdiacej tekutiny všeobecne,
p statický tlak prúdiacej tekutiny všeobecne,
χ pomer hmotnostných tepelných kapacít (špecifického tepla) pri stálom tlaku a hmotnostných tepelných kapacít pri stálom objeme (tzv. Poissonova konštanta), pričom platí pre

- dvojatómové plyny χ=1,4 ,
- jednoatómové plyny χ=1,66.

Aplikácia uvedenej rovnice, napr. pri známom východzom stave tekutiny v priereze *1* umožňuje určiť hodnotu konštanty a potom pre ľubovolný okamih zmeny stavu tekutiny vypočítať jej hustotu alebo tlak.

Bernoulliho rovnica charakterizuje energetický stav napr. elementárneho objemu tekutiny v niektorom sledovanom priereze. Vo všeobecnosti je tento energetický obsah daný súčtom kinetickej (rýchlostnej) a potenciálnej (tlakovej a polohovej) energie. V blízkych prietočných prierezoch, v zmysle Bernoulliho rovnice (zákon zachovania energie), pre ideálnu tekutinu platí

$$\frac{1}{2}\rho_1 \cdot v_1^2 + p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{1}{2}\rho_0 \cdot v_0^2 + p_0 + \rho \cdot g \cdot h_0 = \frac{1}{2}\rho_2 \cdot v_2^2 + p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 = \\ = \frac{1}{2}\rho_3 \cdot v_3^2 + p_3 + \rho \cdot g \cdot h_3 \qquad (5.13)$$

kde v je rýchlosť tekutiny v danom priereze,
h potenciálna polohová energia v danom priereze určená výškou od referenčnej roviny.

V sledovanom prípade možno zanedbať polohovú energiu, resp. jej zmenu, lebo vo vodorovnom potrubí sa nemení výška prúdiacej tekutiny. Potom sa rovnica zjednoduší na tvar

$$\frac{1}{2}\rho_1 \cdot v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho_0 \cdot v_0^2 + p_0 = \frac{1}{2}\rho_2 \cdot v_2^2 + p_2 = \frac{1}{2}\rho_3 \cdot v_3^2 + p_3 \qquad (5.14)$$

Hmotnostný prietok tečúci prierezom *1* sa musí rovnať hmotnostnému prietoku, ktorý preteká prierezmi *0, 2* a *3* (zákon o zachovaní hmoty). Čiže, podľa ***rovnice kontinuity*** platí pre jednotlivé prierezy s prietokovou plochou S_i

$$S_1 \cdot v_1 \cdot \rho_1 = S_0 \cdot v_0 \cdot \rho_0 = S_2 \cdot v_2 \cdot \rho_2 = S_3 \cdot v_3 \cdot \rho_3 \qquad (5.15)$$

Z rov. 5.15 vyplýva, že rýchlosť v priereze *1* a *3* je rovnaká, avšak menšia ako v priereze *0*. Najväčšia rýchlosť prúdiacej tekutiny je v najmenšom prietokovom priereze *2*, ktorý sa vytvára zotrvačnosťou pôsobiacou v prúdiacej kvapaline (tzv. kontrakcia). Čiže platí

$$v_2 > v_0 > v_1 > v_3$$

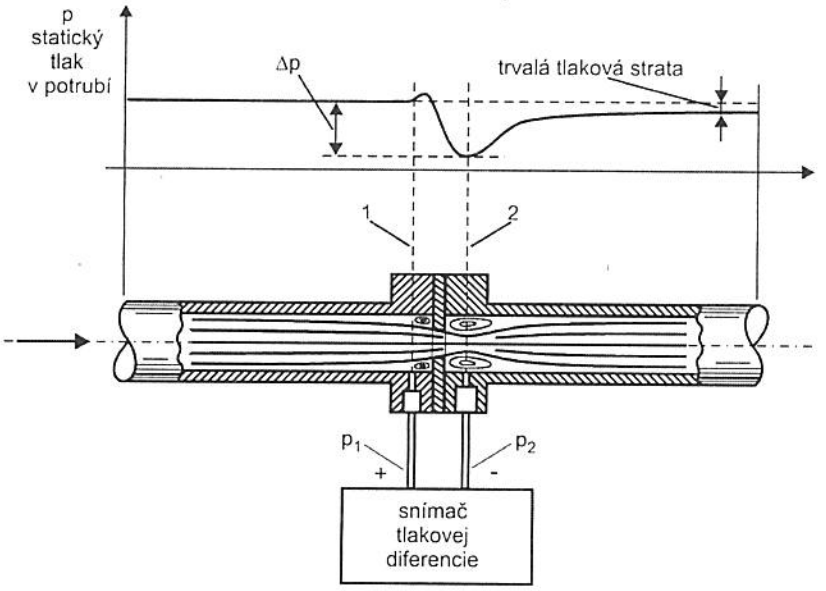
a zo zákona o zachovaní energie vyplýva, že

$$p_1 > p_2$$

Tento výsledok je dôležitý z hľadiska merania prietoku v potrubí so zúženým prietočným prierezom. Zmena časti tlakovej energie prúdiacej tekutiny na rýchlostnú umožňuje nepriamo, cez meranie tlakového spádu medzi prierezmi *1* a *2*, sledovať prietok tekutiny potrubím. Prietoková rovnica charakterizujúca prietok ***reálnej tekutiny*** cez zoškrtený prietočný prierez v závislosti od tlakového spádu na ňom, je výsledkom riešenia rovníc 5.12, 5.14 a 5.15 s uvažovaním koeficientov, ktoré upravujú prúdenie ideálnej tekutiny na reálne pomery

$$Q_V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \qquad (5.16)$$

kde Q_V [$m^3.s^{-1}$] je objemový prietok v potrubí,
α [–] prietokový koeficient vztiahnutý na zoškrtený prierez,
ε [–] koeficient expanzie charakterizujúci pružnú tekutinu, tj. plyn alebo paru (pre plyny $\varepsilon < 1$, pre kvapaliny $\varepsilon = 1$),
S_0 [m^2] prietočná plocha zúženého prierezu, prierez *0*,
ρ [$kg.m^{-3}$] hustota pretekajúcej tekutiny pri prevádzkových podmienkach,
Δp [Pa] tlakový spád na škrtiacom zariadení.



Obr. 5.20. Merací systém prietoku so škrtiacim prvkom

Uvedená rovnica pre plyny platí len vtedy, ak je tlakový spád medzi prierezmi *1* a *2* menší ako tzv. kritický, tj. pokiaľ rýchlosť prúdenia v najužšom priereze nedosahuje rýchlosť, ktorou by sa prúdiacim plynom šíril zvuk. Prietok kvapaliny je špecifický v tom, že sa v tomto prípade prakticky neuplatňuje jej stlačiteľnosť, a tak hodnota expanzného koeficienta v prietokovej rovnici je rovná jednej. Vplyv expanzie možno niekedy zanedbať aj pri plynoch, pokiaľ je rozdiel tlakov $p_1 - p_2$ oproti tlaku p_1 veľmi malý a pokiaľ to dovoľujú požiadavky na presnosť merania.

Prietoková rovnica pre napr. suché plyny (vlastnosti blízke ideálnemu plynu) má pre referenčné (normálne) stavové veličiny tvar

$$Q_{V_0} = k\sqrt{\frac{p}{T}\cdot\Delta p}$$

kde p a T sú prevádzkové parametre meraného plynu (pozri časť *Základné pojmy*).
Podobne, pre prehriatu paru platí

$$Q_{V_0} = \alpha\cdot\varepsilon\cdot S_0\sqrt{2v_0^2}\cdot\frac{1}{\sqrt{v}}\cdot\sqrt{\Delta p}; \qquad v = f(p,T)$$

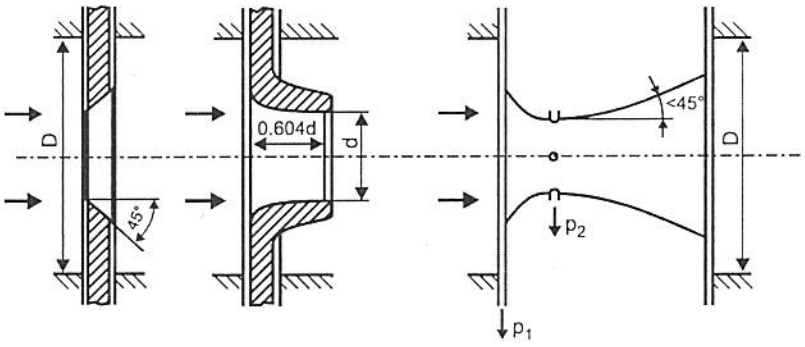
kde v tomto prípade v je hmotnostný objem prúdiacej pary.

5.4.2 Škrtiace zariadenia, orgány

Ak tečie tekutina potrubím, v ktorom je umiestnený zoškrtený prierez ľubovolného tvaru, vzniká na ňom odpovedajúci tlakový spád. Aby bolo možné toto ľubovolné škrtiace zariadenie používať na meranie prietoku prostredníctvom merania tlakového spádu, musel by sa merací systém kalibrovať, napr. zmeraním jeho prevodovej charakteristiky. V energetických zariadenia, pri veľmi náročných pracovných podmienkach a veľkých priemeroch potrubí je táto úloha ťažko riešiteľná, už len preto, že vložiť do potrubia kalibračné meracie zariadenie a po kalibrácii ho odstrániť, je technologicky veľmi náročné. Preto sa vytvorila metóda návrhu škrtiacich zariadení podľa normy (normalizované škrtiace zariadenia) napr. podľa ČSN ISO 5167-1, ktorá zabezpečí ***geometrickú a tekutinovú*** podobnosť navrhovaného meracieho systému s jeho vzorom z normy. Z toho vyplýva, že stačí poznať základné parametre pretekajúceho média a potrubia, zvoliť vhodný merací člen tlakovej diferencie a vypočítať plochu alebo priemer zošrteného prierezu, od ktorého sú odvodené všetky ostatné rozmery normovaného škrtiaceho zariadenia. Takto navrhnutý prvok možno potom zabudovať do potrubia a ***bez priameho kalibrovania*** merať ním prietok potrubím prostredníctvom tlakového spádu.

Medzi základné normalizované škrtiace orgány patria:

- normalizovaná clona,
- normalizovaná dýza,
- Venturiho dýza.



a) b) c)

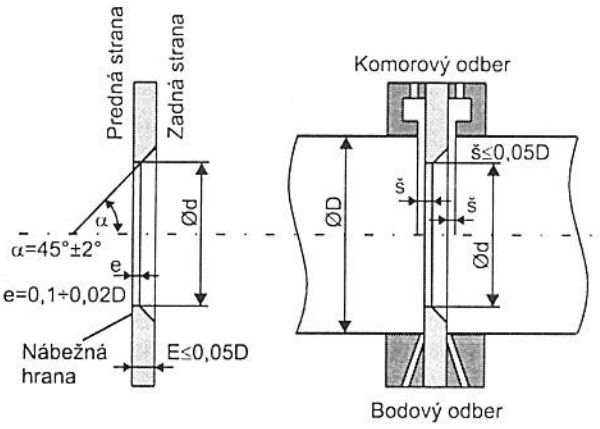
Obr. 5.21. Normalizované škrtiace orgány
a) clona, b) dýza, c) Venturiho dýza

5.4.2.1 Clona

Clona je najjednoduchšie a najčastejšie používané škrtiace zariadenie pre kruhové potrubia. Malá stavebná dĺžka umožňuje ľahkú montáž a jej výmenu. Clona sa používa na meranie prietokov v kruhových potrubiach od priemeru D = 50 mm pri pomernom zúžení m = (0,05 až 0,7), kde $m = S_0/S_D$, pričom S_0 je prietočná plocha škrtiaceho zariadenia a S_D je prietočná plocha potrubia. Clona spôsobuje pomerne veľkú trvalú tlakovú stratu $\Delta p_z = (1\text{-}m)\Delta p$. Montuje sa do potrubia dostatočnej priamej dĺžky *(15D pred, 5D za clonou)*. Ukľudňujúca dráha musí byť tým väčšia, čím väčšie je pomerné zúženie.

Tlakové odbery sú realizované buď ako bodové (jeden tlakový odber pred clonou a jeden za clonou) alebo ako komorové (niekoľko otvorov po obvode alebo štrbina po celom obvode s prstencovou zbernou komorou). Na obr. 5.22 je zobrazená normalizovaná clona s bodovým a komorovým odberom.

Clona je tiež vhodná na meranie časovo premenných prietokov (až stovky Hz) za predpokladu, že snímač tlakového spádu má odpovedajúce dynamické vlastnosti.



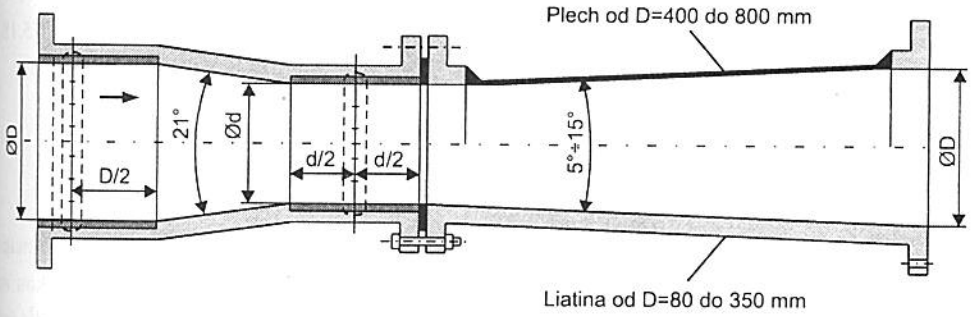
Obr. 5.22. Normalizovaná clona s bodovým a komorovým odberom

5.4.2.2 Dýza

Dýza je tvarovo zložitejšia ako clona, má upravenú vtokovú časť na zmenšenie trvalej tlakovej straty. Dýza sa používa všade tam, kde sú väčšie požiadavky na presnosť merania. Týmto škrtiacim zariadením sa meria prietok potrubím o priemere D = (50 až 500) mm pri pomernom zúžení *m = (0,05 až 0,64)*. Tlaková strata spôsobená dýzou dosahuje hodnotu $\Delta p_z = (1 - 1{,}4.m)\Delta p$.

Venturiho dýza vzniká napojením difúzora (pozvoľné rozširovanie prierezu) na normalizovanú dýzu. Má veľkú stavebnú dĺžku, je výrobne náročná a používa sa na meranie

prietoku v potrubí s priemerom D = *(50 až 500)* mm pri pomernom zúžení m = *(0,05 až 0,6)*. Tlaková strata na Venturiho dýze je najmenšia (upravená vtoková aj výtoková časť), približne 30% tlakovej straty spôsobenej clonou.



Obr. 5.23. Venturiho dýza

Presnosť merania normalizovanými škrtiacimi orgánmi sa pohybuje okolo 3%. Pri dobre navrhnutom škrtiacom orgáne a dodržaní podmienok montáže sa dosahuje presnosť 1% až 2%.

Medzi ďalšie škrtiace zariadenia patrí napr. polkruhová dýza vhodná na meranie prietoku pri malom Reynoldsovom čísle (Re < 500), pre znečistené tekutiny sú vhodné segmentové, excentrické alebo štrbinové clony.

5.4.3 Prandtlova a Pitotova rúrka

Na nepriame meranie prietokov sa používajú aj ďalšie druhy dynamických meradiel založených na vyhodnocovaní rýchlosti prúdiacej tekutiny potrubím so známym prierezom, ale tiež na meranie rýchlosti prúdenia tekutiny v otvorených priestoroch alebo na meranie rýchlosti predmetu v *(kváži)* statickom otvorenom priestore *(lietadlo)*. Ide predovšetkým o Prandtlovu a Pitotovu rúrku.

Toto meranie je založené na zákone zachovania energie v prúdiacej tekutine, tj. Bernoulliho rovnici. Rúrka s uzavretým druhým koncom je vložená proti prúdiacej tekutine v potrubí, ktorej celková energia sa skladá s kinetickej a potenciálnej energie (rov. 5.14, obr. 5.19). Ak sa polohová energia tekutiny a jej zmena v priestore merania zanedbá, potom pri „zabrzdení" tekutiny na nulovú rýchlosť v uzavretej rúrke sa musí celá kinetická energia prúdiacej tekutiny premeniť na potenciálnu tlakovú. Podľa zákona o zachovaní energie platí

$$\frac{1}{2}\rho \cdot v_1^2 + p_1 = p_{dyn} + p_{st} = p_c \qquad (5.17)$$

kde v_1, p_1 sú rýchlosť a tlak prúdiacej tekutiny,

ρ je hustota prúdiacej tekutiny,

p_{dyn} tzv. dynamický tlak reprezentujúci premenu kinetickej energie na tlakovú,

p_{st} statický tlak v potrubí (v prúdiacom priestore), potenciálna tlaková energia,

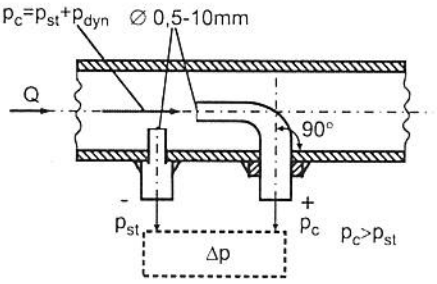
p_c celkový tlak v meracej rúrke.

Po zavedení $v = v_1$ a $p_{st} = p_1$ je rýchlosť tekutiny v mieste ústia rúrky, napr. v potrubí, určená vzťahom

$$v = \sqrt{\frac{2\,(p_c - p_{st})}{\rho}} \tag{5.18}$$

5.4.3.1 Pitotova rúrka

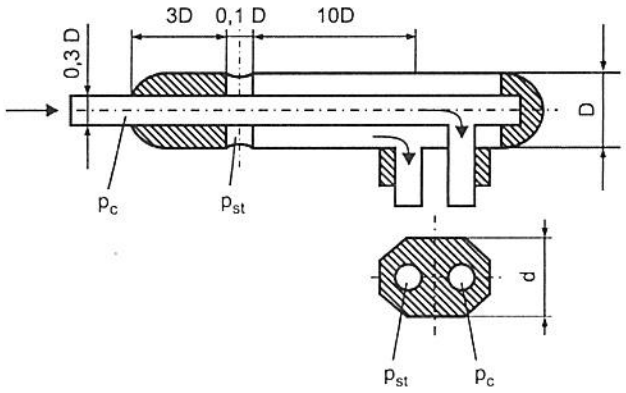
Jednoduchšie konštrukčné usporiadanie meracieho systému na uvedenom princípe predstavuje Pitotova rúrka *(meranie celkového tlaku p_c, tj. súčtu p_{dyn} a p_{st})* spolu s rúrkou na meranie statického tlaku v prúdiacej tekutine p_{st} na obr. 5.24. Spracovaním oboch tlakových signálov podľa rov. 5.18 sa určí rýchlosť tekutiny v blízkosti ústia Pitotovej rúrky.



Obr. 5.24. Meranie rýchlosti prúdenia tekutiny v potrubí Pitotovou rúrkou

5.4.3.2 Prandtlova rúrka

Prandtlova rúrka predstavuje konštrukčne vhodne upravený merací systém (sonda), ktorý umožňuje snímať oba informačné tlaky na jednom mieste. Súčet statického a dynamického tlaku sa odvádza strednou rúrkou a statický tlak je vedený medzipriestorom medzi vnútornou a vonkajšou rúrkou, obr. 5.25.



Obr. 5.25. Prandtlova rúrka

Premiestňovaním Prandtlovej rúrky v priestore prúdiacej tekutiny možno zmerať rýchlostný profil prietočného prierezu a integráciou určiť prietok aj vo veľkých a otvorených kanáloch. V potrubí sa najčastejšie určí touto metódou maximálna rýchlosť tekutiny (v strede potrubia), pričom pri turbulentnom prúdení platí

$$v_s = 0{,}84 \cdot v_{max}$$

kde v_s je stredná (priemerná) rýchlosť tekutiny v potrubí.
Pre objemový prietok Q_V celým prierezom potrubia s plošným obsahom S potom platí

$$Q_V = S \cdot v_s = 0{,}84 \cdot S \sqrt{\frac{2\,(p_c - p_{st})}{\rho}} \qquad (5.19)$$

Prandtlové rúrky sa používajú hlavne na meranie prietoku plynov vo veľkých potrubiach a v otvorených kanáloch. Výhoda tohoto merania je určená veľmi malou tlakovou stratou spôsobovanou meracím systémom a tiež skutočnosť, že rúrku možno do potrubia vsúvať malým otvorom bez väčších úprav. K nevýhodám patrí najmä nižšia presnosť merania, najmä ak sa pri meraní a výpočte prietoku použije len maximálna rýchlosť prúdiaceho prostredia.

5.4.4 Merací člen prietoku so snímačom Annubar

Meracie členy prietoku so snímačom (sondou) Annubar patria k prietokomerom väčších množstiev v potrubiach, pričom pracujú na rovnakom princípe ako Prandtlova alebo Pitotova rúrka, na princípe zákona zachovania mechanickej energie v tekutinách. V súčasnosti významne potláčajú používanie škrtiacich prvkov vzhľadom k ich niekoľkým dôležitým výhodám:

- podstatne vyššia presnosť merania voči škrtiacim zariadeniam,
- až 20-krát nižšia tlaková strata v porovnaní s clonou,
- nižšie náklady na inštaláciu.

Snímače Annubar sa zasúvajú do potrubia naprieč rýchlostného profilu a vzhľadom na svoj tvar (valcová alebo tvarovaná rúrka) minimálne obmedzujú prietok tekutiny, preto spôsobujú len malú tlakovú stratu. Tlakové odberové miesta (obr. 5.26) na nábehovej a odtokovej strane meracej rúrky ústia do príslušných komôr. Počet týchto otvorov závisí na priemere potrubia, napr. pre priemery od 50 mm do 125 mm sa používajú štyri otvory. V jednej vyrovnávacej komore z nábehovej strany sa vytvára priemerná (stredná) hodnota celkového tlaku p_c a na odtokovej strane stredná hodnota tlaku p_{od}. Rozdiel $\Delta p = p_c - p_{od}$ je úmerný strednému dynamickému tlaku p_d podľa vzťahu

$$p_d = k^2 \cdot (p_c - p_{od}) = k^2 \cdot \Delta p$$

kde k je kalibračná konštanta snímača.
Pre strednú rýchlosť prúdenia $\bar{v}$ tekutiny s hustotou ρ z Bernoulliho rovnice vyplýva

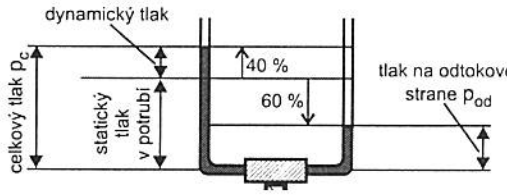
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} = k \cdot \sqrt{2\frac{\Delta p}{\rho}}$$

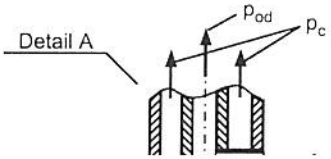
a potom z tlakového spádu meraného snímačom tlakovej diferencie sa určí objemový prietok

$$Q_V = S \cdot k \cdot \sqrt{2\frac{\Delta p}{\rho}}$$

kde $k = \sqrt{p_d / \Delta p}$ je konštanta prietokomera a S prierez potrubia.

Prietokomer so snímačom Annubar meria objemový prietok kvapalín, plynov a pár s presnosťou až 0,5 % (pri kalibrácii výrobcom) pri prevádzkovom tlaku do 10 MPa a teplote do 450 °C. Vo vyhotovení ISS *(kap. Inteligentné meracie členy v automatizácii)* je na výstupe signál (4 až 20) mA, ktorý reprezentuje kompenzovaný hmotnostný prietok Q_M, pričom ISS umožňuje zmeny rozsahu až 10 : 1, číslicovú komunikáciu protokolom HART. Tieto riešenia sú integrované, čiže obsahujú snímač Annubar, snímač tlakovej diferencie a ventilové súpravy na pripojenie do tekutinového obvodu.





5.5 Hmotnostr

Hmotnostné prieto
pretečeného množstva te
Je to hlavne z toho dôv
rozťažnosti a tlakovej
vstupné filtre a naviac m
smermi. Najväčšie uplatn
princípe, menej tepelné
sú v súčasnosti vo výrobi
prietoku tekutín. Nástup
to pretečená hmotnosť, k
pár, kvapalín, ale aj prášl
produkty, sa predávajú hl

5.5.1 Coriolisov h

Ak sa hmotný bo
tangenciálne zrýchlenie j
$\omega = konšt.$, ešte pohybuje
okrem odstredivej sily
hmotného bodu (v tomto
priamočiary pohyb (od str
vyplýva, že relatívny pohy
trajektórie hmotného bo
Element hmoty zväčšov
obvodovú rýchlosť v_{ob}, na

Aplikácia tohoto javu
Silové účinky zrýchlenia
účinok Coriolisovho zrých

5.5 Hmotnostné prietokomery

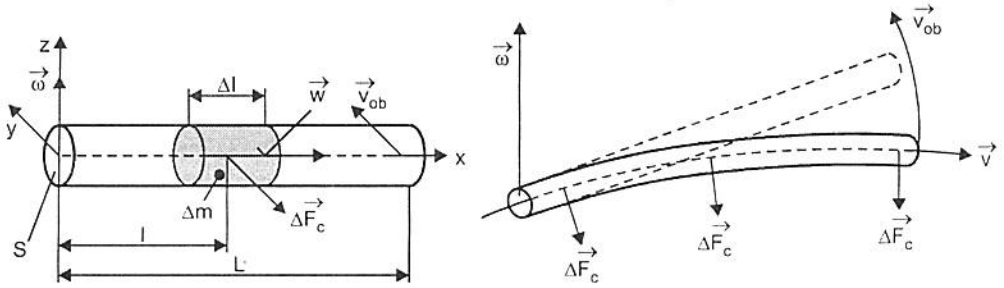
Hmotnostné prietokomery sa stávajú v súčasnom období preferovanými meradlami pretečeného množstva tekutín, preto stále častejšie nahrádzajú tradičné objemové prietokomery. Je to hlavne z toho dôvodu, že nimi meraný hmotnostný prietok nie je závislý od teplotnej rozťažnosti a tlakovej stlačiteľnosti tekutín. Tieto prietokomery nemajú vysoké nároky na vstupné filtre a naviac možno nimi obvykle merať aj hustotu prúdiacej tekutiny a prietok oboma smermi. Najväčšie uplatnenie zaznamenali hmotnostné prietokomery založené na Coriolisovom princípe, menej tepelné meracie členy hmotnostného prietoku. Preto hmotnostné prietokomery sú v súčasnosti vo výrobnom programe mnohých renomovaných firiem angažovaných v meraní prietoku tekutín. Nástup hmotnostných prietokomerov je opodstatnený, pretože najčastejšie je to pretečená hmotnosť, ktorá sa vyhodnocuje pri odoberaní transportovaných tekutín, tj. plynov, pár, kvapalín, ale aj práškových látok, suspenzií a pod. Kvapalné uhľovodíky, ako je ropa a jej produkty, sa predávajú hlavne cez hmotnostné množstvá.

5.5.1 Coriolisov hmotnostný prietokomer

Ak sa hmotný bod pohybuje po kružnici konštantnou uhlovou rýchlosťou jeho tangenciálne zrýchlenie je nulové. Ale ak sa tento hmotný bod, rotujúci uhlovou rýchlosťou $\omega = konšt.$, ešte pohybuje konštantnou rýchlosťou v po priamke, ktorá prechádza osou rotácie, okrem odstredivej sily pôsobí naň aj Coriolisova sila, tj. $\overline{F}_c$ (obr. 5.27). Rotačný pohyb hmotného bodu (v tomto prípade elementu hmoty Δm) predstavuje absolútny pohyb, ale jeho priamočiary pohyb (od stredu alebo do stredu) je relatívny vzhľadom k rotujúcej sústave. Z toho vyplýva, že relatívny pohyb (priamočiary, rovnomerný) z hľadiska absolútneho pohybu má tvar trajektórie hmotného bodu pohybujúceho sa po oblúku (obr. 5.27*b*, rúrka plnou čiarou). Element hmoty zväčšovaním polomeru rotácie zväčšuje svoj energetický obsah – svoju obvodovú rýchlosť v_{ob}, na čo je potrebné Coriolisove zrýchlenie, pre ktoré vo všeobecnosti platí

$$\overline{a}_c = 2 \cdot (\overline{v} \times \overline{\omega}) \tag{5.20}$$

Aplikácia tohoto javu pri prúdiacej tekutine pružným potrubím je znázornená na obr. 5.27. Silové účinky zrýchlenia $\overline{a}_c$ sa podľa 3. Newtonovho zákona „akcie a reakcie" prejavia tak, že účinok Coriolisovho zrýchlenia hmoty Δm vzhľadom na potrubie je v rovnováhe s reakciou, tj.



a) b)

Obr. 5.27. Princíp Coriolisovho hmotnostného prietokomera

Smer sily $\overline{F}_c$ je kolmý na rovinu vektorov $(\overline{\omega},\overline{v})$, orientácia vektora $\overline{F}_c$ je daná pravidlom vektorového súčinu.
Zo známeho vzťahu

$$Q_M = \rho \cdot v \cdot S$$

po dosadení za ρ podľa rovnice

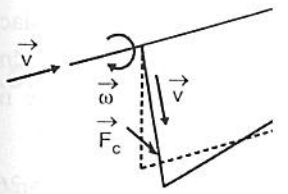
$$\rho = \frac{\Delta m}{S \cdot \Delta l} = \frac{\Delta F_c}{2S \cdot \Delta l \cdot \omega \cdot v} \tag{5.22}$$

pre hmotnostný prietok platí

$$Q_M = \frac{\Delta F_c}{2 \cdot \Delta l \cdot \omega} \tag{5.23}$$

Hmotnostný prietok je teda lineárnou funkciou Coriolisovej sily.

Pre lepšiu predstavu realizácie princípu je na obr. 5.28 naznačený prejav Coriolisovej sily pri prietoku tekutiny rotujúcou pružnou rúrkou tvaru *U* a kmitajúcou priamou pružnou rúrkou. Pri rotujúcej rúrke sa tekutina v ľavom ramene musí urýchľovať (zväčšovanie v_{ob} od stredu) a príčinná reakcia je sila $\overline{F}_c$ pôsobiaca na rúrku proti rotačnému pohybu, pričom v druhom ramene sa tekutina spomaľuje a jej „ubrzďovanie" vyvoláva tiež silu $\overline{F}_c$, ktorá je však opačnej orientácie. V priamej kmitajúcej rúrke pri pohybe od rovnovážnej polohy sa v časti *AB* tekutina musí urýchľovať, čo vyvoláva silu $\overline{F}_c$ a v časti *BC* zasa spomaľovať, čo vytvára silu $\overline{F}_c$ s opačným znamienkom. Hmotnostný prietok je v prvom prípade lineárne závislý od uhlu skrútenia rúrky a v druhom prípade od „fázového" posunu ľavej a pravej časti rúrky.



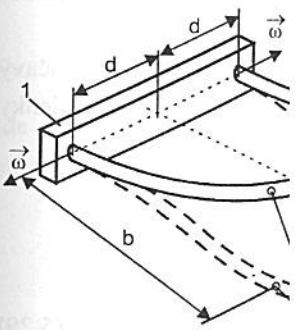
a)

Obr. 5.28. Rotujúca

Podľa obr. 5.28*a*, obr. 5.2
vzťahu

Integrovaním po dĺžke *L* p

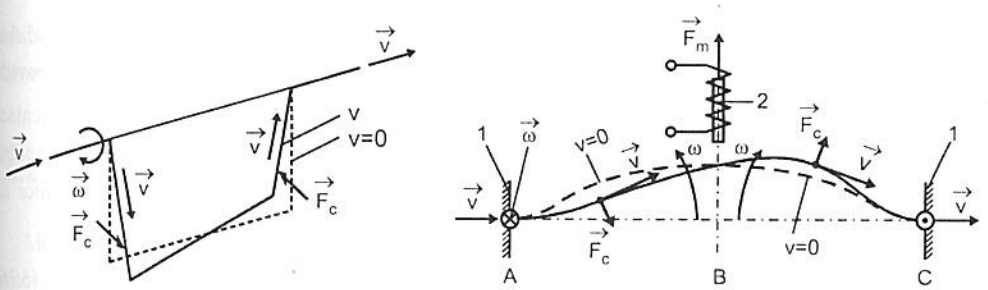
Pri praktickom využi
harmonickým kmitaním,
orientáciu. Na obr. 5.29. je



a)

Obr

1-zákla



a) b)

Obr. 5.28. Rotujúca rúrka tvaru *U* a priama kmitajúca rúrka, účinok Coriolisových síl na ne

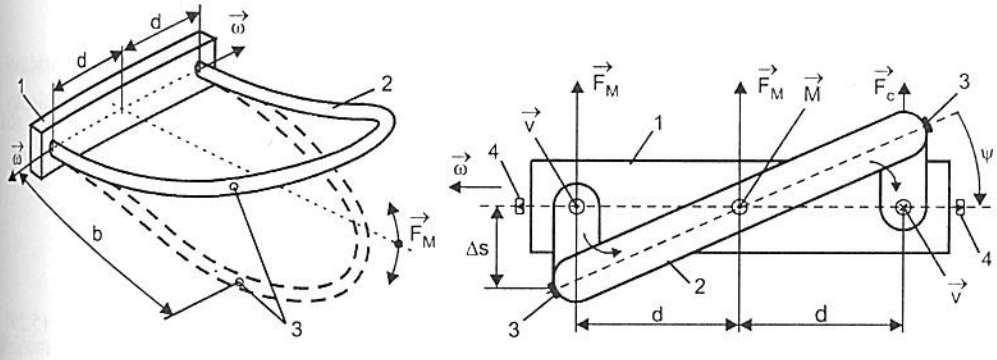
Podľa obr. 5.28*a*, obr. 5.29 a rov. 5.23 spôsobuje Coriolisova sila krútiaci moment $\Delta\overline{M}$ podľa vzťahu

$$\Delta\overline{M} = 2Q_M \cdot \left[\bar{l} \times \left(\Delta\bar{l} \times \overline{\omega}\right)\right] \tag{5.24}$$

Integrovaním po dĺžke L pre celkový krútiaci moment platí

$$M = \int_0^L F_c \cdot dl = 2\int_0^L Q_M \cdot \omega \cdot l \cdot dl = Q_M \cdot \omega \cdot L \tag{5.25}$$

Pri praktickom využití Coriolisovej sily na meranie prietoku sa nahrádza otáčavý pohyb harmonickým kmitaním, tj. vektor $\overline{\omega}$ a teda aj vektor $\overline{F}_c$ majú periodicky sa meniacu orientáciu. Na obr. 5.29. je príklad Coriolisovho prietokomera typu "*U*".



a) b)

Obr. 5.29. Coriolisov prietokomer – príklad realizácie
a) pružná rúrka prietokomera
b) maximálna deformácia rúrky pri danom prietoku
1-základná doska, 2-*U* rúrka, 3-snímací bod, 4-snímač polohy

Rúrka vertikálne kmitá silovým pôsobením elektromagnetu. Pôsobisko periodickej budiacej sily $\overline{F}_M$ je na obr. 5.29*b* v strede základne *U* rúrky. Budiaca frekvencia zodpovedá zvyčajne rezonančnej frekvencii tejto rúrky. Pri prúdiacej tekutine pôsobí harmonicky meniaca sa dvojica Coriolisových síl na obe ramená *U* rúrky, pričom orientácia vektorov síl je opačná vplyvom opačne orientovaného toku tekutiny. Dôsledkom pôsobenia tejto silovej dvojice na ramene dĺžky *d* vznikne krútiaci moment *M*, ktorý spôsobí skrútenie *U* rúrky o uhol ψ

$$\overline{M} = 2 \cdot d \cdot \overline{F}_c \tag{5.26}$$

Tento moment je opäť harmonická veličina (rovnobežné ramená rúrky kmitajú voči sebe). Maximálny uhol skrútenia nastáva pri maximálnej hodnote vektora $\overline{F}_c$, tj. pri prechode strednej časti rúrky kľudovou polohou. Na obr. 5.29*b* je zobrazené maximálne natočenie *U* rúrky pri pohybe smerom hore. Vyhodnotenie maxima periodicky sa meniaceho krútiaceho momentu rieši sa meraním časového intervalu Δt medzi nasledujúcimi prechodmi ľavého a pravého snímacieho bodu nulovou polohou (bod 3 na obr. 5.39*b*), a to prostredníctvom dvoch snímačov polohy umiestnených vo vzdialenosti *b* od základnej dosky *U* rúrky.
Platí, že

$$\Delta t = \frac{2\Delta s}{v_{ob}} = \frac{2\Delta s}{b \cdot \omega} \tag{5.27}$$

kde Δs je dráha snímaného bodu na rúrke,
v_{ob} obvodová rýchlosť.

Pre malý uhol ψ platí $\Delta s \cong d.\Psi$ a po dosadení do rov. 5.27 je časový interval daný vzťahom

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d \cdot \Psi}{b \cdot \omega} \tag{5.28}$$

Tuhosť rúrky vzťahujúca sa k osi symetrii oboch „polrúrok" pôsobí ako direktívny otáčavý moment $M_D = K.\Psi$ (kde *K* je tuhosť rúrky). Rovnovážny stav nastane pri splnení podmienky $M_D = M$, tj.

$$K \cdot \Psi = 2 \cdot d \cdot F_c \quad \text{a} \quad F_c = 2L \cdot \omega \cdot Q_M$$

Po dosadení do vzťahu 5.28 vychádza, že Δt je lineárne závislá od Q_M

$$\Delta t = \frac{8d^2 L}{b \cdot K} \cdot Q_M \tag{5.29}$$

kde *L* je efektívna dĺžka jedného ramena *U* rúrky.
Zo vzťahu 5.29 vyplýva, že meranie Q_M je nezávislé od uhlovej rýchlosti ω. Okrem uvedeného *U* typu sa vyrábajú Coriolisove pretokomery iných konštrukcií, v súčasnosti najmä s priamou rúrkou, princíp merania je však rovnaký.

Coriolisove prietokomery sa vyrábajú pre rozsahy prietokov od 0,05 kg.min^{-1} do 18000 kg.min^{-1}. Presnosť prietokomerov dosahuje pri spodnej medzi správnosti *(min. prietok*

od 3 % až 5 %, v pracovnom rozsahu 0,4 %, výnimočne až 0,2 %. Vlastný prietokomer môže pracovať v prostredí teplôt od -100 °C do +200 °C a pri tlaku meranej tekutiny až do 30 MPa.

5.5.2 Tepelné meradlá hmotnostného prietoku

Merací princíp tepelných prietokomerov spočíva vo vyhodnocovaní energetickej rovnováhy pri odovzdávaní tepla z elektricky vyhrievaného telesa do prúdiacej tekutiny. Uplatňujú sa hlavne dva varianty riešenia týchto senzorov podľa vyhodnocovania prietoku, a to

- otepľovaním prúdiacej tekutiny,
- ochladzovaním vyhrievacieho telesa prúdiacou tekutinou, termoanemometrický princíp.

5.5.2.1 *Tepelné prietokomery merajúce oteplenie tekutiny*

Časť tekutiny je vedená paralelnou tenkostennou dobre tepelne vodivou kovovou rúrkou (obr. 5.30), pričom podľa zákonov prúdenia tekutín sa dá precízne prepočítať hodnota prietoku tenkou rúrkou na celkový prietok. V strede rúrky je umiestnené ohrievacie vinutie T a po oboch stranách sú symetricky navinuté odporové senzory teploty R_1 a R_2. Celá meracia časť je dôkladne tepelne izolovaná od okolia. Pokiaľ tekutina neprúdi, dochádza k rovnakému obojsmernému ohrevu tekutiny a merací mostík je vyvážený. Pri prietoku tekutiny sa symetrické rozdelenie teploty v rúrke poruší a teplotný rozdiel $\vartheta_2 - \vartheta_1$ je vyhodnotený mostíkovým zapojením. Medzi hmotnostným prietokom a meraným teplotným rozdielom platí v obmedzenom rozsahu prietoku lineárny vzťah

$$Q_M = A \cdot \frac{c_p \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{P_q}$$

kde A [kg^2.s^{-2}] je konštanta,

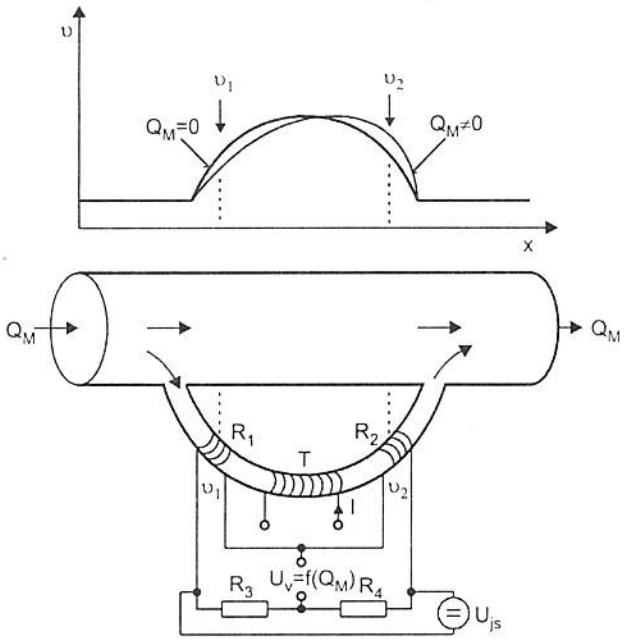
c_p [J.kg^{-1}.°C] hmotnostná tepelná kapacita (merná tepelná kapacita) tekutiny pri konštantnom tlaku,

ϑ_2 [°C] teplota tekutiny za ohrievacím vinutím,

ϑ_1 [°C] teplota tekutiny pred ohrievacím vinutím,

P_q [J.s^{-1}] konštantný tepelný tok z ohrievacieho vinutia do tekutiny.

Pričom merná tepelná kapacita tekutiny c_p je funkciou teploty.



Obr. 5.30. Tepelný prietokomer hmotnostného prietoku s vyhodnocovaním oteplenia prúdiacej tekutiny
R_1, R_2 – odporové senzory teploty, T – ohrievacie vinutie

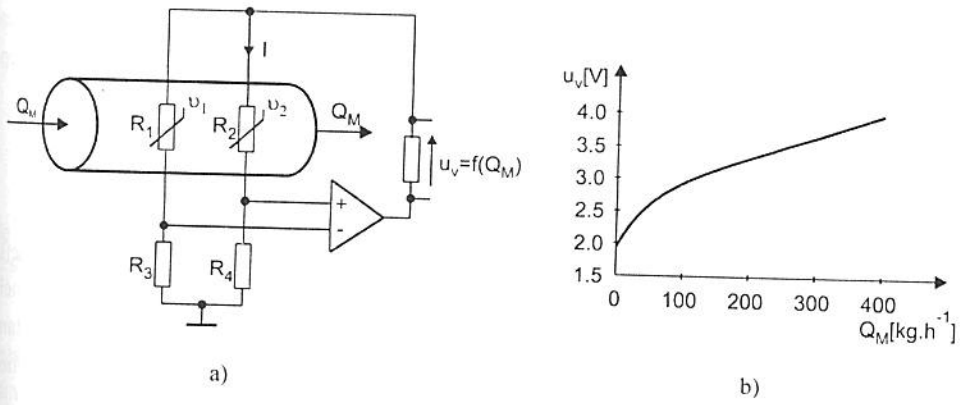
Prietokomery uvedeného typu sa väčšinou používajú pre hmotnostné prietoky plynov, pretože pre bežné rozsahy teplôt a tlaku plynov v praxi možno ich hmotnostnú tepelnú kapacitu pri konštantnom tlaku c_p považovať za konštantnú. Rozsahy prietokomerov sú udávané od 3 ml.min^{-1} do 30000 ml.min^{-1}, aj keď ide o hmotnostné prietokomery. Podstatná časť výrobcov udáva v katalógoch objemové jednotky prietoku pri vzťažných podmienkach, tj. pri ϑ_0, p_0.

5.5.2.2 Tepelné prietokomery s termoanemometrickým princípom

Tieto prietokomery používajú dva senzory teploty – vrstvové (alebo drôtikové) platinové odpory R_1 a R_2 umiestnené za sebou v potrubí (obr. 5.31). Senzory sú zapojené v meracom mostíku s odpormi R_3, R_4. Aktívne odpory R_1, R_2 sú chránené pred účinkami prúdiaceho prostredia tenkou keramickou vrstvou. Senzor R_2 plní dvojitú úlohu tým, že dodáva tepelnú energiu do prúdiaceho prostredia a súčasne meria vlastnú teplotu pri energeticky vyváženom stave v meracom systéme. To platí za podmienky, že $R_2 << R_1$, čiže prúd I tečie hlavne odporom R_2. Potom pre tepelnú bilanciu na odpore R_2 platí

$$R_2 \cdot I^2 = \alpha \cdot S \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

kde α je koeficient prestupu tepla prúdením z R_2 do prúdiaceho prostredia,
S aktívna plocha vyhrievaného senzora *(jeho povrch)*.



a) b)

Obr. 5.31. Hmotnostný prietokomer s využitím termoanemometrického princípu
a) usporiadanie, zapojenie
b) statická charakteristika prietokomera
R_1 – odporový senzor teploty, R_2 – elektricky vyhrievaný senzor teploty

Koeficient prestupu tepla α je funkciou mnohých fyzikálnych veličín pôsobiacich v meracom procese (tekutina: jej hustota, viskozita, tepelná vodivosť, ďalej rýchlosť prúdenia tekutiny, tvar senzorov), a tak na základe teórie podobnosti v termodynamických dejoch bol určený empirický vzťah pre takto usporiadaný prietokomer

$$R_2 \cdot I^2 = (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot \left(A + B\sqrt{Q_M}\right)$$

kde A, B sú konštanty charakterizujúce výmenu tepelnej energie v systéme.

Ak sa uvažuje lineárna prevodová charakteristika Pt snímačov, potom platí

$$(\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{R_2 - R_1}{\alpha_{Pt} \cdot R_0}$$

kde R_0 je odpor pri teplote $\vartheta = 0$ °C a pre dve teploty v lineárnej časti charakteristiky možno písať

$$(\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{R_2 - R_1}{\alpha_{Pt} \cdot R_0}$$

Dosadením do empirickej rovnice sa získa pre Q_M prakticky použiteľný vzťah

$$Q_M = \left(\frac{\alpha_{Pt} \cdot R_0 \cdot I^2}{B} \cdot \frac{R_2}{R_2 - R_1} - \frac{A}{B} \right)^2$$

Zapojenie mostíka a zosilňovača podľa obr. 5.31 je charakteristické tým, že mostík je stále vyvážený, čím je splnená podmienka

$$\frac{R_2}{R_1} = \text{konšt.} \quad \Rightarrow \quad \vartheta_2 - \vartheta_1 \cong \text{konšt.}$$

To znamená, že teplotný rozdiel medzi oboma snímačmi teploty, tj. medzi vyhrievacím telesom a prúdiacou tekutinou je konštantný, čo zabezpečuje stabilné podmienky pri výmene tepla v meracom systéme. Často sa rovnica pre Q_M upravuje do vhodnejšieho tvaru

$$Q_M = \left(C_1 \cdot I^2 - C_2\right)^2$$

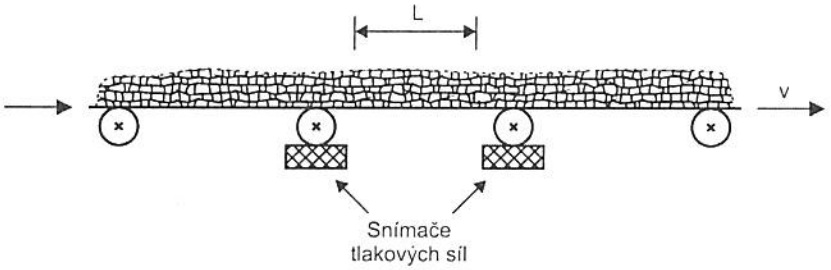
kde C_1, C_2 sú teplotne nezávislé konštanty meracieho systému.
Nelineárna závislosť vyhrievacieho prúdu I a rovnako aj výstupného napätia u_v sa najčastejšie upravuje v číslicovej časti inteligentného meracieho člena. Podobne ako prvý variant tepelného prietokomera, aj tento sa používa hlavne na meranie prietokov plynov. Časová konštanta uvádzaného princípu prietokomera je veľmi malá, okolo 100 ms, z čoho vyplýva jeho použitie - meranie dynamicky sa meniacich prietokov plynov.

5.6 Tok sypkých látok

Tok alebo prietok sypkých látok sa sleduje hlavne pri spojitej doprave materiálu. Všetky meracie zariadenia snímajú hmotnostný prietok. Sú založené na tom, že v mieste merania sa zabezpečí na určitej aktívnej dĺžke L dopravnej trasy konštantná rýchlosť pohybu materiálu v. Pri konštrukčnom riešení podľa obr. 5.32 aktívna dĺžka pásu L nezodpovedá vzdialenosti (rozteči) valčekových podpôr, ale je určená výrobcom meracieho systému. Zaťaženie materiálom dopravnej trasy na aktívnej dĺžke L sa zisťuje vážením, tj. ak je okamžitá hmotnosť materiálu na meracom úseku dopravnej trasy M_o, potom pre hmotnostný prietok za čas platí

$$Q_M = \frac{v}{L} \cdot M_o$$

Hodnoty v a L sú stále a prietok je úmerný okamžitej hmotnosti na meracom úseku M_o. Ustálená rýchlosť pohybu materiálu sa rieši použitím pásového dopravníka s konštantnou rýchlosťou pásu.



Obr. 5. 32. Pásový merací systém

Na obr. 5.32 je uvedená schéma pásového meracieho systému. V mieste merania je prerušená konštrukcia s nosnými valčekmi a dopravný pás beží cez kladky rámu meracieho

systému, ktorý priebežne sleduje prechádzajúce množstvo materiálu sprostredkovane cez snímače sily (tlaku) spojené s meracím rámom, tj.

