Драгана Прокин Петар Бошњаковић

# *Индустријска метрологија*

Београд
2015.

Др Петар Бошњаковић, 1945.
Др Драгана Прокин, 1963.

Индустријска Метрологија
Рецензенти
др Славица Маринковић,
мр Борислав Хаџибабић.

Обрада и припрема текста
др Петар Бошњаковић
Ненад Толић
Мијат Штимац

Корице
Ненад Толић

Издавач
Висока школа електротехнике и рачунарства, струковних студија
Војводе Степе 283, Београд

1. издање
тираж: 30
Штампарија: Школски сервис Гајић, Београд
Формат: B5 (JIS)
ISBN 978-86-7982-222-2

*Наставно веће Високе школе електротехнике и рачунарства, на својој седници одржаној 29.05.2014. године одобрило је издавање и коришћење овог уџбеника у настави.*

CIP - Каталогизација у публикацији -
Народна библиотека Србије, Београд

006.91(075.8)
621.317(075.8)

ПРОКИН, Драгана, 1963-
Индустријска метрологија / Драгана Прокин, Петар Бошњаковић. - 1. изд. - Београд : Висока школа електротехнике и рачунарства, струковних студија, 2015 (Београд : Школски сервис Гајић). - 379 стр. : илустр. ; 25 cm

Тираж 30. - Речник појмова: стр. 371-374. - Библиографија уз поједина поглавља. - Регистар.

ISBN 978-86-7982-222-2

# ПРЕДГОВОР

Материја обрађена у овој књизи организована је у складу са програмом предмета Мерења 2, који се, према наставним плановима акредитованих студијских програма “Аутоматика и системи управљања возилима” и “Електроника и телекомуникације” изучава на трећој години основних струковних студија на Високој школи електротехнике и рачунарства у Београду. Сама књига је урађена као други део дводелног издања посвећеног умећу које је имало пресудан утицај на развој савремене науке. Намењена је студентима, али и инжењерима, који су као своје струковно опредељење изабрали природне науке.

Обрађена материја подељена је на 14 поглавља. У уводном делу приказана је системска основа предмета који се бави практичном метрологијом. У следећем поглављу дата је општа теоријска основа области савремене мерне технике која се назива индустријска метрологија. Општи елементи мерења у индустрији разматрају се у трећем поглављу. Обрађени су основни појмови потребни за праћење даљег излагања у овом уџбенику. Због значаја који имају, мерења наизменичних електричних величина, електричне снаге и енергије обрађена су у четвртом и петом поглављу. Шесто поглавље посвећено је сензорима неелектричних величина. У седмом поглављу су обрађене методе и уређаји за мерење неелектричних величина. Савремени вишефункцијски дигитални мерни инструменти предмет су осмог поглавља. Посебна пажња посвећена је микропроцесорским мерним инструментима и приказу њихових функција. Програмабилна мерна средства, програмабилни кондиционери и мерни претварачи, програмабилни мерни инструменти и системи су предмет деветог поглавља. Интерфејсни системи који се користе у мерној техници разматрају се у десетом поглављу. Савременим аутоматизованим мерним системима, који се користе у истраживачким, развојним и метролошким лабораторијама посвећено је једанаестом поглавље. Дванаесто поглавње бави се системима којима се остварује даљинско мерење.

Захваљујемо рецензентима, др Славици Маринковић и мр Бориславу Хаџибабићу који су подржали концепцију књиге и својим сугестијама допринели да формулације буду прецизније и јасније. Своју захвалност аутори дугују и Ненаду Толићу и Мијату Штимцу на корисним сугестијама у погледу коначног обликовања овог уџбеника.

28.06.2015. Аутори

# ОЗНАКЕ

| | |
|---|---|
| $a, A$ | аналогна величина |
| $A$ | појачање |
| $A_U$ | појачање напона |
| $A_u$ | појачање напона за мале сигнале |
| $b$ | бинарна величина |
| $C$ | капацитивност |
| $cos$ | косинус |
| $ctg$ | котангенс |
| $d$ | дигитална величина, |
| $f$ | учестаност |
| $h$ | Хевисајдова одскочна функција |
| $\boldsymbol{h}$ | хибридни матрични параметри четворопола |
| $\boldsymbol{H}(j\omega)$ | фреквенцијска карактеристика, фреквенцијски одзив |
| $H(\omega)$ | модуо фреквенцијске карактеристике |
| $\boldsymbol{H}(s)$ | функција преноса |
| $i$ | тренутна вредност променљиве електричне струје |
| $I$ | стална електрична струја |
| $i_{IN}, i_I$ | тренутна вредност променљиве улазне струје |
| $Im$ | имагинарни део комплексног броја |
| $i_{OUT}, i_O$ | тренутна вредност променљиве излазне струје |
| $i_o$ | наизменична компонента излазне струје |
| $I_O$ | стална излазна струја |
| $i_\sim$ | наизменична компонента променљиве струје |
| $j$ | имагинарна јединица |
| $k, K$ | појачање |
| $L$ | индуктивност |
| $m$ | маса |
| $N$ | број |
| $p(t)$ | тренутна вредност електричне снаге |
| $P$ | активна снага |
| $q, Q$ | наелектрисање |
| $q(t)$ | реактивна енергија |
| $r , R$ | електрична отпорност |
| $Re$ | реални део комплексног броја |
| $\boldsymbol{s}$ | комплексна променљива |
| $sgn$ | сигнум |
| $sin$ | синус |
| $t$ | време |
| $T$ | период |
| $TC$ | температурски коефицијент |
| $u$ | тренутна вредност променљивог напона |
| $u_\sim$ | наизменична компонента напона |
| $U$ | стални напон |
| $U_{AV}$ | средња вредност укупног напона |
| $u_{IN}, u_I$ | тренутна вредност укупног променљивог напона на улазу |
| $u_{in}, u_i$ | наизменична компонента напона на излазу |
| $U_{IN}, U_I$ | стални напон на улазу |
| $u_{OUT}, u_O$ | тренутна вредност укупног променљивог напона на улазу |
| $u_{out}, u_o$ | наизменична компонента напона на излазу |
| $U_{OUT}, U_O$ | стални напон на излазу |
| $\boldsymbol{Z}$ | импеданса |
| $Z(\omega)$ | модуо импедансе |
| $\alpha$ | угао |
| $\delta$ | промена |
| $\Delta$ | прираштај, промена, одступање |
| $\varphi$ | угао, разлика фаза |
| $\omega$ | угаона брзина (учестаност) |
| $\mathcal{O}$ | оператор |

# САДРЖАЈ


1. УВОД 1
   - 1.1. МЕРЕЊЕ И РАЧУНАЊЕ *3*
   - 1.2. МЕРЕЊА У АУТОМАТИЦИ - АУТОМАТИКА У МЕРЕЊИМА *6*
   - 1.3. ДАЉИНСКО МЕРЕЊЕ - ТЕЛЕМЕТРИЈА *10*

2. МЕРНИ СИГНАЛИ И СИСТЕМИ 13
   - 2.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ *13*
   - 2.2. МЕРНИ ИНФОРМАЦИОНИ СИСТЕМИ *22*