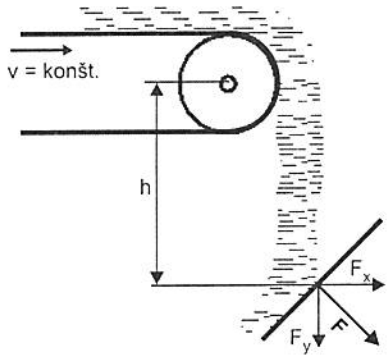
$$M = \frac{v}{L} \cdot \int_{t_1}^{t_2} Q'_M \cdot dt$$

kde Q'_M je hmotnostný prietok cez merací systém za elementárny časový interval.
Presnosť merania pásového systému dosahuje až 1 % meracieho rozsahu.

Na obr. 5.33 je znázornené riešenie so šikmou doskou, na ktorú padá meraná látka z pásového dopravníka z konštantnej výšky *h*. Silový prejav hmoty na šikmú dosku sa sleduje snímačmi sily napr. v smere oboch osí. Hmotnostný prietok sa určí na základe 3. Newtonovho zákona podobne ako v prvom prípade a spracovaním signálu zo snímačov sily v integrátore

$$M = K \cdot \int_{t_1}^{t_2} Q'_M \cdot dt$$

kde K je konštanta meracieho systému.



Obr. 5.33. Šikmá doska

Pri tomto vyhotovení je spravidla presnosť merania horšia ako pri pásových váhach.

Meracie systémy prietoku sypkých látok sa vyrábajú pre rôzne hmotnostné prietoky od niekoľko desiatok kilogramov až do niekoľko ton za hodinu. Rýchlosť pásu dosahuje (0,01 až 0,2) $m.s^{-1}$.

6 MERANIE MNOŽSTVA TEPLA

6.1 Základné pojmy

Podľa kinetickej teórie je teplo alebo tepelná energia prejavom celkovej kinetickej energie neusporiadaného pohybu molekúl látky. To znamená, že teplo je zvláštna forma energie a pri meraní tepla (množstva tepla) sa určuje množstvo tepelnej energie dodanej alebo odobranej nejakému telesu. Preto sa pod pojmom ***teplo*** v technickej praxi rozumie spravidla ***množstvo tepla dodané alebo odobrané cez výmenník tepla prostredníctvom teplonosného média v teplotechnických zariadeniach***. Jednotkou tepelného množstva v SI sústave je **joule [J]**, staršia, ale dodnes používaná jednotka je ***kaloria* [cal]**. Pre vzájomný prevodový vzťah, určený experimentálne, platí ***1J = 0,2388 cal***.

Množstvo tepla ΔQ dodané látke (pri rovnakom skupenstve), pri zvýšení jej teploty o malý prírastok $\Delta\vartheta$, je úmerné tomuto prírastku teploty a hmotnosti m látky

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta \qquad \left[J; J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}; kg; {}^{\circ}C\right] \tag{6.1}$$

kde c je konštanta úmernosti, tj. ***špecifická tepelná kapacita*** *(merné teplo)* látky.

Potom špecifická tepelná kapacita c je definovaná vzťahom

$$c_s = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta\vartheta} \qquad \left[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}\right] \tag{6.2}$$

Špecifická tepelná kapacita je teda funkciou ***druhu látky a čiastočne jej teploty***. Vzhľadom k tomu, že sa ***špecifická tepelná kapacita*** s teplotou mení spravidla len veľmi málo, jej hodnota odpovedá číselne množstvu tepla, ktorým sa jednotka hmoty *(1 kg)* danej látky ohreje o 1 °C.

Pre praktické výpočty sa zavádza ***priemerná (stredná) špecifická tepelná kapacita*** v určitom rozsahu teplôt ϑ_1 a ϑ_2

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{(\vartheta_1 - \vartheta_2)} \tag{6.3}$$

pričom ΔQ je množstvo tepla, ktorým sa zohreje látka o hmotnosti m z teploty ϑ_2 na teplotu ϑ_1. Pri výmene tepelnej energie cez výmenník tepla prostredníctvom ***prúdiacej tekutiny*** platí vzťah pre odovzdanú alebo prijatú ***tepelnú energiu za jednotku času*** (sekundu), tj. pre ***tepelný výkon***

$$P_Q = c \cdot m \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = c \cdot Q_M \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \qquad \left[J \cdot s^{-1}, \text{tj. } W\right] \tag{6.4}$$

kde súčin $c.m$ predstavuje ***tepelnú kapacitu*** teplonosného média, pričom m reprezentuje vlastne hmotnostný prietok Q_M [kg.s^{-1}] tohoto média výmenníkom (obr. 6.1).
Pre odovzdanú ***tepelnú energiu*** potom platí

$$Q = \int_0^t P_Q \, dt \qquad [J] \tag{6.5}$$

6.2 Meranie množstva tepla

V technických zariadeniach, ako aj vo výrobných procesoch, sa často uskutočňuje výmena tepelnej energie medzi jednotlivými časťami systémov, napr. v chemickom priemysle, v energetike a v tepelno-technických zariadeniach (napr. spaľovacie motory). Prenos tepla z centrálneho zdroja jeho výroby k jednotlivým spotrebiteľom, napr. k výmenníkovým staniciam domových a bytových jednotiek, je tiež veľmi častý a sledovaný prípad transportu tepelnej energie. Vyhodnotenie odobraného tepla možno vykonať na základe energetickej bilancie pred a za výmenníkom tepla, pričom teplonosné médium býva najčastejšie ***voda, nemrznúca kvapalina, vzduch a para***. Za predpokladu, že obe sledované miesta energetickej siete majú rovnaký prietočný prierez je prenášaný tepelný výkon vo všeobecnosti (pre ľubovolné prenosové médium) úmerný rozdielu entalpií teplonosnej tekutiny pred a za odberovým miestom. Teda ***entalpia*** je stavová veličina, ktorá charakterizuje schopnosť látky vykonávať technickú prácu, v tomto prípade - prenášať tepelnú energiu. Pri prenose tepla ***prúdiacou vodou*** v potrubí (obr. 6.1) zodpovedá rozdiel entalpií úvahám v predchádzajúcej časti, a tak platí pre

tepelný výkon $$P_Q = Q_M \cdot c_{ps} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \rho_s \cdot c_{ps} \cdot Q_v \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \tag{6.6}$$

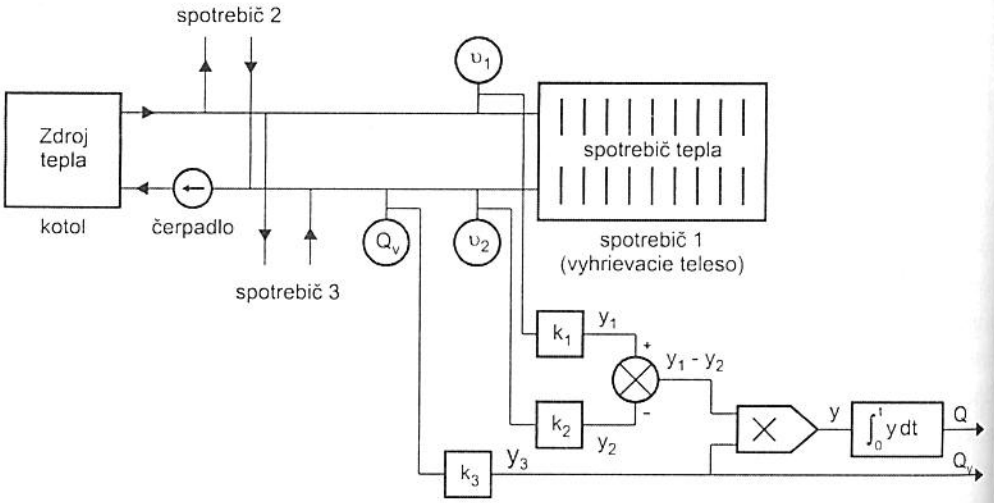
a

množstvo tepla $$Q = \int_0^t P_Q \cdot dt = \sum_{i=1}^{n} \Delta Q_i = \sum_{i=1}^{n} (P_{Qi} \cdot \Delta t_i) \tag{6.7}$$

kde
- Q_M [kg.s^{-1}] je hmotnostný prietok teplonosnej tekutiny,
- Q_v [m^3.s^{-1}] objemový prietok teplonosnej tekutiny,
- c_{ps} [J.kg^{-1}.K^{-1}] stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity pri konštantnom tlaku, pre vodu je to 4250 J.kg^{-1}.K^{-1},
- ρ_s [kg.m^{-3}] stredná hodnota špecifickej hustoty teplonosnej tekutiny,
- ϑ_1, ϑ_2 [°C] teploty v miestach merania, pred a za spotrebičom tepla.

Prístroj realizujúci posledný výraz (rov. 6.7) sa nazýva ***integračný***, v praxi sa vyskytuje najčastejšie.

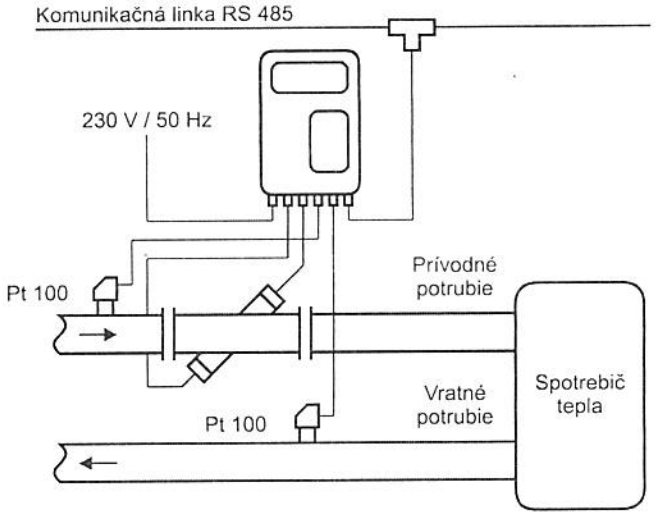
Meracie členy množstva tepla (častejšie ***merače tepla***) sa delia podľa druhu snímačov teploty ϑ_1, ϑ_2, podľa princípu merania prietoku $Q_{V(M)}$ a podľa spôsobu výpočtu rov. 6.7 na mechanické, elektrické a elektronické (inteligentné). Dnes už jednoznačne dominujú ***elektrické*** a ***elektronické*** merače udávajúce na výstupe aspoň informácie o množstve tepla Q spotrebovaného za definovaný čas a o množstve pretečenej teplonostnej tekutiny za ten istý časový interval $Q_{V(M)}$. Na meranie funkčných teplôt sa pre svoje výborné vlastnosti používajú hlavne odporové snímače typu *Pt* a z cenových dôvodov sa vo väčšine prípadov v meračoch tepla používajú turbínkové (lopatkové), menej ultrazvukové prietokomery. Z tohto vyplýva, že ***celkovú základnú presnosť*** meračov tepla určuje presnosť meracieho člena prietoku.



Obr. 6.1 Meranie množstva tepla v jednoduchom energetickom obvode

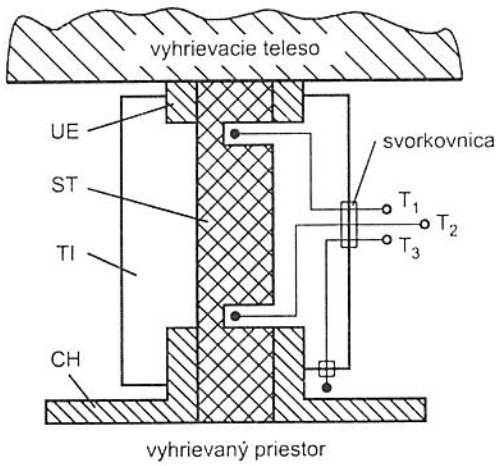
Časté konštrukčné riešenia s dvoma platinovými snímačmi teploty (Pt 100, Pt 500), turbínkovým prietokomerom s impulzným výstupom a elektronickým vyhodnocovaním dosahujú presnosť od 2 % do 5 %, nepriamoúmerne od veľkosti $\Delta\vartheta$. Inteligentné merače tepla s mikropočítačovým vyhodnocovaním umožňujú, okrem všeobecných funkcií inteligentných meracích členov, meranie množstva tepla pre široký rozsah teplôt (od $\Delta\vartheta = 0{,}05$ °C až po 150 °C) s presnosťou od 1 % do 3 %.

Príklad pripojenia merača tepla so snímačmi Pt 100 a s ultrazvukovým meraním prietoku (UC 1.0) do energetickej siete je na obr. 6.2. Väčšina týchto prístrojov umožňuje miestne alebo diaľkové odčítanie nameraných údajov cez induktívne prepojenie (interface), prípadne sériové komunikačné rozhranie. Vyhodnocovacia jednotka je napájaná zo siete alebo z batériového monočlánku.



Obr. 6.2. Prietokový merač tepla s ultrazvukovým prietokomerom Q_1.

Zaujímavé technické riešenie využívajúce unikátny a doteraz nepoužitý princíp merania spotreby tepelnej energie v bytoch a miestnostiach napojených na teplovodné vykurovanie predstavuje ***pôvodný slovenský patentovo chránený vynález***, ktorý je podľa správy PCT Európskeho patentového úradu v Londýne svetovou novinkou v oblasti merania tepla. Tento merač tepla nevyžaduje meranie prietoku nosiča tepelnej energie, len sledovanie teplotného spádu prostredníctvom merania troch teplôt na definovanom tepelnom vodiči – kovovom stĺpiku *ST* (obr. 6.3). Stĺpik je uchytený na vyhrievacom telese (radiátore) pomocou úchytného prvku *UE* a chladičom *CH* je spojený s vyhrievaným prostredím (napr. izba). Teplovodivý stĺpik je uložený v tepelnej izolácii *TI* a teplotný spád na ňom je meraný v dvoch bodoch, tj. na vstupe tepla (T_1) a tesne pred chladičom (T_2). Súčasne sa meria aj teplota okolia T_3.



Obr. 6.3. Princíp merača tepla so sledovaním teplotného spádu

Uvádzaný systém je založený na dvoch základných zákonoch šírenia tepla

- *zákon o šírení tepla prúdením (konvekcia)*

$$P_{Q,KON1} = \alpha_1 \cdot S_R \cdot (T_1 - T_3) \tag{6.8}$$

kde $P_{Q,KON1}$ [J.s^{-1}; W] je odovzdané teplo prúdením z vyhrievacieho telesa (*VT*) do prostredia, napr. izby za jednotku času,
S_R [m^2] výhrevná plocha *VT*,
α_1 [W.m^{-2}.K^{-1}] súčiniteľ prestupu tepla prúdením,
T_1 [K] stredná teplota povrchu *VT*,
T_3 [K] teplota vzduchu obtekajúceho *VT*,

a

$$P_{Q,KON2} = \alpha_2 \cdot S_2 \cdot (T_2 - T_3) \tag{6.9}$$

kde $P_{Q,KON2}$ [J.s^{-1}; W] je odvedené teplo prúdením z povrchu chladiča *CH* do prostredia za jednotku času,
S_2 [m^2] účinná plocha chladiča,
α_2 [W.m^{-2}.K^{-1}] súčiniteľ prestupu tepla,
T_2 [K] stredná povrchová teplota chladiča,
T_3 [K] teplota vzduchu obtekajúceho chladič,

- *zákon o šírení tepla vedením (kondukcia)*

$$P_{Q,K} = \frac{\lambda \cdot S_1 (T_1 - T_2)}{L} \tag{6.10}$$

kde $P_{Q,K}$ [J.s^{-1}; W] je teplo šírené vedením pozdĺž stĺpika za jednotku času,
λ [W.m^{-1}.K^{-1}] súčiniteľ tepelnej vodivosti materiálu *ST*,
S_1 [m^2] prierezová plocha stĺpika *ST*,
T_1, (T_2) [K] teplota na vstupe (výstupe) tepelného toku do (z) *ST*,
L [m] vzdialenosť snímačov T_1 a T_2.

Zo vzťahu (6.8) vyplýva, že pri známej hodnote α_1 a meraním zistených teplôt T_1 a T_3 možno jednoznačne určiť okamžitý tepelný výkon vyhrievacieho telesa. Súčiniteľ prestupu tepla prúdením α je vo všeobecnosti zložitá funkcia viacerých veličín charakterizujúcich zúčastnené látky a spôsob prúdenia. Za predpokladu, že súčinitele α_1 a α_2 sú zhodné (taká je snaha pri konštrukcii a tvare chladiča), tepelná energia prenesená za jednotku času meracím stĺpikom ***vedením*** (λ je známa, stĺpik izolovaný) je za jednotkový čas odvedená chladičom (***prúdením***) do prostredia, čiže $P_{Q,K} = P_{Q,KON2}$, a z toho

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot S_1 (T_1 - T_2)}{S_2 (T_2 - T_3) \cdot L} \tag{6.11}$$

Všetky parametre v tejto rovnici sú známe alebo priamo merané, preto výpočet aktuálnej hodnoty α je realizovateľný podľa rov. 6.11. Potom integráciou $P_{Q,KON1}$ počas aktívneho času sa určí množstvo tepla transportované vyhrievacím telesom do vyhrievaného priestoru, napr. do izby.

7 SNÍMAČE TEKUTÍN

7.1 Snímače

Z pozorovania p
tekutiny rôznou rýchlo
pri pohybe medzi jedn
v tekutinách sú však or
umiestnená medzi dv
vnútorných trecích síl p

kde S je plocha dosky
v kolmom smere na sm
tekutinách platí lineárny

pričom koeficient η repre
Viskozita je základr
používa ***koeficient visko***
charakterizuje pomer tang
veľkosti kolmého rýchlost

Obr.

[1] *reológia* je vedná disciplína, ktorá

7 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY VISKOZITY A HUSTOTY TEKUTÍN

7.1 Snímače viskozity, základné pojmy

Z pozorovania prúdenia tekutín vyplýva, že pri rovnakých podmienkach tečú rôzne tekutiny rôznou rýchlosťou. Príčinou tohoto javu je vnútorné trenie v tekutinách, ktoré vzniká pri pohybe medzi jednotlivými rovnobežnými vrstvami šmýkajúcimi sa po sebe. Sily trenia v tekutinách sú však omnoho menšie ako trecie sily medzi tuhými telesami. Tekutina, ktorá je umiestnená medzi dvoma rovnobežnými doskami (obr. 7.1), vyžaduje na prekonanie vnútorných trecích síl pri pohybe hornej dosky rýchlosťou v, silu F_t

$$F_t = S \cdot \tau$$

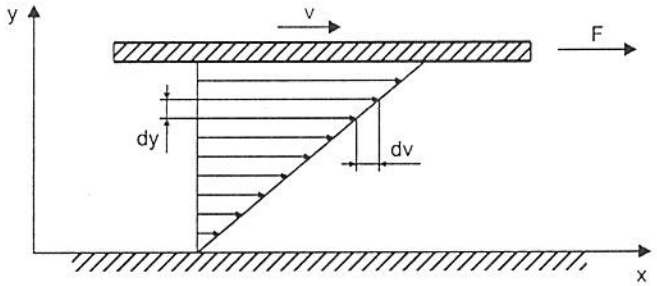
kde S je plocha dosky a τ mechanické tangenciálne napätie úmerné gradientu rýchlosti v kolmom smere na smer prúdenia tekutiny. Pre tangenciálne napätie v tzv. ***newtonovských tekutinách*** platí lineárny zákon

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \tag{7.1}$$

pričom koeficient η reprezentuje vnútorné trenie v tekutine, čiže ***viskozitu prostredia***.

Viskozita je základný reologický parameter[1] a k jeho kvantitatívnemu ohodnoteniu sa používa ***koeficient viskozity*** s označením η alebo ν. Podľa definície, viskozitu v tekutine charakterizuje pomer tangenciálneho napätia τ pôsobiaceho v smere pohybu prostredia ku veľkosti kolmého rýchlostného spádu, čiže z rov. 7.1 platí

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \tag{7.2}$$



Obr. 7.1. Vnútorné trenie v newtonoskej kvapaline

[1] *reológia* je vedná disciplína, ktorá sa zaoberá deformačnými vlastnosťami látok

Takto definovaná viskozita sa označuje ako ***dynamická viskozita*** a jej odvodená jednotka v SI sústave je [Pa.s] alebo [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]. Často používanou dočasnou jednotkou je ***1 poise*** [P], (1 P = 0,1 Pa.s). Prevrátená hodnota viskozity sa nazýva ***tekutosť*** *(fluidita)* prostredia.

V technickej praxi sa vyjadrujú viskózne vlastnosti prostredia často ako pomer dynamickej viskozity a hustoty prostredia. Naznačený pomer sa nazýva ***kinematická viskozita***, pre ktorú platí

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \left[m^2 \cdot s^{-1}\right] \tag{7.3}$$

Dočasná, ale často používaná jednotka kinematickej viskozity je ***centistokes*** [cSt], (1 cSt = 10^6 $m^2.s^{-1}$).

Na viskozitu tekutín má najväčší vplyv teplota (5 až 10 % $.°C^{-1}$) zo všetkých fyzikálnych veličín, pričom viskozita kvapalín klesá so stúpajúcou teplotou, viskozita plynov s teplotou rastie. Závislosť na teplote je zásadne rozdielna pre rôzne tekutiny. Uvedený jav vyžaduje pri meraní viskozity riešenie kompenzácie zmien ***teploty ako hlavnej poruchovej veličiny***. So zmenou tlaku sa viskozita kvapalín a plynov mení pomerne málo. Pri plynoch je potrebné uvažovať túto poruchovú veličinu až pri zmene tlaku o niekoľko desiatok *kPa*. Rozsah meraných hodnôt viskozity sa pohybuje v rozmedzí $1:10^{10}$. Presnosť merania viskozity predstavuje závažný problém a zmenšenie chyby pod 1 % vyžaduje mimoriadne úsilie a dosahuje sa len pri etalónoch.

Prostredia, ktorých viskozita je závislá na rýchlostnom gradiente, tj. pre ne neplatia rov. 7.1 a 7.2 sa nazývajú ***nenewtonovské fluidá***, ako napr. emulzie, suspenzie, koloidné roztoky alebo známejší – med.

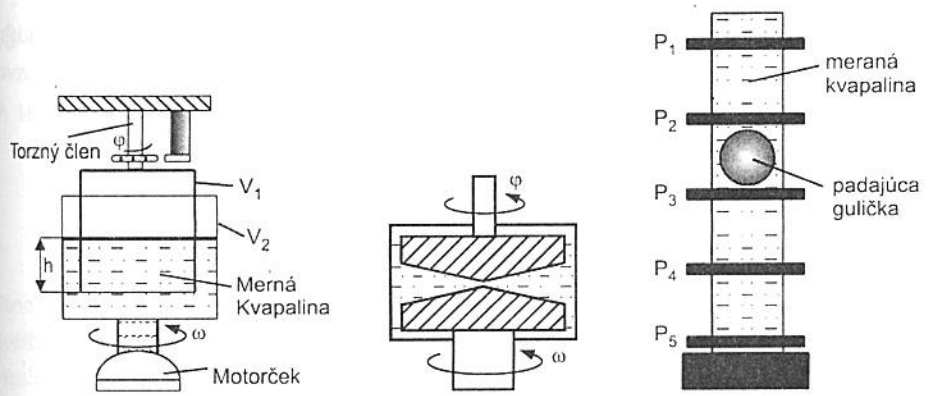
7.2 Snímače viskozity

Meranie viskozity umožňujú hlavne laboratórne metódy s priamou účasťou laboratórneho pracovníka, vzhľadom k zložitej príprave a realizácii tohoto experimentu. Automatizácia procesov merania viskozity sa v súčasnosti stáva viac-menej štandardnou požiadavkou, čo je dôsledkom snahy o stále zvyšovanie kvality výrobných procesov. Prístroje s vlastnosťami ISS podstatne uľahčujú automatizáciu tohoto merania, čiže zásah operátora je minimálny alebo nie je vôbec nutný.

Podľa účinkov viskozity na pohyb prostredia boli vyvinuté viaceré metódy jej merania použiteľné aj pre automatizované meranie.

Rotačné snímače viskozity kvapalín sú založené na tom, že pri rotácii telesa ponoreného v nádobe s kvapalinou vzniká trenie závislé na viskozite η, na geometrii rotujúceho objektu a na jeho uhlovej rýchlosti ω. Veľkosť trenia medzi rotujúcim telesom a kvapalinou sa vyhodnocuje nepriamo cez vyžadovaný alebo vytváraný krútiaci moment.

Zostava viskozimetra s rotujúcim valcom sa skladá zo zvonu V_1 s polomerom r_1 ponoreného do meranej kvapaliny vo valcovej nádobe V_2 s polomerom r_2 (obr. 7.2*a*).



a) b) c)

Obr. 7.2. Snímače viskozity: a) rotačný valcový, b) rotačný kužeľový, c) telieskový

Nádoba pri meraní sa uvedie do rotačného pohybu uhlovou rýchlosťou ω a meria sa reakčný moment sily pôsobiaci na zvon V_1. Rotačný snímač viskozity tvorí kombinácia snímačov momentu a uhlovej rýchlosti ω. Ako pružný člen snímača momentu sa používa tenký valec - torzné vlákno spolu so snímačom uhlu natočenia (skrútenia) φ. Dynamická viskozita sa určí zo vzťahu

$$\eta = \frac{K \cdot \varphi}{4\pi \cdot h \cdot \omega} \cdot \frac{1}{r_1^2 - r_2^2}$$

kde K je direktívna konštanta torznej pružinky a r_i sú polomery rotujúceho a pevného valca.

Rotujúci valec je síce vhodný pre kvapaliny vyššej viskozity *(suspenzie, koloidy a pod.)*, avšak pre ešte väčšie viskozity, ako napr. nevulkanizované kaučukové zmesi, sú namiesto valcov používané kužele s rôznym vrcholovým uhlom, obr. 7.2*b*.

Jedna z metód merania viskozity je založená na meraní sily F reprezentujúcej odpor proti pohybu telesa, ktorý kladie tekutina. Pre guľku o polomere r pohybujúcu sa v nekonečne rozmernom viskóznom prostredí v gravitačnom poli zeme rýchlosťou v, odvodil *Stokes* vzťah pre silu charakterizujúcu odpor proti jej pohybu

$$F = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

Voľne padajúca guľka v prostredí so sledovanou viskozitou dosiahne ***hraničnú rýchlosť*** v_h, pri ktorej sa tiaž telesa rovná práve sile F, tj. odporu, ktorý kladie tekutina guľke. Po dosiahnutí rovnováhy, pri ktorej platí

$$V \cdot (\rho_g - \rho) \cdot g = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v_h$$

je pohyb guľky je veľmi blízky rovnomernému. V uvedenom vzťahu sú hustota guľky a kvapaliny označené ρ_g, ρ a objem guľky je V.

Telieskové snímače viskozity (guličkové) vychádzajú z merania hraničných rýchlostí v_h, tj. z merania doby priechodu telieska medzi značkami (snímače polohy) pri voľnom páde

sledovanou kvapalinou od hladiny meranej kvapaliny. Zo schematického usporiadania (obr. 7.2*c*) je zrejmé, že sa na získanie údajov pri meraní rýchlosti používa viac senzorov polohy P_i, pretože je nutné zistiť, či sa už pri páde guľky dosiahla hraničná rýchlosť v_h. Až potom sa určí viskozita kvapaliny zo vzťahu

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 \cdot (\rho_g - \rho)}{9 \cdot v_h} = \Delta t \cdot K_g \cdot (\rho_g - \rho)$$

kde K_g je tzv. konštanta guličky (udáva výrobca pre jednotlivé guličky vyberané podľa rozsahu η) a Δt je doba priechodu guličky medzi senzormi polohy v tej časti dráhy, kde už bola dosiahnutá hraničná (rovnomerná) rýchlosť v_h.

Je zrejmé, že viskozita tekutiny ovplyvňuje objemový prietok Q_v cez zúžený prietočný prierez, napr. potrubie. Pri laminárnom prúdení rúrkou o dĺžke l podľa *Hagen-Poiseuilleovho zákona* platí vzťah (*lineárny laminárny tekutinový odpor*)

$$Q_v = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot l \cdot k} \cdot \Delta p ,$$

pričom objemový prietok je vyjadrený vzťahom $Q_v = \pi \cdot r^2 \cdot \bar{v}$, kde $\bar{v}$ je stredná rýchlosť tekutiny plochou $\pi.r^2$.

Na tomto princípe sú založené ***výtokové a kapilárne snímače viskozity***. Pri ***výtokových snímačoch*** využívajúcich laminárny zákon, sa sleduje doba výtoku definovaného množstva kvapaliny kapilárou kruhového prierezu. Nepriamo sa určuje relatívna viskozita porovnávaním doby výtoku meranej kvapaliny Δt_x a destilovanej vody Δt_0 (pri teplote 20 °C). Pri výpočte viskozity kvapaliny sa predpokladá znalosť hustoty ρ_x a ρ_0. Potom platí

$$\eta = \frac{\rho_x}{\rho_0} \cdot \frac{\Delta t_x}{\Delta t_0}$$

Pri tomto meraní sa používa destilovaná voda ako porovnávacia kvapalina, pretože jej viskozita je pri 20 °C práve 1 cP. Tlakový spád sa zabezpečuje najčastejšie definovanou výškou hladiny meranej kvapaliny v nádobe.

Rotametrové snímače viskozity používajú na meranie prietokomer s rotujúcim plavákom vhodného tvaru, tzv. rotameter (pozri kap. *Snímače a meracie členy prietoku*). Tvar telieska je volený tak, aby jeho rovnovážna poloha bola čo najviac závislá na viskozite meranej kvapaliny, čo je v protiklade s požiadavkou pri meraní prietoku. Poloha telieska v kužeľovej trubici sa ustáli pri rovnováhe síl vyvolaných tlakovým spádom na teliesku gravitáciou (tiaž telieska), viskóznou a vztlakovou silou. Udržiavaním konštantného prietoku a konštantnej teploty tekutiny je poloha telieska určená len kinematickou viskozitou meranej kvapaliny pretekajúcej rotametrom.

7.3 Snímače hustoty, základné pojmy

Hustota ρ látky telesa je definovaná pomerom

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\mathrm{kg \cdot m^{-3}}\right]$$

kde m je homogénne rozložená hmotnosť,
V objem látky alebo telesa.

Hustota všetkých látok závisí na teplote a tlaku samotnej látky. Pri pevných látkach a kvapalinách sa uvažuje iba o vplyve teploty, pretože vplyv tlaku vzhľadom na malú stlačiteľnosť je spravidla bezvýznamný. Zmena hustoty látky s teplotou predstavuje objemovú vlastnosť približne popísanú vzťahom (pre teplotný spád $\Delta\vartheta$)

$$V = V_0\left[1 + \beta\left(\vartheta - \vartheta_0\right)\right]$$

kde $\beta\,[\mathrm{K^{-1}}]$ je teplotný súčiniteľ objemovej rozťažnosti,
ϑ aktuálna teplota látky,
V_0 objem pri teplote ϑ_0.

Z predchádzajúceho vyplýva, že hlavnou poruchovou veličinou pri meraní hustoty je ***teplota*** sledovaného prostredia, pričom jej korekcia sa rieši buď meraním teploty a korekčným výpočtom (ISS prvky) alebo konštrukciou snímača s potláčaním tejto chyby. Meracie rozsahy meracích členov hustoty tekutín sa pohybujú pre plyny od (0 až 50) $\mathrm{kg.m^{-3}}$ do (0 až 400) $\mathrm{kg.m^{-3}}$ a (0 až 2000) $\mathrm{kg.m^{-3}}$ pre kvapaliny. Presnosť závisí od druhu látky, pre kvapaliny sa dosahuje (0,2 až 0,5) %.

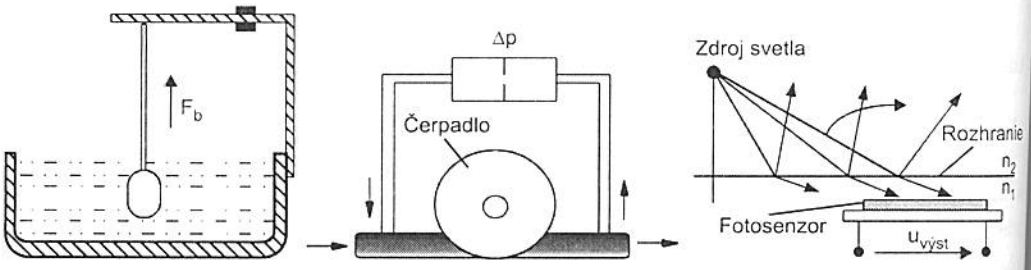
7.4 Priame snímače hustoty

Priame snímače hustoty sú vhodné na meranie hustoty tekutín pre účely automatického riadenia, pretože napr. cez snímače sily alebo tlakovej diferencie sú schopné určovať priamo a priebežne hmotnosť tekutiny známeho objemu. Najčastejšie používané princípy merania hustoty sú tie, ktoré využívajú pre svoju činnosť vztlakové sily, tlakový spád na zoškrtenom priereze a javy ovplyvňujúce optické parametre prostredia.

Vztlakové snímače merajú senzorom sily s tenzometrami na pružnom člene v tvare nosníka vztlakové účinky plaváka ponoreného do meranej kvapaliny (obr. 7.3*a*).

Snímače hustoty plynov založené na princípe tlakovej diferencie sú usporiadané podľa obr. 7.3*b*. Odstredivé čerpadlo so stálym výkonom núti meraný plyn prúdiť konštantným objemovým prietokom cez škrtiace zariadenie. Zo vzťahu pre škrtiace orgány (pozri kap. *Snímače a meracie členy prietoku*) je zrejmé, že tlaková diferencia bude závislá na hustote pretekajúceho plynu. V uvádzanom príklade sa meria tlakový spád priamo na čerpadle.

Optické snímače sa používajú pre látky, pri ktorých ich hustota ovplyvňuje index lomu jedneho z prostredí, tj. n_1 alebo n_2. Na schematickom usporiadaní refraktometra na obr. 7.3*c* je určovaná poloha stopy lomeného lúča optickým snímačom.



a) b) c)

Obr. 7.3. Priame snímače hustoty tekutín
a) plavákový snímač hustoty
b) snímač hustoty s tlakovou diferenciou
c) refraktometrický snímač hustoty

Snímače na princípe útlmu žiarenia charakterizuje závislosť útlmu rádioaktívneho žiarenia na hustote prostredia a je často využívaný najmä pre bezdotykové merania v ťažkých prevádzkových podmienkach. V najjednoduchšom prípade sa sleduje výstupný signál snímača ionizujúceho žiarenia, ktorý odpovedá časti žiarenia rádioizotopového zdroja prepustenej meraným prostredím.

7.5 Nepriame snímače hustoty

Nepriame určovanie hustoty výpočtom z nameraných hodnôt statického tlaku p_s a teploty T je vhodné pri určovaní hustoty plynov, pričom sa vychádza zo stavovej rovnice plynov.
Pre plyny, ktoré sa svojimi vlastnosťami blížia vlastnostiam tzv. ideálneho plynu, vo všeobecnosti platí

$$\rho = \frac{p_s}{R \cdot T}$$

$$R = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = 8{,}314 \cdot 10^3 \quad \left[J \cdot K^{-1} \cdot kmol^{-1}\right]$$

a je pre *1 kmol* ľubovolného plynu rovnaká. Uvedená konštanta je univerzálna fyzikálna konštanta, tzv. molová plynová konštanta. Pri výpočte hustoty určeného (daného) množstva plynu sa potom použije rovnica

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p_s \cdot M}{R \cdot T}$$

kde M [kg.kmol^{-1}] je ***molová hmotnosť plynu***.

8 SNÍMAČE A MERACIE ČLENY POLOHY

Meranie polohy, výchylky, posunutia a vzdialenosti, sledovanie prítomnosti predmetov a ich počítanie sa vyskytuje veľmi často v automatizačných úlohách, v aplikáciách v robotických a rôznych pohybových zariadeniach, napr. aj v kinematických častiach akčných členov. Zásadné rozšírenie snímania polohy a odvodených procesných veličín priniesla automatizácia nespojitých výrobných procesov, ktorých reprezentantom je hlavne strojárenská výroba.

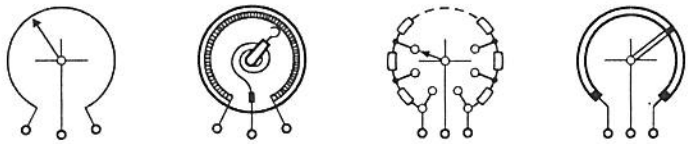
8.1 Spojité snímače polohy

Spojité snímače polohy a odvodených procesných veličín sú charakterizované analógovým signálom na výstupe. Používajú sa na riešenie náročnejších úloh automatizácie a monitorovania. Napr. poloha, rýchlosť a zrýchlenie sú fyzikálne veličiny, bez aktuálnej znalosti ktorých v celom pracovnom priestore nemôže pracovať žiadny kvalitný pohybový systém. Medzi takéto patria napríklad pohybové systémy CNC strojov, ramená robotov a každé iné zariadenie s uzavretým servosystémom.

8.1.1 Spojité odporové snímače

Odporové (potenciometrické) snímače so spojitým výstupným signálom patria do skupiny pasívnych meracích prvkov a sú vhodné na priame meranie, napr. polohy prvku mechanickej zostavy alebo na meranie neelektrických veličín, ktoré sa dajú transformovať na zmenu polohy, čiže na posunutie, pootočenie a pod. V druhom prípade sa jedná o odporové vysielače pre prvotný merací systém, ako napr. snímač tlaku s Bourdonovou rúrkou pripojený na odporový vysielač.

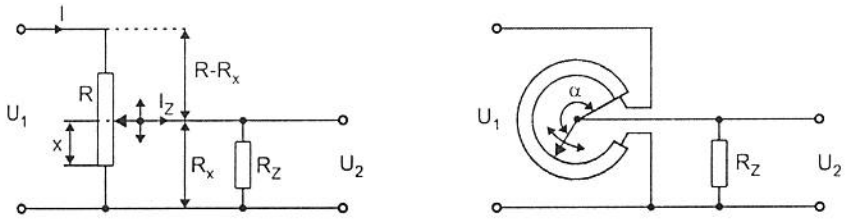
Pri spojitom odporovom snímači pôsobením meranej neelektrickej veličiny sa mení poloha kontaktu (bežca, zberača), ktorý sa posúva po odporovej dráhe, čím sa mení deliaci pomer odporového potenciometra. V takýchto prípadoch sa jedná o merací potenciometer špeciálnej konštrukcie. Odporové snímače sa najčastejšie delia podľa tvaru odporovej dráhy, po ktorej sa pohybuje bežec. Celková hodnota odporu týchto snímačov býva v rozsahu od 20 Ω do 5 MΩ. Zvyčajne sa vyžaduje lineárny priebeh medzi uhlovou zmenou polohy (alebo posunutím) bežca a zmenou odporu, no často sa realizuje aj iná, požadovaná, funkčná závislosť. Potenciometrické snímače polohy sa vyznačujú jednoduchosťou a spoľahlivosťou, avšak na dosiahnutie vhodných metrologických a prevádzkových parametrov musia byť odporové snímače mechanicky dokonale vyhotovené, tj. s malým trecím momentom, malým šumom a malým vplyvom poruchových veličín (teplota, vibrácie, vlhkosť, prašnosť, a pod.). Odporová dráha je najčastejšie vytvorená z vinutého odporového drôtu. Skupina odporových snímačov polohy je rozsiahla a umožňuje riešiť mnoho problémov z oblasti merania procesných veličín.



a) b) c) d)

Obr. 8.1. Konštrukčné riešenia odporových snímačov polohy s kruhovou dráhou
a) potenciometer s jedným odporovým vodičom
b) odporový vodič navinutý na nosnej podložke
c) stupňovitá odporová dráha
d) odporová dráha tvorená elektrolytom

Kvôli vernej realizácii požadovanej charakteristiky potenciometra $R = f(x;\alpha)$ je nevyhnutné, aby zaťažovací odpor R_z potenciometrického snímača bol čo najväčší, teoreticky nekonečne veľký. Preto v reálnom vyhotovení vzniká vplyvom záťaže prídavná, tzv. napäťová chyba konformnosti priebehu δ_x, ktorej veľkosť závisí na polohe bežca a pomere zaťažovacieho odpotu R_z a od celkového odporu potenciometra R, tj. na parametri zaťaženia $K_z = R_z/R$. Príklady dvoch typov odporových snímačov sú na obr. 8.2. Sú to potenciometrické deliče s deliacim pomerom nastaviteľným v hraniciach 0 až 1, pričom deliaci pomer je daný polohou kontaktu – bežca.



a) b)

Obr. 8.2. Schémy zapojenia potenciometrických snímačov polohy
a) pusunu
b) pootočenia

Pre nezaťažený potenciometer platí

$$U_2 = k \cdot x, \quad \text{resp.} \quad U_2 = k \cdot \alpha,$$

pričom konštanta úmernosti k je určená pomerom

$$k = \frac{U_2}{x_{max}} = \frac{U_2}{\alpha_{max}}$$

Reálna hodnota odporu záťaže R_z spôsobuje odchýlku od lineárneho priebehu zaťažovacej charakteristiky, tj. napäťovú chybu potenciometrického snímača

$$\Delta U_2 = U_2 - U_{20}$$

kde U_2 je napätie na záťaži R_z,
U_{20} napätie na nezaťaženom potenciometri, tj. $R_z = \infty$.

Pre napätie na záťaži platí

$$U_2 = U_1 - I \cdot (R - R_x)$$

pričom prúd I sa určí z rovnice

$$I = \frac{U_1}{R - R_x + \frac{R_x \cdot R_z}{R_x + R_z}}$$

Potom platí

$$U_2 = U_1 \frac{R_x}{R + R \cdot \frac{R_x}{R_z} - \frac{R_x^2}{R_z}} \qquad (8.1)$$

Ak sa uvažuje v rovnici 8.1, že $R_{x\,max.} = R$, potom

$$U_{2\,max} = U_1$$

a ak platí $R_z = \infty$, tak

$$U_{20} = U_1 \cdot \frac{R_x}{R_0}$$

Pre napäťovú odchýlku od ideálnej charakteristiky platí

$$\Delta U_2 = U_2 - U_{20} = U_1 \frac{R_x \cdot R_z}{R \cdot R_z + R \cdot R_x - R_x^2} - U_1 \cdot \frac{R_x}{R_0}$$

A pre $R_x < R$ a $R_z > R$ možno písať

$$\Delta U_2 = U_1 \left(\frac{R_x^3}{R^2 \cdot R_z} - \frac{R_x^2}{R \cdot R_z} \right)$$

Táto funkcia nadobúda maximum pre $R_x = 2/3\ R$, tj.

$$\Delta U_{2\,max} \cong 0{,}15 \cdot U_1 \cdot \frac{R}{R_z}$$

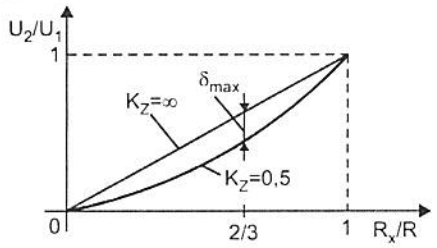
Pomerná chyba skutočných priebehov od lineárnej charakteristiky je daná rovnicou

$$\delta = \frac{\Delta U_2}{U_{2\,max}} = \frac{R_x \cdot R_z}{R \cdot R_z + R \cdot R_x - R_x^2} - \frac{R_x}{R}$$

a jej maximálna hodnota je

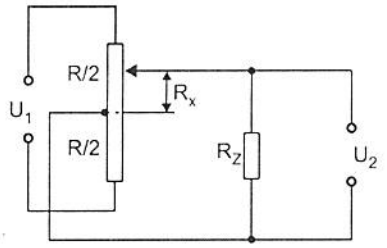
$$\delta_{max} = \frac{\Delta U_{2\,max}}{U_{2\,max}} \cong 0{,}15\,\frac{R}{R_z}$$

Podľa maximálnej pomernej napäťovej chyby δ_{max}, ktorá je pri návrhu potenciometrického snímača polohy určená (daná, zvolená), možno vypočítať dôležitý pomer $K_z = R_z/R$



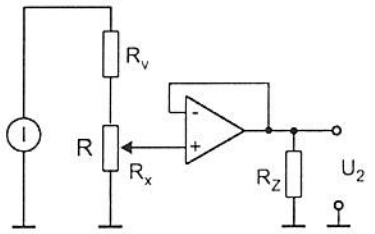
Obr. 8.3. Priebeh napäťovej chyby odporového snímača polohy

Na obr. 8.4 je schéma zapojenia odporového snímača polohy, čiže potenciometera so stredovým vývodom. Veľkosť výstupného napätia závisí od posunutia bežca voči stredu odporu R a polarita tohoto napätia od polohy bežca voči strednému vývodu.



Obr. 8.4. Potenciometrický snímač s vývodom v strede

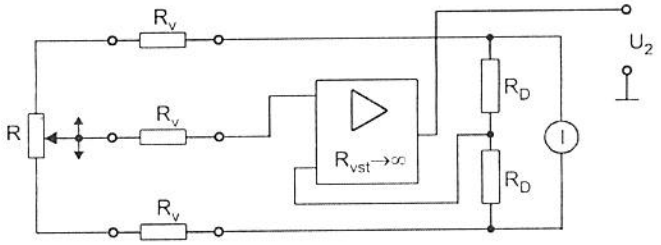
Z predchádzajúcich úvah vyplýva, že je dôležité použiť vyhodnocovací systém s veľkým vstupným odporom a jedno z vhodných riešení je uvedené na obr. 8.5



Obr. 8.5. Priame pripojenie odporového snímača k vyhodnocovaciemu obvodu

Pre niektoré aplikácie je vhodnejšie mostíkové zapojenie podľa obr. 8.6. Výstupné napätie mostíka indikuje polohu bežca od referenčnej polohy (napr. v strede odporovej dráhy) spolu s vyhodnotením znamienka. Pri mostíkovom zapojení je potrebné zaoberať sa chybou

spôsobenou zmenou odporu prívodných vedení od teploty okolia, preto sa často používa trojvodičové pripojenie odporového snímača k vyhodnocovaciemu obvodu (pozri kap. *Snímače a meracie členy teplotných veličín, 1.2.3.1*)



Obr. 8.6. Mostíkové pripojenie odporového snímača polohy

Pre optimálnu funkciu snímača je dôležitá jeho rozlišovacia schopnosť, zvyčajne udávaná ako najmenšia hodnota deliaceho pomeru snímača. Výstupné napätie sa mení plynulo s uhlom natočenia bežca iba vtedy, ak sa bežec trvalo dotýka odporovej dráhy. Táto požiadavka nie je splnená pri vinutých snímačoch, ktorých výstupné napätie sa mení po malých skokoch (stupňoch), daných úbytkami napätia na jednotlivých závitoch. Presnosť najlepších snímačov tejto konštrukcie dosahuje hodnoty až 0,02 % pre jednosmerné napätie. Rozkmitanie (chvenie) bežca v prevádzke je zdrojom šumového napätia. Pri vyššom prúdovom zaťažení (bežné je 100 mA) presnosť rýchlo klesá a rastie tepelný šum. Konštrukčné riešenia týchto snímačov polohy sú dané tvarom dráhy bežca – najčastejšie kruhové, lineárne, špirálovité a špeciálne. Lineárne snímače sa vyrábajú pre rozsahy (5 až 500) mm posunu bežca. Pri kruhových býva uhlové pootočenie od 0° do 240° až 360°. Uvádzaná stredná doba života dosahuje viac ako 10^6 cyklov bežca po dráhe bez vplyvu na presnosť merania.

Pri striedavom napájaní sa presnosť vinutého snímača zmenšuje, pretože jeho vinutie prestáva mať charakter čisto ohmický a chová sa ako komplexná impedancia zložená z rovnomerne rozloženého odporu R, indukčnosti vinutia L a z rozptylových kapacít medzi jednotlivými závitmi a medzi vinutím a kovovými časťami snímača. Vplyv frekvencie napájacieho napätia na presnosť závisí na zaťažovacej impedancii snímača, ale tento vplyv možno podstatne kompenzovať vhodnou voľbou zaťažovacieho odporu. Impedančný charakter snímača spôsobuje pri striedavom napájaní okrem zhoršenia presnosti, tiež nežiadúci fázový posun medzi výstupným a vstupným napätím, ktorý závisí na polohe bežca a nedá sa kompenzovať. Vplyv frekvencie napájacieho napätia je tým väčší, čím je odpor snímača väčší a jeho vinutie dlhšie. Spravidla je možné jednootáčkové snímače používať bez zhoršenia vlastností pri pracovnej frekvencii až niekoľko kHz, miniatúrne viacotáčkové snímače do 400 Hz.

8.1.2 Indukčné snímače

Meracie členy tejto skupiny transformujú mechanickú veličinu na zmenu vlastnej indukčnosti (***indukčnostné***, *inductive*, pasívne) alebo na zmenu vzájomnej indukčnosti (***indukčné, transformátorové***, *transformer*, aktívne). Indukčnostné a indukčné snímače tvoria skupinu snímačov sily, tlaku, ale hlavne polohy, posunutia, uhlu natočenia, otáčok, počítania alebo sledovania prítomnosti predmetov, a pod.

8.1.2.1 Indukčnostné

Ak prechádza časovo nestály magnetický tok Φ cievkou s N závitmi, indukuje sa v cievke svorkové napätie

$$u = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \qquad \left[V; Wb(weber); s^{-1}\right] \tag{8.2}$$

Magnetický tok Φ je úmerný prúdu I a podľa Hopkinsového zákona pre magnetický obvod platí (pri zanedbaní komplexnej zložky magnetickej impedancie)

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{N \cdot I}{R_m} \qquad \left[Wb; A; A \cdot Wb^{-1}\right] \tag{8.3}$$

kde F_m je magnetomotorické napätie v magnetickom obvode,
R_m magnetický odpor v tomto obvode.