3. МЕРЕЊА У ИНДУСТРИЈИ 29
   - 3.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ *30*
   - 3.2. СТАТИЧКА КАРАКТЕРИСТИКА МЕРИЛА *35*
     - 3.2.1. ЛИНЕАРНО ПРЕСЛИКАВАЊЕ *36*
     - 3.2.2. НЕЛИНЕАРНО ПРЕСЛИКАВАЊЕ *40*
   - 3.3. ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МЕРИЛА *41*
     - 3.3.1. АНАЛИЗА У ВРЕМЕНСКОМ ДОМЕНУ *43*
     - 3.3.2. АНАЛИЗА У ФРЕКВЕНЦИЈСКОМ ДОМЕНУ *46*
     - 3.3.3. АНАЛИЗА У КОМПЛЕКСНОМ ДОМЕНУ *53*
   - 3.4. МЕРНИ ПРЕТВАРАЧИ НАИЗМЕНИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА *55*

4. МЕРЕЊЕ НАИЗМЕНИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА 61
   - 4.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ *61*
   - 4.2. МЕРЕЊЕ НАИЗМЕНИЧНОГ ЕЛЕКТРИЧНОГ НАПОНА *68*
   - 4.3. МЕРЕЊЕ НАИЗМЕНИЧНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СТРУЈЕ *76*

5. МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СНАГЕ И ЕНЕРГИЈЕ 83
   - 5.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ *84*
   - 5.2. МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СНАГЕ *88*
   - 5.3. МЕРЕЊЕ АКТИВНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ *94*
   - 5.4. МЕРЕЊЕ РЕАКТИВНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СНАГЕ И ЕНЕРГИЈЕ *97*
   - 5.5. МЕРЕЊЕ У СВРХЕ ОБРАЧУНА *104*
     - 5.5.1. ФУНКЦИОНАЛНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ОБРАЧУНСКОГ МЕРИЛА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ *106*
     - 5.5.2. ЛОКАЛНА ОБРАДА *109*
     - 5.5.3. РЕГИСТРАТОРИ ИМПУЛСНИХ ПОДАТАКА *113*
     - 5.5.4. ТАРИФНИ СИСТЕМ ОБРАЧУНА ТРОШКОВА ЗА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГИЈУ *115*

6. СЕНЗОРИ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА 119
   - 6.1. ОТПРОРНИЧКИ СЕНЗОРИ *121*
     - 6.1.2. ОТПОРНИ МОСТ 124
   - 6.2. МЕРНЕ ТРАКЕ *124*
     - 6.2.1. РЕАЛИЗАЦИЈА И МОНТАЖА МЕРНИХ ТРАКА *126*
     - 6.2.2. УТИЦАЈ ТЕМПЕРАТУРЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА *129*
     - 6.2.3. УТИЦАЈ ОТПОРА ПРОВОДНИКА *130*
   - 6.3. КАПАЦИТИВНИ СЕНЗОРИ *131*
     - 6.3.1. СЕНЗОРИ СА ПРОМЕНЉИВОМ ПОВРШИНОМ *132*
     - 6.3.2. СЕНЗОРИ СА ПРОМЕНЉИВИМ РАЗМАКОМ ИЗМЕЂУ ПЛОЧА *134*

6.3.3. СЕНЗОРИ СА ПРОМЕНЉИВИМ ДИЕЛЕКТРИКОМ *135*
6.4. ИНДУКТИВНИ СЕНЗОРИ *136*
6.5. ЕЛЕКТРОДИНАМИЧКИ СЕНЗОРИ *139*
6.6. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ *140*
6.7. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ *142*

7. МЕТОДЕ И УРЕЂАЈИ ЗА МЕРЕЊЕ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА 145
7.1. МЕРЕЊЕ ПОМЕРАЈА *146*
7.1.1. ПОТЕНЦИОМЕТАРСКИ ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ ТРАНСЛАТОРНИХ И УГАОНИХ ПОМЕРАЈА *146*
7.1.2. КАПАЦИТИВНИ ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ ЛИНЕАРНИХ ПОМЕРАЈА *148*
7.1.3. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ СЕНЗОРИ ПОМЕРАЈА *151*
7.1.4. ПРЕТВАРАЧИ НА ПРИНЦИПУ СТРУНЕ *153*
7.1.5. МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОМЕРАЈА *154*
7.2. МЕРЕЊЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ *157*
7.2.1. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ ПРЕТВАРАЧИ УГАОНЕ БРЗИНЕ *157*
7.2.2. ТАХОГЕНЕРАТОРИ *159*
7.2.3. ОПТОЕЛЕКТРОНСКИ ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ *161*
7.2.4. ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ НА БАЗИ ХОЛОВОГ ЕФЕКТА *162*
7.3. АКЦЕЛЕРОМЕТРИ *164*
7.3.1. КОНТАКТНИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ *164*
7.3.2. ИНДУКЦОНИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ *164*
7.3.3. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ *166*
7.3.4. ПОЛУПРОВОДНИЧКИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ *167*
7.4. МЕРЕЊЕ ВИБРАЦИЈА *167*
7.5. МЕРЕЊЕ СИЛЕ И МОМЕНТА *171*
7.5.1. ЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ СИЛЕ *173*
7.5.2. МЕРЕЊЕ НАПРЕЗАЊА УСЛЕД ТОРИЗИЈЕ *176*
7.6. МЕРЕЊЕ ПРИТИСКА *177*
7.6.1. МАНОМЕТРИ СА ТЕЧНОСТИМА *179*
7.6.2. ЕЛАСТИЧНИ ПРЕТВАРАЧИ *179*
7.6.3. МАНОМЕТРИ СА ЕЛЕКТРИЧНИМ ИЗЛАЗОМ *181*
7.7. МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ *185*
7.7.1. НЕЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ ТЕМПЕРАТУРЕ *189*
7.7.1.1. Експанзиони термометри *189*
7.7.1.2. Дилатациони термометри *190*
7.7.1.3. Биметални термометри *191*
7.7.1.4. Манометарски термометри *192*
7.7.2. ЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ ТЕМПЕРАТУРЕ *194*
7.7.2.1. Термоелементи (термопарови) *194*
7.7.2.2. Отпорни термометри *197*
7.7.2.3. Сензори температуре на бази PN споја *205*
7.7.3. БЕСКОНТАКТНО МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ *207*
7.8. МЕРЕЊЕ ПРОТОКА *212*
7.8.1. МЕРЕЊЕ ПРОТОКА ПОМОЋУ ЦЕВИ СА СУЖЕЊЕМ *213*
7.8.2. РОТАМЕТРИ *217*
7.8.3. ВОЛУМЕТРИЈСКИ МЕРАЧИ *218*
7.8.4. ТУРБИНСКИ МЕРАЧИ *219*
7.8.5. ВРТЛОЖНИ МЕРАЧИ *220*
7.8.6. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ МЕРАЧИ *220*
7.8.7. УЛТРАЗВУЧНИ МЕРАЧИ *224*
7.8.8. КОРИОЛИСОВИ МЕРАЧИ *227*
7.8.9. ТЕРМИЧКИ МЕРАЧИ *228*
7.8.10. АНЕМОМЕТРИ СА УГРЕЈАНОМ ЖИЦОМ *229*

7.9. МЕРЕЊЕ НИВОА 230
7.9.1. ДЕТЕКТОРИ НИВОА *231*
7.9.1.1. Пловак *231*
7.9.1.2. Кондуктивни детектори нивоа *232*
7.9.2. МЕТОДЕ ЗА КОНТИНУАЛНО ПРАЋЕЊЕ НИВОА *233*
7.9.2.1. Капацитивни сензори нивоа *233*
7.9.2.2. Отпорни сензори нивоа *234*
7.9.2.3. Ултразвучни сензори нивоа *235*
7.10. МЕРЕЊЕ ВЛАЖНОСТИ *236*
7.10.1. МЕРЕЊЕ РЕЛАТИВНЕ ВЛАЖНОСТИ ВАЗДУХА ПОМОЋУ ТАЧКЕ РОСЕ *236*
7.10.2. ЕЛЕКТРИЧНИ ПРЕТВАРАЧИ ВЛАЖНОСТИ *237*
7.10.2.1.Капацитивни претварачи влажности *237*
7.10.2.2.Отпорни претварачи влажности *237*