Zmena celkového toku $d\Phi$ je úmerná zmene prúdu dI, a tak platí

$$d\Phi = \frac{N}{R_m} \cdot dI \tag{8.4}$$

Po dosadení do rov. 8.2 a vhodnej úprave vychádza pre napätie na cievke

$$u = -\frac{N^2}{R_m} \cdot \frac{dI}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \tag{8.5}$$

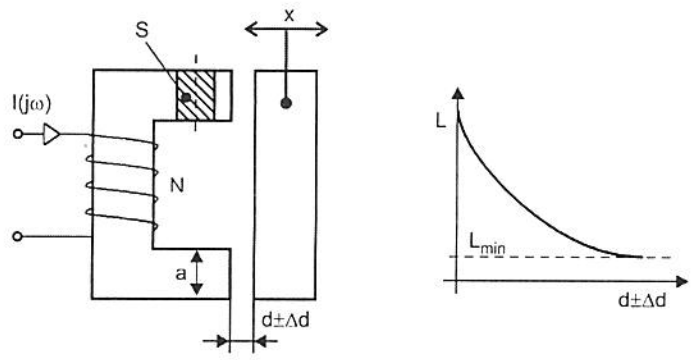
kde L je ***vlastná indukčnosť***. Jednotka vlastnej indukčnosti je ***henry*** [H].
Zo vzťahu 8.3 vyplýva základná rovnica pre vlastnú indukčnosť

$$L = N\frac{\Phi}{I} = \frac{N^2}{R_m} \qquad [H; Wb; A] \tag{8.6}$$

Konštrukčné usporiadanie indukčnostného snímača posunutia s premennou vzduchovou medzerou je na obr. 8.7. Pre indukčnosť jeho cievky platí vzťah 8.6 a pre celkový magnetický odpor R_m rovnica

$$R_m = R_ž + R_v$$

kde $R_ž$ je magnetický odpor feromagnetického jadra, tj. magneticky vodivých častí obvodu,
R_v magnetický odpor vzduchovej medzery.



Obr. 8.7. Indukčnostný snímač s premennou vzduchovou medzerou a jeho charakteristika

Pre oblasť reálnych frekvencií (do 10^4 Hz) a pre pomer $d/a > 0{,}2$ je väčšinou splnená podmienka, že $R_ž << R_v$. Potom platí

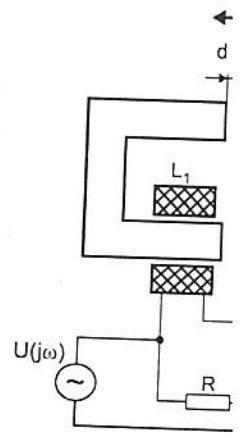
$$R_m \cong R_v = \frac{1}{\mu_v} \cdot \frac{2d}{S} \text{ , pričom platí } \mu_v \cong \mu_0$$

kde d je sledovaná vzdialenosť,
S prierez strmeňa,
μ_v permeabilita vzduchu,
μ_0 permeabilita vákua ($4\pi.10^{-7}$ H.m^{-1}).

Pre vlastnú indukčnosť snímača a jeho prevodovú charakteristiku vychádza nelineárna (hyperbolická) závislosť

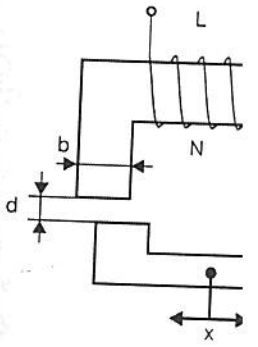
$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \frac{1}{2 \cdot d} = K \cdot \frac{1}{d}$$

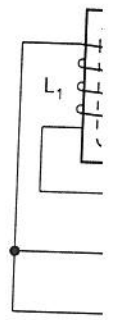
Túto charakteristiku snímača polohy je možné linearizovať, napr. v okolí pracovného bodu diferenciálnym zapojením podľa obr. 8.8.



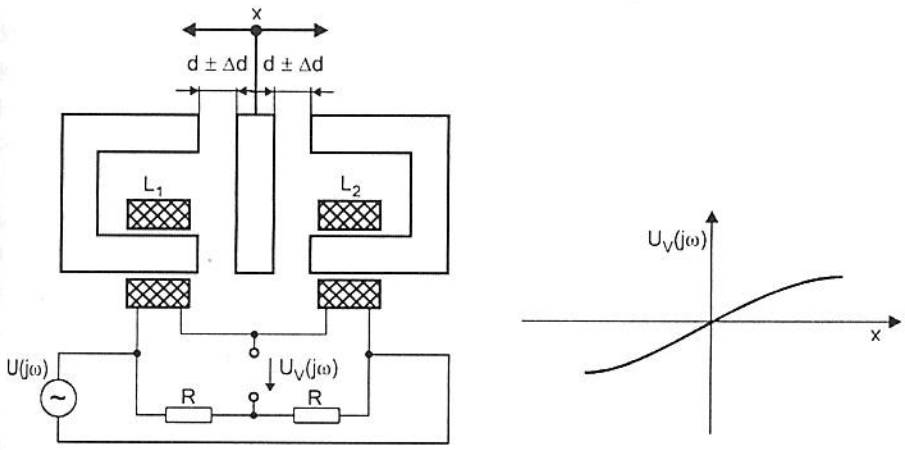
Obr. 8.

Iné konštrukčné riešenia in



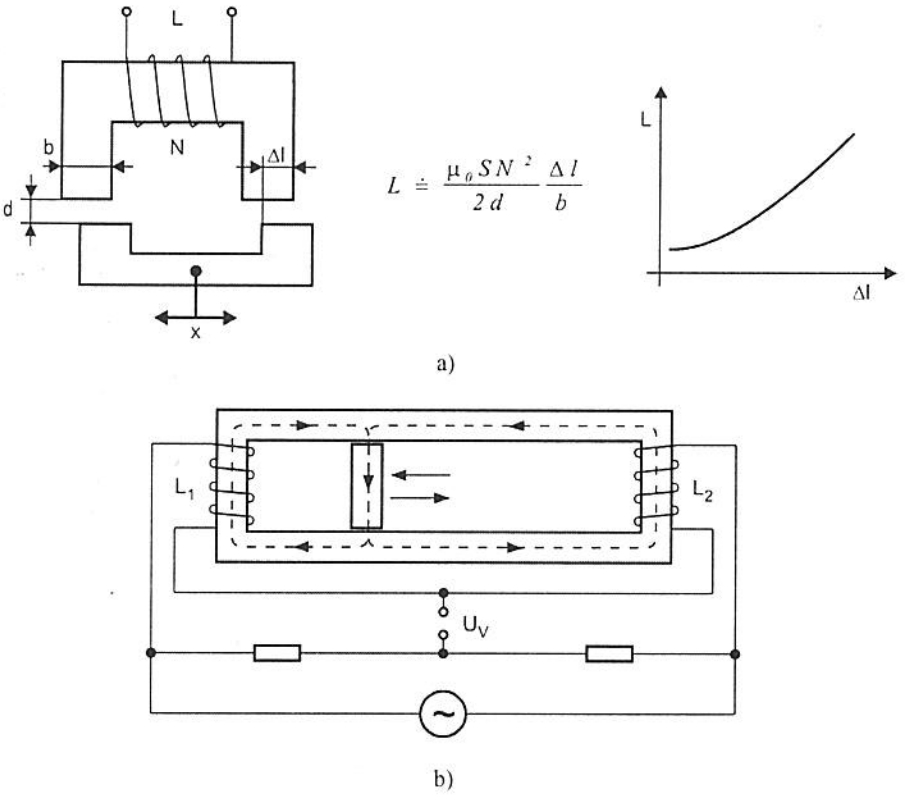


Obr. 8.9. Indukčnos
a) s prer
b) s dvo



Obr. 8.8. Diferenciálne usporiadanie indukčnostného snímača

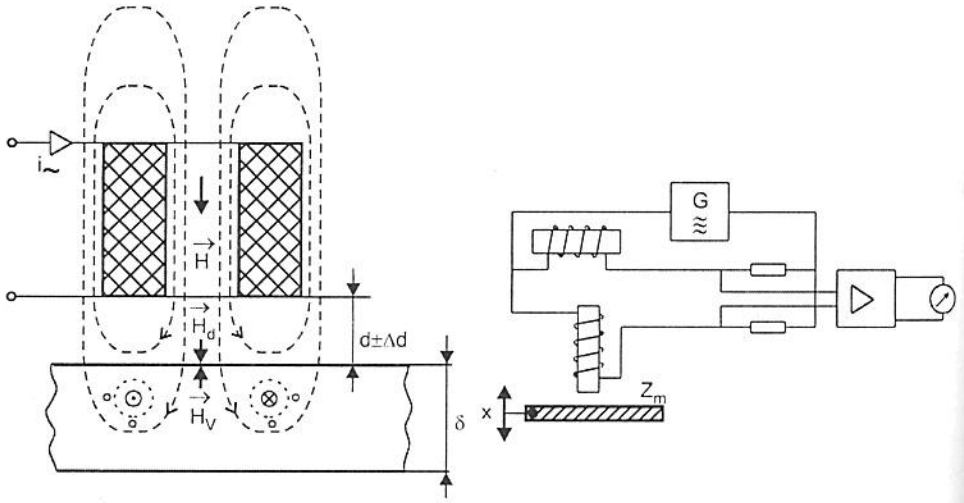
Iné konštrukčné riešenia indučnostných snímačov sú na obr. 8.9.



$$L \doteq \frac{\mu_0 S N^2}{2d} \frac{\Delta l}{b}$$

Obr. 8.9. Indukčnostné snímače polohy s premenným magnetickým odporom R_m
a) s premennou prekrývajúcou sa plochou jadra
b) s dvoma magnetickými obvodmi v diferenciálnom usporiadaní

Do kategórie indukčnostných snímačov patria tiež snímače využívajúce závislosť indukčnosti cievky na prúdovej hustote ***vírivých prúdov***. Vírivé prúdy vytvorené vysokofrekvenčným magnetickým poľom v elektricky vodivom materiáli vybudia v tomto objekte sekundárne magnetické pole H_v. Intenzita tohoto poľa pôsobí proti intenzite poľa H budiacej cievky (Lenzov zákon). Zmenšuje sa intenzita pôvodného poľa, čo charakterizuje názov týchto snímačov, tj. ***s potlačením poľa***. Zmenšenie poľa vyvolá zmenšenie indukčnosti budiacej cievky (pokles toku Φ cievkou) spolu so zvýšením strát, pretože je nutné hradiť energiu spotrebovanú vírivými prúdmi ohrevom vodivého materiálu sledovaného objektu. Princíp snímača je na obr. 8.10.



Obr. 8.10. Indukčnostný snímač s vírivými prúdmi
a) princíp
b) funkčná schéma

Predmet, ktorého polohu snímač sleduje, možno si predstaviť ako sekundárnu cievku, ktorá je zaťažená odporom R_z a indukčnosťou L_z a je viazaná vzájomnou indukciou M (rov. 8.7). Snímače s vírivými prúdmi sú charakterizované pojmom tzv. *hĺbky vniknutia*. Veľkej hustote vírivých prúdov v sledovanom objekte zodpovedá malá hĺbka vniknutia h_v, ktorá je daná vzťahom

$$h_v = \frac{2\rho}{\omega \cdot \mu}$$

kde ω je kruhová frekvencia napätia v budiacej cievke a ρ merný elektrický odpor sledovaného predmetu.

Fyzikálne hĺbka h_v reprezentuje vzdialenosť od povrchu vodivého predmetu, v ktorej sa dopadajúca elektromagnetická vlna utlmí na 95 % intenzity na povrchu. Toto platí len pre tzv. *silné polia H*. Zo vzťahu pre h_v vyplýva, že týmto princípom možno sledovať vlastnosti

objektu, (napr. zloženie a kvalitu povrchu), ak tieto veličiny ovplyvňujú ρ alebo μ. Zaujímavé sú tiež diagnostické aplikácie na detekovanie vád materiálov založené na zmene rezistivity a permeability materiálu objektu. Platí to aj o vodivých kvapalinách. Intenzita poľa H prenikajúca do objektu je závislá na vzdialenosti cievka – objekt, preto sú indukčnostné snímače s vírivými prúdmi dôležité prostriedky na ***bezdotykové meranie vzdialenosti, hrúbky vrstiev alebo na detekciu kovových objektov v prostredí.*** Princíp jednoduchého snímača na meranie vzdialenosti od vodivej roviny je na obr. 8.10*b*, kde pracovná cievka s magnetickou impedanciou Z_m je zapojená vo vyhodnocovacom mostíku. Napájacia frekvencia sa volí tak, aby meraná hodnota x nebola ovplyvnená hrúbkou objektu δ.

Výhody snímačov pracujúcich na princípe vírivých prúdov predstavuje lineárna závislosť výstupného signálu na sledovanej vzdialenosti, ďalej nízka citlivosť snímača na cudzie magnetické polia a necitlivosť na rýchlosť otáčania sa sledovaného predmetu. K výhodám patrí aj to, že umožňujú bezdotykové meranie pohybu predmetov z rôznych, ale elektricky vodivých materiálov.

8.1.2.2 Indukčné - transformátorové

Indukčné snímače pracujú na princípe vzájomnej indukčnosti, podobne ako transformátory, preto sa častejšie nazývajú ***transformátorové.***

Ak sú dve cievky umiestnené vo vhodnej vzdialenosti a prvou tečie prúd, ktorý je v čase premenný, vytvára sa medzi nimi magnetická väzba vyjadrená tzv. koeficientom úmernosti alebo koeficientom vzájomnej indukčnosti M medzi magnetickým poľom Φ a prúdom v prvej cievke I_1. Pri každej zmene prúdu v prvej cievke sa mení aj celkový magnetický tok druhej cievky, preto sa bude v nej indukovať napätie

$$u_2 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12}\frac{dI_1}{dt} \tag{8.7}$$

Preto vzájomná indukcia

$$M_{12} = \frac{N_1 \cdot N_2}{R_{m12}} \tag{8.8}$$

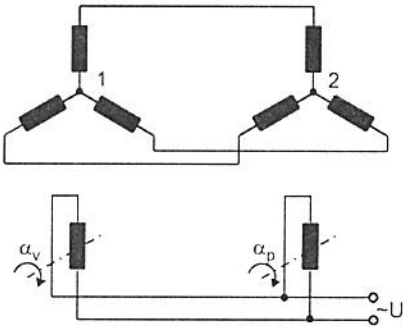
je koeficient úmernosti medzi napätím u_2 indukovaným v druhej cievke a rýchlosťou zmeny prúdu v prvej cievke I_1. Pričom platí, že $M_{12} = M_{21} = M$. Jednotka vzájomnej indukcie je ***henry*** [H].

Technika číslicového riadenia obrábacích strojov zohrala veľmi dôležitú úlohu pri vývoji meracích systémov polohy pracujúcich na indukčnom princípe s vysokými požiadavkami na kvalitu metrologických parametrov. Vyvinuté meracie systémy v tejto oblasti sa neskôr prevzali aj do napr. robototechniky, dopravných systémov a pod.

Selsyny sa používajú na priamy prenos uhlovej výchylky. Skladajú sa z dvoch základných prvkov – vysielača uhlovej výchylky *1* a prijímača *2* (obr. 8.11), pričom každý z nich sa svojou

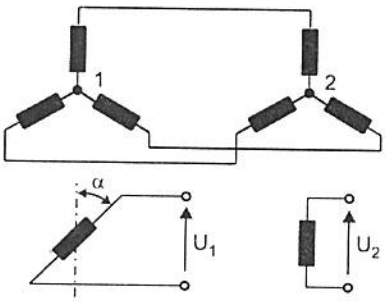
konštrukciou podobá na elektrický točivý stroj. Na rotoroch sú najčastejšie umiestnené jednofázové budiace vinutia spoločne napájané napätím s frekvenciou (50 až 500) Hz, ktoré slúžia na budenie magnetického obvodu selsyna. V statorových drážkach sú potom uložené trojfázové synchronizačné vinutia. Okrem týchto dvoch vinutí býva na statore aj tlmiace vinutie, ktoré slúži na utlmenie rotorového kývania pri náhlych zmenách uhlovej výchylky alebo pri prudkých zmenách záťaže. Ak sa potočí rotor selsyna *1* (vysielača) o uhol α_1 oproti pôvodnej polohe, zmení sa rozdelenie napätí v synchronizačnom vedení (prepojenie statorov) a tečú ním vyrovnávacie prúdy, ktoré sú úmerné uhlu osí výsledných magnetických polí statora a rotora vo vzduchovej medzere selsynu *2* (prijímača). Tým vzniká silové pôsobenie na voľný rotor selsynu *2* a v dôsledku toho pootočenie rotora o uhol α_2 do rovnovážnej polohy, ktorá sa zhoduje s polohou rotora selsynu *1*. Vznikne opäť rovnováha synchronizačných napätí oboch selsynov a vyrovnávacie prúdy zaniknú.

Výhoda tohto snímača spočíva v tom, že je schopný sledovať a prenášať uhlové výchylky aj pri rovnomernom otáčaní (napr. pri tzv. elektrickom hriadeli).



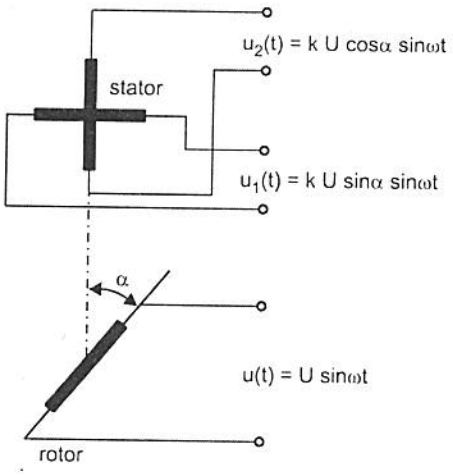
Obr. 8.11. Selsyn s napájaným rotorom

Polohový transformátor alebo selsyn – mostík má podobnú konštrukciu a princíp činnosti ako selsyn. Používa sa na prevod uhlovej výchylky na elektrický signál. Magnetický obvod prijímača je upravený tak, že napätie indukované vo výstupnom vinutí je v určitom rozsahu priamo úmerné uhlovej výchylke (napr. ± 85°), presnosť snímania uhla dosahuje hodnôt od 0,1 % do 0,5 %. Napätie U_2 indukované na výstupnom vinutí je úmerné budiacemu napätiu U_1, transformačnému pomeru v systéme a uhlu pootočenia α.



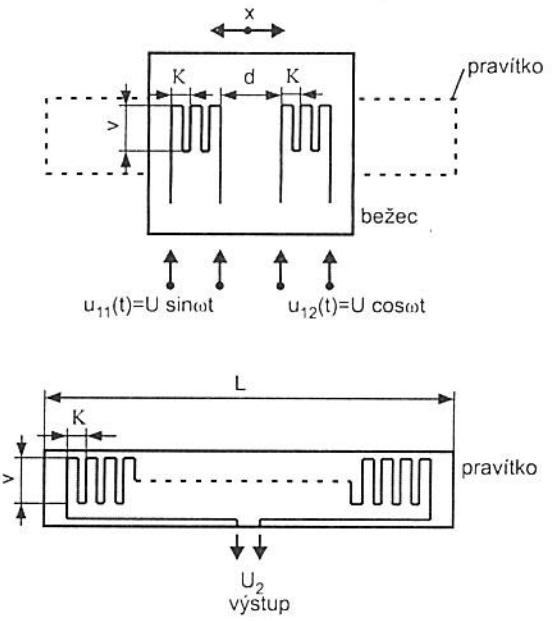
Obr. 8.12. Selsyn mostík

Na vyhodnocovanie posunu realizovaného pohybovou skrutkou, tj. uhla natočenia v kovoobrábacích strojoch, sa často používa ***resolver*** (*indukčný fázový menič, špeciálny polohový otočný transformátor*), ktorý tiež pracuje na princípe polohového transformátora. Je určený na veľmi presné meranie uhla natočenia, až v uhlových sekundách. Skladá sa podobne ako selsyn zo statora a rotora (obr. 8.13). Ak je budiace vinutie napájané striedavým napätím *u(t)* (obyčajne v rotore), indukujú sa v dvoch statorových vinutiach napätia, ktoré sú úmerné sínusu *(cosínusu)* uhla pootočenia. Presnosť merania uhlu pootočenia rotora sa pohybuje od (0,05 až 5) % z rozsahu pri pracovných obrátkach do 6000 za minutu.



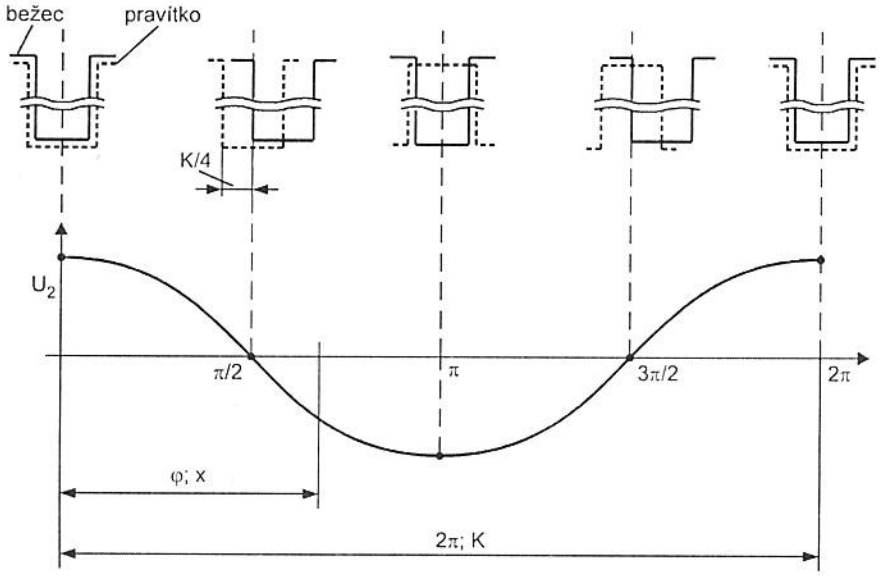
Obr. 8.13. Resolver

Induktosyn sa používa na presné meranie veľkých lineárnych alebo uhlových výchyliek hlavne v kovoobrábacích strojoch. Opäť sa jedná o špeciálny polohový transformátor (obr. 8.14).



Obr. 8.14. Princíp induktosyna

Induktosyn sa skladá z pevnej časti (pravítko) a pohyblivej časti (bežec), ktorá sa pohybuje nad pravítkom. Obidve vinutia s krokom K (primárne - bežec, sekundárne - pravítko) sú vyrobené technikou plošných spojov na podkladových doskách napr. zo skla, keramiky alebo nemagnetickej ocele s izolačnou vrstvou. Magnetická väzba (vzájomná indukčnosť M) medzi primárnym a sekundárnym vinutím je závislá hlavne na vzájomnom posunutí bežca a pravítka.



Obr. 8.15. Priebeh indukovaného napätia U_2

Ak sa sleduje účinok len jedného primárneho vinutia samostatne a neuvažuje sa obracanie fázy, najväčšiu hodnotu dosahuje indukované napätie pri úplnom prekrytí obrazcov vinutia bežca a merítka (obr. 8.15). Nulovú hodnotu zasa pri vzájomnom posunutí o štvrtinu kroku, tj. $\pi/2$, pretože cez rovnobežné susedné časti cievky bežca pretekajú opačne orientované prúdy a v medziľahlom úseku pravítka sa indukujú napätia opačnej fázy a tak výsledné napätie je nulové. Podobne, pri posunutí o ďalšiu štvrtinu kroku sa vinutia prekrývajú a indukuje sa opäť napätie s maximálnou amplitúdou, ale opačnej fázy. Závislosť amplitúdy indukovaného napätia na polohe x v rámci jedného kroku je možné aproximovať kosinusovou funkciou, tj.

$$U_2 = k \cdot U \cdot \cos\varphi = k \cdot U \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{K}\right)$$

Napätie indukované do pravítka z jednej cievky bežca budené harmonickým napätím s frekvenciou ω bude mať priebeh

$$u_{21}(t) = k \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega t$$

s amplitúdou úmernou posunu x/K v rámci kroku.

Na úpravu výstupného indukovaného napätia sa používajú viaceré úpravy meracieho systému. Vhodné geometrické usporiadanie umožňuje upraviť priebeh činiteľa väzby obidvoch vinutí k'. Pohyblivá časť (bežec) obsahuje dve vinutia, pričom druhé vinutie je oproti prvému posunuté o hodnotu $d = n.K + K/4$ a každé je napájané harmonickým napätím s posunutím o $\pi/2$. Potom sa indukuje v sekundárnom vinutí súčet dvoch napätí podľa vzťahu

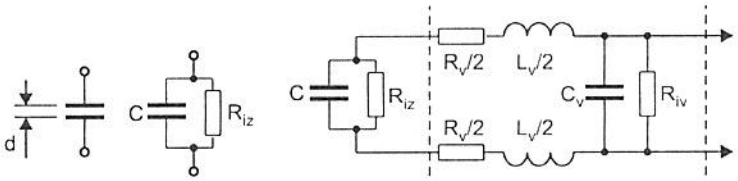
$$u_2(t) = u_{21}(t) + u_{22}(t) = k' \cdot U \cdot (\cos\varphi \cdot \cos\omega t + \sin\varphi \cdot \sin\omega t) = k' \cdot U \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

Tým sa vyhodnocovanie posuvu x zmenilo na elektronické vyhodnocovanie fázového posunu φ, ktorý je nezávislý na pracovnej frekvencii a amplitúde, ale hlavne je presne merateľný (sledujú sa prechody nulou napájacieho a indukovaného napätia). Pri meraní väčších posunutí sa musia počítať ubehnuté kroky K a súčasne sledovať posunutie x v rámci posledného kroku meraním posunu fázy signálov.

Dĺžka pravítka lineárnych induktosynov dosahuje bežne hodnotu do 200 až 300 milimetrov a merací systém pracuje s absolútnou chybou ± 6 µm až $\pm 1{,}5$ µm.

8.1.3 Kapacitné snímače

Základ kapacitných snímačov tvorí dvoj alebo viacelektródový systém kondenzátorov s premenlivými parametrami, ktoré sa menia pôsobením sledovanej napr. neelektrickej veličiny. Kapacitný princíp patrí k najstarším a pomerne rozšíreným princípom snímačov neelektrických veličín pre svoje výhodné vlastnosti ako sú jednoduchosť, malé rozmery a nízka hmotnosť. Na druhej strane tento princíp vyžaduje náročné vyhodnocovacie obvody.



a) b)

Obr. 8.16. Kapacitný snímač, jeho náhradné schémy

Pre kapacitu jednoduchého rovinného kondenzátora podľa obr. 8.16*a* platí

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

kde S je plocha elektród,
d vzdialenosť elektród,
ε_r pomerná permitivita,
ε_0 permitivita vákua ($8{,}854.10^{-12}$ F.m^{-1}).

Z elektrickej náhradnej schémy kapacitného snímača vyplýva, že snímač neobsahuje len kapacitnú reaktanciu, ale tiež izolačný (zvodový) odpor R_{iz} (obr. 8.16*a*). Ak platí, že $1/\omega C << R_{iz}$, potom vplyv odporu R_{iz} je zanedbateľný.

Kapacitný snímač vo všeobecnosti je spojený s meracím prevodníkom prostredníctvom prívodných vedení. Elektrické parametre vodičov môžu nepriaznivo ovplyvňovať funkciu snímača. Na obr. 8.16*b* je elektrická náhradná schéma snímača a spojovacích (prívodných) vodičov, kde R_v je odpor vodičov, L_v ich indukčnosť, C_v vlastná kapacita vodičov a R_{iv} ich izolačný odpor. Aby nedochádzalo k ovplyvňovaniu vlastností snímača zmenou elektrických parametrov prívodov v dôsledku zmeny ich polohy, teploty, vlhkosti a pod., musia byť splnené tieto podmienky

$$R_v ; \omega \cdot L_v << \frac{1}{\omega \cdot C} << R_{iz} ; R_{iv} ; \frac{1}{\omega \cdot C_v}$$

To znamená, že odpor vodiča a jeho induktancia má byť oveľa menšia ako reaktancia snímača a táto má byť zároveň oveľa menšia ako izolačný odpor a reaktancia prívodných vodičov. Parazitné vplyvy spojovacích vodičov pri zmene teploty, vlhkosti, pri deformácii a pohybe

To znamená, že zmenu
môže spôsobovať zme
oddialenie, ale tiež zn
najčastejšie uplatňuje zm
elektrického poľa medzi

Kapacitný snímač p
viacerých elektród, pričo
pri meraní polohy a posu
citlivosťou, stabilitou a m
Kapacitné snímače polohy

- snímače pracujú
- snímače pracujú
- snímače, pri ktor

Najjednoduchší tvar *kap*
kondenzátor s premennou n

Obr. 8.17

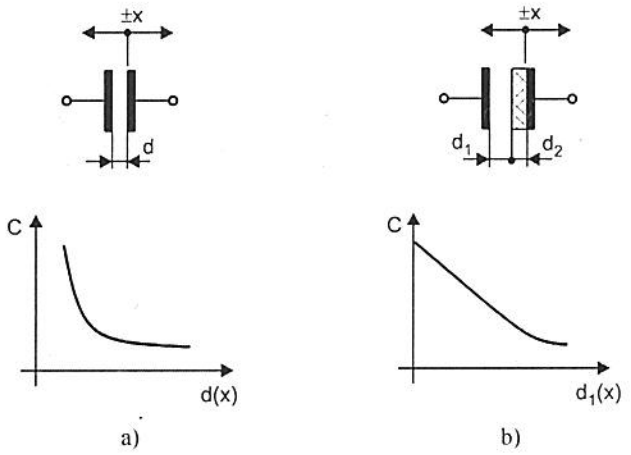
To znamená, že zmenu kapacity snímača fyzikálnej, chemickej, biologickej alebo inej veličiny môže spôsobovať zmena prekrytia dosák kondenzátora, ich vzájomné priblíženie alebo oddialenie, ale tiež zmena permitivity dielektrika. V prevádzkovej meracej technike sa najčastejšie uplatňuje zmena d a S. Tieto úvahy platia za predpokladu dostatočne homogénneho elektrického poľa medzi elektródami kondenzátora.

Kapacitný snímač polohy je tvorený kondenzátorom, ktorý sa skladá z dvoch, prípadne viacerých elektród, pričom aspoň jedna z nich je pohyblivá. Tieto snímače sa uplatňujú hlavne pri meraní polohy a posunutia v rozsahoch mikrometrov a milimetrov. Vyznačujú sa vysokou citlivosťou, stabilitou a malou chybou merania (presnosť 0,05 %).
Kapacitné snímače polohy sa delia na:

- snímače pracujúce so zmenou vzdialeností elektród,
- snímače pracujúce so zmenou prekrytia plôch elektród,
- snímače, pri ktorých sa mení hrúbka alebo plocha dielektrika.

Najjednoduchší tvar ***kapacitného snímača posunutia*** predstavuje jednoduchý doskový kondenzátor s premennou medzerou medzi jeho elektródami (obr. 8.17*a*), pre ktorý platí

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d(x)}$$



Obr. 8.17. Jednoduchý kapacitný snímač a snímač s izolačnou vrstvou a ich prevodové charakteristiky

Ak sa zmení vzdialenosť dosiek kondenzátora o hodnotu Δd, ktorá predstavuje nepatrnú časť počiatočnej vzdialenosti d, možno písať

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d + \Delta d} - \frac{\varepsilon \cdot S}{d} = -\frac{\varepsilon \cdot S}{d}\left(\frac{\Delta d}{d + \Delta d}\right) = -C_0\left(\frac{\Delta d}{d + \Delta d}\right)$$

a pre citlivosť snímača

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -C_0 \frac{1}{d-\Delta d} = -\frac{C_0}{d}\left(\frac{1}{1-\frac{\Delta d}{d}}\right) = -\frac{C_0}{d}\left[1-\frac{\Delta d}{d}+\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 - \cdots\right]$$

Pri uvažovaní $\Delta d/d << 1$ možno uplatniť len prvý člen rozvoja do radu, tj.

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} \cong -\frac{C_0}{d}\left(1-\frac{\Delta d}{d}\right)$$

Aby nedošlo ku skratu elektród, sú v niektorých prípadoch použité snímače s izolačnou vrstvou podľa obr. 8.17*b*, kde $d_1(x)$ je premenná vzdialenosť medzi elektródou a izolovanou elektródou. Pre kapacitu takejto štruktúry platí

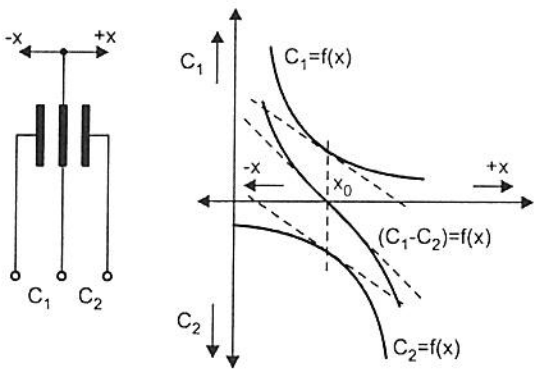
$$C = \frac{\varepsilon_1 \cdot S}{d_1(x)+\frac{d_2 \cdot \varepsilon_1}{\varepsilon_2}}$$

kde ε_1 je premitivita vzduchu a ε_2 permitivita izolácie.

Oba vzťahy pre kapacity snímačov dokumentujú ich nelineárne statické charakteristiky. Tento problém sa rieši diferenciálnym zapojením meracích kondenzátorov a ich činnosťou v blízkom okolí pracovného bodu. Diferenciálny kapacitný snímač (obr. 8.18) spolu s rozdielovým meracím prevodníkom je popísaný vzťahom

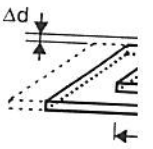
$$C_1 - C_2 = C + \Delta C - (C - \Delta C) = 2\Delta C$$

z čoho vyplýva známa vlastnosť, že citlivosť snímača sa týmto zapojením zvýšila na dvojnásobok.



Obr. 8.18. Diferenciálne zapojenie kapacitného snímača posunutia

Zmena polohy do
možnosť uplatnenia ka
na obr. 8.19.



Obr. 8.19. I

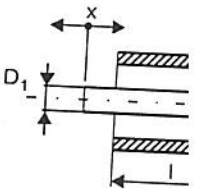
Kapacita jednodoskovéh

kde l je dĺžka vzájomnéh

Najväčšiu kapacitu C_{max} c

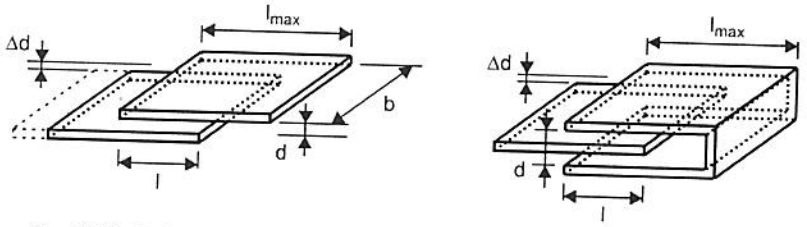
Z uvedeného vyplýva, že
(napr. obdĺžnik, štvorec) j
valcových elektród (s prer
štruktúry platí

kde l je dĺžka zasu
D_1 priemer vn
D_2 priemer vn



Obr. 8.20. Kapacitný sníma

Zmena polohy dosiek kondenzátora, ich ***vzájomné rovinné posunutie***, predstavuje druhú možnosť uplatnenia kapacitného snímača v tejto oblasti. Dva z mnohých variantov sú uvedené na obr. 8.19.



Obr. 8.19. Princíp snímača pracujúceho so zmenou aktívnej plochy elektród

Kapacita jednodoskového snímača pracujúceho na tomto princípe je daná vzťahom

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{b \cdot l}{d}$$

kde l je dĺžka vzájomného prekrytia.

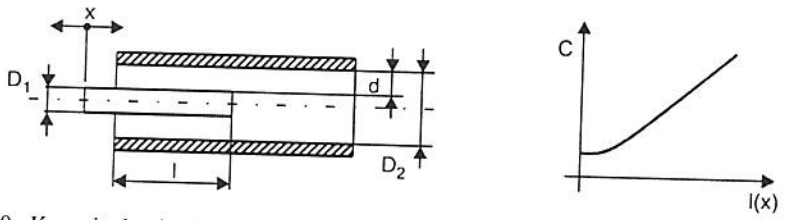
Najväčšiu kapacitu C_{max} dosahuje systém pri $l = l_{max}$, a teda platí

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{l}{l_{max}}$$

Z uvedeného vyplýva, že charakteristika snímača s vhodne plošne usporiadanými elektródami (napr. obdĺžnik, štvorec) je lineárna. Pre snímanie posuvu sa často používa súosé usporiadanie valcových elektród (s premenlivou plochou prekrytia) podľa obr. 8.20. Pre kapacitu takejto štruktúry platí

$$C = \varepsilon \frac{2\pi \cdot l(x)}{\ln \frac{D_1}{D_2}}$$

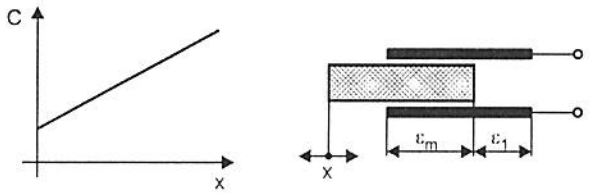
kde l je dĺžka zasunutia vnútornej elektródy do vonkajšej,
D_1 priemer vnútornej elektródy,
D_2 priemer vnútorného plášťa vonkajšej elektródy.



Obr. 8.20. Kapacitný snímač s valcovým usporiadaním elektród a jeho prevodová charakteristika

Pri reálnych riešeniach týchto snímačov však vystupuje ako poruchová veličina posúvanie dosiek v kolmom (radiálnom) smere na ich činnú plochu pri aktívnom pohybe. Vzhľadom na veľkú citlivosť týchto snímačov na posunutie v smere *d*, spôsobuje táto poruchová veličina podstatnú chybu merania. S premennou plochou prekrytia kondenzátorov sa možno stretnúť pri číslicových prírastkových alebo absolútnych kapacitných snímačoch. Sú to zriedkavé konštrukcie.

Na obr. 8.21 je naznačená konštrukcia snímača ***so zmenou druhu dielektrika***. Zmena kapacity vzduchového kondenzátora sa dosahuje zasúvaním izolačného materiálu medzi jeho elektródy. Napríklad pri vypĺňaní vzduchového priestoru medzi elektródami kondenzátora tuhým alebo kvapalným izolantom sa dosahuje zmena výslednej permitivity ε. Čím viac sa vzduch nahrádza tuhým izolantom, tým väčšia bude celková kapacita snímača, lebo určujúci parameter jeho kapacity je permitivita dielektrika ε_m medzi elektródami (pre vzduch $\varepsilon_1 = 1$, pre izolačné materiály $\varepsilon_m > 1$).

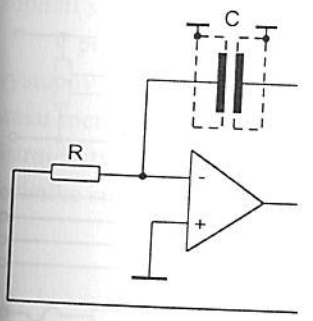


Obr. 8.21. Konštrukcia so zmenou dielektrika

Permitivita dielektrika je vlastnosť materiálu, ktorú možno využiť aj pri vyšetrovaní jeho vlastností. Zasúvaním izolantu rôzneho zloženia medzi elektródy vzduchového kondenzátora spolu s meraním zmeny kapacity možno určovať vlastnosti alebo rozmery (napr. hrúbku) daného izolantu.

Základnou podmienkou správnej činnosti kapacitných snímačov je vo všeobecnosti obmedzenie vplyvu parazitných kapacít prívodných vedení ku snímaču od meracieho prevodníka a odtienenie interných a externých elektrických rušivých polí. Parazitné kapacity (obr. 8.22) sú vyvolané rozptylovým poľom (C_{p1}, C_{p2}), kapacitou prívodov (C_{p3}), kapacitami tieniaceho krytu (C_{p4}, C_{p5}) a kapacitami káblov (C_{p6}, C_{p7}). Kapacita meracieho kondenzátora C dosahuje hodnotu niekoľkých jednotiek až stoviek *pF*, parazitné kapacity C_{p1} až C_{p5} dosahujú hodnoty niekoľkých *pF*, kapacity prívodných vedení pri väčších vzdialenostiach rádovo až stovky *pF*. Preto vplyv prívodných vedení býva dominantný. Nepriaznivo sa prejavuje zmenšením citlivosti meracieho systému (zväčšuje sa premenná kapacita v obvodoch snímača) a tiež tým, že ovplyvňuje kapacity prívodných vedení vplyvom zmeny ich polohy pri meraní. Najjednoduchšie riešenie uvedených problémov predstavuje skrátenie prívodov na najmenšiu možnú mieru a najlepšie riešenie predstavuje integrácia meracieho prevodníka do jedného celku so snímačom.

Jeden z možných spô
tieniaceho prstenca okolo
Vhodnejšie, najmä pre di
potláčajú parazitné kapaci
potláčajúcich parazitné kap



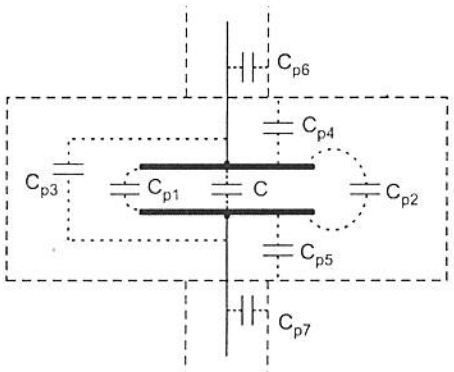
Obr. 8.23. In

Kapacitné snímače sa p
ktoré sú vyvolané malými s
závislosť okolo 0,5 % na 10

8.2 Nespojité sní

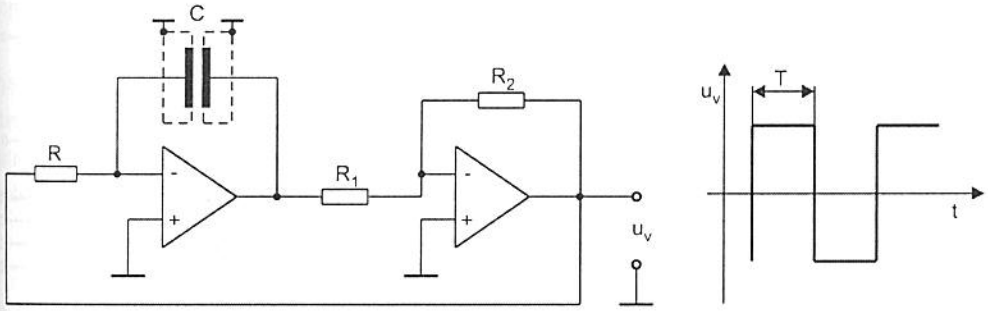
8.2.1 Nespojité odpo

Snímače tejto skupiny s
skokovú zmenu svojho odpo
veličiny (poloha, teplota, tla



Obr. 8.22. Parazitné kapacity kapacitného snímača

Jeden z možných spôsobov obmedzenia vplyvu uvedených poruchových veličín je použitie tieniaceho prstenca okolo dosiek kondenzátora, ktorý potlačí parazitné kapacity C_{p1} a C_{p2}. Vhodnejšie, najmä pre diferenciálne zapojenia, sú transformátorové mostíky. Tieto mostíky potláčajú parazitné kapacity len vo vyváženom stave. Ďalšiu skupinu meracích prevodníkov potláčajúcich parazitné kapacity tvoria tzv. *RC* integračné generátory (obr. 8.23).



Obr. 8.23. Integračný RC generátor so symetrickým tienením snímača

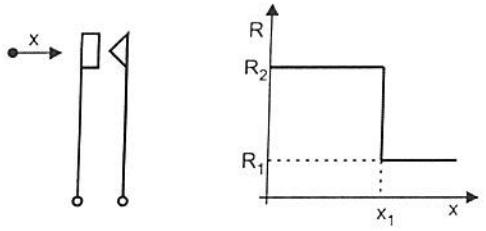
Kapacitné snímače sa používajú najmä na sledovanie miniatúrnych posunutí a pootočení, ktoré sú vyvolané malými silami a momentami. Dosahujú presnosť lepšiu ako 1 %, teplotnú závislosť okolo 0,5 % na 10 °C, vysokú životnosť, tj. až 10^8 posunutí a malú hmotnosť.

8.2 Nespojité snímače polohy

8.2.1 Nespojité odporové snímače (elektrokontaktné)

Snímače tejto skupiny sa vyznačujú tým, že menia zmenu polohy alebo posunutia na skokovú zmenu svojho odporu prepínaním kontaktu. Nejedná sa o spojité meranie vstupnej veličiny (poloha, teplota, tlak), ale len o informáciu (indikáciu) dosiahnutia jednej alebo

niekoľkých dopredu určených hodnôt tejto veličiny (logický, binárny výstup). Najčastejšie ide o indikáciu referenčnej, nulovej alebo koncovej polohy. Na obr. 8.24 je naznačený princíp snímača spolu s jeho spínacou charakteristikou. Hodnota odporu R_2 je určená izoláciou kontaktu a veľkosť odporu R_1 závisí na prechodovom odpore pri vytvorení kontaktu.

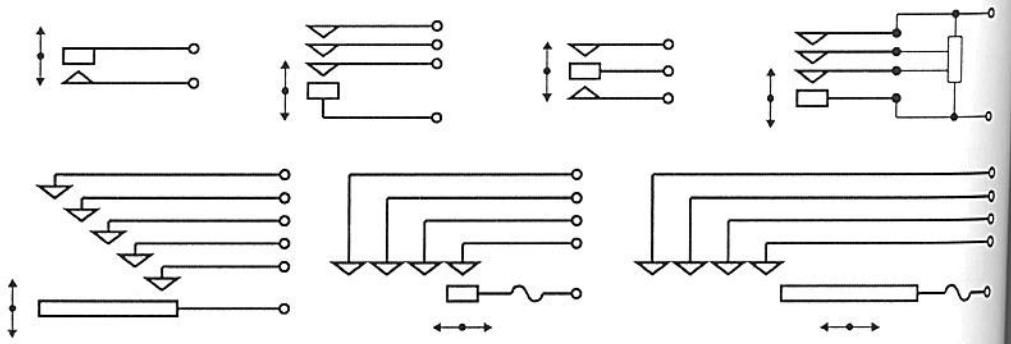


Obr. 8.24. Princíp kontaktného snímača a závislosť odporu na posunutí x

Aktívny kontakt môže byť ovládaný buď:

- priamo, čiže mechanickým posunutím prvku, ktorého poloha sa sníma,
- nepriamo, tj. cez prevod sledovanej procesnej veličiny na posunutie.

Rôzne usporiadania kontaktov odporových snímačov sú na obr. 8.25.



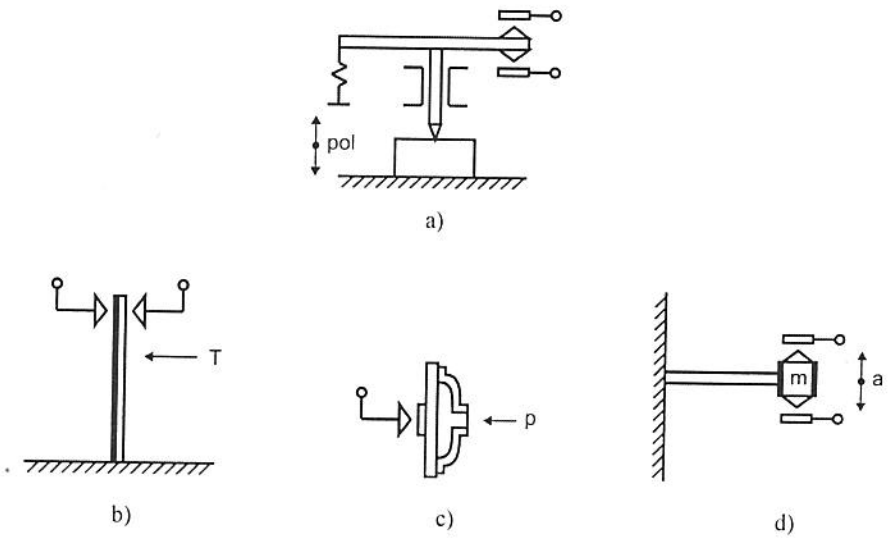
Obr. 8.25. Základné usporiadanie kontaktov

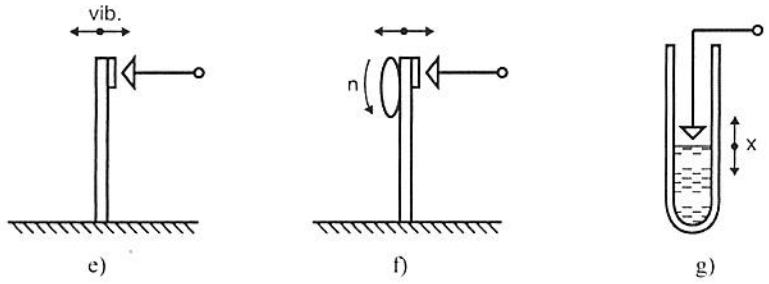
Kontaktný systém patrí k najdôležitejším častiam nespojitého snímača. Materiál, konštrukcia a vyhotovenie kontaktov určujú prenosnosť, spoľahlivosť a strednú dobu života snímača. Medzi dôležité požiadavky patrí minimálne opotrebenie, ktoré je možné dosiahnuť vhodnou voľbou materiálov kontaktných prvkov, ako aj konštrukciou a voľbou pracovného režimu kontaktného systému. Pri malých tlakoch na kontakty je namáhanie dotykovej plochy v rámci elastickej deformácie, pri väčších sú dotykové plochy namáhané až po hranicu tečenia materiálu. Čistý a hladký povrch sa udrží len pri žíhanom materiále prevádzkovanom vo vákuu. Ak je voľný prístup vzduchu ku kontaktu po krátkej dobe sa kov pokryje povrchovou vrstvou, ktorej hrúbka závisí od druhu materiálu, prostredia a pracovnej teploty. Chemický účinok prostredia (voda a síra) vytvorí povrchové nevodivé alebo polovodivé vrstvy, ktoré podstatne ovplyvnia prechodový odpor kontaktného systému. ***Prechodový odpor*** je najdôležitejším

parametrom vlastného kontaktu a je určovaný predovšetkým zúžením prúdových vlákien na malej dotykovej ploche. Na povrchových vrstvách prvkov kontaktu sa vytvoria trhliny, ktorými vystupuje čistý kov, čím dochádza ku kovovému styku oboch kontaktov (menší prechodový odpor, ale aj „lepenie"). Pri tangenciálnom pohybe oboch prvkov kontaktu sa vytvárajú úlomky povrchových vrstiev, ktoré sa usadzujú ako jemný prach a spôsobujú mechanické opotrebenie kontaktu. ***Rušivé napätie*** vzniká na kontakte moduláciou prechodového odporu vplyvom nestálosti prítlačnej sily, čo býva spôsobené mechanickými otrasmi, chvením alebo aj nehomogénnym znečistením kontaktov (ich dotykových plôch). ***Elektrické opotrebenie kontaktov*** vzniká pôsobením elektrického prúdu na kontaktný systém, preto dôležitým parametrom kontaktných snímačov je tzv. ***medzný prúd***, pri ktorom sa rozpoja kontakty bez vzniku oblúka pri veľmi krátkej rozpínacej dráhe. Jeho veľkosť závisí na čistote materiálu, teplote a kvalite povrchu, tvare kontaktu, ako aj na relatívnej vlhkosti vzduchu. Ak sa prekročí medzný prúd, dochádza ku zapáleniu oblúka, čo spôsobuje prenos materiálu z anódy na katódu. Pri použití striedavého prúdu v kontaktnom systéme je opotrebovanie kontaktov menšie, pretože pri prechode prúdu „nulou" oblúk samočinne zhasne.

Pre vlastnú činnosť snímača je dôležitá konštrukcia kontaktného systému. Umiestnenie kontaktov do krytov, napr. do sklenenej banky naplnenej inertným plynom, zvyšuje počet zopnutí s jazýčkovými kontaktmi až na 10^8 (obvykle 10^6).

V praxi je používanie kontaktných snímačov veľmi časté pre svoju jednoduchosť, veľký výstupný signál a overenosť konštrukčných riešení. Používajú sa predovšetkým na indikáciu stavu meranej veličiny, na triediace účely alebo ako pomocné zariadenia (napr. ako krúžkové ústrojenstvo pre prenos signálu z rotujúcich častí a pod.). Príklady ich použitia v automatizačnej technike sú naznačené na obr. 8.26.



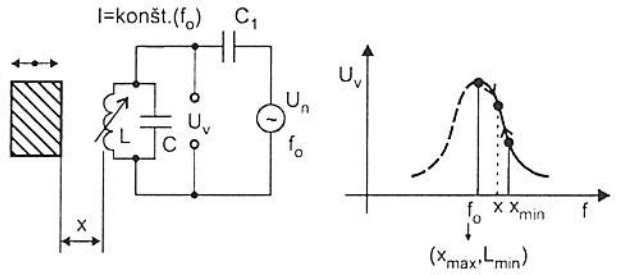


Obr. 8.26. Príklady použitia kontaktov na indikáciu rôznych veličín
a) poloha, posunutie, prítomnosť, počítanie a geometrické rozmery predmetov, b) teplota, c) tlak, d) zrýchlenie, e) vibrácie, f) obrátky, g) výška hladiny, atď.

Na obr. 8.26 sú schematický naznačené princípy indikácie uvedených veličín. Vo všetkých prípadoch je meraná veličina vhodným spôsobom zmenená na posunutie jedného prvku kontaktového systému. Na sledovanie teploty sa využívajú dilatačné nosníky kontaktu, v prípade tlaku zase rôzne druhy deformačných prvkov a pod.

8.2.2 Oscilátorové snímače

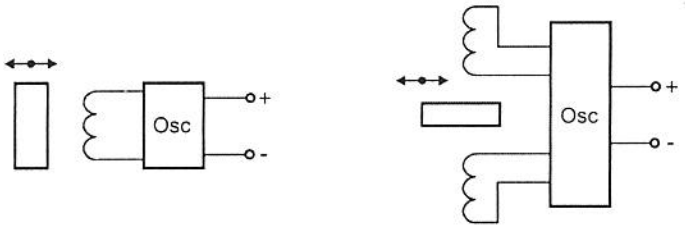
Sú to bezdotykové väčšinou indukčnostné snímače, najčastejšie spínacieho typu (binárny výstup). Základný typ je realizovaný ako oscilátor s rezonančným obvodom, ktorý sa zatlmí pri priblížení elektricky vodivého telesa. Oscilátor môže pracovať v dvoch možných režimoch a to tak, že sa v závislosti od polohy meraného telesa amplitúda signálu mení buď skokom alebo spojito (zriedkavé riešenie), obr. 8.27. Iné riešenie predstavuje oscilátor s indukčnou spätnou väzbou, ktorá je ovplyvňovaná elektricky vodivým telesom (obr. 8.28*b*).



Obr. 8.27. Prevodová charakteristika oscilátorových snímačov, spojité vyhodnocovanie

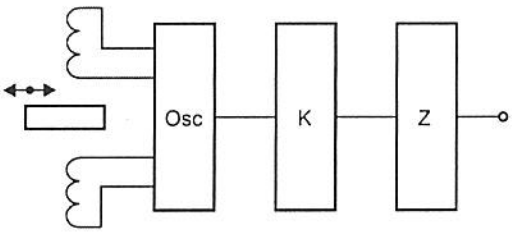
Bloková schéma približovacieho snímača so skokovou zmenou amplitúdy je na obr. 8.28*a*. Približovaním elektricky vodivého predmetu sa zväčšuje tlmenie obvodu oscilátora až pri určitej vzdialenosti predmetu oscilátor prestane kmitať, čo spôsobí zásadný pokles výstupného napätia. Príklad spracovania výstupného signálu pri druhom type snímača s medzerou (obr. 8.28*b*), je na obr. 8.29. Výkonový zosilňovač *Z* je spínaný komparátorom *K*, ktorý je riadený oscilátorom so spojitou zmenou amplitúdy pôsobením sledovaného telesa. Väčšina

snímačov pracuje len s binárnym výstupom. Snímače sú obvykle konštruované tak, že väzobné cievky a obvody sú zabudované v jednom konštrukčnom celku. Vo výnimočných prípadoch sa používajú konštrukcie s oddelenými cievkami a oscilátorom.



a) b)

Obr. 8.28. Bloková schéma oscilátorového snímača

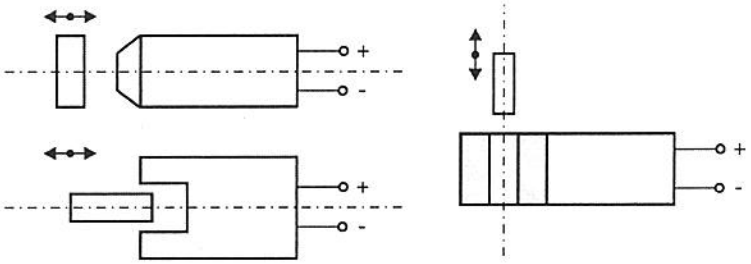


Obr. 8.29. Oscilátorový snímač s komparátorom

Výstupný signál zo snímača má na výstupe oscilátora, klopného obvodu alebo zosilovača napäťový alebo prúdový charakter.

Z konštrukčného a funkčného hľadiska možno rozdeliť oscilátorové snímače na (obr. 8.30):

- približovacie,
- medzerové,
- priechodové.



Obr. 8.30. Základné typy oscilátorových snímačov

Snímače sa vyrábajú v rôznych veľkostiach a v širokom rozmerovom sortimente. Spínacie vzdialenosti sa pohybujú v rozsahu (1 až 100) mm. Rezonančná frekvencia oscilátora snímača býva od niekoľko jednotiek do dvesto kHz. Jej hodnota určuje hornú hranicu spínacej

frekvencie snímača. Oscilátorový snímač sa vyznačuje hysteréziou, ktorá je závislá na teplote a napájacom napätí. Hysteréziu však možno potlačiť impulzným napájaním. Oscilátorové snímače sa vyznačujú vysokou spoľahlivosťou, dlhou životnosťou *(až 10^{10} zapnutí)* a výborným elektrickým krytím *(až IP 68)*. Sú vhodné na sledovanie koncových polôh telies pracovných strojov, prítomnosti alebo na počítanie predmetov, prípadne snímanie otáčok (pri vhodnej konštrukčnej úprave). Vyrábajú sa aj vyhotovenia na sledovanie predmetov zo železných i neželezných kovov v jednom konštrukčnom celku.

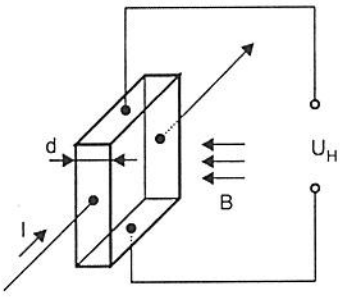
8.2.3 Magnetické, snímač s Hallovou sondou

Magnetické snímače polohy využívajú magnetické pole trvalého magnetu, pričom najznámejší prvok z tejto skupiny je snímač s Hallovou sondou na bezdotykové sledovanie polohy a prítomnosti predmetov, prípadne ich otáčavého pohybu.

Hallov jav možno pozorovať vtedy, ak priečne magnetické pole s indukciou B pôsobí na polovodič, ktorým prechádza elektrický prúd I. Potom Hallove napätie U_H je merateľné na protiľahlých stranách hranola (obr. 8.31), pričom platí:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d}$$

kde R_H je Hallova konštanta,
d hrúbka polovodiča.

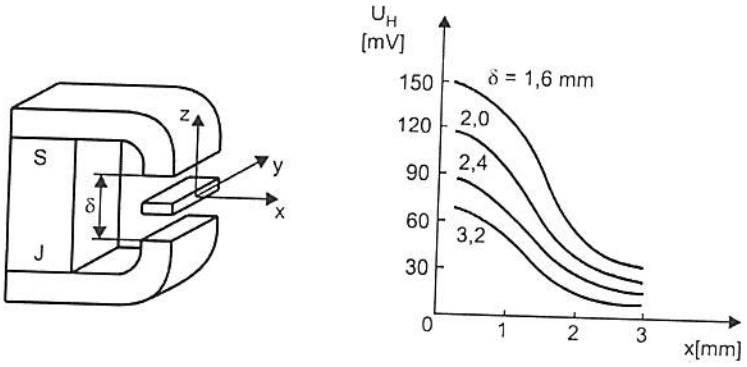


Obr. 8.31. Hallova sonda

Magnetická indukcia pôsobiaca na polovodič vychyľuje prúdovodiče prechádzajúceho prúdu a dôsledkom tohoto javu sa na stenách kolmých na smer toku prúdu a smer magnetickej indukcie objavuje napätie U_H. Hallov generátor bol objavený na kovových vodičoch, avšak úroveň vytvoreného napätia je taká nízka, že tento signál nie je prakticky využiteľný. Súčasné sériové riešenia sú z polovodičov napr. na báze germánia (Ge), kremíka (Si) alebo dotovaných zmesí india (InAs, InSb). Zalievajú sa do miniatúrnych puzdier, vyrábajú sa aj vo vyhotovení SMD a často sú doplnené obvodmi na spracovanie signálu vo forme integrovaných zákazkových obvodov. Na vytvorenie magnetickej indukcie sa väčšinou používajú permanentné magnety, buď v pároch na vytvorenie homogénneho magnetického poľa alebo samostatne.

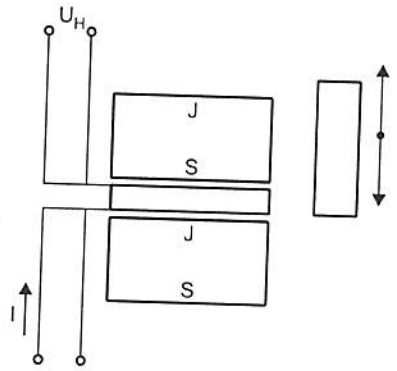
Snímanie polohy pomocou snímača s Hallovou sondou je možné dvoma spôsobmi:

1. Ak sa Hallov článok pohybuje v nehomogénnom magnetickom poli, potom sa Hallovo napätie mení v závislosti na zmene polohy tohoto článku. Konštrukčné usporiadanie a základné charakteristiky tohoto snímača sú na obr. 8.32. Diferenciálnym usporiadaním je možné charakteristiky čiastočne linearizovať. Snímače tohoto typu sa používajú na meranie polohy v rozsahu jednotiek milimetrov.



Obr. 8.32. Princíp Hallového snímača a jeho charakteristiky

2. Hallov článok je medzi pólovými nástavcami permanentného magnetu. Ak sa v blízkosti rozptylového poľa permanentného magnetu pohybuje feromagnetické teleso, dochádza k narušeniu magnetickej indukcie v Hallovom článku a na výstupe snímača sa to prejaví zmenou U_H napätia. V tomto usporiadaní sa používajú Hallove snímače na bezdotykové snímanie polohy, na určovanie prítomnosti alebo počítanie predmetov, či otáčok.



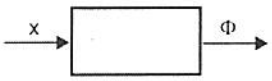
Obr. 8.33. Bezdotykový Hallov snímač polohy, prítomnosti, počtu obrátok, atď.

8.2.4 Optoelektronické snímače

Do tejto skupiny snímačov patria prvky citlivé na svetlo, čiže na svetelnú energiu najmä z oblasti vlnových dĺžok viditeľného žiarenia, tj. (380 až 760) nm. Základnými stavebnými časťami optoelektronických meracích členov sú prvky na sledovanie intenzity svetla (fotometria – fotorezistor, fotodióda, fototranzistor), prvky s fotolaterálnym javom (polohová citlivosť) a nábojom viazané prvky (kamery CCD). K optoelektronickým snímačom patria aj snímače budúcnosti – optovláknové senzory. Z uvedenej rozsiahlej množiny prvkov sa v súčasnosti v priemyselných meracích členoch uplatňuje hlavne prvá skupina, ktorej predstaviteľmi sú napr. optróny, ako aj inkrementálne a absolútne optoelektronické snímače.

Požiadavku na odolný výstupný signál snímača voči rušeniu a jeho neovplyvnený prenos na miesto spracovania je možné realizovať prostredníctvom optoelekronických snimačov.

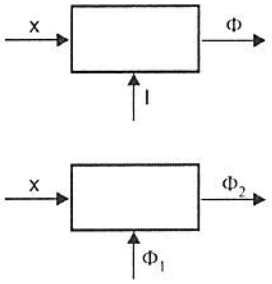
Bloková schéma takéhoto prvku je na obr. 8.34. Meraná neelektrická veličina x sa optoelektronickým snímačom mení na signál Φ, ktorý má charakter žiarenia ultrafialovej, viditeľnej, alebo infračervenej časti sveteľného spektra. Výstupný signál môže byť modulovaný napr. amplitúdovo, frekvenčne, impulzne alebo kódovo. Typickou vlastnosťou týchto snímačov je, že výstupný signál sa prenáša prostredím, ktoré veľmi málo tlmí svetelné žiarenie (plyn, kvapalina a tuhé skupenstvo). V tomto prostredí sa svetlo môže vhodne smerovať, poprípade viesť svetlovodmi na veľké vzdialenosti. Táto skutočnosť určuje zásadný rozdiel medzi snímačmi elektrickými (elektronickými) a optoelektronickými.



Obr. 8.34. Bloková schéma optoelektronického snímača

Podľa druhu napájacieho signálu sa optoelektronické MČ delia na (obr. 8.35):

- napájané elektrickým prúdom,
- napájané svetelným tokom (svetlovodné snímače).



Obr. 8.35. Základné druhy optoelektronických snímačov

V prvom prípade sa snímač chová ako modulovaný zdroj svetelného žiarenia. V druhom prípade je zdroj svetelného žiarenia od snímača oddelený. Z toho vyplýva, že súčasťou optoelektronického snímača je zdroj žiarenia a snímač je napájaný z tohoto zdroja. Optické

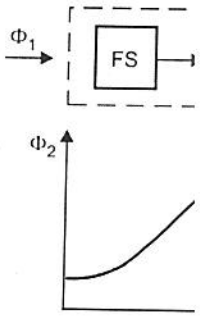
a elektronické vlastnos
snímačov. Ako zdroje s
dióda a žiarovka. Poži
zatiaľ najlepšie vyhovuj

8.2.4.1 Optrónov

Pod označením *op*
a snímača svetelného ži
jednoduchý elektrooptic

- elektrická,
- optická,
- kombinovaná (

Bloková schéma optróni
signál reprezentuje svete
(FS – fotoelektrický sní
bloku (LED – svetelná
charakteristík oboch čle
dĺžkou na žiarenie s inou
alebo menič žiarenia. Jel
a integrovanými obvodmi



Obr. 8.36. Optrón

Na obr. 8.37 je bloko
elektrického signálu na vý
Tento typ optrónov sa poi
na galvanické oddelenie v
meranou neelektrickou ve

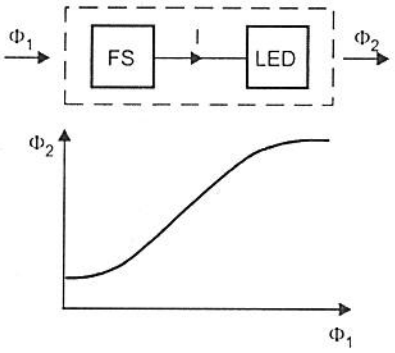
a elektronické vlastnosti zdrojov svetla výrazne ovplyvňujú parametre optoelektrických snímačov. Ako zdroje svetla sa používajú najmä svetelná emisná dióda, polovodičová laserová dióda a žiarovka. Požiadavkám kladeným na zdroje svetla v optoelektronických snímačoch zatiaľ najlepšie vyhovujú polovodičove svetelné emisné diódy (LED) a laserové diódy (LD).

8.2.4.1 Optrónové

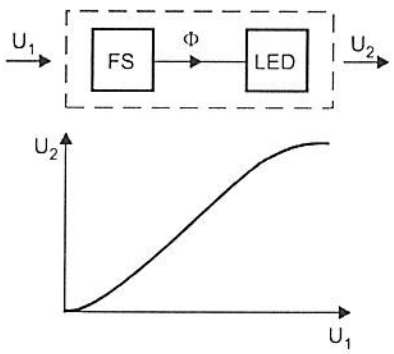
Pod označením ***optrón*** sa rozumie optoelektronický systém, tj. spojenie zdroja svetla a snímača svetelného žiarenia do jedného celku, do tzv. optrónovej dvojice. Takto sa vytvorí jednoduchý elektrooptický štvorpól. Vzájomná vnútorná väzba tejto dvojice môže byť:

- elektrická,
- optická,
- kombinovaná (elektrooptická).

Bloková schéma optrónu s elektrickou väzbou je na obr. 8.36. Vstupný riadiaci (sledovaný) signál reprezentuje svetelný tok Φ_1, pričom v prvom bloku sa svetelný signál mení na elektrický (FS – fotoelektrický snímač) a po vhodnej úprave signálu sa spätne transformuje v ďalšom bloku (LED – svetelná emisná dióda) na svetelný signál Φ_2. Vhodnou voľbou spektrálnych charakteristík oboch členov optrónu je možné uskutočniť prevod žiarenia s danou vlnovou dĺžkou na žiarenie s inou vlnovou dĺžkou. Optrón tohoto typu môže pracovať ako zosilňovač alebo menič žiarenia. Jeho prevodová charakteristika je v spodnej časti obrázku. Hybridnými a integrovanými obvodmi je možno vytvoriť radové a maticové optrónové snímače tohoto typu.



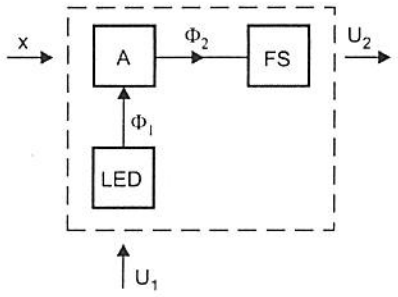
Obr. 8.36. Optrón s elektrickou väzbou



Obr. 8.37. Optrón s optickou väzbou

Na obr. 8.37 je bloková schéma optrónu ***s priamou optickou väzbou***. Premena vstupného elektrického signálu na výstupný elektrický signál sa deje prostredníctvom optického signálu. Tento typ optrónov sa používa v elektrických obvodoch pri premenách elektrického signálu a na galvanické oddelenie vstupného a výstupného signálu. Ak bude svetelný tok ovplyvňovaný meranou neelektrickou veličinou, možno optrón použiť ako snímač neelektrickej veličiny.

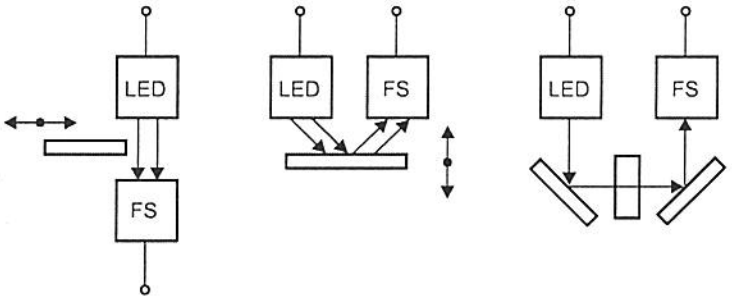
Bloková schéma optrónu v tejto funkcii je na obr. 8.38. V časti *A* sa mení optická väzba pôsobením meranej neelektrickej veličiny.



Obr. 8.38. Optrónový snímač neelektrickej veličiny

Podľa vzájomného postavenia meraného objektu a snímača (obr. 8.39) možno optrónové snímače charakterizovať ako:

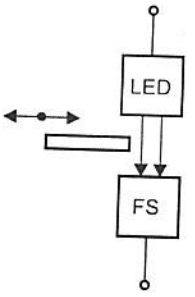
- priechodné,
- reflexné,
- kombinované.



Obr. 8.39. Základné princípy optrónových snímačov

Prípadne podľa vzájomného postavenia zdroja žiarenia a snímača svetelného toku:

- typ I – zdroj žiarenia i snímač sú umiestnené v jednej ose (nad sebou) (obr. 8.40*a*),
- typ H – paralelné usporiadanie, os zdroja žiarenia a snímača sú rovnobežné (obr. 8.40*b*),
- typ V – os zdroja žiarenia a snímača žiarenia zvierajú definovaný uhol (obr. 8.40*c*),
- typ Y – zdroj žiarenia a snímač žiarenia sú spojené združovačom, ktorý zabezpečuje zvedenie vysielaného a prijímaného toku žiarenia do jednej osi (obr. 8.40*d*).



a)

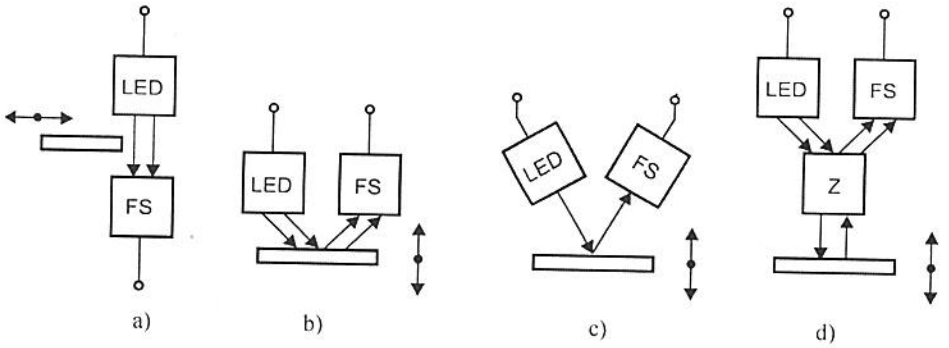
Okrem týchto typov je m
Optroelektronické s
v extrémnych prevádzko
V súčasnosti sa optróny
absolútne) a pri meraní ot

8.2.4.2 Relatívne (

Relatívne (inkrement
systémy, ktoré transformu
nespojitý, najčastejšie imp
číslicové spracovanie inf
k najpoužívanejším sníma
systémoch.

Inkrementálny snímač
mení údaje o zmene poloh
dĺžkového alebo uhlového
rovnako veľké dieliky λ,
odpovedá posunutiu sledov
tieto snímače nazývajú aj *r*
dráhových prírastkov λ voči

kde x je nová poloha, x_0 je p



Obr. 8.40. Základné druhy optrónových snímačov

Okrem týchto typov je možné vytvoriť viacnásobné optrónové snímače.

Optroelektronické snímače sa používajú predovšetkým na meranie procesných veličín v extrémnych prevádzkových podmienkach, napr. poloha, rýchlosť, vibrácie, sila, moment. V súčasnosti sa optróny používajú pri jednoduchom číslicovom meraní polohy (prírastkové, absolútne) a pri meraní otáčok. Sériovo sa vyrábajú optróny typu I, H, V.

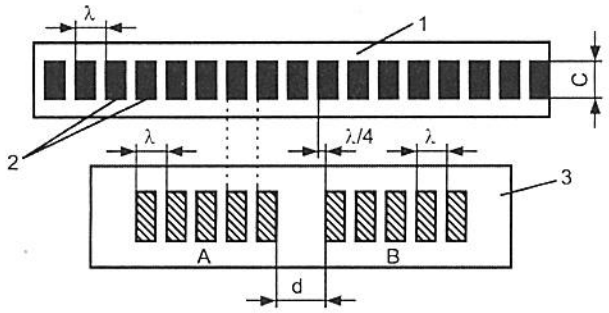
8.2.4.2 Relatívne (inkrementálne)

Relatívne (inkrementálne, prírastkové) snímače patria medzi optoelektronické meracie systémy, ktoré transformujú mechanickú veličinu (napr. pootočenie, posunutie) na elektrický nespojitý, najčastejšie impulzný signál. Z tohoto dôvodu sú tieto snímače veľmi vhodné pre číslicové spracovanie informácií pretože nevyžadujú AD prevodník. Patria v súčasnosti k najpoužívanejším snímačom polohy, rýchlosti a zrýchlenia v pohybových a akčných systémoch.

Inkrementálny snímač je vlastne optoelektronický analógovo-číslicový prevodník, ktorý mení údaje o zmene polohy na digitálne elektrické signály. Najjednoduchší spôsob premeny dĺžkového alebo uhlového posunutia na číslo predstavuje rozdelenie pracovného intervalu na rovnako veľké dieliky λ, tzv. ***prírastky*** a samotný snímač generuje počet impulzov, ktorý odpovedá posunutiu sledovaného predmetu od referenčnej (zvolenej) polohy. Preto sa často tieto snímače nazývajú aj ***relatívne***. Každá nasledujúca sledovaná poloha je teda daná počtom dráhových prírastkov λ voči predchádzajúcej polohe (obr. 8.41). Teda platí

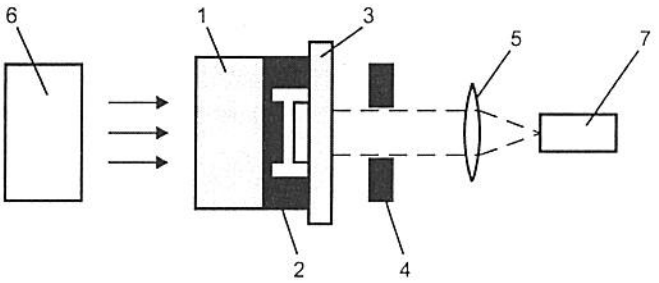
$$x = x_0 \pm k.\lambda$$

kde x je nová poloha, x_0 je predchádzajúca poloha a k počet dráhových prírastkov – impulzov λ.



Obr. 8.41. Princíp inkrementálneho snímača polohy s presvetlovaním

V inkrementálnych snímačoch sa používajú dva typy optoelektronických systémov, tzv. presvetlovacie (transmisné) a odrazové (reflexné). Presvetlovací merací systém sa skladá zo skleneného lineárneho alebo otočného pravítka *1*, na ktorom sú fotochemickým spôsobom vytvorené paralelné priehľadné a nepriehľadné prúžky *2*. Pravítko je mechanicky spojené s pohybujúcim sa objektom. Ďalšiu časť tvoria nepohyblivé clony *3* s rovnakou geometriou prúžkov ako sú na pravítku. Svetelný tok (obr. 8.42) zo špeciálnej žiarovky alebo jednotlivých *LED* diód *6* je pri pohybe pravítka prerušovaný a upravený tok svetla (*4*-clona, *5*-optika) je vyhodnocovaný fotodiódami *7* a elektronicky upravovaný na impulzy.



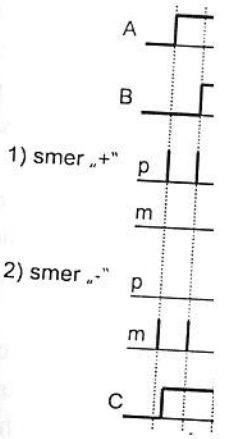
Obr. 8.42. Svetelný tok v meracom systéme

Inkrementálny systém snímača je rozdelený do troch kanálov (*A, B, C*), pričom prírastková stupnica je realizovaná na pravítku s delením λ, čo zodpovedá jednému cyklu. Aby bolo možné snímať nielen veľkosť dráhy, ale aj smer posuvu, musia sa použiť dva fotosnímače umiestnené vo vzdialenosti *d*, ktorá vyhovuje podmienke (obr. 8.41 a obr. 8.43)

$$d = n\frac{\lambda}{2} \pm \frac{\lambda}{4}$$

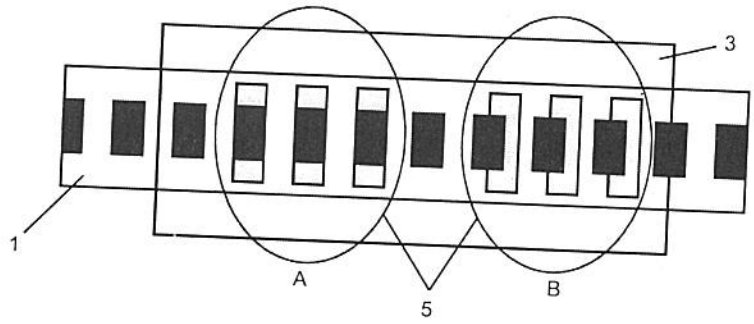
kde $n = 0, 1, 2, ..., k$.

Pri splnení tejto podm
obr. 8.44). V logickom
vyhodnotí smer pohybu
A a *B*. Orientácia pohyb
signálu *A*. Na získanie in
dráhy lineárneho pravítka
dĺžku.



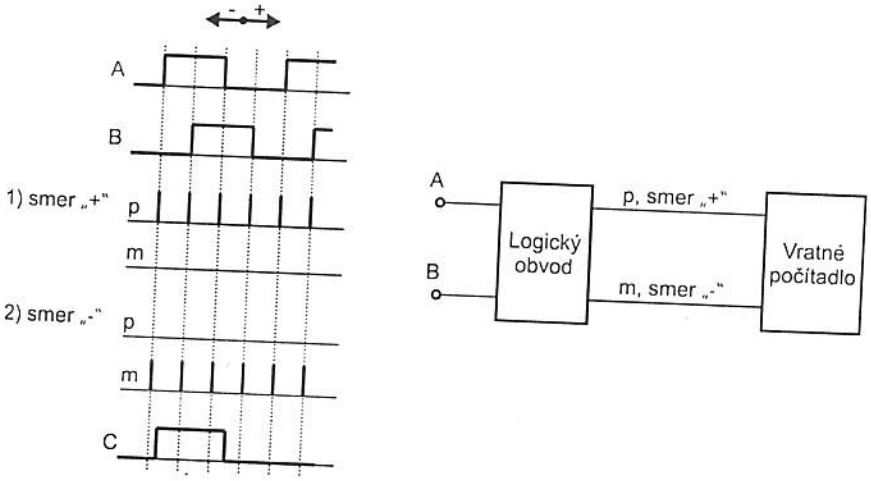
Obr. 8.44. Vyho

Z dôvodu ohybu svetla
najjemnejšie delenie sa pohy
prúžkov s absolútnou chybou
dosahuje využitím nábežnej a
optiky, úpravou pomocou M
systému, atď. Najdokonalejši
miere 0,0005° a v lineárnej 0,



Obr. 8.43. Vyhodnocovanie smeru posuvu, signály *A, B*

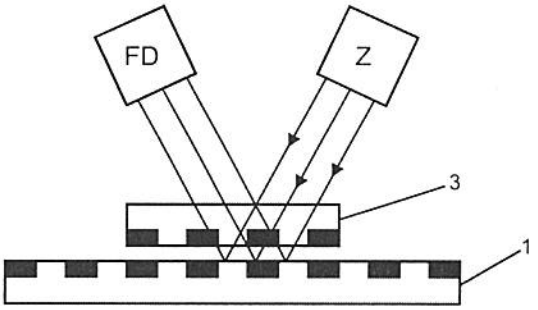
Pri splnení tejto podmienky sú impulzy z fotodiód posunuté o 90° (obr. 8.43 – pozícia 5, obr. 8.44). V logickom obvode s derivačným členom (zvýšenie citlivosti, signály *p, m*) sa vyhodnotí smer pohybu alebo otáčania, a to na základe časovej postupnosti signálov z kanálov *A* a *B*. Orientácia pohybu pravítka je určená logickou úrovňou signálu *B* pri vzostupnej hrane signálu *A*. Na získanie informácie o počte obrátok kotúča s prúžkami alebo o prebehnutí určitej dráhy lineárneho pravítka sa používa kanál *C* s jedným impulzom na obrátku alebo definovanú dĺžku.



Obr. 8.44. Vyhodnotenie signálov v inkrementálnom meracom člene polohy

Z dôvodu ohybu svetla nie je možné rozmery prúžkov ľubovolne zmenšovať, a tak najjemnejšie delenie sa pohybuje okolo $\lambda = 7$ μm. Na otočnom pravítku to znamená až 36 000 prúžkov s absolútnou chybou uhlu 1″. Ďalšie zvyšovanie citlivosti inkrementálneho snímača sa dosahuje využitím nábežnej a dobežnej hrany upraveného signálu, diferenciálnym usporiadaním optiky, úpravou pomocou Moivrovej mriežky, noniovým usporiadaním optoelektronického systému, atď. Najdokonalejšie inkrementálne meracie členy dosahujú rozlíšiteľnosť v uhlovej miere 0,0005° a v lineárnej 0,05 μm.

Presvetlovací optický systém predstavuje jednoduché riešenie, ale má nevýhodu v sklenenom pravítku, čiže veľká možnosť jeho znečistenia, poškodenia ale aj pôsobenie nepriaznivého vplyvu rozdielneho súčiniteľa teplotnej rozťažnosti a pod. Uvedené problémy sa neprejavujú pri odrazovom (reflexnom) spôsobe snímania značiek (obr. 8.45). Pohyblivá časť pravítka *1* býva vytvorená z pevného materiálu napr. nehrdzavejúcej ocele a pevná časť meradla *3* je sklená.



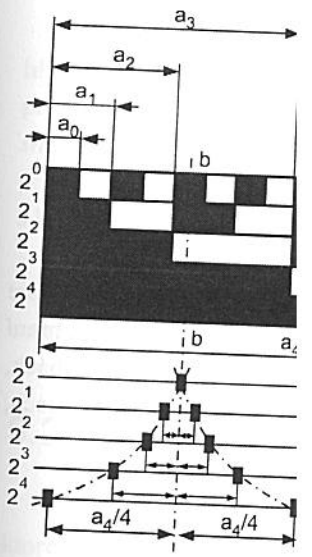
Obr. 8.45. Reflexný snímač
FD - fotodetektor, Z -zdroj svetla

8.2.4.3 Absolútne (číslicové)

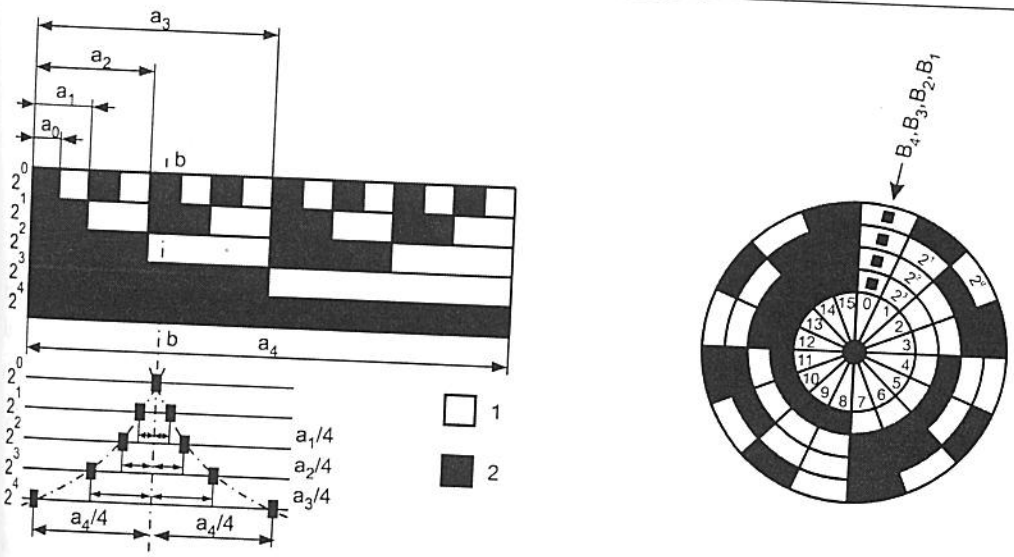
Snímač na obr. 8.46 sa nazýva polohový ***absolútny***, lebo je to vlastne priamy AD prevodník poloha/číslo. To znamená, že sa poloha vyhodnocuje v tvare číslicového signálu (binárny alebo Grayov kód), čo reprezentuje jeho hlavnú výhodu.

Základ absolútneho snímača polohy tvorí kódovací prvok (kotúč pre uhlové pootočenie, priamy pás pre priamočiary pohyb), na ktorom je vyjadrená číslicová informácia vhodným číslicovým kódom. Z hľadiska funkčných vlastností je dôležité riešenie vyhodnocovacieho optoelektronického systému, ale aj výber vhodného kódu.

V prvom prípade, pri určitej reálnej nepresnosti sledovania hrán a_i, a_{i-1} v jednotlivých rádoch (2^i) samostatnými optickými systémami v každom ráde (nepresnosť ich umiestnenia, polohy) alebo chvením kódovacieho kotúča pri jeho pohybe, môžu vznikať veľké chyby pri vyhodnocovaní signálov z jednotlivých rádov. Napr. pri prechode z hodnoty 3B (binárne) na 4B môže systém pri nepriaznivých okolnostiach indikovať okrem uvedených číslic aj hodnotu 0B alebo 7B. Preto sa používa tzv. snímanie *V* (obr. 8.46, spodná časť), ktoré je zložitejšie, ale koriguje uvedenú chybu čítania vznikajúcu pri jednoduchom optickom systéme. Šírka polí v jednotlivých rádoch a_i, ktoré charakterizujú umiestnenie optík, je určená tak, aby umožnila jednoznačne vyhodnocovať číslo v danej stope. Inú možnosť poskytuje použitie Grayovho kódu, v ktorom sa susedné kódové kombinácie líšia len v jednom bite.



Celková konštrukcia
inkrementálneho snímača, p
sú zrovnateľné. Pri optickom
17 dvojkových rádov, tj. 1
snímania uhlu ± 5″. Pripoje
merať uhol odpovedajúci via



Obr. 8.46. Kódovací pás a kotúč s binárnym kódom

Celková konštrukcia absolútneho snímača polohy je zložitejšia a drahšia ako inkrementálneho snímača, prevádzkové vlastnosti sú však lepšie a ich metrologické parametre sú zrovnateľné. Pri optickom snímaní s kódovým kotúčom o priemere 100 mm sa dá realizovať 17 dvojkových rádov, tj. 131 072 dekadických jednotiek, čo umožňuje absolútnu presnosť snímania uhlu ± 5″. Pripojením ďalšieho meracieho systému s prevodom do pomala možno merať uhol odpovedajúci viacerým obrátkam.

9 MERANIE VÝŠKY HLADINY V NÁDOBÁCH

9.1 Základné pojmy, rozdelenie

Meranie výšky hladín materiálov (kvapalín a sypkých látok) v nádobách, najčastejšie v zásobníkoch a nádržiach, predstavuje špecifické ***meranie polohy***, tj. polohy rozhraní skladovaných látok alebo len samotnej výšky hladiny. Sledovanie stavu materiálu v nádobách, tj. sledovanie výšky jeho hladiny, sa vyžaduje takmer vo všetkých priemyselných odvetviach, ako napr.:

- pri získavaní pitnej vody,
- pri spracovaní odpadových vôd,
- v chemickom a petrochemickom priemysle,
- v energetike a energetických zariadeniach,
- v potravinárskom a farmaceutickom priemysle,
- v priemysle surovín a stavebníctve,
- v papierenskom a keramickom priemysle, atď.

Pri takto širokej oblasti použitia sú pracovné podmienky rôzne, často veľmi náročné, ovplyvňované najmä teplotou, hlukom, prachom, vlhkosťou, vibráciami a aj prostredím s nebezpečím výbuchu. Preto sa pri realizácii v zásade vyžadujú riešenia s robustnými prístrojmi, čiže s prvkami s vysokou odolnosťou, prevádzkovou spoľahlivosťou a dostatočnou presnosťou merania. Aplikácie sú však limitované hlavne požiadavkami na priaznivé ceny, jednoduchú inštaláciu, obsluhu a kontrolu.

Pri meraní výšky hladiny v nádobách sa vyskytujú najmä úlohy spojené

- s kontinuálnym (spojitým) meraním výšky hladiny,
- s vyhodnocovaním medzných stavov (limitné merania),
- s ochranou proti pretečeniu (preplneniu) nádob.

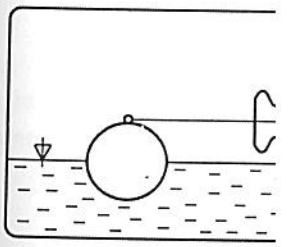
Pri ***kontinuálnom meraní*** sa sledovaná výška hladiny vyhodnocuje meracím členom s analógovým, najčastejšie unifikovaným výstupným signálom, ktorý zodpovedá ***proporcionálne*** výške hladiny. Vyhodnocovanie ***medzných (krajných)*** hodnôt rieši sledovanie charakteristických stavov materiálov v nádobách, ako je napríklad maximálna a minimálna výška hladiny kvapaliny v nádrži. Výstup z meracieho člena býva ***logického typu***, ktorý je spracovaný riadiacim systémom spolu s príslušnou signalizáciou. Tieto systémy sú často označované ako ***limitné.*** Ochrana proti ***preplneniu*** zvyšuje bezpečnosť obsluhy a samotného technologického zariadenia, tj. chráni ľudí a životné prostredie pred účinkami preplnenia zásobníkov pevnou alebo kvapalnou látkou.

Medzi najjednoduchši
hladín pomocou ***plavákov***
prístrojov na meranie výš
stĺpca kvapaliny. Pre nároč
princípy. V prípade sypkýc
s kmitajúcimi časťami.

Princípy merania použ
merania. Trendy pri riešení
meraniu, bez mechanických

9.2 Snímače s p

Merací člen výšky hl
ktoré odvodzujú výstupný s
jeho polohy. Pokiaľ je vzť
signál prakticky považovať
hladiny. Plavákový systém
často mechanicky spojený
znázornené na obr. 9.1*a,b,c*
V prípade merania hladín,
prevodového mechanizmu n



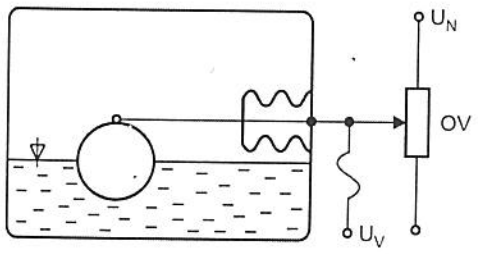
a)

Medzi najjednoduchšie princípy merania výšky hladiny v nádržiach sa zaraďujú merania hladín pomocou ***plavákov*** a meracích členov ***s ponorným telesom***. Ďalšia rozsiahla skupina prístrojov na meranie výšky hladín je založená na vyhodnocovaní ***hydrostatického účinku stĺpca kvapaliny***. Pre náročnejšie merania sa používajú ***kapacitné, ultrazvukové a mikrovlnové*** princípy. V prípade sypkých hmôt sa vyvinuli špeciálne, hlavne limitné meracie systémy, napr. s kmitajúcimi časťami.

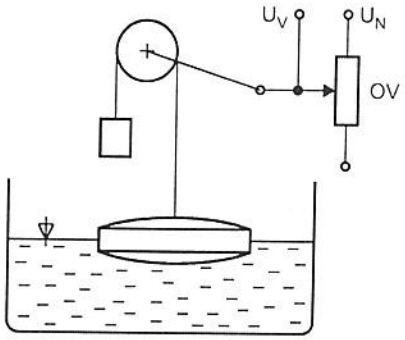
Princípy merania používané pre spojité meracie systémy sa uplatňujú často aj pre limitné merania. Trendy pri riešení úloh merania výšky hladiny v nádobách smerujú k bezdotykovému meraniu, bez mechanických pohyblivých častí a k jednoduchej obsluhe.

9.2 Snímače s plavákom

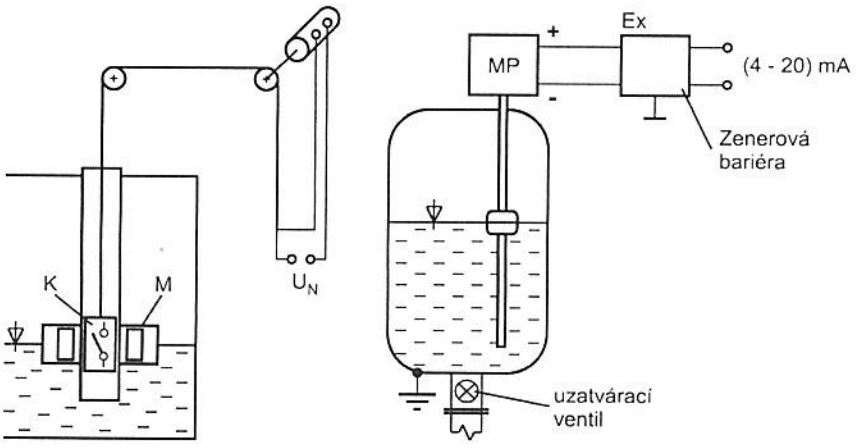
Merací člen výšky hladiny (MČVH) s plavákovým snímačom sa radí medzi prístroje, ktoré odvodzujú výstupný signál od pohybu telesa plávajúceho na hladine kvapaliny, čiže od jeho polohy. Pokiaľ je vzťažná plocha plaváku S dostatočná (správne navrhnutá), môže sa signál prakticky považovať za ***nezávislý na mernej hmotnosti kvapaliny*** a ***úmerný výške hladiny***. Plavákový systém reprezentuje v princípe plávajúce teleso – plavák, ktorý je veľmi často mechanicky spojený cez prevod s vyhodnocovacím systémom. Niektoré zostavy sú znázornené na obr. 9.1*a,b,c,d*. Prevody na obr. 9.1*a,b* sú doplnené odporovými vysielačmi. V prípade merania hladín, napr. agresívnych kvapalín (obr. 9.1*c,d*) je oddelený plaváka od prevodového mechanizmu napr. rúrkou z plastu (nemagnetického materiálu).



a)



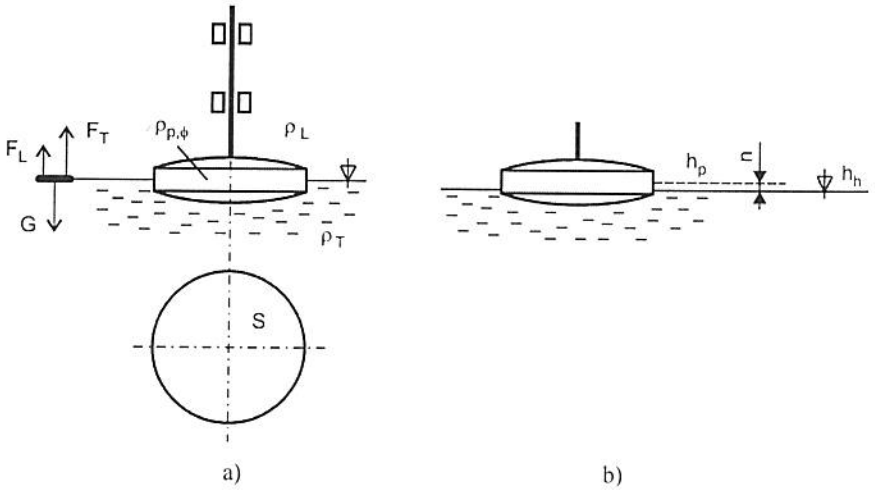
b)



c) d)

Obr. 9.1. Plavák v uzavretej a otvorenej nádrži s vyhodnocovacím mechanizmom
a) priamy plavák, b) plavák s vyvažovaním,
c), d) plavákový systém aj pre agresívne kvapaliny
OV - odporový vysielač, U_N - napájacie napätie, U_V - výstupné napätie,
M - permanentný magnet, *K* - kontakt

Základná podmienka správnej činnosti plavákového systému spočíva v tom, že plavák musí na hladine kvapaliny alebo na rozhraní kvapalín ***plávať***. Vo všeobecnom prípade leží plavák na rozhraní medzi ťažšou kvapalinou s hustotou ρ_T a ľahšou kvapalinou s hustotou ρ_L, obr. 9.2. Plavák je navrhnutý a vyvážený *(plocha S, vztlakové sily F_L, F_T, tiaž plaváka G)* tak, aby pri voľnom, nezaťaženom stave ležala hladina rozhrania približne uprostred výšky jeho valcovej časti.



a) b)

Obr. 9.2. Plavákové teleso

To znamená, že pre jeho priemernú objemovú hmotnosť (plný, ale aj dutý plavák) musí platiť (obr. 9.2)

$$\rho_T > \rho_{p,\phi} > \rho_L \tag{9.1}$$

kde ρ_T je hustota ťažšej kvapaliny,
$\rho_{p,\varphi}$ priemerná objemová hmotnosť plaváka,
ρ_L hustota ľahšej kvapaliny.