8. ВИШЕФУНКЦИЈСКИ ДИГИТАЛНИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ 241
8.1. ФУНКЦИЈЕ ДИГИТАЛНИХ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА *242*
8.2. АРХИТЕКТУРА МИКРОПРОЦЕСОРСКИХ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА *246*
8.3. ОСНОВНЕ МЕРНЕ ФУНКЦИЈЕ ДИГИТАЛНИХ ИНСТРУМЕНАТА *249*
8.3.1. БРОЈАЊЕ *249*
8.3.2. МЕРЕЊЕ ВРЕМЕНА И УЧЕСТАНОСТИ *250*
8.3.3. МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ НАПОНА *252*
8.4. ПОМОЋНЕ (МЕРНЕ) ФУНКЦИЈЕ *254*
8.4.1. МЕРНИ ОПСЕГ *254*
8.4.2. ИНИЦИРАЊЕ МЕРЕЊА *254*
8.4.3. ТРАЈАЊЕ МЕРЕЊА *255*
8.4.4. САМОПОДЕШАВАЊЕ *255*
8.4.5. ВИШЕКАНАЛНО МЕРЕЊЕ *256*
8.4.6. ФИЛТРИРАЊЕ *256*
8.5. МАТЕМАТИЧКА ОБРАДА *257*
8.5.1. ОДСТУПАЊЕ *257*
8.5.2. РАЗМЕРАВАЊЕ *258*
8.5.3. КОНТРОЛА ГРАНИЧНИХ ВРЕДНОСТИ *259*
8.5.4. НЕЛИНЕАРНЕ ФУНКЦИЈЕ *260*
8.5.5. СТАТИСТИЧКА ОБРАДА *261*
8.6. ЧУВАЊЕ ПОДАТАКА *262*
8.7. КОМУНИКАЦИОНЕ ФУНКЦИЈЕ *263*
8.7.1. *HMI*-ДИЈАЛОГ *263*
8.7.2. ПРЕНОС ПОДАТАКА *265*

9. ПРОГРАМАБИЛНА МЕРНА СРЕДСТВА 267
9.1. ПРОГРАМАБИЛНИ КОНДИЦИОНЕРИ И МЕРНИ ПРЕТВАРАЧИ *268*
9.1.1. ПРОГРАМАБИЛНИ СИСТЕМ ЗА КОНДИЦИОНИРАЊЕ АНАЛОГНИХ МЕРНИХ СИГНАЛА *271*
9.1.2. ОСНОВНИ ТИПОВИ ПРОГРАМАБИЛНИХ КОНДИЦИОНЕРА *277*
9.1.2.1. Кондиционер опште намене *277*
9.1.2.2. Кондиционер типа потенциометар *278*
9.1.2.3. Кондиционер типа мерни мост *280*
9.1.2.4. Кондиционер типа термопар *281*
9.2. ПРОГРАМАБИЛНИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ *282*
9.3. ПРОГРАМАБИЛНИ МЕРНИ СИСТЕМИ *285*

10. ИНТЕРФЕЈСНИ СИСТЕМИ У МЕРНОЈ ТЕХНИЦИ 289
10.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ *291*

10.2. КЛАСИФИКАЦИЈА ИНТЕРФЕЈСА *295*
10.3. ПРЕНОС ПОДАТАКА *297*
10.4. ИНТЕРФЕЈСИ ЗА СЕРИЈСКИ ПРЕНОС ПОДАТАКА *299*
10.4.1. СТРУЈНА ПЕТЉА *299*
10.4.2. ИНТЕРФЕЈС *RS-232* *300*
10.4.3. ИНТЕРФЕЈС *RS-422* *303*
10.4.4. ИНТЕРФЕЈС *RS-485* *304*
10.4.5. УНИВЕРЗАЛНА СЕРИЈСКА МАГИСТРАЛА *USB* *304*
10.4.6. МОДЕМ *304*
10.5. ИНТЕРФЕЈСИ ЗА ПАРАЛЕЛНИ ПРЕНОС ПОДАТАКА *306*
10.6. ИНТЕРФЕЈС ПРОГРАМАБИЛНИХ МЕРНИХ УРЕЂАЈА *308*
10.7. *GPIB* ИНТЕРФЕЈСНИ СИСТЕМ *312*
10.7.1. СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАДА *312*
10.7.2. ИНТЕРАКТИВНИ ПРЕНОС ПОДАТАКА *315*
10.7.3. ЕЛЕКТРИЧНЕ И МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ *319*

11. АУТОМАТИЗОВАНИ МЕРНИ СИСТЕМИ 321
11.1. РАЧУНАР КАО КОНТРОЛЕР СИСТЕМА ПРОГРАМАБИЛНИХ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА *321*
11.2. ПРИМЕНА *GPIB*-СИСТЕМА *324*
11.2.1. ПРОГРАМСКИ РУКОВАОЦИ *GPIB*-ИНТЕРФЕЈСОМ *325*
11.3. ПРОГРАМИРАЊЕ И ОЧИТАВАЊЕ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА ПОМОЋУ РАЧУНАРА И ИНТЕРФЕЈСА *GPIB* *326*
11.3.1. ПРИМЕР 1: ЗАДАВАЊЕ РАДНОГ РЕЖИМА ИНСТРУМЕНАТА И ОЧИТАВАЊЕ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА *326*
11.3.2. ПРИМЕР 2: РЕГИСТРАЦИЈА (ЗАПИС) МЕРЕЊА *329*
11.3.3. ПРОЗИВАЊЕ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА *332*
11.4. ПРОГРАМСКА ПОДРШКА МЕРНИХ СИСТЕМА *334*
11.4.1. ПРОГРАМСКИ ЈЕЗИК *VEE Pro* *336*
11.5. АУТОМАТИЗОВАНИ ИСПИТНИ СИСТЕМИ *338*
11.5.1. ЛАБОРАТОРИЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ И ОВЕРУ БРОЈИЛА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ *339*

12. ДАЉИНСКО МЕРЕЊЕ 347
12.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ *349*
12.2. ПРЕНОС ПОДАТАКА *353*
12.3. ДИСТРИБУИРАНИ МЕРНИ СИСТЕМИ *355*
12.3.1. КОМУНИКАЦИОНИ ПРОТОКОЛ *359*
12.4. АУТОМАТСКО ОЧИТАВАЊЕ БРОЈИЛА *363*

ПРОБЛЕМИ 367

РЕЧНИК ПОЈМОВА 295

ИНДЕКС 297

# 1.
# УВОД

Метрологија је наука о мерењима, методама и средствима обезбеђења њиховог јединства, као и начину постизања потребне тачности. Са циљем да се оствари координација сарадње националних метролошких институција у областима истраживања у метрологији, следивости мерења до јединица *SI*[1], међународног признавања националних еталона[2] и могућности еталонирања и мерења, основана је 2007. године одговарајућа регионална метролошка организација: Европско удружење националних метролошких института (*European Association of National Metrology Institutes, EURAMET*). Ова организација настоји да "успостави заједничко метролошко разумевање и референтни оквир, како у Европи, тако и између Европе и осталих региона широм света". У центру пажње је уједначеност услуга мерења и испитивања која се односе на квалитет живота, заштиту животне средине и трговину, посебно тамо где су техничке сметње трговини узроковане „метролошким сметњама". Метрологија је подељена на три врсте различитог нивоа сложености и тачности:

- **научна метрологија** представља највиши ниво, који се односи на организацију, развој и одржавање мерних еталона;
- **индустријска метрологија** се бави обезбеђивањем адекватних мерних средстава за потребе индустрије, производних процеса и испитивања;
- **законска метрологија** се бави питањима која се односе на утврђивање техничких захтева и административних поступака којима се гарантује сигурност и одговарајућа тачност мерења, са циљем да се обезбеди транспарентност економских трансакција заснованих на резултатима мерења.