V reálnych riešeniach plavák pohybuje nevyváženým meracím mechanizmom alebo je nadľahčovaný protizávažím, pričom stredná poloha (plavák – hladina, obr. 9.2) sa dosahuje vyvažovaním spolu s celým mechanizmom, ktorý je pripojený k plaváku. Pri malej zmene výšky hladiny plavák zotrváva v pôvodnej polohe, lebo proti jeho pohybu pôsobia trecie sily s ním spojeného mechanizmu (obr. 9.2*b*). Hladina rozhrania sa teda posunie od strednej roviny plaváka o dráhu $h_p - h_h$ a na plavák pôsobí sila

$$F = S \cdot (h_p - h_h) \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_L) \qquad [N; m^2; m; m \cdot s^{-2}; kg \cdot m^{-3}] \tag{9.2}$$

Ak pokračuje posúvanie hladiny, sila F rastie a pri určitej hodnote odchýlky dosiahne úroveň potrebnú na prekonanie celkového odporu pripojeného mechanizmu, ktorý je vyjadrený silou F_c. Až od tejto polohy začne hladina kvapaliny plavák unášať a prestavovať spojený mechanizmus. To znamená, že od prekročenia odchýlky n sa vzájomná poloha plaváka a hladiny nemení a pre dráhu plaváka h_p platí

$$h_p = h_h \pm n$$

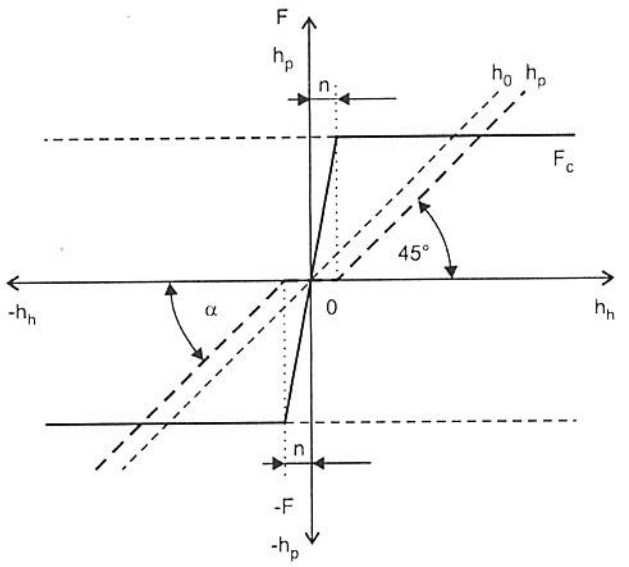
Odchýlka hladiny n sa nazýva ***necitlivosť*** plaváka

$$n = \frac{F_c}{S \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_L)} \tag{9.3}$$

Ak je nad hladinou plyn alebo para, možno hodnotu ρ_L zanedbať a pre necitlivosť platí zjednodušený výraz

$$n = \frac{F_c}{S \cdot g \cdot \rho} \tag{9.4}$$

kde ρ je merná hmotnosť kvapaliny.
Z uvedeného vzťahu je možné určiť vzťažnú plochu plaváka S tak, aby nebola prekročená požadovaná necitlivosť meracieho systému.



Obr. 9.3. Charakteristika plaváka
0 - východzia poloha , h_h - dráha hladiny, F - výsledná sila pôsobiaca na plavák, h_p - dráha plaváka, *n* - necitlivosť plaváka, h_0 - dráha plaváka pri zanedbateľnej sile F_c

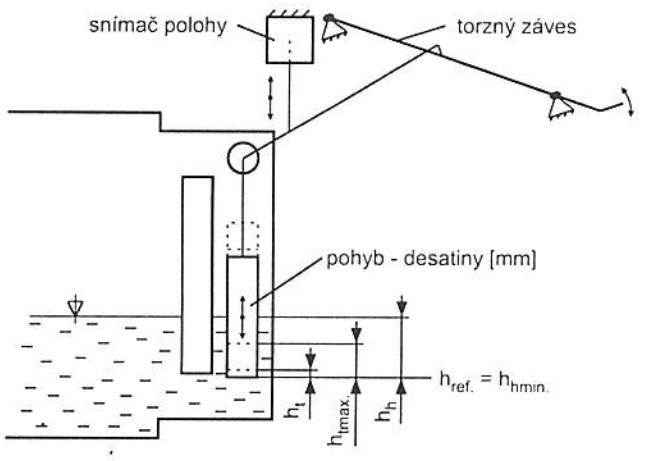
Sila *F* rastie lineárne v rozsahu necitlivosti len vtedy, ak je vzťažná plocha *S* zachovaná v určitom rozsahu jeho výšky. Ak je sila F_c zanedbateľná (napr. plavák je veľmi jemne uložený), potom je necitlivosť prakticky nulová a priebeh zdvihu plaváku znázorňuje priamka h_0 (moderné prístroje). Rozsah merania pri rozhraní dvoch kvapalín je daný (ohraničený) výškou plaváka. Ak rozdiel merných hmotnosti nebude dostatočne veľký, možno očakávať zníženú presnosť merania.

Pri malých pohyboch plaváka sa v praxi rieši prevod na elektrický unifikovaný signál odporovými a indukčnými vysielačmi polohy (obr. 9.1*a,b*), pre väčšie rozsahy pohybu plaváka sa používajú napr. inkrementálne – optoelektronické snímače posunutia. Na obr. 9.1*c* je naznačené riešenie sledovania hladiny pre agresívne kvapaliny oddelením plaváka od prevodového mechanizmu pomocou rúrky z plastu. Vo vnútri rúrky sa na lanku pohybuje sledovač polohy plaváka s magnetickým prepínačom *K*. Pri zmene hladiny sa plavák premiestni, čím dôjde k zapnutiu kontaktu, cez ktorý sa uvedie do chodu servopohon. Servopohon prestavuje sledovač v smere pohybu plaváka pomocou lanka (slúži aj na prívod el. energie) až dovtedy, kým magnet nerozopne kontakt *K*. Daná poloha je nová rovnovážna poloha prevodového mechanizmu, ktorý spolu s plavákom sleduje zmenu hladiny. Opísaný princíp prevodu možno využiť aj na meranie hladín sypkých hmôt. Iné riešenia predstavujú plavákové snímače hladiny na vodiacej tyčke, ktorá je ponorená do sledovanej kvapaliny. Pohyb plaváka je cez magnetickú väzbu prenášaný na miniatúrne jazýčkové relé (niekoľko relé – kvázi potenciometrický vysielač), ktoré sú umiestené vo vodiacej rúrke. Pri prúdovom unifikovanom signále sa dosahuje rozlišovacia schopnosť až 5 mm. Dodávané sú snímače aj v limitnom a vyhotovení pre prostredia s nebezpečím výbuchu (obr. 9.1*d*).

Spoločnú vlastnosť plavákových systémov predstavuje nezávislosť merania od hustoty meranej kvapaliny. To platí za predpokladu, že je dostatočne veľká plocha plaváka vzhľadom aj k necitlivosti systému. Nevýhody tohto princípu sú hlavne: nevyhnutnosť transformácie dráhy plaváka (radovo metre) na elektrický signál a nutnosť tienenia plaváka od prúdiacich, nepokojných a prudko sa vlniacich hladín. Problémy vznikajú aj pri prevode pohybu plaváka z tlakového priestoru zásobníka. Prevádzkové vlastnosti sú závislé na konštrukčnom riešení meracieho systému, metrologické najmä od návrhu vzťažnej plochy plaváka a vhodného prevodového meracieho mechanizmu.

9.3 Snímače s ponorným telesom

Merací člen výšky hladiny s ponorným telesom pracuje na princípe merania vztlaku pôsobiaceho na teleso, ktoré je čiastočne ponorené do kvapaliny. S pohybom hladiny sa mení ponorený objem telesa, a tým i vztlak, ktorý pôsobí na teleso. Aktívna veličina v tomto prípade je ***veľkosť vztlakovej sily*** a ***nie dĺžka dráhy***. Hmotnosť telesa nemá na vlastné meranie vplyv, avšak jeho tiaž musí byť väčšia ako vztlaková sila. To umožní jednoduché zavesenie telesa bez komplikovaných meracích prevodov, pričom merací prvok je vlastne snímač sily alebo polohy, ktorý je súčasťou pružného závesu ponorného telesa na torznej rúrke, prípadne pružine.



Obr.9.4. Princíp merania hladiny ponorným telesom.

Nech plocha ponorného telesa (priemet telesa do vodorovnej roviny) je S a $h_{ref.}$ je referenčná hladina pri minimálnej výške hladiny h_{hmin}, čo odpovedá maximálnemu natočeniu torznej rúrky. Ak sa zmení (vzrastie) výška hladiny o hodnotu h_h, zväčší sa vztlak pôsobiaci na teleso, zmenší sa pootočenie torznej rúrky a ponorné teleso stúpne o dráhu h_t. Pokles sily F pôsobiacej na pružinu je úmerný dráhe h_t a pružinovej konštante K

$$F = K \cdot h_t$$

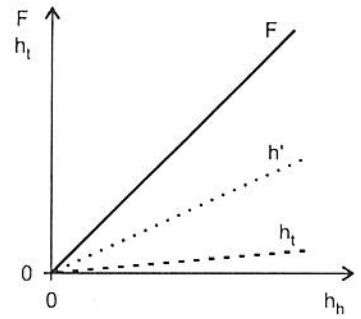
Na druhej strane, tento pokles tiaže ponorného telesa je vyvolaný vztlakovou silou F, tj. zmenou vzájomnej polohy hladiny a telesa $h_h - h_t$. Ak je merná hmotnosť kvapaliny ρ, tak platí

$$F = (h_h - h_t) \cdot S \cdot \rho \cdot g$$

z porovnania pôsobiacich síl vychádza

$$h_t = \frac{S \cdot \rho \cdot g}{K + S \cdot \rho \cdot g} \cdot h_h$$

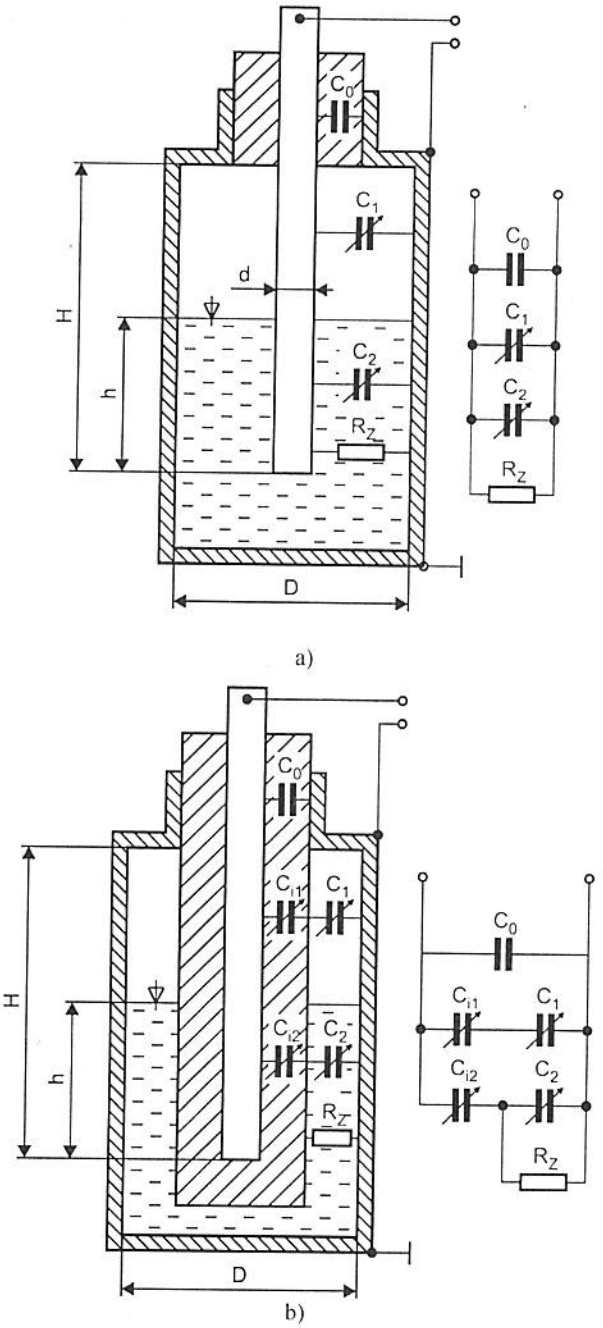
čiže zmena polohy telesa (natočenie torznej rúrky) pri konštantnej hustote kvapaliny je lineárne závislá na zmene ***polohy hladiny*** sledovanej kvapaliny.
Závislosť sily F a polohy telesa h_t na polohe hladiny h_h je znázornená na obr. 9.5.



Obr. 9.5. Charakteristika ponorného telesa:
0 - východzia poloha, h_h - dráha hladiny, F - vztlaková sila pôsobiaca na teleso,
h_t - dráha telesa, ak je sila meraná napr. torznou rúrkou,
h` - dráha telesa pri mäkkej pružine

Opísaný princíp, ktorý priamo transformuje pohyb hladiny (napr. v metroch) na posunutie (radovo mm) alebo pootočenie, je výhodný na snímanie hladín stredných a veľkých rozsahov (od 130 mm do 7m). Presnosť meracích členov dosahuje hodnoty okolo 1,5 % z rozsahu. Zásadnou nevýhodou je skutočnosť, že ponorné teleso sa musí navrhovať alebo vyberať z ponuky pre každý rozsah a kvapalinu.

9.4 Kapacitné snímače



Obr. 9.6 Kapacitný snímač výšky hladiny
a) Princíp kapacitného snímača a náhradná schéma pre nevodivý materiál
b) Princíp kapacitného snímača a náhradná schéma pre vodivý materiál

V prvom prípade sa uvažuje valcový zásobník s elektricky nevodivou kvapalinou. Elektródy vytvárajú valcový kondenzátor, ktorého priestor do výšky elektródy h je vyplnený

meranou kvapalinou a priestor *(H – h)* napr. paroplynovou zmesou. Elektródy sú navzájom upevnené pomocou izolačného prvku.
Všeobecne pre kapacitu valcového kondenzátora platí

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot H}{\ln \frac{D}{d}} \qquad \left[F; F \cdot m^{-1}; m\right] \tag{9.5}$$

kde ε_0 je permitivita vákua ($8{,}859.10^{-12}$ F.m^{-1}),
ε_r relatívna permitivita aktuálneho dielektrika,
H dĺžka elektródy,
h dĺžka ponorenej časti elektródy,
D, d priemer vonkajšej a vnútornej elektródy.

Pre celkovú kapacitu valcového kondenzátora na obr. 9.6*a* platí

$$C = C_0 + C_1 + C_2 \tag{9.6}$$

kde C_0 je stála kapacita prechodového kondenzátora v mieste upevnenia elektród,
C_1 kapacita priestoru medzi elektródami vyplneného paroplynovou zmesou,
C_2 kapacita priestoru medzi elektródami vyplneného kvapalinou.

Typické hodnoty kapacity C_0 sa pohybujú v rozsahu (18 až 35) pF podľa typu elektródy a spôsobu mechanického upevnenia. Veľkosť kapacity C_1 pre vzduch sa pohybuje v rozsahu (8 až 12) pF.m^{-1} a pre vodu približne 350 pF.m^{-1} (pre valcový zásobník s priemerom > 250 mm).

Pre celkovú kapacitu snímača platí

$$C = C_0 + \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \cdot (H - h)}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \cdot h}{\ln \frac{D}{d}} \tag{9.7}$$

kde ε_{r2} je relatívna permitivita meranej kvapaliny,
ε_{r1} relatívna permitivita prostredia nad meranou kvapalinou.

Statická charakteristika kapacitného snímača pre nevodivé médium *(ε_{r1} = konšt., pre vzduch je to 1, ε_{r2} = konšt. a C_0 = konšt.)* je daná vzťahom

$$C = C_0 + 2\pi \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \cdot H \frac{\left[1 + (\varepsilon_{r2} - 1) \cdot \frac{h}{H}\right]}{\ln \frac{D}{d}} \tag{9.8}$$

čo v prepise znamená,
materiálu

kde k_1 a k_2 sú konštanty m
Ďalším dôležitým par
kapacity resp. minimálna
kapacity

potom

čiže, čím je hodnota ε_{r2} vyšši
aj vyššia presnosť merania.
V druhom prípade, pre v
hladiny materiálu a kapacitou
z obr. 9.6*b*. Napríklad, pre vo
izolované meracie elektródy,
(guma – 3,0; teflón – 2,7; PV
s veľmi vysokým ε_r a znižuje
merania výšky hladiny kvapalin
Hodnota odporu R v náhradnýc

kde ρ je merný odpor príslušnej
Vyhodnocovanie zmeny ele
signálu s využitím metódy strieda
V prípade mostíka sú elektr
36) V s frekvenciou 40 kHz až 2
prázdnom (0 %) a plnom zásobní
ramenách mostíka, ktoré sú vyve
P – max. hodnota). Výstupný sig
20) mA alebo napäťový (0 až 10)

čo v prepise znamená, že celková kapacita snímača je lineárne závislá od výšky hladiny materiálu

$$C = k_1 \cdot h + k_2 \tag{9.9}$$

kde k_1 a k_2 sú konštanty meracieho systému.

Ďalším dôležitým parametrom kapacitného snímača je jeho citlivosť, t.j. minimálna zmena kapacity resp. minimálna zmena výšky hladiny potrebná na vyvolanie merateľnej zmeny kapacity

$$\Delta C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta h \cdot (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1})}{\ln \frac{D}{d}} \tag{9.10}$$

potom

$$\Delta h \geq \frac{\Delta C \cdot \ln \frac{D}{d}}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1})} \tag{9.11}$$

čiže, čím je hodnota ε_{r2} vyššia, tým je zabezpečená aj vyššia citlivosť meracieho systému, a tak aj vyššia presnosť merania.

V druhom prípade, pre vodivý meraný materiál, je postup pri určení vzťahu medzi výškou hladiny materiálu a kapacitou snímača analogický, len sa uvažuje príslušná náhradná schéma z obr. 9.6*b*. Napríklad, pre vodivé kvapaliny s mernou vodivosťou > 10^{-6} S.m^{-1} sa používajú izolované meracie elektródy, ktorých relatívna permitivita použitej izolácie je veľmi nízka (guma – 3,0; teflón – 2,7; PVC – 3,2). Táto izolácia umožňuje meranie výšky hladiny látok s veľmi vysokým ε_r a znižuje vplyv kolísania relatívnej permitivity materiálov na presnosť merania výšky hladiny kvapaliny.

Hodnota odporu R v náhradných schémach (obr. 9.6) je daná vzťahom

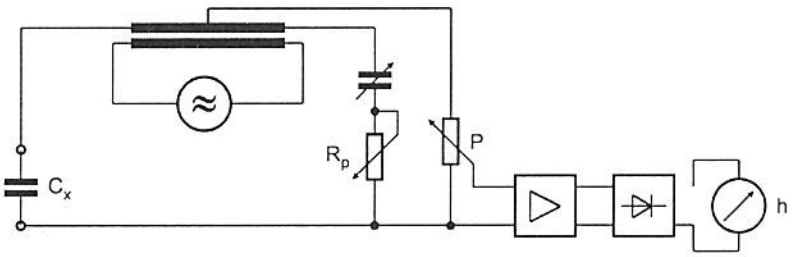
$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot h} \cdot \ln \frac{D}{d} \tag{9.12}$$

kde ρ je merný odpor príslušnej kvapaliny.

Vyhodnocovanie zmeny elektrickej kapacity snímača sa rieši napr. pomocou prevodníkov signálu s využitím metódy striedavého mostíka (obr. 9.7), impulznej alebo rezonančnej metódy. V prípade mostíka sú elektródy kondenzátora napájané spravidla napätím (12 až 36) V s frekvenciou 40 kHz až 2 MHz. Na nastavenie počiatočných hodnôt (podľa obr. 9.7) pri prázdnom (0 %) a plnom zásobníku (100 %) slúžia premenné odpory a kapacity v protiľahlých ramenách mostíka, ktoré sú vyvedené na čelný panel meracích prístrojov (R_P, C_P – počiatok, P – max. hodnota). Výstupný signál je najčastejšie upravený na unifikovaný prúdový (4 až 20) mA alebo napäťový (0 až 10) V.

Tab. 9.1. Hodnoty ε_r pre niektoré materiály

Materiál	Zrnitosť	ε_r
Voda	–	81
Piesok, mokrý	hrubozrnný	15 – 20
Piesok, suchý	jemnozrnný	3 – 4
Obilie	-	2,5 – 4,5
Benzín	-	1,9
Plast	granule	1,5 – 2,0
Tekutý plyn	-	1,2 – 1,7
Prací prášok	jemnozrnný	1,1 – 1,3
Vákuum	-	1
Vzduch	-	1



Obr. 9.7. Merací prevodník kapacitného snímača výšky hladiny

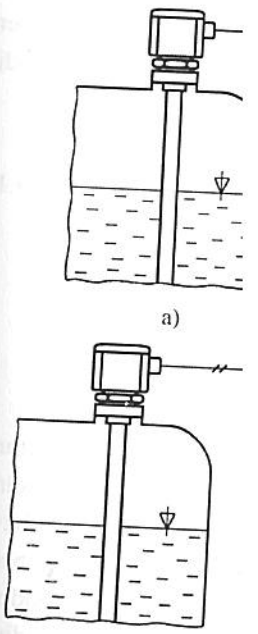
Kapacitný princíp možno použiť pre kontinuálne meranie výšky hladiny alebo aj na vyhodnocovanie medzných stavov. Pri kontinuálnom meraní výšky sa elektródy inštalujú vertikálne (obr. 9.8*a*), pri vyhodnocovaní medzných stavov horizontálne alebo vertikálne (obr. 9.8*b,c*).

Výhody horizontálnej inštalácie:

- spínací bod je definovaný presným miestom inštalácie,
- vysoká reprodukovateľnosť pri úplnom zakrytí elektródy,
- spoľahlivé spínanie aj pri zmenách parametrov meraného materiálu.

Vertikálna inštalácia sa používa pri požiadavkách:

- nastavenia niekoľkých spínacích bodov s jednou elektródou (napr. sledovanie max/min),
- nastavenia spínacieho bodu individuálne pozdĺž celej dĺžky elektródy.



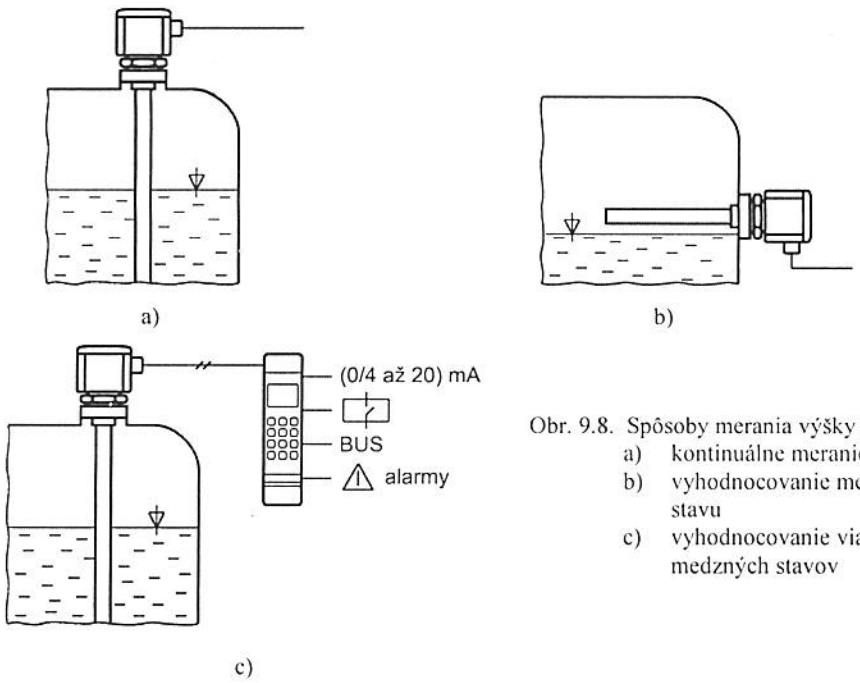
Ak je elektróda inštalovaná zásobníka mení sa kapacita kapacity lineárna, preto sa v t ako referenčná elektróda ale druhý pól kondenzátora musí použitím kovovej alebo oceľo

Prednosť metódy kapaci prejavuje odolnosťou voči ne kapacitné meracie systémy j 6,3 MPa, v rozsahu teplôt od elektród závisí od typu izolač okolo 400 °C sa používajú materiály). Pri kvapalných plyn kombináciou látok na zabezpeč

Presnosť merania výšky h 1 %, ale kalibráciou kapacity korekciou na aktuálnu hodnotu

9.5 Snímače s mer

Meranie výšky hladiny kva pre nezávislosť tejto metódy od



Obr. 9.8. Spôsoby merania výšky hladiny
a) kontinuálne meranie výšky
b) vyhodnocovanie medzného stavu
c) vyhodnocovanie viacerých medzných stavov

Ak je elektróda inštalovaná vo valcovom zásobníku s rovným dnom paralelne so stenou zásobníka mení sa kapacita lineárne. Pri nepravidelných tvaroch zásobníka nie je zmena kapacity lineárna, preto sa v tomto prípade používa koncentrická rúrka (so spoločným stredom) ako referenčná elektróda alebo dvojtyčová elektróda. V prípade nevodivých zásobníkov sa druhý pól kondenzátora musí zabezpečiť rovnako pomocou koncentrickej kovovej rúry alebo použitím kovovej alebo oceľovej fólie na vonkajšom povrchu zásobníka.

Prednosť metódy kapacitného merania výšky hladiny spočíva v jej robustnosti, ktorá sa prejavuje odolnosťou voči nepriaznivým pracovným podmienkam a podmienkam okolia. Pre kapacitné meracie systémy je charakteristické ich použitie v rozsahu tlakov od vákua po 6,3 MPa, v rozsahu teplôt od –50 °C do + 400 °C. Rozsah pracovných teplôt kapacitných elektród závisí od typu izolačného materiálu a ich mechanického uchytenia. V prípade teplôt okolo 400 °C sa používajú vysokotepelné elektródy (odporúčané sú obzvlášť pre sypké materiály). Pri kvapalných plynoch sú mechanické uchytenia elektródy realizované so zvláštnou kombináciou látok na zabezpečenie dokonalého tesnenia.

Presnosť merania výšky hladiny kvapalín kapacitnými snímačmi dosahuje hodnotu okolo 1 %, ale kalibráciou kapacity meracieho kondenzátora (naprázdno pred napĺňaním), ako aj korekciou na aktuálnu hodnotu ε_r, možno zlepšiť presnosť merania až na 0,5 %.

9.5 Snímače s meraním hydrostatického tlaku

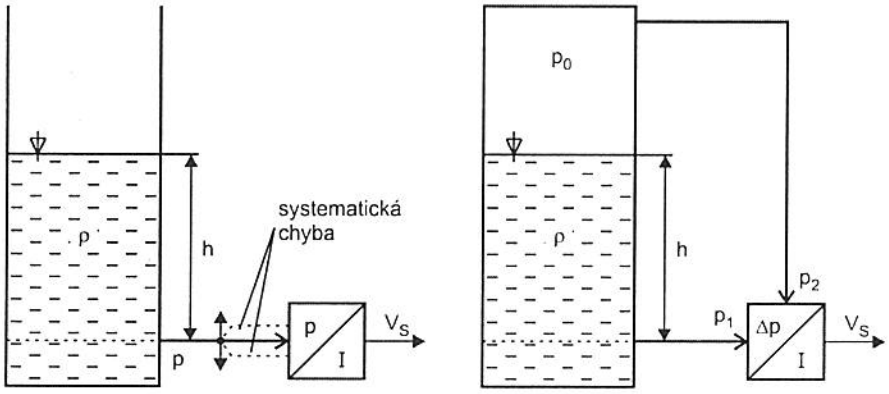
Meranie výšky hladiny kvapalín prostredníctvom hydrostatického tlaku je veľmi rozšírené pre nezávislosť tejto metódy od elektrických vlastností meranej látky (vodivosť, permitivita),

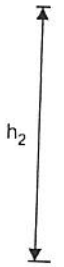
ako aj od procesných podmienok (tvorba peny). Zo vzájomného vzťahu pre ekvivalenty potenciálnych energií kvapalín (polohová a tlaková) vyplýva, že meranie výšky hladiny kvapalín možno zmeniť na meranie tlaku, pretože pre tlak p kvapalinového stĺpca platí

$$p = \rho \cdot g \cdot h + p_0 = k \cdot h + p_0 \qquad \left[\text{Pa}; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}; \text{m} \cdot \text{s}^{-2}; \text{m}; \text{Pa}\right] \qquad (9.13)$$

kde ρ je merná hmotnosť kvapaliny,
g gravitačné zrýchlenie,
h výška stĺpca kvapaliny,
p_0 tlak nad hladinou kvapaliny,
k konštanta merania.

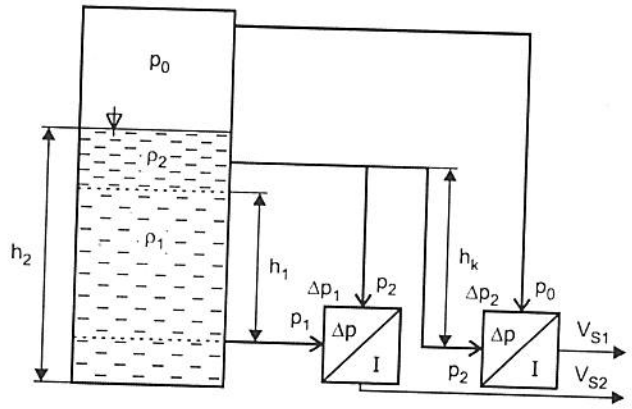
Z uvedeného vyplýva, že sa jedná vlastne o meranie tlaku alebo tlakového rozdielu, ktorý je priamo úmerný výške stĺpca kvapaliny, pričom ho možno merať bežnými priemyselnými snímačmi tlaku (manometrami) alebo diferenciálnymi tlakomermi. Tento princíp je obzvlášť vhodný pre kontinuálne meranie výšky hladiny kvapalín s rôznou viskozitou v otvorených alebo uzatvorených nádobách. Pri meraní v uzatvorených nádobách sa rozlišuje snímanie v nádobách s nekondenzujúcimi a kondenzujúcimi parami. Používané spôsoby snímania výšky hladiny sú na obr. 9.9.



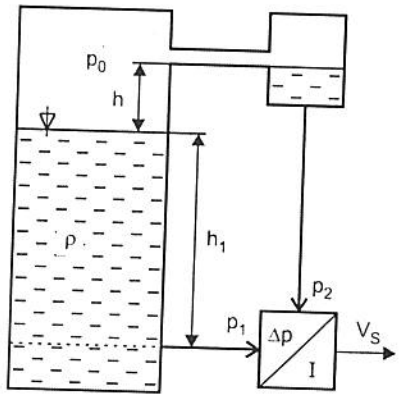


Obr. 9.9 Snímanie vý
a)
b)
c)
d)

Prvý príklad charal
umiestneným meracím čl
Pokiaľ je nad hladinou iba
meranie vyhovuje meraci



c)



d)

Obr. 9.9 Snímanie výšky hladiny kvapalín meraním hydrostatického tlaku. V_s - (4 až 20) mA
a) v otvorenej nádrži
b) v uzavretej tlakovej nádrži bez kondenzujúcich pár
c) v uzavretej tlakovej nádrži, dve hladiny bez kondenzujúcich pár
d) v uzavretej tlakovej nádrži s kondenzujúcimi parami

Prvý príklad charakterizuje meranie výšky hladiny v otvorenej nádrži s vhodne umiestneným meracím členom, tj vlastný snímač tlaku je umiestnený v referenčnej rovine. Pokiaľ je nad hladinou iba barometrický tlak, platí prvá časť rov. 13 (bez p_0), a preto pre toto meranie vyhovuje merací člen tlaku pripojený jedinou prípojkou, napr. v blízkosti dna nádrže. Ak je tlakový signál prenášaný k meraciemu členu, ktorý je umiestnený z rôznych dôvodov v inej než referenčnej hladine (vyššie alebo nižšie), vzniká systematická chyba výstupného údaja, ktorá sa musí zohľadňovať pri vyhodnocovaní (korekcia o príslušnú výšku). Pri meraní v uzavretej nádobe (obr. 9.9*b*), kde je nad hladinou iný tlak než barometrický, musí sa merať tlakový rozdiel medzi miestom referenčnej hladiny *(p_1)* a medzi priestorom nad maximálne možnou hladinou *(p_2)*, tj.

$$p_1 = \rho \cdot g \cdot h + p_0$$

a

$$p_2 = p_0$$

Tlak snímaný diferenciálnym tlakomerom je lineárnou funkciou len výšky hladiny, tj.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h = k \cdot h$$

kde k je konštanta snímača.

Pri väčšom pomere tlakov p_1, p_2 a pri malých hodnotách hydrostatického tlaku (malá hodnota h) nie je uvádzané riešenie veľmi vhodné, lebo „dolný" merací člen musí byť dimenzovaný na súčet oboch tlakov, a tak sa v tomto prípade využije jeho merací rozsah iba v malej časti, čo zhoršuje presnosť výsledného merania.

Príklad merania rozhrania hladín nemiesiteľných kvapalín znázorňuje obr. 9.9*c*, z ktorého vyplýva, že pomocou dvoch diferenciálnych meracích členov tlaku je možné sledovať ich rozhranie i výšku hladiny hornej kvapaliny.

Platí

$$\Delta p_1 = p_1 - p_2 \; ; \quad \Delta p_2 = p_2 - p_0 \tag{9.14}$$

a

$$p_1 = p_0 + (h_2 - h_1) \cdot \rho_2 \cdot g + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g \tag{9.15}$$

$$p_2 = p_0 + (h_2 - h_k) \cdot \rho_2 \cdot g \tag{9.16}$$

po dosadení do rov. 9.14 pre diferenciálne tlaky vyplýva, že Δp_1 a Δp_2 sú funkciami h_1 a h_2

$$\Delta p_1 = h_1 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g + k_1 = k \cdot h_1 + k_1 \tag{9.17}$$

a

$$\Delta p_2 = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g + k_2 = k' \cdot h_2 + k_2 \tag{9.18}$$

kde k, k', k_1, k_2 sú konštanty meracieho systému.

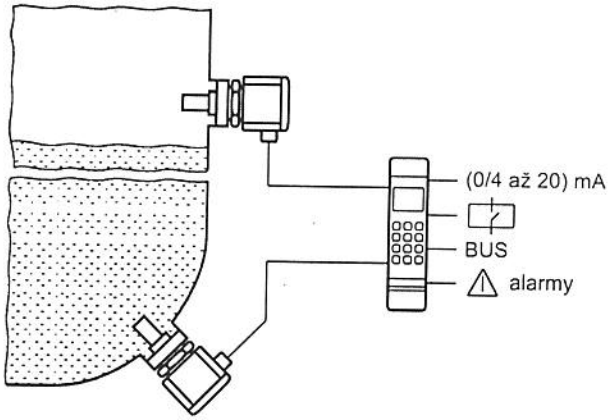
Úprava podľa obr. 9.9*d* sa volí vtedy, ak pary nad hladinou kondenzujú, čo rieši prídavná kondenzačná nádobka, ktorá je pripojená k meraciemu systému rúrkou naplnenou kondenzujúcou kvapalinou. V tomto prípade sa sleduje rozdiel medzi hladinou v nádrži a hladinou v kondenzačnej nádobke (podobne ako pri U manometri). Meranie je nezávislé na polohe diferenciálneho meracieho člena. Pre rovnováhu na úrovni referenčnej hladiny platí

$$p_1 = h_1 \cdot \rho \cdot g + p_0; \quad p_2 = (h_1 + h) \cdot \rho \cdot g + p_0$$

a

$$\Delta p = p_2 - p_1 = h \cdot \rho \cdot g = k \cdot h$$

Rozsahy a presnosti hydrostatických meracích členov výšky hladín sú dané hlavne presnosťou použitých snímačov tlaku, ktorých parametre sú väčšinou lepšie ako požadovaná presnosť merania výšky hladiny.
Príklad priemyselného riešenia merania výšky hladiny kvapaliny v uzatvorenej nádrži je na obr. 9.10.



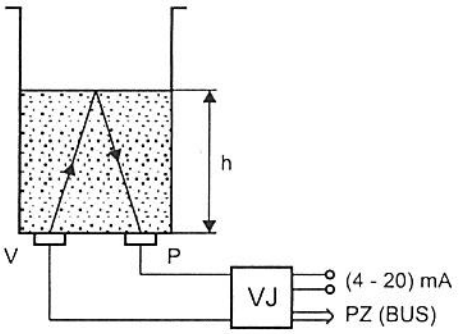
Obr. 9.10. Meranie výšky hladiny s dvoma meracími členmi tlaku s vyhodnocovacím členom

Uvedený systém je vhodný na meranie výšky hladiny v otvorených, ale aj v uzatvorených nádobách. V druhom prípade sa použijú dva tlakové snímače. Informácie sú spracované vo vyhodnocovacom prístroji s diferenciálnou funkciou. Ako vyplýva z obr. 9.10, moderné systémy merania výšky hladín ponúkajú užívateľovi uplatniť buď analógové prúdové alebo logické výstupy (relé), prípadne prenos informácie o procesnej veličine číslicovou priemyselnou zbernicou. Vyhodnocovací systém generuje aj požadované „alarmové" hlásenia.

9.6 Bezdotykové snímače

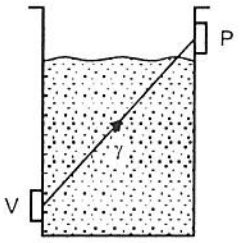
Bezdotykové meracie členy hladín používajú ultrazvukový a mikrovlnový princíp činnosti (žiarenie). ***Ultrazvukové meracie členy*** merajú časový interval medzi vyslaným a od hladiny kvapaliny alebo sypkej látky odrazeným impulzom (alebo sériou impulzov) ultrazvukového vlnenia, obr. 9.11. Piezokeramický vysielač s úzkou vyžarovacou charakteristikou je umiestnený nad alebo pod hladinou. V súčasnosti prevažujú kombinované prvky vysielač – prijímač v jednom bloku. Hlavná poruchová veličina je teplota prostredia, v ktorom sa šíri ultrazvuku a homogénnosť tohoto prostredia. Z uvedeného dôvodu sú v meničoch zvuku integrované aj snímače teploty. Vyhodnocovanie pre spojité snímače hladín vyžaduje komplikovanejšie spracovanie údajov, a preto sa vyrábajú väčšinou vo variante ISS. Na spracovanie dĺžky časového intervalu sa používajú rôzne formy číslicovej analýzy odrazov počínajúc nelineárnymi číslicovými filtráciami, určovaním stredných hodnôt, prípadne spracovaním signálov metódami fuzzy logiky a pod. Vhodná filtrácia údajov potláča napríklad

vplyv turbulencie hladiny. Rušivé odrazy, ktoré vznikajú od usadenín na stenách zásobníkov, odstraňuje algoritmus úpravy prahovej citlivosti, tj. impulzy úrovne pod prahom nie sú rešpektované. V tomto prípade sa dosahuje presnosť až 0,25 % pri pracovnom rozpätí až desiatky metrov (napr. 60 m) a teplotnom rozsahu od - 20 °C až po 80 °C.



Obr. 9.11. Ultrazvukové meranie výšky hladiny
V - vysielač, P - prijímač, VJ - vyhodnocovacia jednotka, PZ - priemyselná zbernica

Izotopové meracie členy hladín pracujú na intenzitnom princípe, čiže indikuje sa prítomnosť materiálu v dráhe *zdroj – detektor žiarenia* a sleduje sa úroveň (intenzita) žiarenia. Ako žiariče sa používajú ***zdroje svetla*** a ***infračerveného, elektromagnetického žiarenia***, a v zložitých podmienkach aj ***rádioaktívneho (ionizujúceho) žiarenia*** s možnosťou merať aj cez steny nádoby. Tento princíp sa používa hlavne na meranie výšky sypkých materiálov, obr. 9.12.



Obr. 9.12. Izotopový merač výšky hladiny

Intenzita pôvodného žiarenia *(γ alebo β)* I_0 poklesne priechodom cez materiál na hodnotu

$$I = I_0 e^{-\mu\rho x}$$

kde μ je hmotnostný absorbčný koeficient (lineárny súčiniteľ zoslabenia),
ρ objemová hmotnosť materiálu,
x hrúbka prežiareného materiálu.

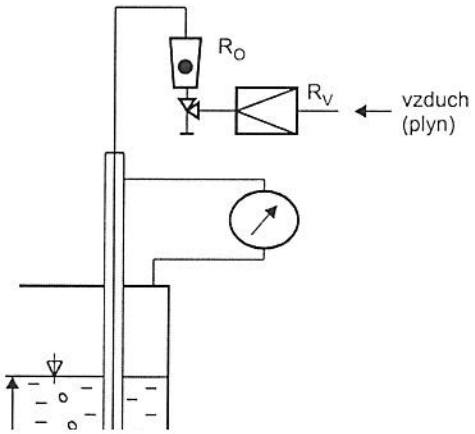
Pre zdroj γ žiarenia, napr. cesium 137, ktorý je často používaný na meranie hladín, platia nasledovné hodnoty μ pre rôzne materiály

voda, nafta	$77.\ 10^{-7}$ [$m^2.g^{-1}$]
hliník	$74.\ 10^{-7}$ [$m^2.g^{-1}$]
oceľ	$72.\ 10^{-7}$ [$m^2.g^{-1}$]
olovo	$103.\ 10^{-7}$ [$m^2.g^{-1}$]

Zlepšenie linearity meracích členov sa dosahuje tvarovaním zdroja žiarenia, napr. miesto bodového sa použije líniový.

9.7 Ostatné používané princípy

V praxi sa často vyskytuje požiadavka sledovať výšku hladiny agresívnych kvapalín alebo stav hladiny kvapalín v neprístupných a tvarovaných nádržiach. V takýchto prípadoch sa používa princíp merania ***prevzdušňovaním***, čiže meraním pneumatického odporu, ktorý kladie hydrostatický stĺpec kvapaliny prúdu vzduchu (vhodného plynu) privádzaného do nádrže prevzdušňovacou rúrkou. Z rúrky na úrovni referenčnej (minimálnej) hladiny prebubláva vzduch. Podmienkou je konštantný prietok vzduchu (regulátor R_O). Potom tlak vzduchu v prívodnom vedení (otvorená nádrž) alebo jeho diferencia (uzavretá nádrž) je priamo úmerný výške hladiny, obr. 9.13.

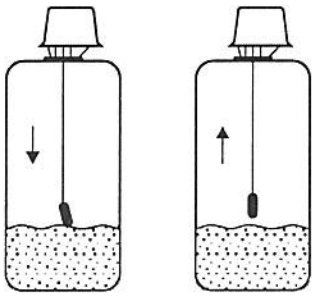


Meranie výšky hladiny vážením pripojenej nádoby. Na zásobník je pripojená s dostatočne dlhými spojovacími a pružnými rúrkami pomocná nádoba zavesená na snímači sily. Zmenou výšky hladiny kvapaliny sa zmení výška náplne pomocnej nádobky, čím sa zmení aj jej hmotnosť. Cez snímač sily alebo deformáciu prívodných trubiek sa určí zmena hladiny v hlavnej nádrži – zásobníku.

Vodivostné snímače určujú hladinu meraním elektrického odporu kvapaliny medzi elektródami. K nevýhodám patri závislosť princípu na teplote a koncentrácie látky, preto sa nahrádza kapacitnými snímačmi. Vodivostné snímače sú vhodnejšie pre tzv. bodové sledovanie výšky hladiny (rozmiestnenie niekoľkých snímačov po zvislici – kvázispojité snímanie) a indikujú zvýšenie vodivosti pri ponorení elektród príslušného snímača pod hladinu. Použitie tohoto princípu nie je možné v priestoroch s nebezpečím výbuchu.

Vibračné snímače výšky hladiny sú určené na nespojité (limitné) sledovanie výšky. Indikujú dotyk s hladinou kvapaliny (kmitajúca vidlička) alebo sypkého materiálu (kmitajúca tyč) rozladením („vypadnutím") z pracovnej frekvencie elektromagnetického oscilátora vhodného tvaru, ktorý je utlmený prítomným materiálom.

Elektromechanický princíp (obr. 9.14.) merania výšky je pre mnohé aplikácie nenahraditeľný pre svoju mimoriadnu robustnosť. Na meranie sa používa závažie (plavák), ktoré sa na lane elektromechanicky spúšťa do zásobníka. Pri dotyku závažia s meranou látkou sa odľahčí závesné lano a na základe signálu, napr. zo snímača sily, sa zmení smer otáčania navíjacieho motora. Odvinutá dĺžka lana predstavuje mieru pre výšku kvapaliny alebo sypkej hmoty v zásobníku. Princíp je vhodný do veľkých zásobníkov s výškou až do 50 m v ťažkých pracovných podmienkach. Vďaka precíznemu riadeniu navíjania a odvíjania lana sa dosahujú presnosti až 0,5 %.



10 MERANIE

10.1 Základn

Požiadavky na r
činnosti, napr. v pol
v chemickom priemys
procesoch, napr. aj
významný parameter
naopak prebytok má
prebiehajúcich technol
plynov boli spracovane
najmä ***snímače vlhkost***
Mnohé z nich však už
odozvy. Z tohto dôvod
ktoré okrem už spomer
z hľadiska obsluhy a pre

Najviac snímačov j
meracie členy vlhkosti t
ktorý sa rieši individuáln

Na meranie vlhkosti
látok, napr. zmena elek
vlhkosti sú založené na al
merania vlhkosti tuhých
univerzálnu.

Najpoužívanejšie veličiny

Absolútna vlhkosť je de
v určitom objeme vzduchu

H_{abs} = hmo

10 MERANIE VLHKOSTI

10.1 Základné pojmy

Požiadavky na meranie vlhkosti sa vyskytujú prakticky vo všetkých odboroch ľudskej činnosti, napr. v poľnohospodárstve, meteorológii, klimatizácii, pri sušení, v medicíne, v chemickom priemysle, v energetike a v mnohých ďalších výrobných a technologických procesoch, napr. aj pri výrobe polovodičových súčiastok. Z toho plynie, že vlhkosť je významný parameter v priemyselných a potravinárskych odvetviach a jej nedostatok alebo naopak prebytok má často väčší vplyv na stratu materiálu, poruchy zariadení a kvalitu prebiehajúcich technologických procesov, ako ktorýkoľvek iný parameter. Pre meranie vlhkosti plynov boli spracované mnohé, dnes už klasické metódy, z ktorých sa v súčasnosti uplatňujú najmä ***snímače vlhkosti plynov, kvapalín a pevných látok s elektrickým výstupným signálom***. Mnohé z nich však už nevyhovujú rastúcim požiadavkám na presnosť, ale hlavne na rýchlosť odozvy. Z tohto dôvodu sa stále častejšie nahrádzajú ***senzormi*** (miniaturizácia, integrácia), ktoré okrem už spomenutých predností umožňujú vytvoriť aj jednoduchšie meracie systémy z hľadiska obsluhy a prevádzky (najmä vyhotovenia ISS).

Najviac snímačov je určených na sledovanie vlhkosti vzduchu a plynov, menej časté sú meracie členy vlhkosti tuhých látok. Meranie vlhkosti kvapalín je veľmi špecifický problém, ktorý sa rieši individuálne, podľa povahy problému.

Na meranie vlhkosti, najmä plynov, sa využívajú niektoré povrchové vlastnosti vhodných látok, napr. zmena elektrického odporu alebo kapacity, preto prvky vhodné na indikáciu vlhkosti sú založené na absorpcii vody (vodnej pary) do povrchových vrstiev snímača. Problém merania vlhkosti tuhých látok je zložitejší, pretože žiadnu metódu nemožno považovať za univerzálnu.

Najpoužívanejšie veličiny z oblasti merania vlhkosti vzduchu

Absolútna vlhkosť je definovaná ako hmotnosť vody (vodnej pary), ktorá je obsiahnutá v určitom objeme vzduchu

$$H_{abs} = \text{hmotnosť vody / objem vzduchu} \quad [kg.m^{-3}, \text{častejšie } g.m^{-3}]$$

Saturačná vlhkosť predstavuje maximálnu hmotnosť vody, ktorá môže byť obsiahnutá v určitom objeme vzduchu pri danej ***teplote*** a ***tlaku***. Pri meraní vlhkosti atmosferického vzduchu možno vo väčšine prípadov zmeny barometrického tlaku zanedbať a považovať tento tlak za konštantný, potom

$$H_{sat}(T) = \text{max. hmotnosť vody / objem vzduchu} \quad [kg.m^{-3}, \text{častejšie } g.m^{-3}]$$

Relatívna vlhkosť udáva pomer absolútnej a saturačnej vlhkosti vyjadrený v percentách

$$H_{rel}(T) = H_{abs} / H_{sat}(T) \cdot 100 \quad [\%] \tag{10.1}$$

Teplota, pri ktorej platí

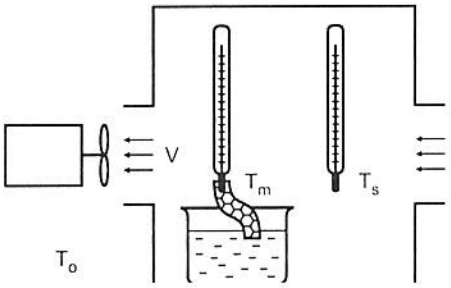
$$H_{abs} = H_{sat}(T) \tag{10.2}$$

sa nazýva ***rosný bod.***

Pri poklese teploty vzduchu pod hodnotou rosného bodu nadbytočná voda kondenzuje vo forme rosy alebo hmly.

10.2 Psychrometer

Psychrometrická metóda je založená na meraní teplôt v prostredí vlhkého vzduchu dvoma teplomermi. Jeden z nich, tzv. ***suchý teplomer*** meria teplotu okolitého vzduchu T_s. Druhý, tzv. ***vlhký teplomer***, je trvalo zvlhčovaný vodou z nádobky prostredníctvom tenkého prúžku sacej textílie (pančuška). Voda z povrchu textílie a vlhkého teplomera sa odparuje, preto teplota blízkeho okolia je znižovaná výparným teplom vody. Preto údaj T_m je nižší ako teplota T_s. Rozdiel teploty medzi suchým a vlhkým teplomerom ***(psychrometrický rozdiel)*** je tým väčší, čím nižšia je relatívna vlhkosť vzduchu, pretože odparovanie z textílie je potom intenzívnejšie. Psychrometrický rozdiel závisí okrem vlhkosti vzduchu aj od jeho tlaku, a najmä od rýchlosti prúdenia vzduchu v okolí vlhkého teplomera. Vplyv zmien barometrického tlaku vzduchu sa pri praktických meraniach obvykle zanedbáva. Rýchlosť prúdiaceho vzduchu zvyšuje psychrometrický rozdiel, avšak pri rýchlosti nad 2,5 $m.s^{-1}$ hodnota psychrometrického rozdielu saturuje.

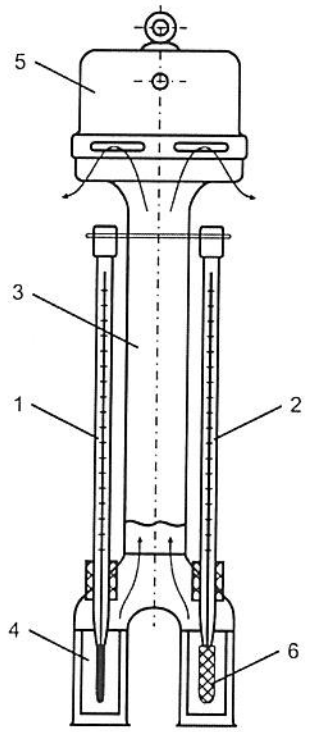


rýchlosť prúdenia sa n
psychrometer, ktorý je
Psychrometrická
vzduchu, pretože kal
predstavuje jednoduch
sa používajú na kalibrá
o teplote okolitého vz
vlhkosť vzduchu, príp
psychrometra je jeho
s vodou a malý ventilát
pre automatizačné úče
vyhotovení ISS. Teplot
pripojeného mikropočíta
Príklady klasického
psychrometrov sú na obr

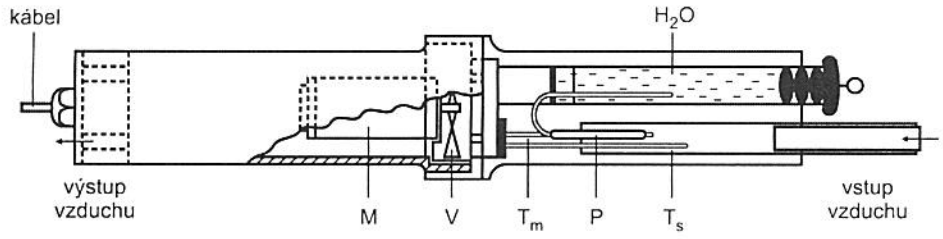
rýchlosť prúdenia sa nemusí merať a stabilizovať. V tomto prípade sa jedná o tzv. ***Assmannov psychrometer***, ktorý je schopný dosiahnuť relatívnu chybu merania (1 až 2) %.

Psychrometrická metóda je považovaná za jednu z ***najpresnejších metód merania vlhkosti vzduchu***, pretože kalibrácia psychrometra spočíva len v kontrole dvoch teplomerov, čo predstavuje jednoduchú metrologickú úlohu s dostatočnou presnosťou. Prenosné psychrometre sa používajú na kalibráciu prevádzkových vlhkomerov. Psychrometer navyše poskytuje aj údaj o teplote okolitého vzduchu a výpočtom možno určiť okrem relatívnej vlhkosti aj absolútnu vlhkosť vzduchu, prípadne rosný bod, hmotnosť vodnej pary, atď. Hlavnou nevýhodou psychrometra je jeho pomerne komplikovaná mechanická konštrukcia obsahujúca nádobku s vodou a malý ventilátor, čo znamená, že tento merací systém nie je vhodný v takejto zostave pre automatizačné účely. V súčasnosti sú už k dispozícii aj číslicové psychrometre vo vyhotovení ISS. Teplota sa meria senzormi Pt a psychrometrická tabuľka je uložená v pamäti pripojeného mikropočítača.

Príklady klasického a senzorového vyhotovenia (vhodné pre automatizačné úlohy) psychrometrov sú na obr. 10.2 a 10.3.



Obr. 10.2. Laboratórny psychrometer
1 - suchý teplomer, 2 - mokrý teplomer, 3 - rúrka,
4 - tieniace puzdro, 5 - ventilátor, 6 - pančuška



Obr. 10.3. Psychrometrický merací člen (*M* - motorček vetráčika *V*, T_m - mokrý senzor teploty, T_s - suchý senzor teploty, *P* - vlhčená pančuška)

10.3 Metóda merania rosného bodu (kondenzačná)

Podstata metódy merania rosného bodu spočíva v stanovení teploty vody (jej povrchu), pri ktorej sa vytvorí dynamická rovnováha medzi množstvom, ktoré sa vyparuje z povrchu a množstvom molekúl vodnej pary, ktoré na tento povrch dopadá z okolitého plynu. Ak je známa teplota rosného bodu vzdušného prostredia, potom sú známe aj H_{abs} a $H_{sat}(T)$, a ak sa meria aj teplota prostredia, potom možno jednoduchým výpočtom určiť aj $H_{rel}(T)$ (rov. 10.1 a 10.2). ***Teplota rosného bodu*** týchto vlhkomerov sa určuje tak, že sa najprv ochladzuje pracovný povrch snímača (napr. kovové zrkadielko) tak dlho, až sa na jeho povrchu vytvorí kondenzát. V tomto okamihu sa chladenie preruší a snímač sa začne zohrievať. Meria sa teplota, pri ktorej sa kondenzát objavil a zasa zanikol. Aritmetický priemer týchto teplôt sa potom považuje za teplotu rosného bodu. Teplota zrkadielka sa reguluje tak, aby hrúbka vrstvy kondenzátu bola konštantnej hodnoty. Na zvýšenie objektívnosti merania sa častejšie postupuje tak, že po dosiahnutí rovnováhy na zrkadielku sa teplota naďalej znižuje a určí sa teplota, pri ktorej sa začne vrstva kondenzátu zväčšovať. Potom sa teplota zvyšuje a zistí sa jej hodnota, ktorá zodpovedá začiatku zmenšovania vrstvy kondenzátu. Stredná hodnota týchto dvoch teplôt sa považuje za ***teplotu rosného bodu***. Je zrejmé, že v tomto prípade sa meria teplota rovnovážneho stavu medzi kvapalinou a parou, a preto je toto meranie presnejšie, ako keď sa meria teplota rovnovážneho stavu medzi kovom (zrkadielkom) a kvapalinou. Pri nízkych teplotách meraného prostredia je požadovaná podobná presnosť merania teplôt, ako pri vyšších teplotách, čo je ***hlavná výhoda oproti psychrometrickej metóde***. Meranie teploty s presnosťou 0,1 až 0,2 K postačuje pre kladné aj záporné teploty prostredia.

Objektívne meranie teploty rosného bodu je možné jedine automaticky pracujúcimi prístrojmi. Je to vlastne uzatvorený regulačný obvod, ktorého principiálna bloková schéma je na obrázku obr. 10.4.

Regulačný obvod obsahuje tieto časti:

- regulovaná sústava – plocha, na ktorej dochádza ku kondenzácii; z hľadiska regulácie je to riadený objekt,
- chladiace, vyhrievacie teleso – akčný člen,
- teplotný snímač (senzor) na meranie teploty rosného bodu,

- snímač konde
- regulátor tepl

Obr. 10.4. Princíp za

Ako pracovný prvok vlh
materiálu, ktorá je zohri
vrstva kondenzátu. Detek

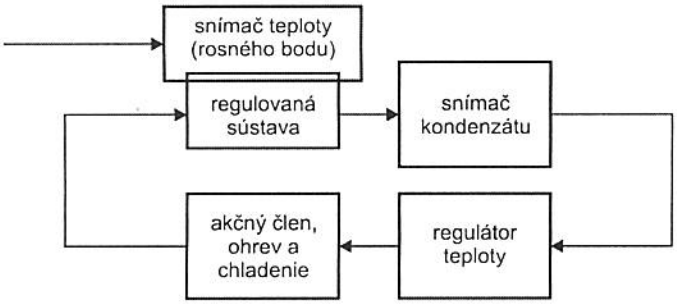
- fotoelektrický,
- vodivostný (ko
- radiačný.

Pri fotoelektrickej detekc
tak, aby sa lúč odrážal na
svetla, čo sa sleduje cez pi
Vodivostná metóda spoč
z dielektrického materiálu
povrchového odporu.
Pri radiačnej detekcii je p
Zarosenie zrkadielka je
vyžarovaného z povrchu.
Metóda merania rosného b

- dostatočná presn
- dostatočná presn
- malá časová konš
- jednoduchá kalibr

K nevýhodám patrí nevyhn
presnosť klesá so stúpajúc
prejaví pri 100 % relatívnej

- snímač kondenzátu,
- regulátor teploty.



Obr. 10.4. Princíp zapojenia automaticky riadeného prístroja na meranie teploty rosného bodu

Ako pracovný prvok vlhkomeru sa používa doštička z kovu (zrkadielko) alebo z dielektrického materiálu, ktorá je zohrievaná, resp. ochladzovaná tak, aby sa na jej povrchu udržovala stála vrstva kondenzátu. Detektor kondenzátu býva

- fotoelektrický,
- vodivostný (konduktometrický),
- radiačný.

Pri fotoelektrickej detekcii je zrkadielko vyleštené do vysokého lesku osvetľované žiarovkou tak, aby sa lúč odrážal na fotoelektrický článok. Zarosením zrkadielka poklesne intenzita odrazu svetla, čo sa sleduje cez prúdový výstup z fotoelektrického článku.

Vodivostná metóda spočíva v tom, že namiesto kovového zrkadielka sa používa doštička z dielektrického materiálu, najčastejšie skla. Moment zarosenia sa prejaví prudkým poklesom povrchového odporu.

Pri radiačnej detekcii je povrch zrkadielka pokrytý tenkou vrstvou rádioaktívneho materiálu. Zarosenie zrkadielka je sprevádzané podstatnou zmenou intenzity žiarenia α alebo β vyžarovaného z povrchu.

Metóda merania rosného bodu je charakterizovaná niektorými výhodami

- dostatočná presnosť aj pri nízkych teplotách,
- dostatočná presnosť aj pri nízkych relatívnych vlhkostiach,
- malá časová konštanta i pri nízkych teplotách a malých relatívnych vlhkostiach,
- jednoduchá kalibrácia.

K nevýhodám patrí nevyhnutné zariadenie na ochladzovanie pracovného prvku, a tiež to, že presnosť klesá so stúpajúcou relatívnou vlhkosťou. Preto sa najväčšia chyba tejto metódy prejaví pri 100 % relatívnej vlhkosti vzduchu.

10.4 Sorpčné snímače vlhkosti

Sú založené na zmene fyzikálno-chemických vlastností materiálov v závislosti na rovnovážnom stave absorpcie (pohlcovanie plynnej alebo kvapalnej látky povrchovou vrstvou inej látky) a desorpcie (uvoľňovanie molekúl plynu viazaných tuhou alebo kvapalnou látkou) molekúl vody z alebo do vodnej pary. Patria sem napríklad známe vlhkomery s deformačným citlivým prvkom (vlasové a blanové), ale hlavne moderné senzorové vodivostné a kapacitné prvky.

10.4.1 Vlasový vlhkomer

Hlavným reprezentantom dilatačných vlhkomerov je vlasový vlhkomer. Ako citlivý prvok sa používa napr. odmastený ľudský vlas, ktorý je schopný zmeniť dĺžku až o 2,5 % pri zmene relatívnej vlhkosti z 0 % na 100 %. Závislosť zmeny dĺžky na relatívnej vlhkosti je približne logaritmická a možno ju vyjadriť vzťahom

$$\Delta l = k \cdot T \cdot \log \varphi$$

kde k je konštanta,
T absolútna teplota,
φ relatívna vlhkosť vzduchu.

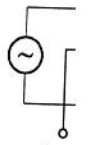
Pri meraní by nemal byť vlasový vlhkomer vystavený relatívnym vlhkostiam pod 15% a nad 95%, pretože by mohlo dôjsť k nevratnému posunu prevodovej charakteristiky. Rovnako je nutné dodržať teplotný rozsah vlhkomeru od - 20°C do 70°C. Pri nízkych teplotách je odozva vlhkomeru príliš pomalá, pri vysokých teplotách môžu vlas napádať rôzne huby a plesne. Pri skokovej zmene z 20 % na 40 % relatívnej vlhkosti dosiahne 90% ustálenej hodnoty vlhkomer približne za 8 minút, pri skokovej zmene z 40 % na 80 % asi za 3,5 minúty. Hodnoty platia pre teplotu okolo 22 °C v smere sorpcie (smer zvyšovania vlhkosti). V opačnom smere (desorpcia) dôjde k ustáleniu asi za 30 minút pri teplote okolo 20°C. Vhodnou úpravou vlasového vlhkomeru možno prevodovú charakteristiku linearizovať.

Pre uvedené nedostatky je vlasový vlhkomer nevhodný pre priemyselné využitie, ako aj pre využitie v automatickom riadení. V súčasnosti sa používa už len na orientačné merania vlhkosti vzdušného prostredia, napr. v laboratóriách.

10.4.2 Absorpčný elektrolytický vlhkomer

Táto metóda je založená na schopnosti látok udržovať svoju vlhkosť v rovnováhe s vlhkosťou okolitého prostredia. Vlastný senzor tvorí tenkostenná sklenná alebo keramická rúrka s navlečenou sklenenou tkaninou. Tkanina je nasýtená vodným roztokom LiCl (chlorid

lithny) a do nej sú votka
Pt. Elektródy sú napájan
až na teplotu, pri ktorej
skupenstvo, tj. odparen
ochladzovaniu roztoku z
stáva opäť vodivým a
vyhodnocuje Pt sníma
termodynamických záko
hranica teploty rozsahu
teplotou vzduchu. Horná



Pt (

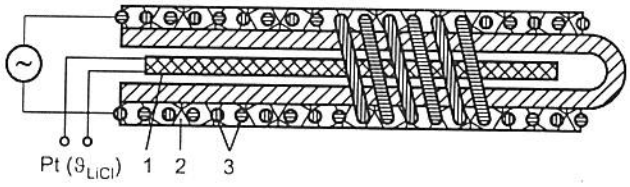
Pri meraní relatívnej
rovnovážnej teploty ešte
snímačom teploty. Po sp
informácia aj o hodnote re
člen má pomerne malú časo

Ob
VB - v

10.5 Mikroelektro

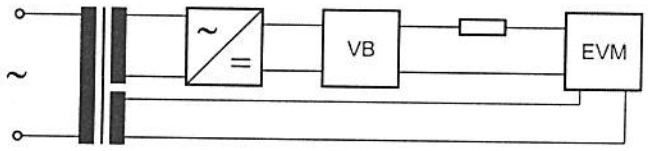
Neustála miniaturizácia
v tejto oblasti. Senzory vlhl
látkach, a to v absolútnej ale

lithny) a do nej sú votkané dve platinové elektródy. Vo vnútri rúrky je odporový teplomer typu Pt. Elektródy sú napájané zo striedavého zdroja a prúd pretekajúci elektrolytom zohrieva roztok až na teplotu, pri ktorej dochádza k rýchlemu poklesu vodivosti roztoku (pri vzniku soli, pevné skupenstvo, tj. odparenie vody), a tým k zmenšeniu prechádzajúceho prúdu a opätovnému ochladzovaniu roztoku za súčasnej absorpcie vodných pár z meraného plynu. Roztok sa takto stáva opäť vodivým a celý cyklus sa opakuje. Teplota soli ϑ_{LiCl} v pevnom skupenstve sa vyhodnocuje Pt snímačom umiestneným vo vnútri rúrky, a z nej potom podľa termodynamických zákonov ***teplota rosného bodu***. Presnosť merania dosahuje 1 %. Spodná hranica teploty rozsahu merania je daná podmienkou, aby rovnovážna teplota ležala nad teplotou vzduchu. Horná hranica merania vyplýva z konštrukcie a býva okolo 60 °C.



Obr. 10.5. Schéma vlhkomeru LiCl
1. Pt snímač
2. sklenná tkanina
3. elektródy

Pri meraní relatívnej vlhkosti vzduchu elektrolytickým vlhkomerom je nutné merať okrem rovnovážnej teploty ešte aj teplotu vzduchu. Pre tento účel je prístroj doplnený ďalším snímačom teploty. Po spracovaní údajov zo snímačov je na výstupe z meracieho člena informácia aj o hodnote relatívnej vlhkosti. Presnosť takéhoto merania je okolo 2 %. Merací člen má pomerne malú časovú konštantu.



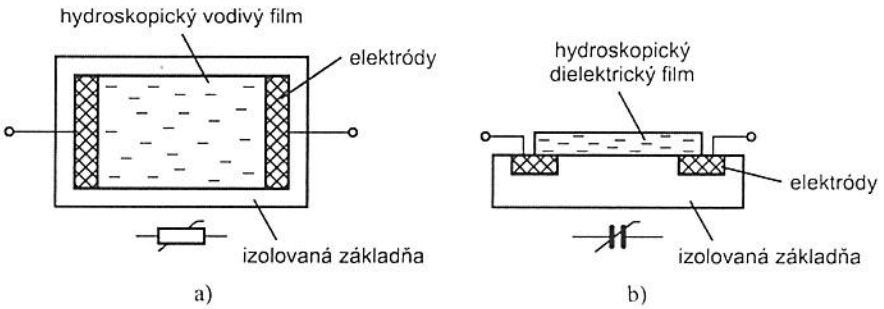
Obr. 10.6. Zapojenie elektrolytického vlhkomeru
VB - vyhodnocovací blok, EVM - elektrolytický vlhkomer

10.5 Mikroelektronické senzory vlhkosti

Neustála miniaturizácia vedie k vývoju miniaturizovaných a integrovaných senzorov aj v tejto oblasti. Senzory vlhkosti merajú množstvo vody v plynoch, vo vzduchu a pevných látkach, a to v absolútnej alebo relatívnej vlhkosti. Najviac senzorov vlhkosti je založených na

absorbcii vody do povrchu aktívnej látky lebo povrchové fyzikálne vlastnosti, hlavne elektrická impedancia a kapacita, sú funkciami vlhkosti obsiahnutej napr. v plynnom okolí.

Príklad konštrukcie senzorov vlhkosti je na obr. 10.7, funkcia senzorov vychádza z elektrických vlastností materiálov.



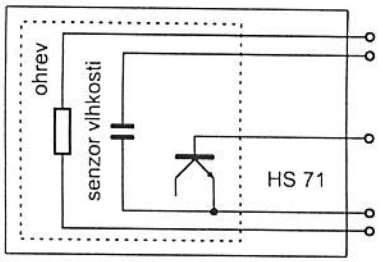
Obr. 10.7. Základné typy senzorov vlhkosti
a) typ s vodivou vrstvou
b) kapacitný senzor

10.5.1 Vodivostný senzor vlhkosti

Senzor na obr. 10.7*a* využíva závislosť elektrickej vodivosti (odporu) sorpčného materiálu, tj. hygroskopického filmu, na obsiahnutej vlhkosti. Rast vlhkosti je zvyšovaný množstvom absorbovanej vody v materiále, ktorý zmenšuje odpor tenkej vrstvy medzi elektródami. Staršie typy týchto senzorov mali vytvorenú vodivú vrstvu z ionických hydrátovaných solí (napr. LiCl), novšie typy používajú hygroskopické polymery (napr. oxid zirkonia). Vo všeobecnosti platí, že vodivosť sa zvyšuje približne exponenciálne so zvyšovaním relatívnej vlhkosti. Senzory sú väčšinou doplnené odporovou linearizačnou sieťou. Hysterézia medzi prevodovými krivkami pri náraste a poklese vlhkosti je vyššia pri týchto typoch senzorov, pohybuje sa v rozmedzí 2% až 10 %. Teplotné koeficienty sú tiež relatívne vysoké (5 % .°C^{-1}). Z tohto dôvodu sa vyžaduje ***teplotná kompenzácia*** senzorového systému. Ďalšou požiadavkou tohto typu je ***nevyhnutnosť striedavého napájania***, aby sa zabránilo polarizácii elektród.

Príklad vodivostného senzora s teplotnou kompenzáciou a s integrovanými podpornými obvodmi je na obr. 10.8. Vlastné riešenie je v podobe hybridného integrovaného obvodu. Senzor sa skladá z dvoch elektród, medzi ktorými je tenká vrstva Al_2O_3, ktorá ovplyvňuje vodivosť senzora. Jej zmena sa upravuje meracím prevodníkom na unifikovaný napäťový alebo prúdový signál v percentách relatívnej vlhkosti. Základné technické parametre odpovedajú hodnotám:

- merací rozsah (0,1 až 100) % relatívnej vlhkosti,
- chyba merania – lepšia ako ± 2 °C rosného bodu,
- časová konštanta – menšia ako 2 sek. ,
- pracovná teplota (- 30 až + 50) °C.



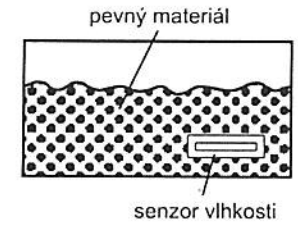
Obr. 10.8. Vodivostný senzor vlhkosti s integrovanými podpornými obvodmi

10.5.2 Kapacitný senzor vlhkosti

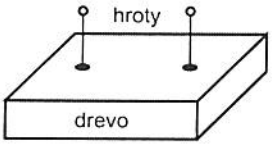
Väčšina kapacitných senzorov je riešená na princípe klasického kondenzátora, obr. 10.7*b*. Medzi dve kovové elektródy je umiestnené dielektrikum, ktoré mení vlastnosti v závislosti od absorbovanej vlhkosti. Zmena kapacity reprezentuje zmenu vlhkosti dielektrika. Integrovaný merací člen obsahuje napríklad kapacitný senzor vlhkosti s absorpčným filmom MgF_2, ktorý tvorí jeho dielektrikum. Je to vlastne kapacitná štruktúra vhodná na realizáciu štandartnou CMOS technológiou s jedným technologickým krokom naviac. Vyhodnocovanie informácie o zmene kapacity, a tým aj o zmene vlhkosti prostredia, sa rieši veľmi často pomocou astabilného multivibrátora s modulovanou frekvenciou od kapacity senzora.

10.5.3 Senzory vlhkosti pevných látok

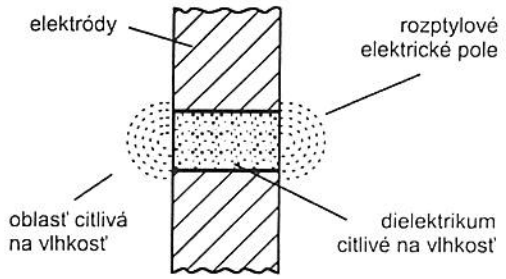
Na obr. 10.9 sú naznačené niektoré princípy merania vlhkosti pevných látok. Prvý charakterizuje „vloženie" senzora do objemu meraného materiálu. Iný uvádzaný princíp reprezentuje meranie vodivosti medzi elektródami vpichnutými do sledovaného materiálu, napr. drevenej dosky v závislosti od vlhkosti látky. Posledná naznačená metóda merania vlhkosti je založená na zmenách dielektrických vlastností látky obsahujúcej vodu. Merná vodivosť a dielektrická konštanta (kapacita) sa menia s vlhkosťou.



a)



c)



b)

Obr. 10.9. Niektoré princípy merania vlhkosti pevných látok
a) senzor pre pevné látky
b) kapacitný senzor
c) vodivostný senzor

11 INTELIGE

Inteligentné ale
prostriedkov v oblas
diagnostické a autoka
Ich uplatnenie v a
tj. funkčných a spoľah

V krátkosti sa
charakterizovať ako
senzorov a ich systén
prevládajú čo do mno
k *inteligentným senzo*
vlastností i z pohľadu u

11.1 Inteligent

Inteligentný senzo
charakterizovaný *prí*
autokalibračnými funk
Výhody inteligentných
kvality (dokonalejšie zl
funkčných vlastnosti, v
v efektívnejšej činnosť
funkcií. Keďže výstupné
poskytujú aktuálnu, presr
tým podstatne *urýchľujú*

11.1.1 Úlohy primá

Okrem zosilnenia v
implementované najmä tie

- linearizácia prev
- selektívny výber
- redukcie namera
- korekcie vzhľado
- korekcie dynamic
- nepriame meranie
- základná analýza

11 INTELIGENTNÉ MERACIE ČLENY V AUTOMATIZÁCII

Inteligentné alebo smart automatizačné prvky predstavujú kvalitatívne novú triedu prostriedkov v oblasti automatizácie vzhľadom na ich schopnosti spracovania informácií, diagnostické a autokalibračné funkcie a číslicovú komunikáciu so svojim technickým okolím. Ich uplatnenie v automatizačných prostriedkoch prináša zásadné zvýšenie úžitkových, tj. funkčných a spoľahlivostných parametrov týchto prostriedkov.

V krátkosti sa dá súčasný stav na procesnej úrovni, na jej informačnej strane, charakterizovať ako nutná ***kombinácia klasických a inteligentných meracích členov***, či senzorov a ich systémov (obr. 2.1). Tento stav je determinovaný tým, že štandardné prvky prevládajú čo do množstva (konzervativizmus, cena, a pod), ale vývoj jednoznačne smeruje k ***inteligentným senzorovým systémom*** pre ich nesporné prednosti z hľadiska funkčných vlastností i z pohľadu užívateľa.

11.1 Inteligentné senzorové systémy

Inteligentný senzorový systém (ISS, obr. 2.28) je vlastne autonómny číslicový systém charakterizovaný ***primárnym spracovaním informácií*** (PSI), ***diagnostickými*** a ***autokalibračnými funkciami***, ako aj ***riadením prenosu komunikácie prvku ISS s okolím***. Výhody inteligentných meracích členov (senzorových systémov) spočívajú v zlepšení ich kvality (dokonalejšie zhodnotenie prirodzených signálov zo snímačov-senzorov, zlepšenie funkčných vlastnosti, vyššia spoľahlivosť, menšia zaťaženosť komunikačného systému) a v efektívnejšej činnosť číslicového (lokálneho alebo totálneho) centra z hľadiska riadiacich funkcií. Keďže výstupné údaje z inteligentného meracieho člena sú primárne predspracované, poskytujú aktuálnu, presnú a spoľahlivú, tj. tzv. „čistú" informáciu o stave riadeného procesu a tým podstatne ***urýchľujú realizáciu riadiaceho algoritmu***.

11.1.1 Úlohy primárneho spracovania informácií v ISS

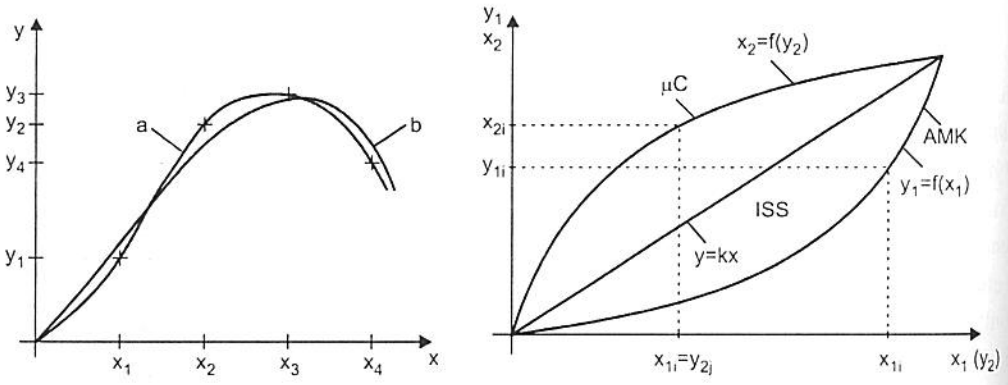
Okrem zosilnenia výstupného signálu senzorového prvku a AD prevodu sú do ISS implementované najmä tieto funkcie PSI:

- linearizácia prevodových charakteristík,
- selektívny výber frekvencie meraného signálu, filtrácia,
- redukcie nameraných údajov,
- korekcie vzhľadom na poruchové veličiny,
- korekcie dynamických chýb,
- nepriame meranie, výpočty a prepočty,
- základná analýza časových postupností údajov,

- sledovanie hraničných hodnôt meraných i prevádzkových veličín,
- autodiagnostika a autokalibrácia,
- interná a externá číslicová (analógová) komunikácia.

Vzhľadom k pomerne rozsiahlemu súboru funkcií, budú v ďalšom texte stručne uvedené len niektoré z nich.

Prirodzenou vlastnosťou väčšiny snímačov je nelineárna prevodová charakteristika. ***Linearizácia*** tejto charakteristiky sa v ISS v zásade realizuje číslicovo, i keď snaha výrobcov je potlačiť nelinearitu už v analógovej časti meracieho kanála. Podstatne dôležitejšie je v ISS zabezpečiť stálosť analógovej časti, tj. vysokú reprodukovateľnosť (opakovateľnosť) meracieho kanála. Na obr. 11.1 je naznačený postup linearizácie prostredníctvom inverznej prevodovej charakteristiky, ktorú je nutné aproximovať v číslicovej časti ISS vhodnou metódou. Ak ide o aproximáciu interpoláciou medzi bodmi prevodovej charakteristiky, ktoré sú napr. výsledkom štatistického spracovania nameraných hodnôt prevodovej charakteristiky analógovej časti snímača alebo získané precíznym meracím prístrojom, je na to vhodný ***Newtonov interpolačný polynóm*** alebo ***splajnová interpolácia***. Pri tejto aproximácii prevodovej charakteristiky meracieho člena sa rešpektujú body *(póly, uzly)*, tj. aproximačná funkcia nimi prechádza.

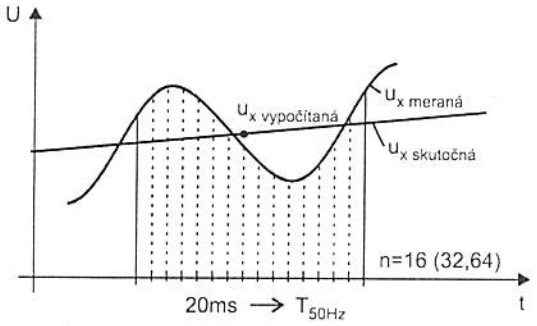


a) rešpektovanie bodov prevodovej charakteristiky
b) nerešpektovanie bodov prevodovej charakteristiky

Linearizácia prevodovej charakteristiky v ISS
x - meraná veličina, y - výstupná veličina,
AMK - analógový merací kanál, μC - mikropočítač

Obr. 11.1. Aproximácia a linearizácia

Väčšina analógových signálov zo snímačov je zaťažená šumom a rušením. Na ich potlačenie v ISS sa používa buď ***filtrácia*** pomocou aktívnych alebo pasívnych analógových filtrov v analógovej časti bloku AD prevodníka alebo číslicová filtrácia. Často sa využíva aj filtračná schopnosť integračného AD prevodníka. Ukážka špeciálneho číslicového filtra vhodného pre ISS na potlačenie periodického rušenia *(typicky 50 Hz)* spočíva vo výpočte aritmetického priemeru z hodnôt navzorkovaných počas jednej periódy rušivého signálu, obr. 11.2. Metóda je náročná na presnosť časovania, vyžaduje vhodne rýchly AD prevodník a prácu bez prerušenia činnosti mikropočítača pri zbere údajov. Použitie číslicového filtra v ISS je obmedzené časovou náročnosťou na jeho realizáciu a úrovňou použitej aritmetiky v mikropočítačovom systéme, preto sa v ISS používa len za predpokladu, že po jeho vykonaní zostáva dostatok času na realizáciu ostatných požadovaných funkcií v rámci doby vzorkovania meranej veličiny.



Obr. 11.2. Špeciálny filter sieťového šumu realizovaný v ISS

V prípade, že je známy ***vplyv poruchových veličín*** na meranú veličinu a dá sa popísať analyticky, je možné ich vplyv jednoducho v ISS vykompenzovať výpočtom. Tento prípad však v praxi nie je príliš častý, a preto sa vplyv poruchových veličín na merací proces určuje spravidla experimentom. Po zistení a aproximácii závislostí *(náročná časť, použitie regresnej analýzy)* sa potom kompenzuje vplyv poruchových veličín už len jednoduchými aritmetickými operáciami v číslicovej časti ISS.

Pri číslicovom spracovaní informácií sa vzorkovaním analógového signálu získa časový rad údajov, ktorý je často charakterizovaný ich nadbytočnosťou. Tento jav vzniká najmä uplatnením Shannonovho pravidla pri voľbe doby vzorkovania. Preto je často vhodné pristúpiť k ***redukcii údajov***, tj. vytvoreniu novej postupnosti s menším počtom údajov z pôvodnej časovej postupnosti. Redukcia údajov je dôležitá najmä preto, že znižuje nároky na kapacitu pamäte pre ich uchovanie a skracuje dobu potrebnú na prenos a spracovanie údajov. V rámci primárneho spracovania informácií v ISS sa rieši najčastejšie bezprostredná redukcia údajov počas ich získavania. Možnosť adaptívneho vzorkovania vstupného spojitého signálu sa v procesných aplikáciách nevyužíva pre svoju zložitosť. Jednoduché a rýchle metódy sú založené na predikcii alebo interpolácii. Prediktory a iterpolátory na redukciu údajov sú spravidla polynomického typu nultého alebo prvého stupňa.

11.1.2 Diagnostika a autokalibrácia v ISS

Pod pojmom ***technická diagnostika*** (TD) sa vo všeobecnosti uvažujú metódy a prostriedky sledovania technického stavu objektov bezdemontážnymi a nedeštrukčnými postupmi na základe vyhodnocovania ich vonkajších prejavov. Základné metódy TD reprezentujú najčastejšie testy funkčnosti objektu. Podstatne zriedkavejšie sa na diagnostiku využívajú sledovania fyzikálnych prejavov charakterizujúcich technický stav diagnostikovaného objektu, ako napr. sledovanie stavu opotrebovania ložísk zariadenia pomocou generovaného chvenia. Prvoradou úlohou TD je zistiť ***poruchu a jej druh***. Kvalitnejšie diagnostické systémy dokážu poruchu aj ***lokalizovať***.

Na to, aby bolo možné riešiť úlohy diagnostiky v číslicových zariadeniach, je potrebné v týchto systémoch vytvoriť vhodné technické i programové prostriedky. V oblasti technických prostriedkov ide najmä o meracie prvky diagnostických veličín, ktorých hodnoty sú potom spracované programovým vybavením vo vzťahu k diagnostickým parametrom (ukazovateľom).

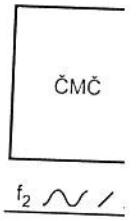
Vnútorná (prevádzková) diagnostika realizuje diagnostické testy v krátkych časových intervaloch a bez technických a organizačných prestojov. Podmienkou je, že diagnostické zariadenie je súčasťou diagnostikovaného systému. ***Vonkajšia*** (servisná) diagnostika je charakterizovaná prídavným, prenosným diagnostickým zariadením. Spolu s diagnostikou objektu často býva spojená aj funkcia kalibrácie alebo autokalibrácie príslušného prvku prípadne jeho časti.

Niektoré typické úlohy diagnostiky v meracích systémoch, konkrétnejšie v ISS, sú reprezentované úlohami:

1. Kontrola správnej činnosti číslicovej časti ISS, tj. diagnostické hodiny alebo tzv. Watch Dog – WD, generovanie stavového signálu.
2. Diagnostické testy pri inicializácii ISS:
   a) číslicová časť:
      - testy internej a externej pamäti údajov RWM (napr. krížové zápisy, presluchy, ...),
      - testy pamäte RWM so zálohovaným zdrojom napájania a zachovaním pôvodných údajov,
      - testy pamäte programu EPROM, ROM (napr. kontrolný súčet),

   b) pripojené periférie:
      - kontrola stavu meracích kanálov (skrat, prerušenie),
      - test AD prevodníka,
      - kontrola stavu ďalších dôležitých prvkov ISS.
3. Diagnostické testy počas činnosti ISS, ktoré sa aktivujú najčastejšie v pravidelných intervaloch a sú reprezentované niektorými z už uvedených testov, čiže vyhodnocujú aktuálny stav najmä pripojených periférií *(meracie kanály, AD prevodník, atď.)*. Tieto testy obsahujú aj ďalšie diagnostické činnosti podľa špecifických požiadaviek.

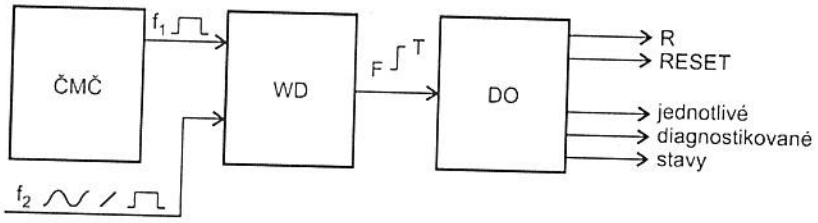
Diagnostické hodi
čase. Zabezpečujú
postupnosť na obr
číslicovej časti sen
generuje impulzy s f
časť ČMČ prestane
hodnotu (maximálnu
logický signál TRU
udávajúci informáciu
na štruktúre a funk
diagnostikovaného s
systému v poruche.



Obr. 1

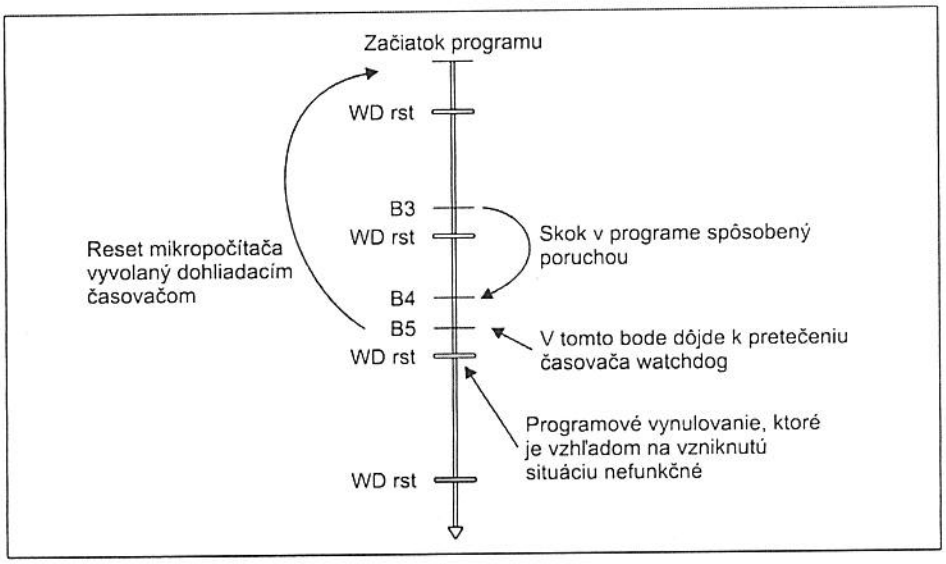
Na časovom diagram
dohliadacieho časovač
„odvedený" z bodu B
stavu, preto sa obsah
maximálnu hodnotu a
nastavenie by prišlo ne

Diagnostické hodiny (WD) sú súčasťou každého číslicového systému pracujúceho v reálnom čase. Zabezpečujú kontrolu správneho chodu programu. Ich činnosť charakterizuje časová postupnosť na obr. 11.4. Funkčná bloková schéma diagnostického dohliadacieho obvodu číslicovej časti senzorového systému je na obr. 11.3. Číslicový merací člen ***programovo*** generuje impulzy s frekvenciou f_1, ktoré nastavujú počítadlo WD. Ak z nejakej príčiny číslicová časť ČMČ prestane korektne nastavovať počítadlo WD, toto sa dostane na svoju extrémnu hodnotu (maximálnu alebo minimálnu) v závislosti od frekvencie f_2 a WD zmení na výstupe logický signál TRUE na FALSE. Dohliadací obvod poruchy DO vygeneruje stavový vektor udávajúci informáciu o stave ČMČ, resp. celého systému. Výstupný vektor má tvar v závislosti na štruktúre a funkcii diagnostikovaného objektu. Stavový signál R udáva celkový stav diagnostikovaného systému *(True/False)* a jednotlivé diagnostikované stavy určujú prvky systému v poruche.



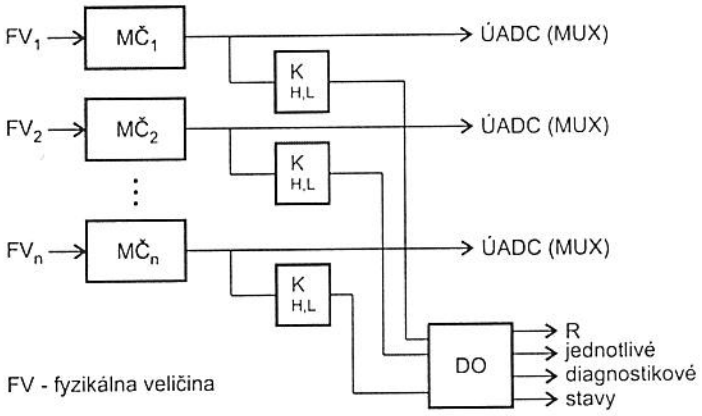
Obr. 11.3. Bloková schéma Watch Dog-u číslicového meracieho člena

Na časovom diagrame (obr. 11.4) body WD rst naznačujú programovo obnovovaný stav dohliadacieho časovača (jeho nastavovanie). Napríklad, dôsledkom poruchy je chod programu „odvedený" z bodu B3 do bodu B4. Tým sa vynechalo jedno nastavenie WD do východzieho stavu, preto sa obsah počítadla stále napr. inkrementuje. V bode B5 jeho obsah dosiahne maximálnu hodnotu a počítadlo generuje signál RESET mikropočítača, lebo jeho ďalšie nastavenie by prišlo neskoro *(za bodom B5)*.



Obr. 11.4. Činnosť obvodu WD

Veľmi častou a dôležitou diagnostikou v ISS je ***kontrola prerušenia***, resp. ***skratu vedení*** medzi meracím prevodníkom a samotným snímačom. Diagnostika sa uplatňuje najmä na signálne vodiče, ale v odôvodnených prípadoch sa uvažujú aj napájacie prívody. Princíp je založený na sledovaní niektorého parametra meracieho kanála pomocou dohliadacieho obvodu DO. Na obr. 11.5 je znázornená principiálna schéma diagnostiky prerušenia alebo skratu vedenia prostredníctvom kontroly elektrického odporu samotného vedenia.



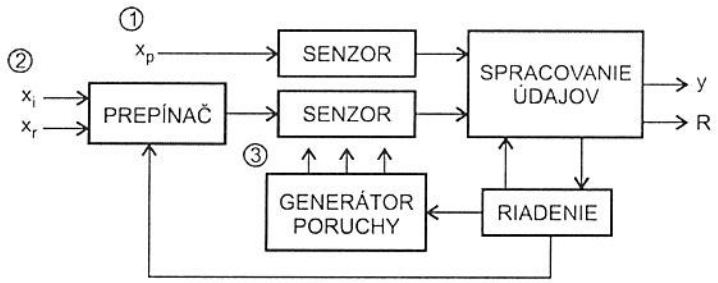
Obr. 11.5. Kontrola stavu prívodných vedení v ISS

Komparátor K porovnáva impedanciu vedenia s určitými preddefinovanými referenčnými hodnotami (H – high, L – low). Ak impedancia vedenia nespadá do daného rozsahu, komparátor nastaví na výstupe odpovedajúcu logickú hodnotu, ktorá je ďalej spracovávaná v dohliadacom

obvode na stavový vektor meracieho kanála. Výstup komparátora môže byť tvorený viacerými signálmi na rozlíšenie typu poruchy.

Poruchové vplyvy prejavujúce sa v meracom člene alebo kanáli majú charakter buď deterministický, potom korekcia ich vplyvu je riešená ***korekčným výpočtom*** alebo sú to vplyvy neformalizovateľné, prípadne neznáme, ktorých korekcia si vyžaduje ***autokalibráciu*** niektorej časti ISS. Do prvej skupiny patria už spomínané faktory: nelinearita, hysterézia, popísateľná teplotná závislosť, atď. V druhej skupine sú to hlavne časový a teplotný drift, nestabilita prvkov a obvodov, krátkodobé zlyhanie alebo preťaženie niektorého prvku a pod. Pre úlohy autokalibrácie v ISS sa používajú v zásade tri metódy:

1) meranie poruchovej veličiny a jej kompenzácia,
2) autokalibrácia pomocou pripojenia referenčného signálu,
3) autokalibrácia cestou podporného signálu generovaného v samotnom prvku, ktorý je diagnostikovaný pomocou generátora poruchy GP.



Obr. 11.6. Autokalibráčné metódy v ISS

Na obr. 11.6 sú blokovo uvedené všetky tri metódy. V prvom prípade sa predpokladá, že vplyv meranej poruchovej veličiny x_p je analyticky vyjadrený vzhľadom k meranej veličine x_i a je potlačený korekčným výpočtom v bloku spracovania a upravením výstupného signálu y. Vplyvy nedeterministických porúch pôsobiacich v meracom kanáli procesnej veličiny x_i sú kontrolované pravidelnou diagnostickou procedúrou *(pripojenie referenčného signálu x_r)*, a v prípade potreby korigované autokalibračnou funkciou MK v jeho číslicovej časti.

Tretí spôsob možno priblížiť príkladom merania teploty v aktívnej časti jadrovej elektrárne, kde sa vyžaduje diaľková kontrola stavu snímača a prípadná autokalibrácia meracieho kanálu. Snímač je doplnený technickými prostriedkami na generovanie definovanej poruchy v jeho okolí, napr. tepelný impulz presne rozložený v čase. Po realizácii tejto poruchy sa sleduje priebeh výstupného signálu a podľa potreby sa upravia prenosové konštanty meracieho kanála v číslicovej časti spracovania signálu v porovnaní s pôvodnými hodnotami.

11.2 Komunikácia na procesnej úrovni a ISS

Aplikáciou číslicovo riadených prvkov do riadiacich systémov na ich rôzne úrovne sa vzhľadom k ich efektívnej spolupráci presadili požiadavky na ich vzájomnú komunikáciu. Už v súčasnosti v priemyselných aplikáciách prislúcha najväčší podiel práce (aj ceny) nie na centrálne spracovanie informácií, ale na periférne inteligentné senzorové a akčné prvky. Z týchto dôvodov vznikol projekt priemyselných zberníc s názvom ***Fieldbus***, ktorý reprezentuje časť „nervového systému" distribuovaného riadenia (DCS) na prevádzkovej úrovni. Jeho úlohy možno zhrnúť do pojmov: obojsmerné číslicové sériové prepojenie prvkov v prevádzkovom prostredí, zabezpečenie prenosu informácií v reálnom čase na procesnej úrovni a možnosť komunikačného prepojenia procesnej časti na vyššiu úroveň riadenia (vlastnosti podľa modelu ISO/OSI). Priemyselná zbernica Fieldbus prináša hlavne tieto výhody :

- distribúcia inteligencie a zásadné ovplyvnenie štrukturálnej spoľahlivosti DCS,
- zásadné zníženie nákladov na kábelové rozvody,
- diaľkové testy a kalibrácie procesných prvkov,
- prenosová nádväznosť na vyššie úrovne riadenia (ISO/OSI, MAP, TOP),
- svetový normovaný komunikačný protokol *(zatiaľ nie je akceptovaný v plnej miere výrobcami)*.

Priemyselná zbernica musí zabezpečovať efektívnu a spoľahlivú činnosť v reálnom čase. Základné parametre tejto zbernice sú: maximálna dĺžka, počet adresovateľných zariadení, rýchlosť, spôsob napájania a spotreba, bezpečnosť (elektrická) a cena. V súčasnosti sú používané hlavne normované protokoly pre firemné a národné siete typu Fielbus, napr. Nemecko – Profibus, Francúzsko – FIP, USA – Fieldbus Foundation (FF), aj keď už bola prijatá medzinárodná norma IEC 61158 (šesť komunikačných protokolov pre priemyselné číslicové zbernice) a európske normy EN 50 170 (Profibus) a EN 50 254. Pre menej náročné aplikácie vzhľadom na prostredie, rozľahlosť a spoľahlivosť prenosu alebo vzhľadom na umiestnenie v rámci procesnej úrovne sú použiteľné zbernice typu CAN, Lon Works, Interbus S, a pod.

Informáciu o meranej procesnej veličine generujú ISS vo forme unifikovaného signálu (4 až 20) mA vzhľadom k chýbajúcemu uznávanému celosvetovému normovanému komunikačnému protokolu. V prípade, že riadiaci systém dodáva jeden alebo niekoľko združených výrobcov, existuje možnosť využiť číslicovú komunikáciu na prevádzkovej úrovni podľa firemného alebo národného protokolu.

Číslicová komunikácia, najmä pre obslužné funkcie ISS, môže byť realizovaná komunikačným protokolom HART *(Highway Adressible Remote Transducer)*, ktorý pracuje s frekvenčne modulovaným signálom na prúdovom výstupnom signáli. HART protokol reprezentuje vlastne medzičlánok, ktorý umožňuje preklenúť obdobie medzi „len" analógovou a „len" číslicovou komunikáciou na procesnej úrovni. Zobrazenie a modifikácia prevádzkových parametrov, voľba podporných funkcií s možnosťou ich modifikácií a testovanie prvku ISS je

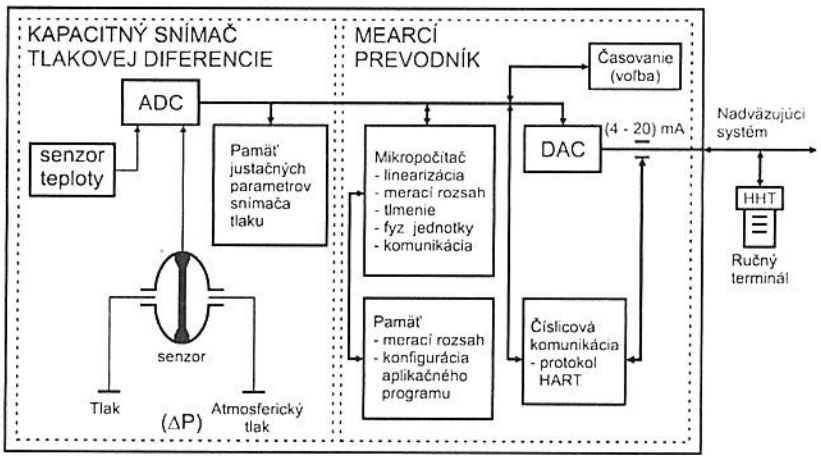
možné priamo pomocou ručného HHT terminálu *(Hand Held Terminal)*, prípadne z vyššej úrovne riadiaceho systému.