Метрологија је нераскидиво повезана са развојем науке. Унапређена мерна средства омогућују научницима да наставе своја истраживања, а научни развој обликује основу за унапређење саме метрологије. Индустријска и законска метрологија такође се непрекидно развијају, да би остварила своју улогу и задовољила потребе савременог друштва.

У складу са потребама развијеног друштва, научна метрологија непрестано напредује у дубину, у правцу остваривања све веће тачности, али и у ширину, задирући у нова подручја. Све више пажње посвећује се

---

[1] Међународни систем јединица (*International System of Units, SI*) је 1960. године усвојила Једанаеста генерална конференција за тегове и мере (*11th CGPM*) и препоручила за све области физике и технике. То је кохерентни систем у којем све изведене јединице могу да се изразе као производ степена седам основних јединица (лат. *coherentia*, повезаност).

[2] Еталон је материјално остварење јединице мере одређене физичке величине које се користи као референца у односу на коју се резултати мерења исказују.

мерењима која су мултидисциплинарна или потпуно изван подручја физике. Током последњих година повећала се потреба да се квантификују ефекти које деловања мноштва фактора има на људско тело, посебно са становишта здравља и безбедности. Да би се остварила објективна квантификација потребно је да се дефинишу подесне мерљиве величине, као и да се оствари повезивање јединица мере физиолошких[3] величина са јединицама међународно прихваћеног система јединица. Овај задатак представља својеврстан проблем, јер се при описивању биолошких величина обично укључују "тежински" сачиниоци, који зависе од различитих утицаја, и често не могу да прецизно буду познати или дефинисани.

Врхунски ниво научне метрологије представља фундаментална метрологија**.** Иако не постоји међународно усаглашена дефиниција овог појма, он се користи да означи највиши ниво тачности у одређеној области. Са тог становишта, фундаментална метрологија може да се посматра као научна метрологија подржана деловима законске и индустријске метрологије.

Научна метрологија је подељена на девет области, у складу са поделом надлежности саветодавних комитета Међународног бироа за тегове и мере[4]. То су, према редоследу оснивања: електрицитет и магнетизам, фотометрија и радиометрија, термометрија, дужина, време и учестаност, јонизујуће зрачење, маса и сродне величине, количина супстанце – хемија, акустика, ултразвук и вибрације. У документима *EURAMET*-а придодата је област која има посебан значај у савременој индустрији: проток. Подела на области и подобласти индустријске метрологије приказана је у табели 1.1.

| | |
|---|---|
| електрицитет и магнетизам | једносмерне електричне величине, наизменичне електричне величине, високофреквентне електричне величине, велике струје и високи напони |
| фотометрија и радиометрија | оптичка радиометрија, фотометрија, колориметрија, оптичка влакна |
| термометрија | контактна мерења температуре, бесконтактна мерења температуре, влажност |
| дужина | таласне дужине и интерферометрија, димензиона метрологија, мерење угла, облици, квалитет површине |
| време и учестаност | мерење времена, мерење учестаности |
| јонизујућа зрачења и радиоактивност | абсорбована доза – медицински производи, заштита од зрачења, радиоактивност |
| маса и сродне величине | сила, притисак, запремина[5], густина, вискозност |
| хемија | хемија околине, клиничка хемија, хемија материјала, прехрамбена хемија, биохемија, микробиологија, мерење *pH* |
| акустика, ултразвук и вибрације | акустичка мерења у гасовима, мерење убрзања, акустичка мерења у течностима, ултразвук |
| проток | проток (запремина) гасова, проток воде (запремина, маса и енергија), анемометрија |

Табела 1.1. Области и подобласти индустријске метрологије

[3] Физиологија се бави изучавањем појава својствених живим организмима.

[4] *The International Bureau of Weights and Measures* је међувладина организација која је основана Метарском конвенцијом 1875. године.

[5] Треба уочити да мерење запремине није сврстано у област мерења дужине.

Заштита здравља, заштита околине и техничка безбедност добијају све већи значај, па се може очекивати издвајање нових области и подобласти.

Развој технике нераскидиво је повезан са мерењем. Брзи развој савремених технологија био би практично неостварљив без одговарајуће метролошке подршке која обезбеђује поуздане и тачне податке током испитивања новог производа односно новог производног процеса[6]. Са друге стране, еволуција електронике, од физичке електронике до инжењерске, апликативне, представљала је квалитативни скок, прелазак квантитета у квалитет, који је имао неслућене последице. Продор електронике у област индустријске метрологије утицао је на побољшање многих карактеристика мерних средстава, придодао им нова својства, открио нове путеве за решавање мноштва проблема. Усавршена технологија производње електронских компонената омогућила је, са једне стране, побољшање функционалности мерних уређаја - појаву и експанзију вишенаменских мерних инструмената и система[7], а са друге, потпуну аутоматизацију[8] обраде података добијених мерењем.

## 1.1 МЕРЕЊЕ И РАЧУНАЊЕ

За развој савремених мерних уређаја, познавање рачунарске технике је од посебног интереса. Данас се под називом "рачунар" подразумева електронски уређај, иако су прве рачунске машине биле механичке, а неки облици оваквих уређаја су до недавно били у употреби (механички таксиметри и коректори запремине гаса, на пример). Захваљујући развоју електронике, рачунари су трансформисани од "постројења", која су за свој рад захтевала 200 kW електричне снаге, у интегрисана кола која представљају компоненте мерних, управљачких и комуникационих уређаја.

Средином двадесетог века аналогна[9] рачунарска техника је, подржана развојем технологије интегрисаних електронских кола, доминирала при решавању проблема аутоматског израчунавања вредности посредно мерених електричних и неелектричних величина. Занемаривши свет микрофизике (корпускуларну структуру материје и квантне ефекте), величине које карактеришу стање технолошких процеса представљају аналогне променљиве, па је било најприродније, а са становишта расположиве технике и најекономичније, да се и обрада мерне информације врши у аналогном облику. Линеарне операције се у аналогној техници реализују са високом

---

[6] Под процесом се подразумева скуп операција који остварује трансформацију, пренос или складиштење материјала, енергије или информација (од лат. *processus* ток, начин којим се нешто дешава).

[7] У техници, под појмом "систем" подразумева се скуп међусобно повезаних елемената, посматран у одређеном контексту као целина, састављена са циљем да се оствари одређена функција. Назив потиче од грчке речи *sýstĕma*, оно што је састављено; уређена и од разноврсних делова састављена целина.

[8] Без непосредног учешћа човека у извршавању (од грч. *automatos*, који сам од себе ради).

[9] Назив потиче од грчке речи *analogos,* сличан, сродан, истоврсан. Аналогне физичке појаве су међусобно различите појаве у физици (механици, термодинамици, електротехници) које се могу описати истим аналитичким изразима. Аналогне (електричне) величине су сличне физичким величинама у свакодневном животу, као што су дужина, маса, брзина кретања, притисак и температура.