11.3 Vlastnosti ISS štandardných procesných veličín

ISS ako nová generáciu prístrojov a zariadení automatizačnej techniky naznačuje, že v súčasnosti sa prejavuje výrazná kvalitatívna zmena v oblasti použiteľných prvkov automatizačných prostriedkov. Pre užívateľov a projektantov majú prvky typu ISS najmä tieto prednosti:

- špičkové metrologické vlastnosti, napr. presnosť lepšia ako 0,1 %,
- úspora procesných prvkov pre predspracovanie signálov, inteligentné prvky realizujú matematické, logické, nespojité, ale už aj spojité riadiace funkcie,
- integrovaná forma umožňuje úpravu, ktorá zabezpečuje výborné vlastnosti pre EEx prevedenie (EEx d IIC T6), imunitu EMC a krytie minimálne IP 65, *(pozri kap. 12)*,
- flexibilita procesných veličín, parametrov a funkcií podstatne zjednodušuje práce pri projektovaní riadiacich systémov,
- zmeny parametrov a funkcií sa realizujú za prevádzky napr. prostredníctvom HHT terminálu alebo z vyššej riadiacej úrovne,
- zásadná úspora káblov (dvojvodičové vyhotovenie), káblových nosičov, konektorov a inštalačných prvkov,
- zásadné zníženie nákladov na diagnostické prístroje (vlastná vnútorná diagnostika a autokalibrácia), automatická tvorba dokumentácie pri revíznych kontrolách.

Okrem klasických meracích členov všetci renomovaní výrobcovia meracej techniky rozšírili svoj výrobný sortiment aj o inteligentné prvky procesnej informatiky. Vo väčšine prípadov ide o najdôležitejšie procesné veličiny ako je teplota, tlak, prietok, poloha a pod. Vhodný príklad predstavuje prevádzkový inteligentný merací člen tlaku a tlakovej diferencie, obr. 11.7. Merací člen má presnosť merania lepšiu ako 0,1 % nastaveného meracieho rozsahu, ktorý možno meniť v hodnotách od 1:1 až do 1:15 maximálneho rozsahu. V samotnom senzorovom systéme sa okrem kapacitného senzora tlaku nachádza aj senzor teploty na potlačenie poruchovej veličiny merania, analógovo-číslicový prevodník a energeticky nezávislá pamäť pre uloženie kalibračných koeficientov senzorového systému. Výmena údajov sa uskutočňuje cez systémovú zbernicu, ktorá zabezpečuje komunikáciu medzi prvkami v senzorovej a elektronickej časti meracieho člena. Informácia o procesnej veličine (tlak, tlaková diferencia) sa prenáša na vyššiu úroveň prúdovým signálom (4 až 20) mA. Číslicová komunikácia pre obslužné funkcie je realizovaná komunikačným protokolom HART.



Obr. 11.7. Bloková schéma ISS tlaku a tlakovej diferencie, Smart Transmitter 3051 CG firmy ROSEMOUNT

Zobrazenie a modifikácia prevádzkových parametrov, voľba podporných funkcií s možnosťou ich modifikácií a testovanie meracieho člena je možné pomocou ručného HHT terminálu, prípadne z prevádzkovej úrovne riadiaceho systému. Inteligentný merací člen vykonáva nepretržite diagnostiku a autokalibráciu svojich pracovných častí. Pri rozpoznaní nekorigovateľnej chyby systém upraví výstupný prúdový signál na definovanú hodnotu mimo jej základný rozsah (tesne pod 4 mA alebo nad 20 mA), čím sa generuje informácia o poruche.

11.4 Súčasné trendy rozvoja senzorovej techniky

Ďalší rozvoj automatizácie v rôznych oblastiach ľudskej činnosti, monitorovanie životného prostredia a mnohé ďalšie aktivity vyžadujú presné a rýchle meranie rôznych neelektrických fyzikálnych veličín, analýzy plynov alebo merania na biologických objektoch. Preto v oblasti senzorovej techniky dochádza k prudkému vývoju prvkov a systémov, ktorý ovplyvňuje takmer všetky technické odbory. ***Vývojové tendencie ISS*** možno charakterizovať ako cielený rozvoj ich architektúry na zvýšenie celkovej inteligencie, ale súčasne na ***zvýšenie inteligencie*** aj každého prvku reťazca ***senzor – spracovanie signálu***.

Jeden z dôležitých smerov vývoja architektúry ISS vedie k aplikáciám tzv. homogénnych a heterogénnych senzorových polí, ktoré sa uplatňujú najmä v mikromechanických, chemických a biologických systémoch. Výhodou týchto štruktúr je zväčšenie informačného obsahu signálu z poľa senzorov, zlepšenie pomeru signál/šum a využitie nových metód v oblasti číslicového spracovania signálov *(Sensor Signal Processing)*.

Zvyšovanie inteligencie prvého článku meracieho reťazca umožňujú nové úpravy materiálov na atomárnej a molekulárnej úrovni, čím vznikajú materiály s ovládateľnými elektrickými, magnetickými, mechanickými a optickými vlastnosťami. Vývoj v obvodoch pre primárne spracovanie signálov zo senzorov možno charakterizovať orientáciou najmä na

miniaturizáciu a súč
analógových signálo
úspešne používajú pr
strane sa intenzívne p
typu ASIC vhodných
častejšie princíp sigm
štruktúru. Miniatúrne
ľahkú implementáciu
metrologických vlastr
pravdepodobne budú
kapacitu pamäte.

Súčasné senzoro
vyššou vzorkovacou fr
určených na spracova
inteligentné zhodnoter
umelej inteligencie, a t
systémov.

miniaturizáciu a súčasne integráciu do monolitických integrovaných obvodov. Spracovanie analógových signálov je obmedzované na nevyhnutné minimum. V prvkovej základni sa úspešne používajú programovateľné univerzálne obvody pre spracovanie signálov, na druhej strane sa intenzívne pracuje na vývoji programovo rekonfigurovateľných zákazkových obvodov typu ASIC vhodných pre ISS. Na prevod AD v integrovaných štruktúrach sa uplatňuje stále častejšie princíp sigma-delta modulácie pre svoje výborné metrologické vlastnosti a jednoduchú štruktúru. Miniatúrne rozmery integrovaných inteligentných senzorových systémov umožňujú ľahkú implementáciu elektromechanických spätných väzieb používaných na zlepšenie metrologických vlastností celku, ako napr. v mechatronike. Novým stavebným prvkom ISS pravdepodobne budú aj prvky založené na neurónových čipoch pri náročných požiadavkách na kapacitu pamäte.

Súčasné senzorové systémy umožňujú získavať údaje stále jednoduchším spôsobom a vyššou vzorkovacou frekvenciou, čo v konečnom dôsledku reprezentuje veľké množstvo údajov určených na spracovanie. Ich racionálne využitie v reálnom čase je možné len cez ich inteligentné zhodnotenie. Efektívne riešenie týchto problémov sa hľadá v uplatnení metód umelej inteligencie, a to najmä metód fuzzy logiky, neurónových sietí a znalostných bázových systémov.

12 ZVYŠOVANIE SPOĽAHLIVOSTI AUTOMATIZAČNÝCH PROSTRIEDKOV NA PROCESNEJ ÚROVNI

V posledných rokoch vzrástla podstatným spôsobom rozľahlosť automatizovaných, ale aj automatizačných zariadení, zvýšila sa komplexnosť výrobných procesov pri zložitejších prevádzkových podmienkach. Súčasne však vzrástol verejný záujem o spôsob a bezpečnosť prevádzkovania takýchto systémov, čoho dôkazom je napr. jadrová energetika. Odrazom tejto skutočnosti sú moderné automaticky riadené technológie s množstvom bezpečnostne-technických a ekologicky orientovaných úloh, ktoré zaisťujú ***bezpečnosť*** a ***pohotovosť*** daného systému aj pri veľkých tokoch energií a materiálov vo výrobnom procese. Aktuálnosť problému potom charakterizujú ***funkčné vlastnosti*** riadeného i riadiaceho systému (ich kvalita a rozsah), ale aj schopnosť tieto ***funkcie vykonávať za daných podmienok a počas stanovenej doby***, čo možno intuitívne chápať ako problém riešenia spoľahlivosti daného systému. Dôsledok podcenenia významu riešenia spoľahlivosti zariadení sa veľmi často prejavuje tým, že sa vyskytujú výrobky s rôznou zložitosťou s dobrými funkčnými vlastnosťami, ale nevyhovujúcou spoľahlivosťou. Takéto prvky riadeného alebo riadiaceho systému vyžadujú v prevádzke nákladnú údržbu, časté opravy a nakoniec predčasné vyradenie z činnosti pre nerentabilitu, prípadne nízku bezpečnosť prevádzky. Naopak, úspechy pri riešení problematiky spoľahlivosti systémov sa odrážajú v dobrých hospodárskych výsledkoch prevádzkovateľov, z čoho vyplýva, že pri širokej ponuke mnohých firiem riadiacich systémov s podobnými funkčnými vlastnosťami je ich ***spoľahlivosť*** jedným z podstatných parametrov kvality.

Kvalita objektu (prvku, systému) je vo všeobecnosti chápaná ako súhrn vlastností, na základe ktorých je objekt vzhľadom k predpokladanému spôsobu a podmienkam použitia, spôsobilý vykonávať požadovanú funkciu. Najvýznamnejšie skupiny vlastností určujúce kvalitu objektu je vhodné usporiadať podľa ich významu. Sú to *technické a funkčné vlastnosti objektu, spoľahlivá činnosti, materiálová a energetická náročnosť, technologičnosť, estetické, ergonomické a ekologické vlastnosti,* atď. Najdôležitejšie kvalitatívne znaky reprezentujú najmä prvé dve skupiny, tj.:

- znaky funkčné a technické, medzi ktoré patria predovšetkým ***fyzikálno-technické vlastnosti a technické parametre*** objektu,
- vlastnosti prejavujúce sa najmä pri používaní zariadenia v prevádzke; k nim patria najmä ***spoľahlivosť, jednoduchá obsluha a bezpečnosť pri manipulácii.***

Kvalita RS zahŕňa teda najmä jeho požadované funkčné vlastnosti, tj. rozsah a spôsob zabezpečenia úloh automatického riadenia výrobného procesu, jeho technické parametre a tiež jeho systémovú spoľahlivosť a robustnosť.

V súčasnosti, keď jednoznačne prevažujú elektrické (elektronické) automatizačné prostriedky, je veľmi dôležité z hľadiska bezpečnosti výrobných technológií zaistiť vhodným ***IP krytím*** elektrické prvky RS a ***ochranu proti explózii*** v exponovaných výrobných zariadeniach realizáciou potrebných prvkov v triede *Ex* (výbušné prostredia). Rozširovanie

číslicových automatizačných prostriedkov až do najnižších úrovní RS vyžaduje riešiť aj problematiku ***elektromagnetickej kompatibility EMC*** sledujúcej všeobecné vzťahy viacerých spolupracujúcich i nespolupracujúcich systémov, včítane ich vplyvu na ľudský organizmus. Distribuované riadiace a meracie systémy sú na procesnej úrovni súborom číslicových (inteligentných) meracích a akčných členov, číslicových regulátorov, ktoré sa často navzájom ovplyvňujú nežiaducim rušením. Okrem toho, tieto zariadenia pracujú v reálnom priemyselnom prostredí, v ktorom je ich funkcia ovplyvňovaná účinkami elektromagnetického poľa vytváraného prevádzkovými zariadeniami. Snaha o vysokú účinnosť číslicových zariadení vyžaduje ich činnosť s nízkymi energiami, a to aj v oblasti signálov. Preto je dôležité sledovať vzájomné rušivé vplyvy a pri prekročení medzí rušenia stanovených príslušnými normami urobiť vhodné opatrenia. Do tejto oblasti (EMC) spadá aj ochrana prvkov na procesnej úrovni RS a výrobnej technológie pred ***poveternostnými poruchami*** *(napr. blesk)* a ***prepäťovými vlnami*** v rozvodoch a prenosových cestách.

Automatizačné prostriedky sú vo všeobecnosti významným objektom nielen vedecko-technického rozvoja, ale aj jeho účelného usmerňovania prostredníctvom ***technickej normalizácie***. Preto je dôležité poznať zásady normotvornej činnosti v tejto oblasti.

12.1 Automatizované technológie v prostrediach s nebezpečím výbuchu

Koncept každej automatizačnej úlohy musí obsahovať požiadavky na kvalitu riadenia výrobného procesu pri stanovených cieľoch riadenia, čo je reprezentované požiadavkami na funkčné vlastnosti a technické parametre riadiaceho systému pri daných vlastnostiach výrobnej technológie. K týmto požiadavkám sa však stále častejšie pripájajú aj požiadavky na pohotovosť a bezpečnosť výrobného procesu ako celku, ktoré reprezentujú dôležité vlastnosti spoľahlivosti výrobnej technológie. Bezpečnosť riadenia výrobného procesu reprezentuje veľmi dôležitú úlohu pri riešení vhodných vlastností technického systému tak, aby neohrozoval ľudské zdravie, životné prostredie a technologické zariadenie.

V priemyselných prevádzkach ako sú chemické, potravinárske, ale aj v prevádzkach automobilového priemyslu dochádza pri výrobe, transporte alebo skladovaní niektorých látok k úniku pár, plynov alebo zvírených prachov, ktoré v určitej koncentrácii so vzduchom tvoria výbušnú zmes. Takéto prostredia sú klasifikované ako výbušné a z dôvodu ochrany osôb a majetku sú stanovené veľmi prísne predpisy, ktoré klasifikujú prostredia podľa stupňa nebezpečnosti a stanovujú podmienky na inštaláciu elektrických zariadení v nich.

Výbušná atmosféra je definovaná v priestore, v ktorom sa vytvára zmes horľavých plynov, pár alebo prachu so vzduchom alebo iným okysličovadlom v takom zložení, že môže byť privedená k výbuchu zdrojom s dostatočnou energiou (iskra, teplý povrch). Teda, predpokladom vzniku explózie alebo požiaru sú horľavé zmesi spolu so zápalnými zdrojmi. Z tohto dôvodu zvýšenie bezpečnosti technologického zariadenia, a tým zvýšenie jeho spoľahlivosti, spočíva v ochrane proti vzniku uvedených podmienok podporujúcich explóziu.

Pri automatickom riadení týchto prevádzok je nevyhnutné zabezpečiť okrem získania informácií o technologickom procese a generovania akčných zásahov do tohto procesu, aj funkčnosť príslušného elektrického zariadenia tak, aby nezapríčinilo výbuch pri normálnej prevádzke technológie alebo pri jej poruchových stavoch. Preto sa v súčasnosti rozlišuje nasadzovanie elektrických, tj. aj ***automatizačných prostriedkov*** do dvoch druhov prostredí: bezpečných (bez nebezpečia výbuchu - BNV) a nebezpečných (s nebezpečím výbuchu - SNV). Návrh automatizačných prvkov a systémov do nebezpečného prostredia si vyžaduje zvláštny prístup, preto je vhodné zoznámiť sa so základnými zásadami prevádzky automatizovaných technológií v prostrediach s nebezpečím výbuchu.

12.1.1 Klasifikácia nebezpečných prostredí (SNV)

V prevádzkach s nebezpečím výbuchu hodnotí a klasifikuje dané prostredie odborná komisia podľa pokynov vydávaných organizáciami užívateľov, ako je napr. *British Institute of Petroleum* alebo príslušné národné orgány. Výsledkom činnosti komisie je protokol o vlastnostiach horľavej látky vytvárajúcej výbušnú atmosféru a určenie tzv. druhu zóny výbušného prostredia podľa ďalej uvedených kategórií.

Horľavé materiály sa delia do skupín podľa energie iskry, ktorá vyvolá ich vznietenie alebo podľa teploty horúcej plochy spôsobujúcej ich vznietenie. Každé zariadenie pracujúce v nebezpečnom prostredí je navrhované ako bezpečné pre niektorú skupinu plynov.

Triedy plynov, povrchový priemysel:

```
Group IIC: reprezentant: acetylén        najnižšia energia iskry na vznietenie,
                                         najhorľavejší
Group IIC:               vodík
Group IIB:               etylén
Group IIA:               propán          najvyššia energia na vznietenie
```

Prachové zmesi, banský priemysel:

```
Group I: metán (banský plyn)
```

Zariadenia umiestnené v nebezpečnom prostredí musia byť klasifikované podľa ***maximálnej povrchovej teploty***, ktorú môžu dosiahnuť pri normálnej prevádzke alebo pri poruche, pričom užívateľ určuje, či je to bezpečná teplota pre plyny používané v danom procese.

Triedy teplôt sú:

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
max.	450°C	300°C	200°C	135°C	100°C	85°C

Samotné ***nebezpečné prostredia*** sa delia podľa pravdepodobnosti, či a ako dlho sa v nich vyskytne výbušná atmosféra, z čoho potom vyplýva nutnosť použitia príslušnej ochrannej techniky. Sú to tzv. zóny:

Zóna 0: výbušná plynná atmosféra je prítomná nepretržite, alebo sa vyskytuje v dlhých časových intervaloch; predtým platné označenie v ČR a SR bolo SNV3.

Zóna 1: výbušná plynná atmosféra sa môže vyskytnúť pri bežnej prevádzke, SNV2.

Zóna 2: výbušná plynná atmosféra sa pri bežnej prevádzke nevytvorí, ak áno, tak len krátkodobo, napr. pri poruche, SNV1.

Zóna Y & Z: pre prachové prostredia.

12.1.2 Ochranné techniky v prostrediach SNV

Primárna ochrana proti explózii zahrňuje hlavne prvky technologického charakteru (vhodný návrh technológie z hľadiska ochrany pred explóziou), menej často stavebné opatrenia (napr. vetranie), ale aj aktívnu činnosť prvkov riadiacich alebo ochranných systémov (monitorovanie nebezpečných priestorov). To znamená, že primárna ochrana zahrňuje:

- ochranu proti vzniku výbušných atmosfér,
- obmedzenie prípadných (možných) explózií na priestory tlakovo odolné,
- ochranu proti uvoľneniu väčšieho množstva horľavých produktov.

Sekundárna ochrana zahŕňa všetky metódy používané v prostredí s nebezpečím výbuchu podľa normy CENELEC EN 50 014, tj. *Explosion proof* – ***Ex*** (nevýbušné prevedenie). Táto ochrana je charakterizovaná použitím *Ex* prevádzkových prístrojov v technologických zariadeniach, ktoré pracujú v nebezpečných prostrediach, tj. v prostrediach SNV. Najčastejšie používané metódy ochrán *Ex* v automatizovaných prevádzkach s prostredím SNV možno v krátkosti charakterizovať:

Skupina A: Princíp spočíva v zabránení prístupu výbušnej zmesi k častiam, ktoré by ju mohli aktivovať.

Hermetický uzáver (skratka "*m*") je nový spôsob ochrany proti vzplanutiu zaujímavý pre automatizačné prostriedky. Možné zdroje iskry sú uzavreté v zalievacej hmote, preto nemôže dôjsť ku vznieteniu výbušnej atmosféry. ***Vhodné pre zóny 1,2.***

Olejový uzáver (skratka *"o"*) je realizovaný tým, že elektrické zariadenie alebo jeho časť je ponorená v oleji, tak aby výbušná atmosféra, ktorá môže byť prítomná nad olejom alebo mimo uzáver, nemala k elektrickým častiam prístup. ***Vhodné pre zónu 1.***

Pretlakový uzáver (skratka *"p"*) je charakteristický tým, že elektrické prevádzkové prostriedky sú vložené do tuhého telesa, v ktorom sa ochranným plynom (vzduch alebo dusík) udržiava nepatrný pretlak, a tak sa zabraňuje vniknutiu výbušnej atmosféry do tohto priestoru. Pretlakový uzáver môže vytvoriť ochranu proti výbuchu aj pre rozsiahlejšie zariadenia. V tomto prípade je vhodná kontrola vnútorného pretlaku, ktorá rieši odpojenie zariadenia od elektrického napájania pri napr. výpadku zdroja ochranného plynu. ***Vhodné pre zóny 1,2.***

Skupina B: Ochrana nebráni prístupu výbušnej zmesi k častiam, ktoré by ju mohli zapáliť, ale znemožňuje rozšírenie prípadného výbuchu do okolia.

Pieskový uzáver (skratka *"q"*) predstavuje uzáver zariadenia zaplnený materiálom s jemným granulometrickým zložením (napr. pieskom) tak, aby v predpokladaných prevádzkových podmienkach nemohlo prísť ku vznieteniu okolitej atmosféry, napr. pri vzniku oblúka vo vnútri uzáveru elektrického zariadenia. Táto metóda je často používaná pre prvky akčného podsystému RS (výkonové prvky). ***Vhodné pre zóny 1,2.***

Tlakový uzáver (skratka *"d"*), ktorý má význam pre akčné členy vyžadujúce väčšie množstvo energie na svoje ovládanie. Označenie môže viesť k nedorozumeniu. Tlakový uzáver udáva, že elektrické prevádzkové prostriedky sa vkladajú síce do tlakuvzdorného, ale nie celkom tesného kovového krytu. Nevylučuje sa pritom, že výbušná atmosféra vnikne do telesa a zapáli sa na vnútorných elektrických častiach. Teleso je dimenzované tak, že sa nemôže silne zohriať, pričom spaliny pretekajúce cez výtokovú medzeru sa ochladia expanziou tak, aby neboli schopné vonkajšiu plynnú zmes zapáliť. ***Vhodné pre zóny 1,2.***

Skupina C: Zariadenie je konštruované tak, aby nemohlo dôjsť k elektrickým výbojom schopným zapáliť výbušnú zmes.

Zabezpečené vyhotovenia (skratka ***"e"***) spočíva v zdokonalenej izolácii elektrických častí tak, aby nemohlo dôjsť k prierazu alebo povrchovému výboju. Podobne sa dosiahne zabezpečené riešenie vylúčením iskriacich častí (kontaktov) spolu s dôkladným zabezpečením spojov proti samovoľnému uvoľneniu. ***Vhodné pre zóny 1,2.***

Iskrová bezpečnosť[1] (skratka *"i"*) zabezpečuje ochranu tak, že pri predpísaných podmienkach danou normou sa nevytvárajú ani iskry, ani tepelné účinky, ktoré by boli schopné spôsobiť vznietenie výbušnej plynnej atmosféry. Iskrová bezpečnosť kategórie ***ia*** je jediná možná ochrana pre systémy merania a regulácie ***v zóne 0. Vhodné pre zóny 0,1,2.***

Iné: ***Zariadenie v prostredí s nebezpečím výbuchu neakumulujúce energiu***, tj. nevyžadujúce ochranu. Takéto zariadenia je možné umiestniť a pripojiť do priestoru s nebezpečím výbuchu, pretože nie sú schopné generovať ani akumulovať významné množstvo energie pri prevádzke a ani poruche. Tieto jednoduché zariadenia *(Simple Apparatus)* nesmú na základe údajov od výrobcu prekročiť žiadnu z hodnôt 1,2 V; 0,1 A; 20 μJ; 25 mW. Jedná sa hlavne o spínače, potenciometre, fotočlánky, termočlánky, odporové teplomery a LED diódy.

Kombinácia viacerých techník sa používa pri riešení obtiažneho spôsobu ochrany elektrických zariadení.

Z uvedených ochrán pred explóziou sa v súčasnosti presadzuje v automatizačnej technike najmä ***iskrová bezpečnosť*** pre svoju vysokú účinnosť, jednoduchosť a pomerne nízku cenu. Iskrová bezpečnosť, skrátene *IS (Intrinsic Safety* – vlastná, vnútorná bezpečnosť) je založená na princípe obmedzenia elektrickej energie v obvodoch nachádzajúcich sa v nebezpečnom

[1] *iskrová bezpečnosť*, v tomto prípade ako preklad *Intrinsic Safety*, často používané aj ako všeobecný pojem ochrany pred výbuchom v prostredí SNV

prostredí, takže príp
normálnej prevádzk
Použiteľný užitočný
činnosť väčšiny mo
technika sa však ned

Definované sú dve sk
Ex ia: ochrana
prvkov
Takéto e
predpokl
Ex ib: ochrana
elektrick

Výhody *IS* charakteri
stupňa ochrany pri pc
to, že kalibráciu zar
Napokon, k výhodám
alebo pretlakovým s
ochrannými dielmi).
prenášanej energie, či

12.1.3 Technika

Technika *IS* um
výbuchu bez požiadav
oddeľovacími uzávern
Blok *ROZHRANIE* r
oddeľovacie jednotky,
napr. displeje a multipl

prostredí, takže prípadné iskry alebo horúce povrchy, ktoré by sa mohli vyskytnúť v dôsledku normálnej prevádzky alebo poruchy, sú príliš energeticky slabé na to aby spôsobili vznietenie. Použiteľný užitočný výkon v týchto systémoch je okolo 1 W, ktorý je dostatočný pre spoľahlivú činnosť väčšiny moderných prístrojov a zariadení najmä v oblasti procesného merania. Táto technika sa však nedá použiť pre výkonové zariadenia, napr. pre mnohé akčné členy.

Definované sú dve skupiny *IS* zariadení, ktoré sa líšia stupňom spoľahlivosti:

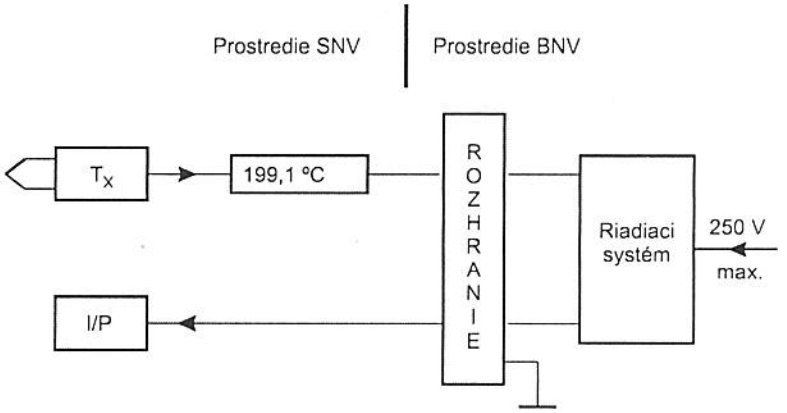
Ex ia: ochrana proti výbuchu je zabezpečená i pri dvoch nezávislých poruchách súčiastok, prvkov alebo subsystémov elektrických zariadení, prípadne iných poruchách. Takéto elektrické zariadenia môžu byť použité ***v zóne 0*** alebo ***k zóne 0*** pripojené za predpokladu, že zariadenie má zodpovedajúce krytie.

Ex ib: ochrana proti výbuchu je zabezpečená pri jednej nezávislej poruche. Tieto elektrické zariadenia môžu byť použité ***v zóne 1*** alebo ***k zóne 1*** pripojené.

Výhody *IS* charakterizuje jej vhodnosť ***pre všetky zóny nebezpečných prostredí***, neznižovanie stupňa ochrany pri poruche zariadenia, zníženie nákladov na inštaláciu, údržbu a opravu, a tiež to, že kalibráciu zariadenia je možné uskutočniť bez prerušenia prevádzky *(pod napätím)*. Napokon, k výhodám patrí aj ľahká manipulácia so zariadením *(oproti napr. pevnému uzáveru alebo pretlakovým systémom, lebo nie je v tomto prípade nutná manipulácia s ťažkými ochrannými dielmi)*. Za základnú nevýhodu tejto ochrany možno považovať obmedzenie prenášanej energie, čiže jej použiteľnosť len pre nízkovýkonové zariadenia.

12.1.3 Technika IS v riadiacich systémoch

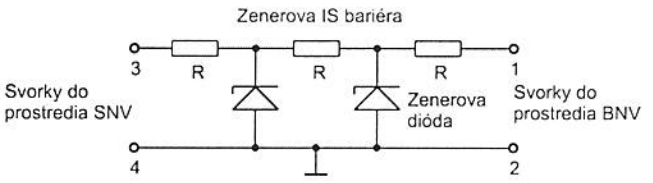
Technika *IS* umožňuje umiestnenie elektrických zariadení do prostredia s nebezpečím výbuchu bez požiadavky fyzického oddelenia elektrickej časti od výbušnej atmosféry rôznymi oddeľovacími uzávermi. Lokalizácia prvkov ochrany *IS* v riadiacom systéme je na obr. 12.1. Blok *ROZHRANIE* reprezentuje vlastné prvky *IS*, najmä Zenerove bariéry a galvanické oddeľovacie jednotky, ktoré môžu byť doplnené prvkami schopnými pracovať priamo v SNV, napr. displeje a multiplexory v *Ex* vyhotovení.



Obr. 12.1. Blokova schéma štruktúry zapojenia prvkov riadiaceho systému s technológiou v nebezpečnom prostredí. *Tx* - snímač teploty, *I/P* - systémový prevodník (4 až 20)mA/(20 až 100) kPa, displej.

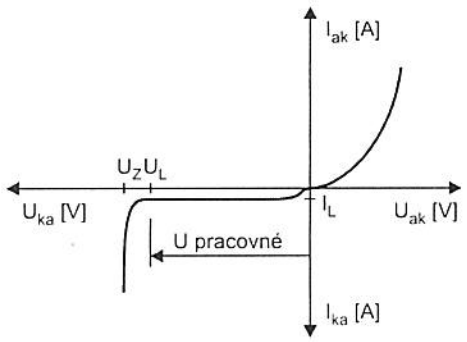
12.1.3.1 Zenerove bariéry

Zenerova bariéra predstavuje jednoduchý elektronický obvod s malým počtom súčiastok navrhnutý tak, aby bol schopný obmedziť napätie a prúd na bezpečnú úroveň v obvode pracujúcom v prostredí SNV. Pre svoju jednoduchosť a cenu sú Zenerove bariéry stále používané, aj keď moderné iskrovo bezpečné meracie prevodníky *(galvanické oddeľovače)* ponúkajú lepšie vlastnosti. Obr. 12.2 charakterizuje elektronické zapojenie jednoduchej Zenerovej bariéry.



Obr. 12.2 Zapojenie jednoduchej Zenerovej bariéry

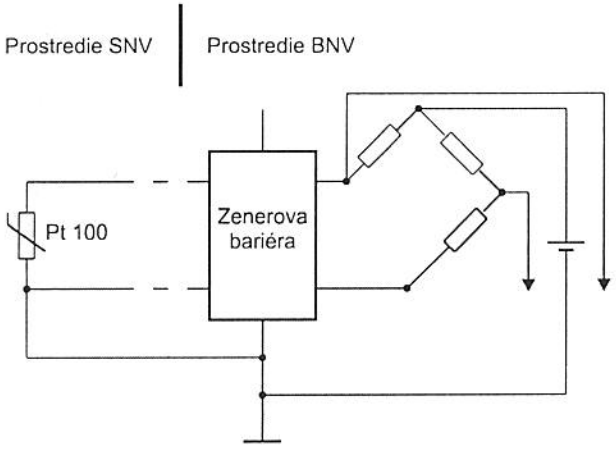
Na svorky *1, 2* sa pripája zariadenie pracujúce v prostredí BNV (bezpečné prostredie) a na



Obr. 12.3. Voltampérová charakteristika Zenerovej diódy

V prípade prekročenia definovaného Zeneroveho napätia U_Z sa vodivo spojí kladný vodič so zemou a zvýšený pretekajúci prúd prepáli tavnú poistku. Podobne, pri prekročení maximálnej úrovne pretekajúceho prúdu obmedzovanú odporom R sa prepáli tavná poistka. V oboch prípadoch sa tak zamedzí prenosu nadbytočnej energie do prostredia s nebezpečím výbuchu.

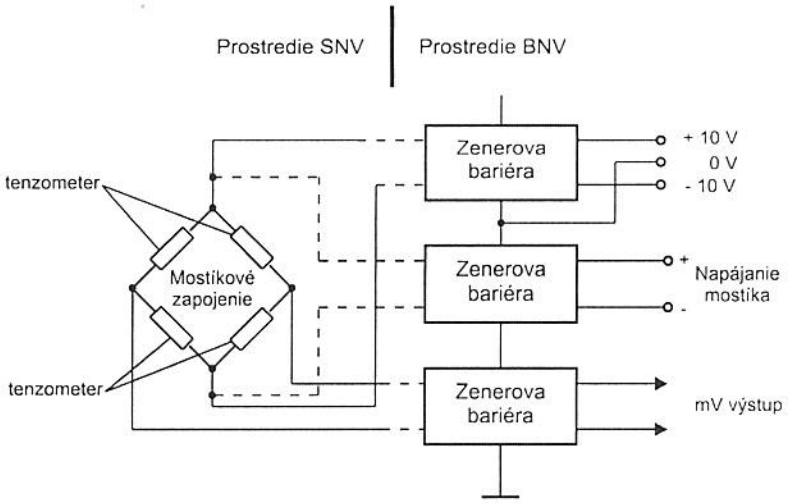
K hlavným nevýhodám Zenerovych bariér patrí to, že neoddeľujú obvody SNV a BNV galvanicky, preto treba počítať (hlavne pri nižšej úrovni signálov a dlhšom vedení) so vznikom rušivých signálov, ktoré môžu dané meranie znehodnotiť. Tento spôsob ochrany tiež vyžaduje kvalitné uzemnenie, kvalitný napájací zdroj. Bariéry zvyšujú odpor v obvode, a tak potláčajú užitočný signál z procesu. Vzhľadom k súčasnej konštrukcii Zenerových bariér (vnútorné obvody zaliate izolačnou hmotou) nie je možná oprava po prepálení tavnej poistky, len výmena bariéry ako celku.



Obr. 12.4 Pripojenie snímača teploty Pt 100 cez Zenerovú bariéru

Príklady použitia Zenerových bariér sú na obr. 12.4 a 12.5. Všetky snímače i ostatné zariadenia vrátane káblov a tienenia musia spĺňať podmienku odolnosti izolácie pre napätia 500 V voči zemi *(odporové snímače teploty obyčajne spĺňajú túto izolačnú podmienku, preto môžu byť pripojené cez Zenerovu bariéru).*

Tenzometre sa veľmi často používajú na meranie tlaku, sily a hmotnosti. Väčšina týchto komerčne vyrábaných prvkov spĺňa izolačnú podmienku, a tak možno na ich pripojenie použiť aj Zenerove bariéry. Základné usporiadanie je na obr. 12.5, kde jedna dvojkanálová bariéra prenáša napájanie, ďalšia vedie nízkoúrovňový informačný signál a pri častej požiadavke vysokej presnosti merania je vhodné pridať aj tretí prvok na kontrolu a udržovanie napájacieho napätia na konštantnej úrovni.

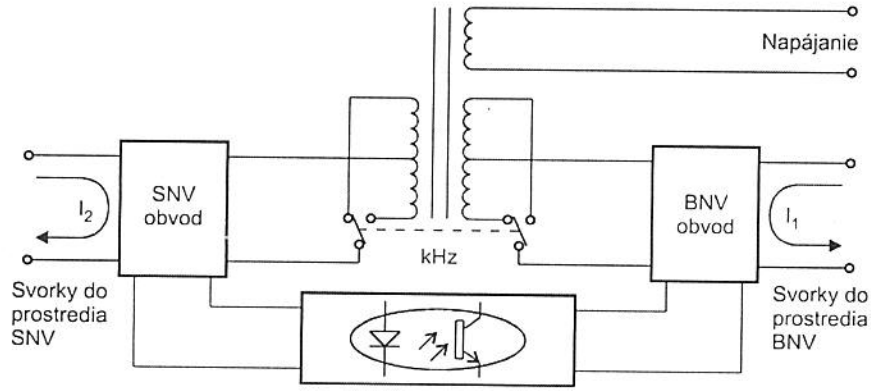


Obr. 12.5. Tenzometrický mostík s tromi Zenerovými bariérami

12.1.3.2 Galvanické oddeľovače

Druhý vývojový stupeň prostriedkov *IS* predstavuje galvanické oddelenie obvodov SNV a BNV. Základná myšlienka je spoločná so Zenerovými bariérami – obmedzenie prenášanej energie do prostredia SNV, len sa používajú rozdielne prostriedky. Galvanické oddeľovače obsahujú buď optočleny (napr. funkcia zapnuté/vypnuté) alebo oddeľovacie transformátory (analógová prevodová funkcia), teda prvky, ktoré galvanicky oddelia prostredie s nebezpečím výbuchu od normálneho prostredia. Takéto riešenie odstraňuje väčšinu negatívnych vlastností Zenerových bariér.

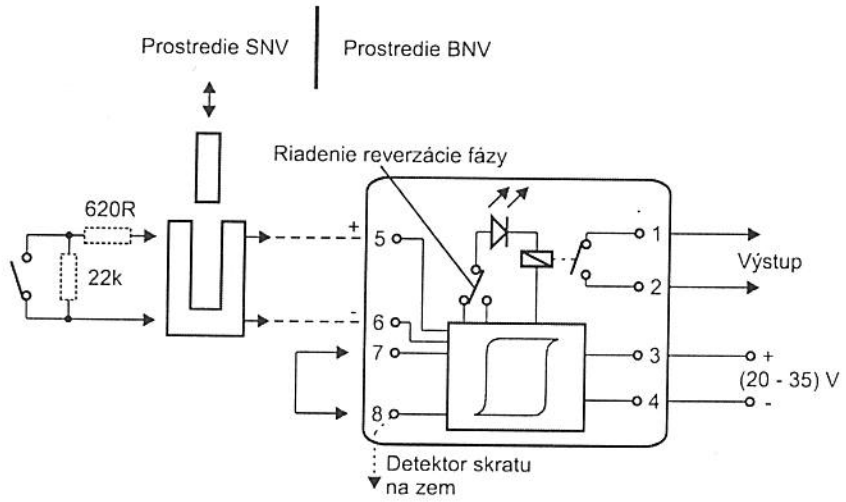
Meraný prúdový signál sa v galvanickom oddeľovači mení na impulzný v modulačnom obvode, vedie sa cez transformátor a v demodulačnom obvode opäť upraví do pôvodného stavu. Takto sú vytvorené dva ekvivalentné, navzájom izolované prúdové signály. Sledovanie bezpečných úrovní signálov sa uskutočňuje v demodulačnom obvode, ktorý obmedzuje výkon signálu na vhodnú úroveň. K popísanému systému môže byť pripojený indikačný optoprvok alebo prvok na prenos impulzného signálu, napr. FSK *(pozri ďalej)*.



Obr. 12.6. Principiálna schéma galvanických oddeľovacích *IS* prevodníkov

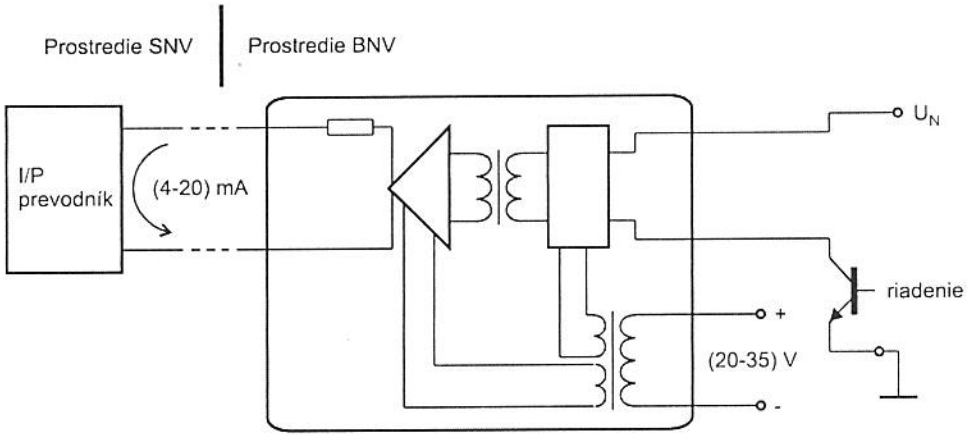
K výhodám galvanických oddeľovačov patrí najmä to, že nevyžadujú zemnenia v jednom mieste, nevyžadujú kvalitný napájací zdroj (galvanické oddeľovače sú osadené vlastným stabilizátorom napätia), rušenie signálov cez spoločnú zem neexistuje a niektoré typy majú elektronickú poistku (obmedzenie prúdu) preto odpadá nebezpečie prepálenia tavnej poistky. Nevýhodou týchto prvkov je požiadavka na externé napájanie, preto ku každému galvanickému oddeľovaču je nutné priviesť okrem signálových vodičov aj napájacie.

Príklady použitia galvanických oddeľovačov sú na obr. 12.7 a 12.8. Prvý charakterizuje spínač s vyššou spoľahlivosťou, tj. bezkontaktný spínač s galvanickou oddeľovacou jednotkou v jednokanálovom zapojení. Pri zapojení bezkontaktného spínača umožňuje galvanická jednotka využiť obvod na detekciu poruchy vedenia LFD (*Line Fault Detection*). V ľavej časti schémy je doplnené použitie tejto jednotky s kontaktným spínačom a potrebnými doplňujúcimi odpormi tak, aby sa dala využiť aj funkcia LFD. Zmena *(obrátenie)* optickej indikácie na jednotke je riešené reverzáciou fázy.



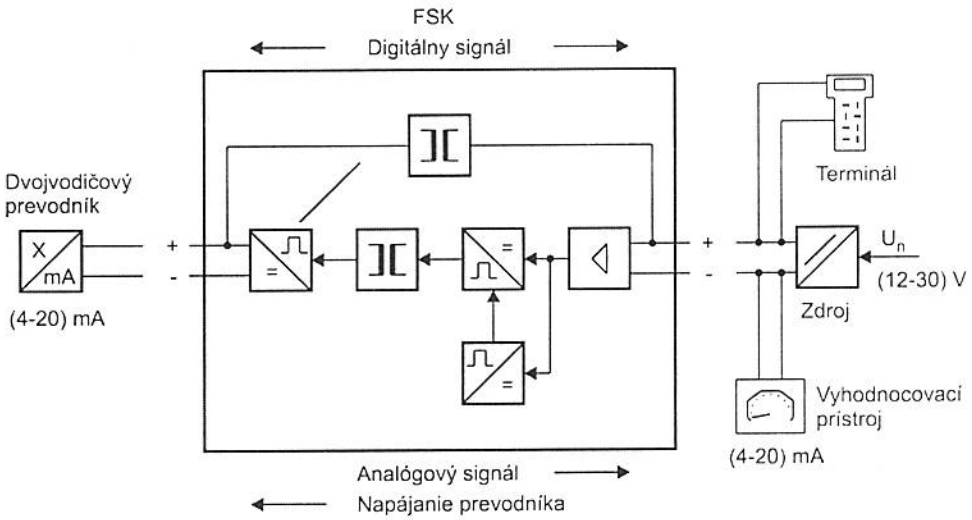
Obr. 12.7. Iskrovo bezpečné relé

Obr. 12.8 naznačuje použitie galvanického prevodníka, ktorý zabezpečuje obvody v prostredí SNV proti skratu na zem, pretože sám je nezávisle napájaný a jeho výstupné napätie je nezávislé na napätí v nadväznom zariadení. Systémový prevodník *I/P* (el. prúd / tlak) predstavuje vhodné riešenie pre energeticky náročnejšie akčné členy.



Obr. 12.8. Iskrovo bezpečný výstup na akčný člen, tj. I/P prevodník

Prenos informácií o nameraných hodnotách procesných veličín pomocou prúdového unifikovaného signálu (4 až 20) mA sa osvedčil v klasickej meracej technike, ale tiež aj v inteligentných meracích systémoch. Pri použití inteligentných prvkov sa po vedení analógového signálu prenáša aj číslicová informácia prostredníctvom signálu FSK *(Frequency Shift Keying)*, ktorý je na prúdovom signále superponovaný.



Obr. 12.9. Principiálna schéma prenosu signálu FSK

Pomocou číslicového signálu možno z úrovne riadenia technologického procesu alebo z ručného terminálu prenášať alebo prijímať aj číslicové informácie, napr. s využitím komunikačného protokolu HART. Preto musia byť prvky *IS* upravené tak, aby boli schopné oddeľovať analógový prúdový signál, ale aj prenášať číslicový signál FSK v oboch smeroch. Galvanický oddeľovací prevodník tohto typu je na obr. 12.9.

Označenie *Ex*-prevádzkových prostriedkov sa skladá z viacerých podskupín číslic a písmen. Napr. označenie *EEx* je podľa EN *(európska norma)* symbol prvku s ochranou proti výbuchu *(Ex v USA)*. V označení nasleduje charakteristika ochrany proti výbuchu *("d", "p", "i", atď.)*, ktorá je doplnená pri druhu ochrany *IS* písmenom *a* resp. *b*, potvrdzujúcim vhodnosť pre zónu 0 alebo 1. Rímskou jednotkou alebo dvojkou sa udáva, či prevádzkový prostriedok zodpovedá ochrane v banskom alebo povrchovom priemysle a ďalšie písmeno popisuje triedu plynu. Posledné písmená charakterizujú teplotnú triedu prístroja *Ex*.
Príklady:

- EEx d IIC T5 – napr. akčný člen s tlakovým uzáverom,
- EEx ia IIC T6 Sitrans P – snímaš tlaku od fy Siemens.

Medzinárodné normy o *IS* (CENELEC EN 50 020 a EN 50 039), spolu s národnými nariadeniami, umožnili vzájomné uznávanie certifikátov pre elektrické prvky typu *Ex* v rámci EU.

12.2 Prepäťové ochrany v obvodoch RS na procesnej úrovni

Moderné systémy s hustou integráciou elektronických súčiastok sú mimoriadne citlivé na elektromagnetickú interferenciu (vplyv rušivých elektromagnetických dejov). Účinky takýchto rušivých vplyvov môžu viesť k zničeniu informačných a technologických systémov, čo vo všeobecnosti spôsobuje veľké škody. Rozširovaním číslicovej techniky v riadiacich systémoch, najmä štruktúr DCS, sa zvyšuje riziko poškodenia tejto techniky prepätiami vznikajúcimi buď atmosférickými poruchami alebo poruchami vo výkonových prvkoch výrobných a riadiacich systémov.

12.2.1 Prepätie a jeho vplyv na elektrické zariadenia

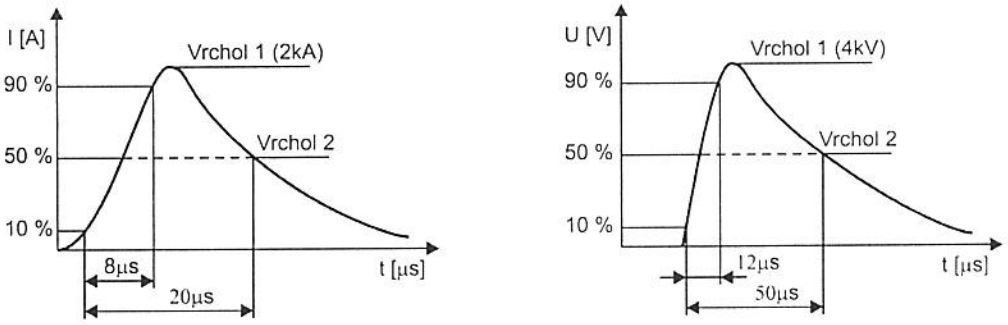
Prepätie patrí k najvýraznejším prejavom elektromagnetickej interferencie. Prepätia sú krátkodobé napäťové impulzy, tzv. *tranzienty*, ktoré trvajú len zlomok sekundy. Dosahujú však hodnoty blízke desiatkam tisíc voltov. Je to vlastne časovo závislé zvýšenie napätia medzi jednou fázou a potenciálom zeme (fázové prepätie) alebo medzi dvoma fázami (medzifázové prepätie) nad najvyššie napätie v sieti. Vyjadruje sa hlavne vrcholovou hodnotou prúdu *(A, kA)* alebo napätia *(V, kV)* a pomernou veličinou charakterizujúcou prúdovú (napäťovú) vlnu pomocou časov $t_{90\,\%}$ a $t_{50\,\%}$. Na obr. 12.10 je znázornená menovitá prúdová vlna s vrcholovou

hodnotou *2 kA* a časovým pomerom *8/20 μsek.* a napäťová vlna *4 kV* a *12/50 μsek.* Odolnosť chráničov a ochrán elektronických zariadení proti prepätiu sa preveruje podľa medzinárodnej normy IEC 801-5. V nej sa klasifikuje odolnosť aplikovaním skúšobných impulzov, ktoré sú delené do štyroch úrovní podľa vrcholových hodnôt napätia na prázdno a prúdu na krátko skúšobného impulzu.

úroveň:	1	2	3	4
napätie (1,2/50) - kV:	0.5	1	2	4
prúd (8/20) - kA:	0.25	0.5	1	2

Hlavnými príčinami vzniku prepätí sú:

- priame údery bleskov,
- nepriame údery bleskov vo vzdialenosti až niekoľkých kilometrov,
- spínacie javy v energetických sieťach,
- rušenie vznikajúce pri spínaní vo vnútorných inštaláciach.



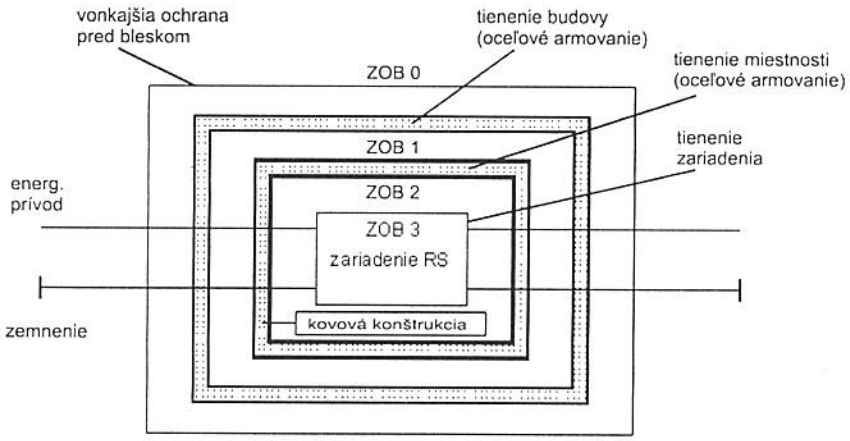
Obr. 12.10. Modely menovitých impulzov, IEC 801-5, štvrtá úroveň

12.2.2 Koncepcia ochrany pred prepätím všeobecne

Súčasťou riešenia elektromagnetickej kompatibility (EMC) je aj ochrana pred bleskom a prepätím, tj. ochrana zariadení pred ich zničením a tiež zvýšenie pravdepodobnosti ich bezporuchovej prevádzky. Vzhľadom k extrémne vysokým hodnotám parametrov ohrozujúcich veličín možno tento cieľ dosiahnuť iba ***kaskádovou ochranou***. Koncepcia zón ochrany proti účinkom blesku je zahrnutá v norme IEC 1312-1. Pojem systému zón ochrany pred bleskom a prepätím klasifikuje nebezpečenstvo pre zariadenia v závislosti od postupného znižovania intenzity impulzu elektromagnetického poľa vyvolaného bleskom alebo iným zdrojom v rôznych priestoroch:

- ***ZBO 0*** – priestory za vonkajšou stenou budovy, v ktorých hrozí priamy úder blesku,
- ***ZBO 1*** – vnútorné priestory pri vonkajšej stene budovy,
- ***ZBO 2*** – priestory budovy s vlastním tienením,
- ***ZBO 3*** – zariadenie vnútornej kovovej skrine.