тачношћу. Нелинеарни функционални блокови (којима се остварују операције множења, дељења, кореновања, логаритмовања и слично) имају знатно лошије перформансе, већу сложеност и вишу цену. Практично све до појаве микропроцесора[10], мерни поступци који су обухватали сложенију математичку обраду коришћени су у сразмерно малом броју случајева, као што је, на пример, израчунавање релативне грешке при испитивању бројила електричне енергије. Савремени дигитални[11] мерни инструменти, међутим, ефикасно обављају аутоматску поправку систематске грешке мерног поступка, самоподешавање као и самотестирање са циљем провере својих функција. Поред високих метролошких перформанси, које се на тај начин постижу, посебно значајно обележје дигиталних мерних инструмената су и могућност складиштења (меморисања[12]) низа резулатата мерења, као и локална математичка обрада мерних података.

Пример потребе за непосредном нумеричком обрадом представља мерење учестаности електроенергетске мреже. С обзиром да се ради о једном од основних параметара стања електроенергетског система, ово мерење има изузетан значај за управљање производњом електричне енергије. На први поглед, проблем је једноставан, скоро тривијалан, ако се има на уму чињенице да је учестаност електричних сигнала величина која се, у овом тренутку, може измерити са већом тачношћу него било која друга физичка величина. Класичне методе мерења су са великом муком успевале да испуне захтеве у погледу ширине мерног опсега, тачности и брзине мерења учестаности у савременим електроенергетским системима са аутоматском регулацијом снаге[13]. Пресликавање вредности учестаности мерног сигнала на вредност једносмерног напона (или једносмерне струје), могуће је остварити са задовољавајућом брзином одговора, али уз ограничену тачност. Са друге стране, када се учестаност одређује (мери) по дефиницији ове величине, као количник броја неких догађаја[14] и трајања временског интервала током којег су посматрани догађаји настали, могуће је остварити екстремно високу тачност, али само по цени неприхватљиво спорог одзива. Наиме, потребно је да мерење траје више од петнаест минута да би се на овај начин постигло да резолуција[15] буде на задовољавајућем нивоу (хиљадити део херца).

Проблем мерења ниских учестаности, у које спада и учестаност наизменичног напона енергетске мреже, успешно се решава посредним поступком, тј. мерењем периода мерног сигнала и израчунавањем реципрочне вредности. Међутим, у класичној мерној техници није постојало задовољавајуће (довољно тачно и економично) решење за остваривање операције дељења, коју овакав поступак мерења захтева. До појаве дигиталних интегрисаних кола високог

---

10 Под називом микропроцесор (*microprocessor*) подразумева се централна процесорска јединица рачунара (*Central Processing Unit - CPU*) произведена као јединствено интегрисано коло.

11 Дигиталне величине су величине које могу да имају неку из низа одвојених вредности. Дигит је члан коначног скупа ненегативних целих бројева који се користи за представљање дискретних величина (бројчани знак, цифра, од лат. *digitus,* прст). У општем случају, дигитална величина се дефинише као величина која има коначан или бесконачан пребројив скуп дискретних вредности (од лат. *discretus,* раздвојен, одвојен)

12 Назив потиче од лат. *memoria*, успомена, сећање.

13 У стационарном стању електроенергетског система, просечно одступање мрежне учестаности мања је од 50 mHz, што је 0,1 % називне вредности.

14 У најопштијем смислу, догађај представља настанак неке појаве која се понавља (осцилација неког динамичког система, појава импулса).

15 Способност разлагања (од лат. *resolutio,* разлучивање, растављање). У мерној техници се под овим називом подразумева најмања промена мерене или задате величине при којој се може очитати њена вредност без интерполације (процене на основу познатих суседних вредности).

степена интеграције, примењивали су се различити, мање или више сложени, комбиновани поступци за решавање овог проблема. Микропроцесор, који је постао практично неизбежни саставни део бројачких мерних уређаја, омогућује остваривање разноврсних израчунавања неопходних при мерењу временских параметара импулсних сигнала, као и извршавање низа додатних функција (као што су компензација систематских и смањивање утицаја случајних грешака путем вишеструких мерења и статистичке обраде резултата, одређивање апсолутног и релативног одступања од називне вредности итд). У посматраном случају, микропроцесор омогућује да се прецизно мерење, са резолуцијом од једног хиљадитог дела херца, оствари у свакој периоди мерног сигнала.

Мерна техника двадесетог века била је снажно усмерена ка аналитичком приступу, што подразумева примену математичких модела којима се описује начин рада делова који се повезују да би формирали комплексан мерни систем. Захваљујући рачунарима, једноставни линеарни модели, на основу којих се могу одредити само основне карактеристике система, уступили су место тачнијим, али и сложенијим. У класичној, мерној техници нелинеарност карактеристика појединих компонената мерног ланца представљала је озбиљан проблем чијем је решавању применом нелинеарних електричних кола посвећено много пажње. Међутим, апроксимација карактеристике полиномом десетог реда која се, на пример, захтева при прецизном мерењу температуре помоћу термопарова[16], превазилази могућности аналогне технике. Дигиталном обрадом овај се проблем успешно решава. Линеаризација, компензација промена утицајних величина и израчунавања вредности посредно мерених величина обављају се програмски[17]. Програмабилност је постала фундаментално својство мерне технике.

Суштинско обележје дигиталних система су могућност складиштења података у одговарајућој меморији и програмирање. На томе се заснива универзалност рачунарских машина. Исти уређај може да се примени за решавање различитих задатака. Следећи корак је способност аутоматског прилагођавања програма рада променљивим условима окружења у којем се налази. На тој основи настали су и "интелигентни"[18] мерни уређаји и системи.

Метрологија спада у оне области у којима је примена рачунарске технике довела до промена које се могу сматрати револуционарним. Нова грана, заснована на примени универзалних рачунарских машина, развијала се и ширила задивљујућом брзином. Уз помоћ рачунара ефикасно су остварене основне функције у процесу мерења:

- конфигурисање мерног система,
- управљање мерним системом,

---

[16] Термопар (*thermocouple*) је сензор температуре који представља спој два различита проводна материјала. Међусобним дејством термичке и електричне појаве (Зебеков ефект) остварује се претварање топлотне енергије у електричну. Између отворених крајева термопара успоставља се напон који зависи од разлике температура спојених и отворених крајева. У литератури на нашем језику користе се и називи "термоелемент", "термоспрег" и "термоспој".

[17] Програм је распоред по којем ће се нешто изводити (обављати), од грч. *programma*, распоред, списак. Програмабилан је уређај чији се начин рада може мењати, сходно потребама корисника, избором једне од понуђених опција.

[18] Назив потиче од лат. *inteligentia*, способност разумевања ствари и појава, способност схватања и поимања, разум.

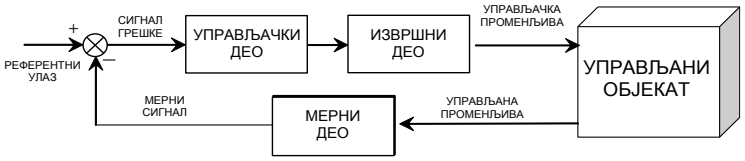
- мерење (узимање података о вредностима величина које се мере),
- обрада и приказ мерних података.

Рачунар је постао језгро аутоматизованих мерних система, обезбеђујући брзо долажење до резултата при пројектовању, моделовању и испитивању нових производа. Управљање радом мерних инструмената и система значајно је поједностављено. Функције као што су бирање одређене процедуре из све бројнијег скупа предефинисаних мерних процедура, као и задавање конкретних радних параметара сложеног мерног система, захтевале су развој нових решења спреге корисника и опреме коју користи. Савремени интерфејс[19] човек-машина обухвата хардверске и софтверске компоненте помоћу којих се остварује размена информација између корисника и рачунарског система.