V každom objekte (budova, otvorený priestor, technológia) možno vytvoriť pomocou tienení uvedený systém zón, obr. 12.11.



Obr. 12.11. Príklad zón ochrany, RS – riadiaci systém

Ochranné zariadenia sa delia na:

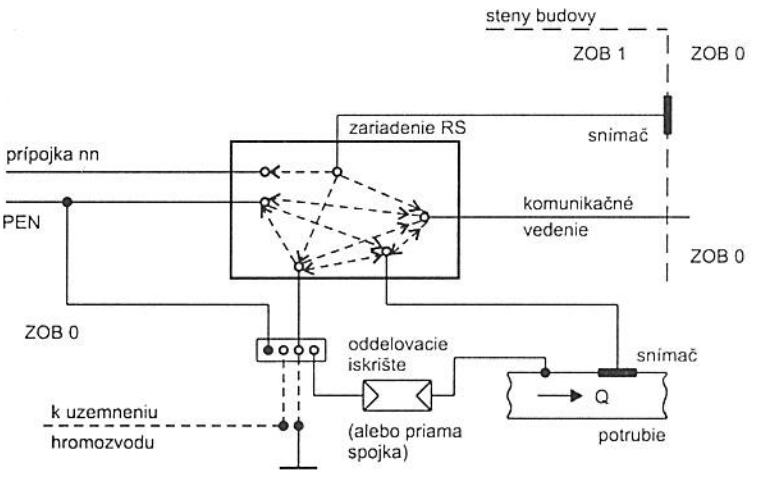
- chrániče proti bleskovým prúdom *(zvodiče)*,
- prepäťové ochrany.

Najväčším zdrojom elektromagnetickej interferencie je bleskový výboj, ktorý pozostáva z viacerých čiastkových výbojov. Jeho reprezentatívny prúdový impulz dosahuje vrcholovú hodnotu 100 kA a vytvára vlnu s pomerom 10/350 μsek. *(podľa obr. 12.10)*. Základnou a dominantnou ochranou pred bleskom je ochrana objektov pred jeho tepelnými a mechanickými účinkami. Ako ***prvý ochranný stupeň*** *(rozhranie zón ZBO 0-1)* sa používa vlnolam, ktorý odvedie väčšiu časť bleskového prúdu, a tým vytvorí pracovné prostredie pre ďalšie, pripojené chrániče. Túto úlohu plnia iskrištia, najčastejšie kompaktnej konštrukcie, preto dokážu spracovať impulznú vlnu bleskového prúdu 10/350 v požadovanej výške a pretvarovať ju na prúdovú vlnu 8/20 zvládnuteľnú pre nasledujúce chrániče. ***Chrániče bleskových prúdov*** musia byť schopné zviesť bleskové prúdy alebo ich podstatné časti, ***bez toho aby sa zničili***. Pri ich dimenzovaní sa vychádza z predpokladaného rozdelenia prúdu pri údere blesku do zachytávacieho zariadenia podľa IEC 1312-1. Vnútorná ochrana pred bleskom tvorí súhrn opatrení na znižovanie účinkov elektromagnetických impulzov spôsobených prúdom vo vnútri chráneného objektu. ***Druhý ochranný*** stupeň (rozhranie zón ZBO 1-2) musí zviesť zvyškovú prúdovú vlnu (8/20) a znížiť napätie na prípustnú hodnotu pre ďalšie zariadenia. Jadrom vnútornej ochrany pred bleskom je ***vyrovnanie potenciálov***, čo znamená, že v jeho rámci sa všetky kovové inštalácie pripoja k ekvipotenciálnej prípojnici. ***Prepäťové ochrany*** sú určené na nižšie energetické namáhanie, a preto sú dimenzované podľa "nižších" skúšobných impulzov. Pre túto oblasť je vhodný ako ochranný prvok varistor (odpor riadený napätím). Moderné varistory na báze oxidov sa vyznačujú rýchlou odozvou a veľmi nízkym zvyškovým napätím

(ochrannou úrovňou). ***V treťom ochrannom stupni*** *(rozhranie zón ZBO 2-3)* sa zohľadňujú potreby koncových zariadení. Aby bola dosiahnutá súhra všetkých troch ochranných stupňov, musia sa vzájomne energeticky koordinovať. To znamená, že musí byť medzi chráničmi bleskových prúdov a prepäťovými ochranami dosiahnutá selektivita tak, aby sa pri výskyte poruchy zabránilo preťaženiu "paralelne" zaradených chráničov (obr. 12.13, obr. 12.14). Chrániče a prepäťové ochrany pre siete nízkeho napätia sú vzhľadom na oblasti použitia rozdelené do štyroch tried podľa špecifikácie ochrannej jednotky, napr. prepäťová ochrana vonkajších vedení nn, ochrana na vyrovnanie potenciálov, atď.

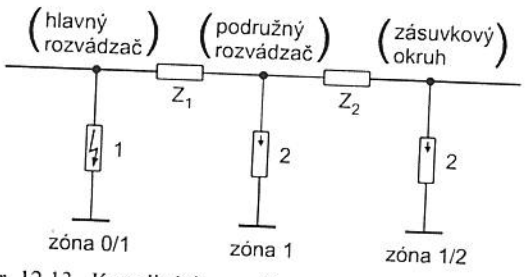
12.2.3 Prepäťové ochrany v obvodoch riadiacich systémov procesnej úrovne

Veľkosti škôd, ktoré sú spôsobené nadmerným prepätím v obvodoch merania a regulácie, sú dané najmä cenami opráv elektronických zariadení a finančnými stratami z nefunkčnosti systému, tj. z výpadku výroby. Často sa pridružia aj škody spôsobené stratou údajov v spolupracujúcej číslicovej technike a časovými a finančnými nárokmi na opätovný nábeh a nastavenie technológie. Elektrické obvody v automatizačných prvkoch predstavujú klasický príklad vplyvu prepätia rôzneho pôvodu prenikajúceho do elektronických zariadení najrôznejšími cestami (obr 12.12). Podľa už uvedených informácií, najnepriaznivejší zdroj prepätia vo vzťahu k riadiacim systémom sú atmosferické poruchy, pretože sú energeticky najobsažnejšie. Ďalšie nebezpečné zdroje reprezentujú spínacie javy v technológiách (vedenia silových rozvodov, ovládanie indukčných záťaží a pod.) vyvolávajúce tzv. spínacie prepätie.



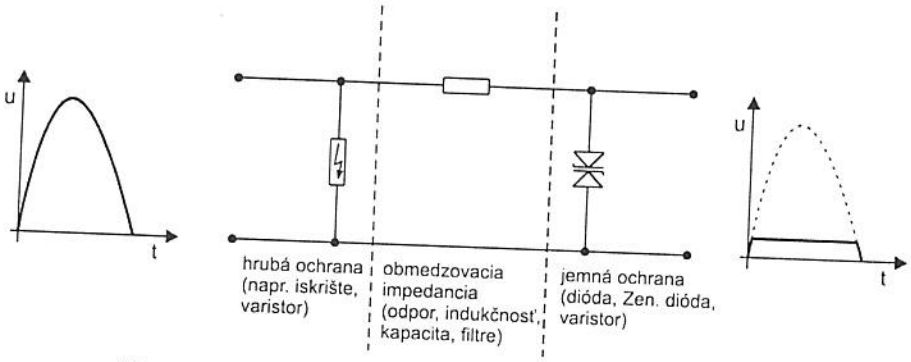
Obr. 12.12. Možné vstupy prepätí do zariadenia RS

Všeobecná úloha chráničov spočíva v obmedzení prepätia pomocou stupňovite zapojených prvkov (obr. 12.13 a 12.14) na hodnoty bezpečné pre ďalšiu prepäťovú ochranu alebo koncové zariadenie, a to tak energeticky, ako aj úrovňou obmedzeného napätia.



Obr. 12.13. Koordinácia zvodičov pomocou impedancií Z_k
1 - Zvodič bleskových prúdov
2 - Prepäťová ochrana

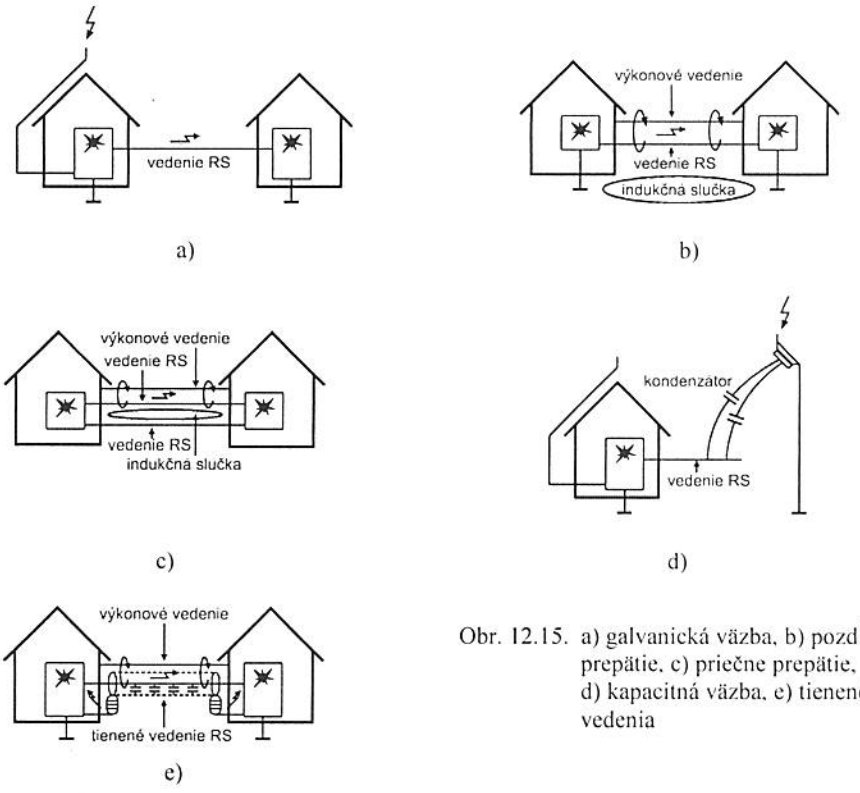
Energetickú koordináciu medzi jednotlivými "paralelne" zapojenými prvkami alebo ochranami treba vyriešiť vhodnými impedanciami medzi jednotlivými stupňami ochrany.



Obr. 12.14. Zapojenie ochranných prvkov pre oznamovacie vedenia

Galvanická väzba medzi prvkami a zariadeniami RS vytvára zásadné nebezpečie pre automatizačné prostriedky pri priamom alebo vzdialenom údere blesku (obr. 12.15*a*). Prvky RS sú podobne, ako oznamovacie a informačno-technické zariadenia, pripojené k vedeniam pre prenos informácií pomocou elektrických signálov. Pri odvádzaní bleskových prúdov vonkajšou ochranou, ale aj pri spínaní alebo skratoch v silovej časti siete, vznikajú silné rušivé elektromagnetické polia, ktoré môžu indukovať v signálových vedeniach ničivé impulzné prepätia ***až do úrovne 10 kV*** a impulzné prúdy ***až niekoľko kA***. Signálové vedenia v RS sú často len čiastočne uzemnené, a preto vytvárajú pomerne širokú indukčnú slučku. Podobne sú ohrozené priemyselné zbernice typu RS 485 a prúdové slučky (0/4 až 20) mA. Pozdĺžne prepätie, ktoré sa vyskytuje v praxi najčastejšie, môže v zlomku sekundy preraziť izoláciu na koncových zariadenia RS a zničiť ich (obr. 12.15*b*). Dvojvodičové vedenie izolované od zeme v prívodoch RS vytvára nebezpečnú priečnu indukčnú slučku (obr. 12.15*c*). Úder blesku do kovového uzemneného predmetu v blízkosti prívodných vedení RS môže spôsobiť vytvorenie kondenzátora podľa obr. 12.15*d*. Vybíjaním takéhoto kondenzátora vznikajú prúdy až niekoľko desiatok ampérov. Vhodne tienené prívodné vedenie RS (obr. 12.15*e*) predstavuje určitú ochranu proti prepätiu, ktoré by ináč vniklo do vedenia indukčnou alebo kapacitnou väzbou.

Preto ***vhodná ochrana prívodných vodičov RS sa dosiahne použitím chráničov proti bleskovým prúdom spolu s ochranami proti prepätiam a uzemnenými tienenými vedeniami.***



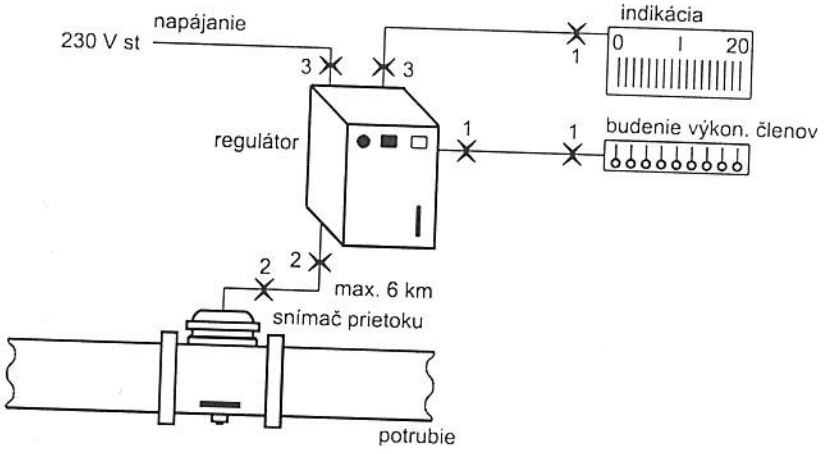
Obr. 12.15. a) galvanická väzba, b) pozdĺžne prepätie, c) priečne prepätie, d) kapacitná väzba, e) tienené vedenia

Pri praktickej realizácii je vhodné na vstupe napr. prívodov regulátora do budovy *(rozhranie ZBO 0-1)* vložiť chrániče, ktoré zabezpečia jeho pripojenie k systému hlavného vyrovnania potenciálov a sú schopné odviesť bez vlastného zničenia časť bleskového prúdu. Zvyškové napätia sú pre dátové vstupy oznamovacích zariadení príliš vysoké. Z toho dôvodu je potrebné vstupy zariadení *(rozhranie ZBO 1-2)* doplniť o príslušné ochrany podľa obr. 12.13 a obr. 12.14, tak aby zvyškové napätia nespôsobili ich zničenie a neovplyvňovali ich prenosové vlastnosti. Vhodné sú najmä kombinované prvky v jednom puzdre, ktoré môžu podstatne zjednodušiť návrhy ochrán.

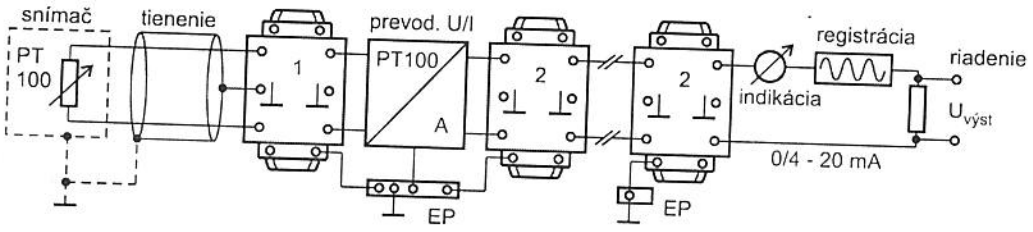
Na ochranu meracích, riadiacich a prenosových (dátových) zariadení s viacnásobnými vstupmi a výstupmi sa používajú ochranné jednotky umiestnené priamo na vstupno/výstupnej karte počítača pre 16, resp. 32 vstupov/výstupov *(I/O)*.

12.2.4 Príklady riešení ochrany pred prepätím v RS

Automatizačné prostriedky určené pre aplikáciu mimo budovy, tzv. prvky procesnej úrovne, majú základnú odolnosť voči prepätiu danú výrobcom (katalóg), ktorá však nemusí postačovať pri náročnejších pracovných podmienkach, napr. pri možnosti blízkeho úderu blesku, pri indukčných prejavoch na súbežných energetických vedeniach alebo vo vedeniach 230 V pri spínacích javoch. Preto, po analýze procesnej časti riadiaceho systému sa často musia tieto prvky rozšíriť o doplňujúce prostriedky. Tieto ochrany sa delia podľa použitia, napr. na prepäťové chrániče (zvodiče) napájacích vedení (najmä proti účinkom spínacích javov), napäťové chrániče dlhých signálnych vedení (na strane meracích členov, ale aj regulátora) a na lacnejšie ochrany pred prepätím s menšou citlivosťou vhodné pre výstupy z regulátorov na indikáciu alebo budenie výkonových členov. Na obr. 12.16 je ukážka použitia prepäťových chráničov pre systém merania a riadenia odberu teplej vody a na obr. 12.17 ochrana obvodov meracieho člena teploty so snímačom Pt100. Typy chráničov sú dimenzované podľa parametrov elektrických veličín prenášaných vedením. V signálových vedeniach sa najčastejšie uvažuje unifikovaný prúdový signál (0/4 až 20) mA.



Obr. 12.16. Použitie prepäťových chráničov v systéme merania a riadenia odberu teplej vody



Obr. 12.17. Ochrana snímačov teploty PT 100 a meracieho prevodníka pred prepätiami

Legenda pre obr.12.16 a 12.17 :

1-Zvodič 60V (bleskoistka + pozdĺžna indukčnosť), 2-Zvodič 15V (bleskoistka + pozdĺžna indukčnosť), 3-Prepäťová ochrana pre ZBO 0-1, 275V (len obr. 12.16)

12.3 Normy a normotvorná činnosť v automatizácii – v meraní

Technické normy sú dokumenty, na ktorých sa dohodli výrobcovia a užívatelia. Obsahujú technické parametre alebo iné presne stanovené kritéria, ako napr. pravidlá, postupy a užitočné vlastnosti, ktorých cieľom je zaručiť vhodnosť daných materiálov, výrobkov alebo služieb pre požadovaný účel. Národné a medzinárodné normy sa teda podieľajú na zjednodušovaní nášho života, pomáhajú zvyšovať efektívnosť výroby, spoľahlivosť a efektívnosť tovarov a služieb, pomáhajú ochraňovať záujmy spotrebiteľov prostredníctvom akceptovania úrovne kvality. Zvyšujú kompatibilitu a vzájomnú zameniteľnosť tovarov a služieb, pričom podporujú obchodnú činnosť. Majú vo všeobecnosti ***nezáväzný charakter***, ak zákon na úrovni štátov nerieši národnú normu inak. Svetovú a európsku normalizačnú činnosť zastrešujú hlavne spoločnosti **ISO, IEC, CEN a CENELEC.**

ISO je celosvetová organizácia zabezpečujúca medzinárodnú normalizačnú činnosť. Zahŕňa približne 120 národných normalizačných organizácií a pokrýva svojím aktivitami technickú normalizáciu vo všetkých oblastiach, okrem elektrotechniky, elektroniky a telekomunikácií. Túto oblasť spravuje **Medzinárodná elektrotechnická komisia IEC** *(International Electrotechnical Commission)*, ktorá s ISO spolupracuje cez komisie ***JTC*** *(Joint Technical Commission)*. Napríklad, oblasť informačných technológií spravuje spojená komisia JTC 1. Názov ISO nie je skratka, ale slovo odvodené z gréckeho "isos", čo znamená "rovnaký". Tento názov je platný vo všetkých oficiálnych jazykoch organizácie – angličtine, ruštine a francúzštine, pričom jej plný názov v angličtine znie *International Organization for Standardization.* Hlavná normalizačná činnosť prebieha v technických komisiách (TC – *Technical Committee*) a vytváranie noriem z oblasti priemyselnej automatizácie a integrácie dotýkajúce sa diskrétnej časti výroby riadi komisia **TC 184 Priemyselné automatizačné systémy** *(Industrial Automation Systems)*, pričom zahŕňa aplikácie viacerých technológií, napr. informačné systémy, stroje a zariadenia a tiež telekomunikácie. Nepatria sem elektrické a elektronické zariadenia, ktoré prevzala práve IEC. Výsledky práce IEC reprezentujú medzinárodné normy a technické správy, ktoré slúžia ako podklady pre národné normy a ako referenčné materiály pri uzatváraní medzinárodných kontraktov. Vlastná činnosť IEC je realizovaná cez tzv. technické výbory (TC), prípadne podvýbory *(SC–Subcommittee)* a normalizačná činnosť v oblasti automatizačných prostriedkov je hlavnou náplňou práce technickej komisie **TC 65 Meranie a riadenie priemyselných procesov** *(Industrial–Process Measurement and Control)*. Hlavná komisia TC65 má kompetencie na vypracovanie medzinárodných noriem pre systémy a prvky priemyselnej riadiacej techniky s prihliadnutím na ***Batch*** *(dávkovacie)* a ***Konti*** *(kontinuálne)* procesy a ďalšie koordinovanie noriem pre prístroje a systémy na meranie, riadenie a reguláciu.

Subkomisia ***SC65*** všeobecných aspek posudzovanie systén
Subkomisia ***SC65B*** a systémov priemyse
Subkomisia ***SC65C*** *Communication)* spr techniky. Poslednou

Okrem normaliz uznávaní certifikátov výrobku, či služby. Pr
Úlohou skúšobníctva j

- hodnotenie produkcie),
- schvaľovanie

Cieľom európske požiadavky, ktoré pôso inštitúcie ***CEN/CENEL*** *(European Telecommu* realizácia jednotného ***elektrotechnických nor*** že európske normy CEN oblasti platí zásada, ak potom musí byť táto pr obsahu originálu.
Slovenská republika je a pridruženým členom CI

Zabezpečenie štátne ***normalizáciu, metrológi*** k ústredným orgánom štá ***metrologický ústav*** *(SMÚ* a ***Slovenský ústav techn*** orgánom a zabezpečuje:

1) medzinárodnú spolupr
   - spoluprácu CENELEC,
   - zriaďovanie s väzbou na organizácií,

Subkomisia ***SC65 A – Systémové aspekty*** *(System Aspects)* sa zaoberá normami z pohľadu všeobecných aspektov systémov riadiacej techniky, ako sú prevádzkové podmienky, posudzovanie systémov, funkčná spoľahlivosť, atď.
Subkomisia ***SC65B – Prístroje pre priemyselnú automatizáciu*** *(Devices)* rieši normy prístrojov a systémov priemyselnej riadiacej techniky na procesnej úrovni, v rozvodni a dozorni (veline).
Subkomisia ***SC65C – Číslicová komunikácia pre procesnú automatizáciu*** *(Digital Communication)* spracováva normy pre komunikáciu subsystémov priemyselnej riadiacej techniky. Poslednou podskupinou je ***SC 65D – Analyzátory*** *(Analyzing Equipment)*.

Okrem normalizácie sa IEC zaoberá aj skúšobníctvom, kde sa dohodami o vzájomnom uznávaní certifikátov a skúšok zabraňuje viacnásobnému skúšobnému procesu jedného výrobku, či služby. Preto je aj v tejto oblasti veľmi dôležitá medzinárodná spolupráca.
Úlohou skúšobníctva je zabezpečovať:

- hodnotenie elektrotechnického spotrebného tovaru (zvyšovanie úrovne domácej produkcie),
- schvaľovanie elektrotechnických výrobkov z hľadiska bezpečnosti osôb a vecí.

Cieľom európskej normalizácie je vytvoriť jednotný systém noriem spĺňajúcich moderné požiadavky, ktoré pôsobia na jednotnom európskom trhu. To je úloha európskej normalizačnej inštitúcie ***CEN/CENELEC*** *(European Committee for Electrotechnical Standardization)* a ***ETSI*** *(European Telecommunications Standard Institute) – telekomunikácie.* Vlastne je to príprava a realizácia jednotného, koherentného systému ***dobrovoľných a harmonizovaných elektrotechnických noriem*** v oblasti elektrotechniky a skúšobníctva. Treba však poznamenať, že európske normy CENELEC sa často prekrývajú, ba sú totožné s normami ISO/IEC. V tejto oblasti platí zásada, ak je prijatá norma členmi CEN/CENELEC, tj. norma EN (európska), potom musí byť táto prijatá aj ako národná norma, pričom preklad musí presne odpovedať obsahu originálu.
Slovenská republika je v súčasnosti *(rok 2000)* riadnym členom organizácií ISO, IEC, ETSI, a pridruženým členom CEN a CENELEC.

Zabezpečenie štátnej politiky v oblasti technickej normalizácie v SR vykonáva ***Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky*** *(ÚNMS SR)*, ktorý patrí k ústredným orgánom štátnej správy. Na podporu svojej činnosti ÚNMS zriadil ***Slovenský metrologický ústav*** *(SMÚ)* pre vedeckú metrológiu, tvorbu a spravovanie štátnych etalónov a ***Slovenský ústav technickej normalizácie*** *(SÚTN),* ktorý je národným normalizačným orgánom a zabezpečuje:

1) medzinárodnú spoluprácu, tj.:
   - spoluprácu pri tvorbe medzinárodných a regionálnych noriem ISO, IEC, CEN, CENELEC,
   - zriaďovanie technických komisií (TK) v oblasti technických noriem (TN) SR s väzbou na príslušné TC medzinárodných a regionálnych normalizačných organizácií,

2) technickú normalizáciu:
   - zostavovanie ročného plánu technickej normalizácie,
   - zriaďovanie TK v oblasti TN v SR s väzbou na TC ISO, IEC,
3) informačnú službu a vydavateľstvo, čiže rešeršnú činnosť, konzultačnú a knižničnú službu a predaj noriem.

Všetky publikácie vydávané týmto ústavom sú prístupné na prezenčné štúdium (aj predaj) v študovni SÚTN. Okrem kompletných slovenských technických noriem (STN) a doplňujúcich odvetvových noriem (ON) sú v knižnici k dispozícii aj medzinárodné normy.

V Európskej únii (EÚ) je záväzný právny predpis tzv. ***technický predpis***, ktorý charakterizuje vlastnosti výrobku alebo služby pričom ***norma je nezáväzný, odporúčajúci dokument***. Toto postavenie noriem môže byť príslušným predpisom zmenené na povinné používanie. Na Slovensku majú normy podobné postavenie ako v EÚ, tj. normy STN sú vo ***všeobecnosti nezáväzné***, pokiaľ zákon nestanoví inak. Z tohto dôvodu je vypracovaný zoznam záväzných noriem STN, ktorý je usporiadaný podľa jednotlivých orgánov štátnej správy.

12.3.1 Technické normy pre riadiace systémy a procesné meranie

(základný prehľad IEC, ISO, STN)

Číselný kód STN normy sa skladá zo šesťčíslia. Prvá dvojica charakterizuje triedu normy, *napr. 18 Priemyselná automatizácia*, druhá dvojica udáva skupinu, *napr. 01 Názvoslovie, všeobecné pojmy* a posledná dvojica zoraďuje normy podľa poradia v skupine. V ďalšej časti je uvedený stručný prehľad noriem dotýkajúcich sa hlavne meracej techniky v automatizácii *(rok 2001)*.

STN IEC 381–1 (18 0110) Analógové signály pre systémy riadenia procesov. Časť 1– jednosmerné prúdové signály

STN IEC 381–2 (18 0111) Analógové signály pre systémy riadenia procesov. Časť 2– jednosmerné napäťové signály

IEC 382:1991 Analógový pneumatický signál pre automatizáciu.

STN IEC 946 (18 0112) Dvojkové jednosmerné napäťové signály pre systémy merania a riadenia procesov

STN IEC 654 (18 0421) Prevádzkové podmienky pre meracie a riadiace zariadenia priemyselných procesov

STN IEC 902 (18 0000) Automatizácia. Meranie a riadenie priemyselných procesov

STN 18 0003 Automatizácia. Elektrické technické prostriedky

STN IEC 801 (18 0014) Elektromagnetická kompatibilita zariadení na meranie a riadenie priemyselných procesov

IEC 584 Termoelektrické články

IEC 751:1993 Priemyselné platinové odporové snímače teploty

STN IEC 770 (18 1078) Metódy hodnotenia prevádzkyschopnosti vysielačov pre riadiace systémy priemyselných procesov

IEC 1158–2 Priemyselná zbernica pre priemyselné riadiace systémy, fyzická vrstva (len pre Profibus –PA, Process Automation, napájanie po prenosovom vedení)

STN EN 50020 (33 0380) Nevýbušné elektrické zariadenia. Iskrová bezpečnosť "i"

STN ISO 3511 Funkčné značenia merania a riadenia v priemyselných procesoch

STN 01 0115 Názvoslovie v metrológii

STN 01 1300 Zákonné meracie jednotky

Vzhľadom k dôležitosti a častej požiadavke hodnotenia vlastností meracích členov (meracích kanálov, prevodníkov, senzorov) riadiacich systémov v praxi má norma STN IEC 770 významné postavenie. Je určená pracovníkom v oblasti projektovania a prevádzkovania automatizačných prostriedkov. Norma STN IEC 770 je vlastne preklad normy IEC 770, 1984 a má formu odporúčania pre medzinárodné používanie. Jej účel spočíva v špecifikovaní ***jednotnej skúšobnej metódy na hodnotenie prevádzkovej schopnosti meracích členov*** (vysielačov, senzorov alebo senzorových systémov) s unifikovanými elektrickými alebo pneumatickými výstupnými signálmi. Metódy hodnotenia špecifikované v tejto norme sú vhodné, tak pre výrobcov na určenie prevádzkovej schopnosti ich výrobkov, ako aj pre užívateľov, prípadne pre nezávislé skúšobné orgány na overenie prevádzkovej schopnosti meracích členov uvádzanej výrobcami. V norme sú definované základné termíny ako *konformnosť, mŕtve pásmo, hysteréza, rozsah, rozpätie, opakovateľnosť*, a pod. Uvedené sú všeobecné skúšobné postupy pri určovaní statických a dynamických vlastností meracích členov.

13 LITERATÚRA

13.1 Monografie

1. Ďaďo, S., Kreidl, M.: *Senzory a měřící obvody*. ČVUT, Praha, 1996
2. Ďaďo, S., Kreidl, M.: *Měříci převodníky fyzikálnych veličín*. ČVUT, Praha, 1990
3. Hofmann, D.: *Priemyselná meracia technika*. Alfa, Bratislava, 1988
4. Chudý, V., Palenčár, R., Kureková, E., Halaj, M.: *Meranie technických veličín*. STU, Bratislava, 1999
5. Klementev, I., Kyška, R.: *Elektrické meranie mechanických veličín*. Alfa, Bratislava, 1991
6. Kreidl, M.: *Senzory*. ČVUT, Praha, 1990
7. Petrovič, J., Ivanič, J.: *Automatizácia v priemysle - meranie*. Alfa, Bratislava, 1981
8. Rous, Z.: *Přepěťové ochrany v elektrických zařízeních do 1000V*. IN-EL, Knižnice Elektro, svazek 45, ISBN 80-86230-06-6
9. Zehnula, K.: *Snímače neelektrických veličín*. SNTL, Praha, 1983
10. Zehnula, K.: *Čidla robotů*. SNTL, Praha, 1990
11. Doebelin, E., O.: *Measurement Systems/Application and Desing/*. McGraw/Hill Publishing Company 1990, ISBN 0-07-017338-9
12. Göpel,W., Hesse, J., Zemel, J., N.: *SENSORS; Fundamentals and General Aspects*. VCH Publishers (UK), 1989, ISBN 3-527-26767-0
13. Morris, A., S.: *Principles of Measurement and Instrumentation*. Prentice Hall International (UK), 1993, ISBN 0-13-48909-9
14. Mylroi, M., G., Calvert, G.: *Measurement and Instrumentation for Control*. P. Peregrinus Ltd., 1986, ISBN 0-8634-024-3
15. Niebuhr, J., Lindner, G.: *Physikalische Meßtechnik mit Sensoren*. Oldenbourg Verlang, 1994, ISBN 3-486-21948-0
16. Olsson, G., Piani, G.: *Computer Systems for Automation and Control*. Prentice Hall International (UK), 1992, ISBN 0-13-457581-4
17. Schiessle, E.: *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*. Vogel Fachbuch, 1992, ISBN 3-8023-0470-5
18. Schnell, G.: *Sensoren in der Automatisierungstechnik*. Vieweg, 1993, SBN 3-528-13370-8

13.2 Odborné periodiká - procesná meracia technika

1. AT&P Journal, Bratislava [SK]
2. ATOMA, Praha [CZ]
3. Automatisierungspraxis, München [D]
4. Automatizace, Praha [CZ]
5. Regelungstechnische Praxis, München [D]
6. Sensors and actuators. Lausanne, Elsevier Sequoia [CH], ISSN 0250-6874
7. Sensors, Peterborouch [USA]
8. Technisches Messen [D]

14 PRÍLO

Tab. P1.

Číslo
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17

Poznámky

e - H_2 je
V
T
G
M, F

14 PRÍLOHA

Tab. P1. Pevné body teplotnej stupnice ITS-90

Číslo	teplota		látka	skupenstvo
	T_{90} (K)	ϑ_{90} (°C)		
1	3 až 5	-270,15 až 268,15	He	V
2	13,8033	-259,3467	e - H_2	T
3	17	-256,15	e - H_2 (He)	V (G)
4	20,3	-252,85	e - H_2 (He)	V (G)
5	24,5561	-248,5939	Ne	T
6	54,3584	-218,7916	O_2	T
7	83,8058	-189,3442	Ar	T
8	234,3156	-38,8344	Hg	T
9	273,16	0,01	H_2O	T
10	302,9146	29,7646	Ga	M
11	429,7485	156,5985	In	F
12	505,078	231,928	Sn	F
13	692,677	419,527	Zn	F
14	933,473	660,323	Al	F
15	1234,93	961,78	Ag	F
16	1337,33	1064,18	Au	F
17	1357,77	1084,62	Cu	F

Poznámky:

e - H_2 je vodík v rovnovážnej koncentrácii s ortovodíkom alebo paravodíkom,
V bod teplotnej závislosti tlaku pary $p = f(T_{90})$,
T trojný bod,
G bod teplotnej závislosti tlaku plynu $p = f(T_{90})$,
M, F bod topenia alebo tuhnutia pri skupenskej premene pri tlaku $p = 101325$ Pa.

Tab. P2. Základné jednotky sústavy SI

Veličina	Jednotka	Značka
dĺžka	meter	m
hmotnosť	kilogram	kg
čas	sekunda	s
elektrický prúd	ampér	A
termodynamická teplota	kelvin	kg
svietivosť	kandela	cd
látkové množstvo	mol	mol

Tab. P3. Násobky a diely jednotiekSI

Názov	Značka	Násobok
tera	T	10^{12}
giga	G	10^{9}
mega	M	10^{6}
kilo	K	10^{3}
mili	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
piko	p	10^{-12}

Tab. P4

Dilata
Dvojk
Termo
T
J
E
K
S
R
B
Odpor
Termis
Pyrom
a) jaso
b) pásn
c) úhrn
d) farel
e) farel
Termov

Tab. P4. Základné typy snímačov teploty

Snímače teploty		Rozsah merania (°C)	Dovolené chyby
Dilatačné tyčové		0 až 1000	1 až 2 %
Dvojkovové, bimetelové		-130 až 450	1 až 3 %
Termoelektrické:			pozri príslušné normy
T	*Cu-CuNi*	-200 až 400	
J	*Fe-CuNi*	-200 až 350	
E	*Ch-CuNi*	-200 až 600	
K	*NiCr-NiAl*	-200 až 1300	
S	*Pt10Rh-Pt*	0 až 1700	
R	*Pt13Rh-Pt*	0 až 1700	
B	*Pt30Rh-Pt6Rh*	0 až 1800	
Odporové – Pt, Ni		-250 až 1000	pozri príslušné normy
Termistorové		-200 až 500	
Pyrometre:			
a) jasové		650 až 3500	1 až 35 K
b) pásmové		500 až 2000	1 až 1,5 %
c) úhrnné		-40 až 3000	
d) farebné porovnávacie		1150 až 1800	10 až 25 K
e) farebné pomerové		700 až 2200	1 až 1,5 %
Termovízia		-20 až 1000	1 %

Tab. P5. Bimetelové snímače teploty - príklad parametrov

Menovité napätie	*-striedavé*	*(V)*	220	220	220
	-jednosmerné	*(V)*	60	30	30
Menovitý prúd	*-striedavý*	*(A)*	0,5	3	3
	-jednosmerný	*(A)*	0,05	1,5	1,5
Spínacia teplota		*(°C)*	60, 65, 70, 75 80, 85, 90, 95 100,105,110,115 120	80, 85, 90 95, 100	85, 90 95,100
Hmotnosť		*(g)*	8 až 10	8 až 10	8
Izolačný odpor		*(MΩ)*	2	2	2
Životnosť		*(zapnutí)*	500	2000	2000

Tab. P6. Základné vlastnosti odporových snímačov teploty

Typ odporového snímača	Označenie typu	Pracovný rozsah (°C)	Menovitá hodnota W_{100}
medený snímač	Cu	-50 až +180	1,426
niklový snímač	Ni	-60 až +180	1,617
platinový snímač	Pt	Tr. A: -200 až +650 Tr. B: -200 až +850	1,3850

Tab. P7. Hodnoty meracieho odporu Pt100 podľa IEC
(W100=1,3850; hodnota odporu v Ω)

T(°C)	0,00	±10	±20	±30	±40	±50	±60	±70	±80	±90
-200	18,49									
-100	60,25	56,19	52,11	48,00	43,87	39,71	35,53	31,32	27,08	22,80
0	100,00	96,09	92,16	88,22	84,27	80,31	76,33	72,33	68,33	64,30
0	100,00	103,90	107,79	111,67	115,54	119,40	123,24	127,07	130,89	134,70
100	138,50	142,29	146,06	149,82	153,58	157,31	161,04	164,76	168,46	172,16
200	175,84	179,51	183,17	186,32	190,45	194,07	197,69	201,29	204,88	208,45

Tab. P8. Term
Term

T (°C)	0
0	0,000
100	0,645
200	1,440
300	2,323
400	3,260
500	4,234
600	5,237
700	6,274
800	7,345
900	8,448
1000	9,585
1100	10,754
1200	11,947
1300	13,155
1400	14,368
1500	15,576
1600	16,771
1700	17,942

Tab. P9. Termoel
Termoel

T (°C)	0
0	0,000
100	0,033
200	0,178
300	0,431
400	0,786
500	1,241
600	1,791
700	2,430
800	3,154
900	3,957

Tab. P8. Termoelektrické napätie termoelektrických článkov podľa IEC
Termoelektrický článok typu S (Pt10Rh-Pt)

T (°C)	termoelektrické napätie U (mV)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	0,055	0,113	0,173	0,235	0,299	0,365	0,432	0,502	0,573
100	0,645	0,719	0,795	0,872	0,950	1,029	1,109	1,190	1,273	1,356
200	1,440	1,525	1,611	1,698	1,785	1,873	1,962	2,051	2,141	2,232
300	2,323	2,414	2,506	2,599	2,692	2,786	2,880	2,974	3,690	3,164
400	3,260	3,356	3,452	3,549	3,645	3,743	3,840	3,938	4,036	4,135
500	4,234	4,333	4,432	4,532	4,632	4,732	4,832	4,933	5,034	5,136
600	5,237	5,339	5,442	5,544	5,648	5,751	5,855	5,960	6,064	6,169
700	6,274	6,380	6,486	6,592	6,699	6,805	6,913	7,020	7,128	7,236
800	7,345	7,454	7,563	7,672	7,782	7,892	8,003	8,114	8,225	8,336
900	8,448	8,560	8,673	8,786	8,899	9,012	9,126	9,240	9,355	9,470
1000	9,585	9,700	9,816	9,932	10,048	10,165	10,282	10,400	10,517	10,635
1100	10,754	10,872	10,991	11,110	11,229	11,348	11,467	11,587	11,707	11,827
1200	11,947	12,067	12,188	12,308	12,429	12,550	12,671	12,792	12,913	13,034
1300	13,155	13,276	13,276	13,519	13,640	13,761	13,883	14,004	14,125	14,247
1400	14,368	14,489	14,489	14,731	14,852	14,973	15,094	15,215	15,336	15,456
1500	15,576	15,697	15,697	15,937	16,057	16,176	16,296	16,415	16,534	16,653
1600	16,771	16,890	16,890	17,125	17,243	17,360	17,477	17,594	17,711	17,826
1700	17,942	18,056	18,056	18,282	18,394	18,504	18,612			

Tab. P9. Termoelektrické napätie termoelektrických článkov podľa IEC
Termoelektrický článok typu B (Pt30Rh-Pt6Rh)

T (°C)	termoelektrické napätie U (mV)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	-0,002	-0,003	-0,002	0,000	0,002	0,006	0,011	0,017	0,025
100	0,033	0,043	0,053	0,065	0,078	0,092	0,107	0,123	0,140	0,159
200	0,178	0,199	0,220	0,243	0,266	0,291	0,317	0,344	0,372	0,401
300	0,431	0,462	0,494	0,527	0,561	0,596	0,632	0,669	0,707	0,746
400	0,786	0,827	0,870	0,913	0,957	1,002	1,048	1,095	1,143	1,192
500	1,241	1,292	1,344	1,397	1,450	1,505	1,560	1,617	1,674	1,732
600	1,791	1,851	1,912	1,974	2,036	2,100	2,164	2,230	2,296	2,363
700	2,430	2,499	2,569	2,639	2,710	2,782	2,855	2,928	3,003	3,078
800	3,154	3,231	3,308	3,387	3,466	3,546	3,626	3,708	3,790	3,873
900	3,957	4,041	4,126	4,212	4,298	4,386	4,474	4,562	4,652	4,742
1000	4,833	4,924	5,016	5,109	5,202	5,297	5,391	5,487	5,583	5,680
1100	5,777	5,875	5,973	6,073	6,172	6,273	6,374	6,475	6,577	6,680
1200	6,783	6,887	6,991	7,096	7,202	7,308	7,414	7,521	7,628	7,736
1300	7,845	7,953	8,063	8,172	8,283	8,393	8,504	8,616	8,727	8,839
1400	8,952	9,065	9,178	9,291	9,405	9,519	9,634	9,748	9,863	9,979
1500	10,094	10,210	10,325	10,441	10,558	10,674	10,790	10,907	11,024	11,141
1600	11,257	11,374	11,491	11,608	11,725	11,842	11,959	12,076	12,193	12,310
1700	12,426	12,543	12,659	12,776	12,892	13,008	13,124	13,239	13,354	13,470
1800	13,585	13,699	13,814							

Tab. P10. Termoelektrické napätie termoelektrických článkov podľa IEC
Termoelektrický článok typu J (Fe-CuNi)

T (°C)	termoelektrické napätie U (mV)									
	0	±10	±20	±30	±40	±50	±60	±70	±80	±90
-200	-7,890	-8,096								
-100	-4,632	-5,036	-5,426	-5,801	-6,159	-6,499	-6,821	-7,122	-7,402	-7,659
0	0,000	-0,501	-0,995	-1,481	-1,960	-2,431	-2,892	-3,344	-3,785	-4,215
0	0,000	0,507	1,019	1,536	2,058	2,585	3,115	3,649	4,186	4,725
100	5,268	5,812	6,359	6,907	7,457	8,008	8,560	9,113	9,667	10,222
200	10,777	11,322	11,887	12,442	12,998	13,533	14,108	14,663	15,217	15,771
300	16,325	16,879	17,432	17,984	18,537	19,089	19,640	20,192	20,743	21,295
400	21,846	22,397	22,949	23,501	24,054	24,607	25,161	25,716	26,272	26,829
500	27,388	27,949	28,511	29,075	29,642	30,210	30,782	31,356	31,933	32,513
600	33,096	33,683	34,273	34,867	35,464	36,066	36,671	37,280	37,89	38,510
700	39,130	39,754	40,382	41,013	41,647	42,283	42,922			

Tab. P11. Termoelektrické napätie termoelektrických článkov podľa IEC
Termoelektrický článok typu K (NiCr-NiAl)

T (°C)	termoelektrické napätie U (mV)									
	0	±10	±20	±30	±40	±50	±60	±70	±80	±90
-200	-5,891	-6,035	-6,158	-6,262	-6,344	-6,404	-6,458			
-100	-3,553	-3,852	-4,138	-4,410	-4,669	-4,912	-5,141	-5,354	-5,550	-5,730
0	0,000	-0,392	-0,777	-1,156	-1,527	-1,889	-2,243	-2,586	-2,920	-3,242
0	0,000	0,397	0,798	1,203	1,611	2,022	2,436	2,850	3,266	3,681
100	4,095	4,508	4,919	5,327	5,733	6,137	6,539	6,939	7,338	7,737
200	8,137	8,537	8,938	9,341	9,745	10,151	10,560	10,969	11,381	11,793
300	12,207	12,623	13,039	13,456	13,874	14,292	14,712	15,132	15,552	15,974
400	16,395	16,818	17,241	17,664	18,088	18,513	18,938	19,363	19,788	20,214
500	20,640	21,066	21,493	21,919	22,346	22,772	23,198	23,624	24,050	24,476
600	24,902	25,327	25,751	26,176	26,599	27,022	27,445	27,867	28,288	28,709
700	29,128	29,547	29,965	30,383	30,799	31,214	31,629	32,042	32,455	32,866
800	33,277	33,686	34,095	34,502	34,909	35,314	35,718	36,121	36,524	36,925
900	37,325	37,724	38,122	38,519	38,915	39,310	39,703	40,096	40,488	40,879
1000	41,269	41,657	42,045	42,432	42,817	43,202	43,585	43,968	44,349	44,729
1100	45,108	45,486	45,863	46,238	46,612	46,985	47,356	47,726	48,095	48,462
1200	48,828	49,192	49,555	49,916	50,276	50,633	50,990	51,344	51,697	52,049
1300	52,398	52,747	53,093	53,439	53,785	54,125	54,466	54,807		

Tab. P12. Kor

Termoelek článo	
Fe-ko	
E (NiCr-Cu	
K (NiCr-Ni	
S (Pt10Rh-P	
B (Pt30Rh-	

Tab. 13. Prevod

	1
1 Pa	1
1 Bar	1,10
1 atm	1,01
1 kp/cm2	0,98
1 Torr	1,33
1 mmH2O	9,80

atm – fyzikálna a

Tab. P14. T

Charakt	
charakte	
nelinear	
maximá	
celkový	
maximál	
uhol nat	
prechod	
materiál	
materiál	
povolená	
izolačný	

Tab. P12. Konštanty na určenie termoelektrického napätia pri inej vzťažnej teplote

Termoelektrický článok	Konštanta α_Z (mV/K)	Súčin $\alpha_Z . \vartheta'_Z$ (prevzatý z krivky)	
		pre ϑ=20 °C	pre ϑ=50 °C
Fe-ko	0,056	1,05	2,65
E (NiCr-CuNi)	0,066	1,31	3,35
K (NiCr-NiAl)	0,041	0,8	2,02
S (Pt10Rh-Pt)	0,006	0,113	0,299
B (Pt30Rh-Pt6Rh)	-	-0,003	0,002

Tab. 13. Prevodová tabuľka jednotiek tlaku

	1 Pa=N/m^2	1 Bar	1 atm	1 kp/cm^2=at	1 Torr	1 mmH_2O
1 Pa	1	1.10^{-5}	$0,986923.10^{-5}$	$1,01972.10^{-5}$	$0,750062.10^{-2}$	0,101972
1 Bar	1.10^{+5}	1	0,986923	1,01972	$7,50062.10^{+2}$	$1,01972.10^{+4}$
1 atm	$1,01325.10^{+5}$	1,01325	1	1,03323	$7,6.10^{+2}$	$1,03323.10^{+4}$
1 kp/cm2	$0,980665.10^{+5}$	0,980665	0,967841	1	$7,3556.10^{+2}$	1.10^{+4}
1 Torr	$1,33322.10^{+2}$	$1,33322.10^{-3}$	$1,31579.10^{-3}$	$1,35951.10^{-3}$	1	13,5951
1 mmH2O	9,80665	$0,980665.10^{-4}$	$0,967841.10^{-4}$	1.10^{-4}	$7,3556.10^{-2}$	1

atm – fyzikálna atmosféra, at – technická atmosféra

Tab. P14. Technické údaje jednoduchých a dvojitých rotačných odporových vysielačov ZPA

Charakteristické parametre	Jednoduchý	Dvojitý
charakteristika	lineárna	
nelinearita	±1% (max.)	
maximálny prúd	100 mA	2 × 100 mA
celkový odpor	100 Ω ± 12 Ω / 0 Ω	2 × 100 Ω ± 12 Ω / 0 Ω
maximálny krútiaci moment	15 N cm	20 N cm
uhol natočenia hriadeľa	90°, 160°, 270°	
prechodový odpor kontaktu	1,4 ± 0,2 Ω (max.)	
materiál vinutia odporu	smaltovaný mangánový drôt	
materiál kontaktu bežca	95 % + 5 % Ir	
povolená pracovná teplota	-10 °C až +50 °C	
izolačný odpor	min. 2 MΩ	

Tab. 15. Hodnoty plynovej konštanty pre niektoré technické plyny

Médium	Značka	Hodnota plynovej konštanty R
vzduch	-	29,27
kyslík	O_2	26,5
dusík	N_2	30,56
vodík	H_2	420,6
kysličník uhličitý	CO_2	19,27
čpavok (amoniak)	NH_3	49,73

Doc. Ing. Ján Šturcel, PhD.

SNÍMAČE A PREVODNÍKY

1. vydanie
Náklad 600 výtlačkov
262 strán, 211 obrázkov, 25 tabuliek, 16,170 AH, 16,539 VH
Edičné číslo 4980
Tlač Vydavateľstvo STU v Bratislave
Rok vydania 2002

85 – 244 – 2002 Sk 125,--

ISBN 80-227-1712-6