Могућности микрорачунарски заснованих мерних уређаја потпуније су искоришћене њиховим повезивањем са рачунарима опште намене. Оваква конфигурација нуди све предности дистрибуиране обраде информација. Ефикасност примене инструмената у склопу комплексних мерних система заснована је на постојању могућности коришћења већег броја рачунарских уређаја, који могу успешно да обаве функције управљања системом и подацима, као и на постојању стандардизованих поступака за међусобно повезивање (спрезање) оваквих инструмената.

## 1.2 МЕРЕЊА У АУТОМАТИЦИ - АУТОМАТИКА У МЕРЕЊИМА

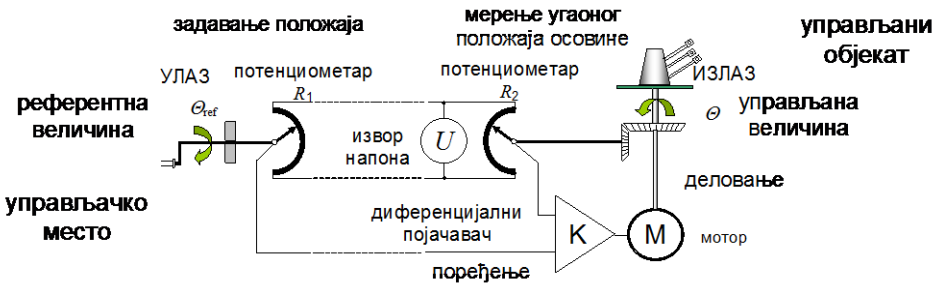
Темељи савремених система управљања процесима у разноврсним областима засновани су на достигнућима теорије аутоматског управљања, технологије електромеханичких, хидрауличких и пнеуматских компонената, али и мерне технике. Мерни део, као „информациони орган“ је есенцијални део система аутоматског управљања. Његова својства одређују својства система у целини. У затвореном систему аутоматског управљања, управљачки сигнал образује се на основу одступања стварне вредности управљане величине од оне која је задата. Управо на основу показивања мерног дела остварује се деловање којим се процес доводи у жељено стање, без обзира на разне поремећаје и промене услова околине (слика 1.1).




Слика 1.1. Аутоматско управљање

[19] У ужем смислу, под интерфејсом (*interface*) се подразумева граница, у смислу споја, спреге између система или делова система преко које се врши пренос информација. Тастатура, миш и екран (монитор) представљају спрегу помоћу које се остварује размена информација између људског бића као корисника и рачунарског система као машине која извршава одређен задатак (*Human Mashine Interface - HMI*). У ширем смислу, он обухвата и програме којима се остварује одговарајући дијалог.

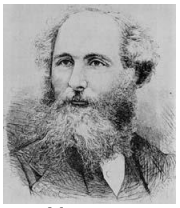
Телемеханички[20] позициони сервосистем[21], приказан на слици 1.2, представља класичан пример примене повратне спреге за остваривање даљинског управљања. Управљана величина $\theta$, која представља угаони положај осовине удаљене платформе (артиљеријског оружја или радарске антене) мери се помоћу потенциометра[22] $R_2$, чији клизач је круто спрегнут са осовином чијим се положајем управља.




Слика 1.2. Даљинско управљање положајем

Електрични напон добијен на клизачу потенциометра $R_2$ пореди се са напоном добијеним на клизачу потенциометра $R_1$, помоћу којег се мери референтни (задати) угао $\theta_{ref}$. Разлика ова два напона, која представља сигнал грешке, доводи се на улаз појачавача *K* који преко мотора *M* окреће платформу у смеру у којем се вредност диференцијалног напона на улазу појачавача смањује. Систем је у равнотежи, ако је диференцијални напон на улазу појачавача једнак нули, односно, ако је угао излазне осовине $\theta$ једнак референтном углу $\theta_{ref}$, задатом на командном месту. Излазна величина прати[23] улазну величину, која одређује жељени правац. У савременим системима, вредност референтне величине (угла) може да буде податак који генерише рачунарски систем, на основу предефинисаног програма управљања или наредбе коју је руковаоц издао преко тастатуре, екрана осетљивог на додир или гласом, а информација се од командног центра до управљаног објекта преноси у дигиталном облику.

Још у старом Риму повратна спрега (*feedback*) се примењивала за регулацију нивоа воде у аквадуктима. Научни развој теорије управљања техничким системима започео је у доба индустријске револуције. Шкотски инжењер и проналазач Ват (*James Watt,* 1736-1819) развио је центрифугални регулатор брзине парне машине (1769). Век касније, његов земљак Максвел (*James Clerk Maxwell,* 1831-1879) извршио је математичку анализу повратне спреге и проблема стабилности на примеру Ватовог регулатора.


Максвел

[20] Телемеханика (*telemechanic*) се бави управљањем машинама на даљину.
[21] Затворен систем у коме је управљана величина механички положај.
[22] Потенциометар је подесиви отпорник са три прикључка који се примењује као електромеханички сензор транслаторног или угаоног помераја.
[23] Праћење је један од основних типова задатака у системима управљања.

Појам повратне спреге заузима значајно место у општој теорији управљања, чији се настанак, као посебне дисциплине, обично повезује са објављивањем књиге Норберта Винера (*Norbert Winer, 1896-1964*) "Кибернетика, или управљање и комуникација код живих бића и машина" (1948). Бавећи се, за време другог светског рата, разрадом и применом електронских рачунарских машина за балистичке прорачуне, он је задатак усмеравања противавионске ватре повезао са општом теоријом аутоматског управљања.


Норберт Винер

Потреба за аутоматизацијом сложених индустријских процеса подстакла је развој разноврсних система способних да реализацију овог задатка обаве на начин који највише одговара потребама и специфичностима конкретне примене. Управљачки системи у индустрији (*Industrial control system-ICS*) обухватају од *SCADA*-система[24] који прикупљају податке са циљем надзора и управљање сложеним постројењима, преко система који управљају дистрибуираним процесима (*Distributed Control Systems, DCS*) до програмабилних контролера (*Programmable Logic Controllers, PLC*) који се користе за локално управљање деловима инфраструктуре. Границе између *SCADA* и *DCS*-система, односно *PLC* уређаја, нису строго и прецизно дефинисане. Развој технологије је допринео да се њихове функције мешају, јер се системи прилагођавају захтевима процеса којим управљају. Оно што је заједничко је чињеница да се у основи функционисања управљачких система налази индустријска метрологија, јер се једино на основу резултата мерења може одредити деловање којим ће се управљани систем довести у жељено стање.

Применом индустријске аутоматике (*ICS*) остварује се побољшање економичности и квалитета производње. То се постиже на два начина. Први је повезан са редукцијом потребне радне снаге, смањивањем производних трошкова и ефикаснијим коришћењем расположивих производних ресурса. Поред тога, повећање квалитета производње огледа се и у повећаном степену сигурности остваривања технолошких процеса. Од индустријског система се очекује „отпорност" на грешке и трајно обезбеђење непрекидног рада. Модуларност[25] физичких и програмских елемената обезбеђује флексибилност и проширивост система.

*SCADA*-системи могу да обрађују хиљаде мерних сигнала, да би се управљање остварило на основу стварног стања надзираног објекта/система. Савремена *SCADA* представља скуп наменских, међусобно повезаних рачунарских уређаја, чији је заједнички циљ остварење функција надзора и/или управљања физичким процесом у реалном времену. Садржи мрежу

---

[24] Систем који надзире, управља и прикупља податке о сложеном индустријском процесу (*SCADA = supervusory control and data acquusition*).

[25] Модул представља мање или више независну функционалну јединицу која се користи, заједно са другим јединицама, при формирању сложених целина. У техници, модул је саставни део система, који се из њега може издвојити или заменити неким другим компатибилним модулом. Назив потиче од латинске речи *modulus* (јединица за меру, мера, мерило) који је уопштено коришћен да означи меру за одређивање величина појединих делова, а посебно калуп за ливење метака. Модуларна концепција електронских уређаја је управо настала при развоју опреме за војне потребе .

рачунара, у општем случају просторно расподељених, чији је задатак да прикупе податке из индустријског постројења, и на основу њих изврше управљачке задатке. Примењују се у различитим процесним системима, као што су електроенергетски и водопривредни системи, постројења нафтне и хемијске индустрије

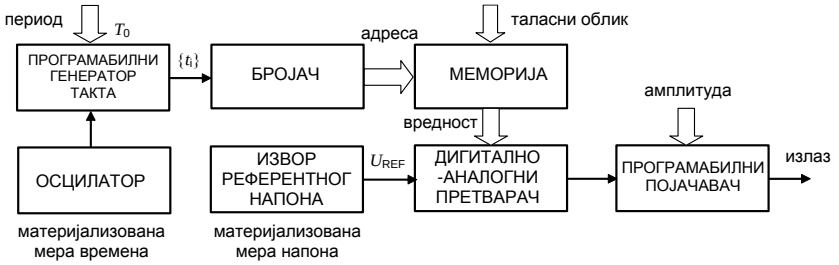
Производња, пренос и дистрибуција електричне енергије подразумева не само управљање електроергетском мрежом него и праћење потрошње, одржавање напона у прописаним границама, детекцију кварова и планирање. У системима водовода и канализације: потребно је перманентно праћење и регулисање протока воде, притиска у цевима, нивоа воде у резервоару и других показатеља стања. Специјализовани *SCADA*-системи омогућују контролу саобраћаја и регулишу саобраћајне сигнале. Системи масовног транспорта (трамваји и тролејбуси) надзиру се даљински. Управљање железничким саобраћајем подразумева праћење и лоцирање возова, аутоматизују сигнализације и контролу пружних прелаза. *SCADA* се примењује и у јавној инфраструктури, за контролу објекта, вентилације и осветљења у њему. Аутоматика се користи не само у индустријским процесима, већ и за потребе истраживачких лабораторија. Аутоматизација мерних поступака представља основно обележје развоја савремене мерне технике. Мерне направе постале су аутомати којима се извршава одређена процедура узимања и меморисања низа вредности, њихова примарна обрада и преношење до централног уређаја. Од аутоматизованих мерних уређаја настали су мерни информациони системи.

При описивању својстава мерних средстава и система користе се појмови из опште теорије система и сигнала, као што су: функционални блок, блок-дијаграм, побуда (*stimulus*), одзив (*response*), статичка карактеристика, фреквенцијска карактеристика (*frequency response*), функција преноса (*transfer function*)...Општи принципи теорије управљања налазе своју примену при дефинисању мерних метода. Основни задаци управљања (стабилизација, извршавање задатог (предефинисаног) програма и праћење променљиве управљачке величине) решавају се при развоју мерних уређаја и система:

– стабилизација је неопходна да би се, на пример, постигло да вредност референтног електричног напона у мерном инструменту не зависи од промене оптерећења или услова околине;

– програмско управљање се примењује не само за аутоматско извршавање сложеног мерног поступка, него и при остваривању подесивих, сталних или временски променљивих референтних величина које представљају материјализоване мере остварене помоћу дигитално-аналогног претварача (слика 1.3);

– поступак добијања резултата мерења као излазне величине се у мерним електронским уређајима извршава и аутоматски понавља, тако да се мерни инструмент понаша као систем са одређеним динамичким својствима који остварује праћење улазне (мерене) величине.




Слика 1.3. Програмабилни генератор напона

Повратна спрега се одавно примењује не само при реализацији појединих функционалних блокова мерних уређаја, већ и као фундаменталан концепт при развоју еталонских система. Негативна повратна спрега омогућује побољшање перформанси мерних кола, па се методологија анализе и синтезе система са повратном спрегом користи као теоријска основа за развој мерних уређаја и система. Аутоматске ваге за паковање и справе за дозирање су примери повезаности аутоматике и мерења.

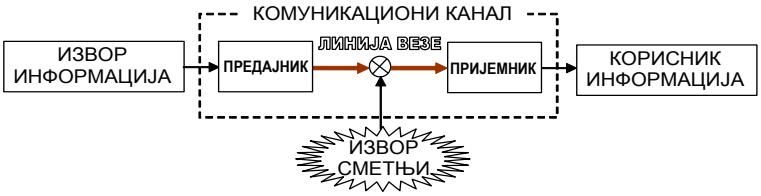
## 1.3 МЕРЕЊЕ НА ДАЉИНУ- ТЕЛЕМЕТРИЈА

Потреба за даљинским мерењем, односно очитавањем мерних величина на месту које је удаљено од места где се те величине стварно мере, постала је све више изражена са развојем сложених, географски распрострањених процесних система, као што су електроенергетски и водопривредни системи, постројења нафтне и хемијске индустрије. Теоријски и практични аспекти даљинског преноса информација (проучавање физичких процеса и појава, метода реализације система, производња и експлоатација комуникационих средстава) обрађени су у различитим областима, али су најпотпуније обухваћени у оквиру телекомуникација[26].

Пренос мерних информација подразумева одређена техничка средства посредством којих се остварује. У најопштијем облику, комуникациони систем се састоји од извора и корисника информација, повезаних комуникационим каналом (слика 1.4). Извор информација генерише поруке (*message*) које треба пренети кориснику: бира једну поруку из скупа могућих и затим је, посредством комуникационог канала, шаље кориснику. Предајник трансформише изабрану поруку у сигнал подесан за пренос - намерно изазван одређени физички процес који у себи носи жељену поруку. Линија везе представља средину кроз коју се сигнал преноси од предајника до пријемника. Пријемник обавља инверзну операцију: трансформише примљени сигнал у поруку. Корисник унапред зна све могуће поруке које извор може да пошаље, али не зна која ће од тих порука бити послана.

---

[26] Грана људске делатности која се бави преношењем (лат. *communicatio*) порука, вести или саопштења од једног места до неке друге удаљене тачке (грч. *tele*, на даљину) посредством електромагнетских система. Основе математичке теорије преноса сигнала поставили су у својим радовима *H. Nyquist* (1924), *R. Hartley* (1928), В.А. Котельников (1933) и *C. Shannon* (1948).

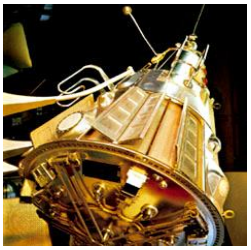



Слика 1.4. Модел комуникационог система

Комуникациони канал, који образују линија везе и пар предајник-пријемник, мора да задовољи услове преноса за било коју од могућих порука. Међутим, због присуства сметњи, послати сигнал није једнозначно одређен примљеним сигналом. Проблеми математичког представљања и анализе процеса преноса и обраде података обрађени су у оквиру теорије информација[27].

Сигнали који представљају информације могу да имају различити облик. Код аналогних сигнала информациони параметар може да има било коју могућу вредност унутар неког опсега. Сигнали који се састоје од низа импулса, чија једна или више карактеристичних величина (нпр. трајање, положај у времену, таласни облик, амплитуда) носи информацију, омогућују вишеканални пренос посредством једне линије везе. У савременим комуникационим системима све више се примењују дигитални сигнали код којих је информација представљена коначним бројем дискретних вредности. Као што постоји више типова информационих сигнала, са различитим карактеристикама, тако постоји низ различитих типова канала кроз које се информације преносе. У настојању да се порука пренесе што је могуће ефикасније и са минимумом изобличења, развијене су различите методе преноса информација у аналогном и дигиталном облику.

Даљински пренос мерних информацијаје разматран је, у почетку, као специфично подручје на периферији области телекомуникационе технике, да би временом прерастао у посебну дисциплину која се назива телеметрија[28] (*telemetry*). Прва примена телеметрије била је у истраживању процеса који се одвијају ван лабораторијских или погонских услова. Слање мерних података из метеоролошких балона може да се обави само радио-путем. Интересовање за процес бежичног преношења сигнала који садржи информацију о мереној величини, од места на којем се мерење врши до неког удаљеног места у циљу



Спутник-3, прва космичка метролошка лабораторија (1958)

[27] Област математичке теорије вероватноће и статистике која се бави одређивањем информационог садржаја и ефикасношћу процеса комуникације.

[28] Под називом „телеметрија“ подразумева се аутоматизовани комуникациони процес помоћу којег се резултати мерења и прикупљања других података са удаљених или неприступачних тачака, даљински преносе до пријемног уређаја. Иако се обично односи на бежични пренос података (применом радио, звучних или светлосних таласа), овај појам обухвата и пренос коришћењем жичане комуникације (путем телефонских и рачунарских мрежа, светловода или енергетске мреже).

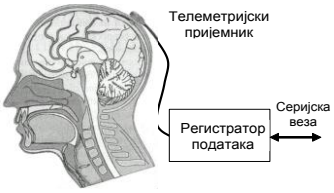
записа (регистрације), приказа или обраде, нагло је порасло након увођења и развоја интерконтиненталних балистичких ракета, сателита и стратосферских летилица са људском посадом. За потребе авиоиндустрије развијене су посебне методе и бројни системи за сакупљање података током тестирања летилица и ракета. Практично сваки авион, сателит или ракета се у току испитивања опрема телеметријским уређајима, што омогућава да се добију информације о хаваријским ситуацијама без угрожавања живота пилота, одстрани субјективни чинилац при анализи података током лета и утврђивању перформанси летилице, као и да се значајно смањи број пробних летова за добијање потребних информација.

Телеметрија је нашла примену у метеорологији, индустрији нафте и гаса, пољопривреди, истраживању дивљих животиња, праћењима која спроводи криминалистичка служба, аутомобилским тркама, **...**



Телеметрија у спорту

На крају двадесетог века, посебна пажња била је посвећена телеметрији у областима биологије и медицине. Развијени су минијатурни телеметријски ендосистеми[29] чија имплантација не утиче (значајно) на стање организма у који се уграђују.




Биомедицински телеметријски систем

Приказане су само три области од посебног значаја за савремену мерну технику. Мерења имају пресудну улогу у трговини, саобраћају, медицинској инструментацији, заштити околине... Метрологија је та која треба да обезбеди заштиту потрошача у малопродаји, али и да објективно посредује у међународној трговини. Мерна средства која се користе у здравственој дијагностици имају све већи значај и подлежу метролошкој регулативи. Безбедност у саобраћају обухвата мерење брзине возила, оптерећење осовине камиона, ниво алкохола у крви. На радним местима се мери интензитет светлости и ниво буке. Мерна техника има изузетну улогу у друштвеном и привредном развоју, за заштиту појединаца и друштва у целини, јер резултати мерења се на много начина одражавају на животни статус људи. Заправо, област индустријске метрологије обухвата не само мерења у индустрији, већ мерења у свим областима свакодневног живота савременог човека.

[29] Предметак у сложеницама *endo*– има значење унутра (грч. *endon*).

# 2.
# МЕРНИ СИГНАЛИ И СИСТЕМИ

Мерење се састоји од поређења мерених (непознатих) са референтним (познатим) величинама и представљања резултата у одговарајућем облику. Мерење је, заправо, информациони[1] процес који обухвата и извршавање неопходних математичких операција. Резултат мерења као информационог процеса је мерна информација, податак који корисник, човек (извршилац мерења) или аутоматизовани систем, даље обрађује, записује (меморише) или преноси другом кориснику. Сврха мерења је добијања информације на основу које се доноси нека одлука односно закључак.

Ово поглавље је посвећено дефинисању појмова који се при разматрању индустријске метрологије користе за описивање мерних сигнала и система. Објашњења су заснована на међународно усаглашеним дефиницијама. Првенствено су коришћени стандардни речници које је објавила Међународна електротехничка комисија[2] [1], [2], [3], као и неки одговарајући документи који су својевремено објављени на српском језику [4], [5]. Треба, притом, имати у виду да се објашњења стручних појмова, који се користе у различитим областима науке и технике, непрекидно усаглашавају, а сами речници допуњују новим терминима, док се неки стари напуштају.

Посебна пажња је посвећена једној новој мултидисциплинарној области коју представљају мерни информациони системи. Дефинисане су основне функције таквих система и приказани су неки карактеристични примери њихове примене.

## 2.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Мерно средство може да се посматра као направа помоћу које се остварује обрада мерних сигнала (слика 2.1). У најопштијем смислу, мерни сигнал[3] је променљива физичка величина[4], функција времена, која

---

[1] У ширем значењу, под информацијом се подразумева знање, сазнање о неким новим, раније непознатим чињеницама, које се може представити у облику погодном за пренос, чување или обраду. Информација може бити представљена помоћу знакова, слика или звука. Појам информације је један од најзначајнијих у савременој науци. Његова важност произилази из његове општости: са појмом информације се сусрећемо при изучавању било које појаве у природи или друштву.

[2] Међународна електротехничка комисија (*International Electrotechnical Commission - IEC*) основана је 1906. године. Задатак ове организације, коју чине национални комитети појединих земаља чланица, је иницирање и унапређивање међународне сарадње по свим питањима која се односе на стандардизацију у области електротехнике и електронике. Речници које ова организација припрема означавају се заједничком ознаком *IEV* (*International Electrotechnical Vocabularu*). Дефиниције коришћене у овој књизи назначене су на уобичајени начин, одговарајућом нумеричком ознаком, датом у заградама, која садржи број *IEC* стандарда, редни број одељка и дефиниције у њему.

[3] Назив потиче од лат. *signum*, знак.

представља информацију [6]. Један или више квантитативних карактеристика (параметара) сигнала садрже (“носе”) информацију о једној или више променљивих величина које сигнал представља. Ови параметри се називају информациони параметри[5] [7].




Слика 2.1. Општи блок-дијаграм мерног средства

Са информационе тачке гледишта, физичка природа носиоца информације је неважна. Значајна је само математичка представа сигнала, као основа за анализу утицаја коју процеси преноса и обраде имају на његов информациони садржај. У практичном смислу, сигнал је физичка величина која се може детектовати[6], помоћу које се преноси порука или информација.

Могу да се разликују две основне врсте величина.

Аналогна величина је променљива величина чији информациони параметар може да поприми било коју вредност унутар одређеног непрекидног интервала вредности.

Дигитална[7] величина је величина чији информациони параметар може да има само неку од вредности из скупа унапред дефинисаних дискретних вредности. У савременој дигиталној техници широку примену имају бинарне величине. То су променљиве величине чији информациони параметар може да поприми само једну од две дискретне вредности. Овим вредностима се обично придружују логичке (Булове) вредности које се означавају са 0 и 1. Бинарна цифра назива се „бит“[8].

У целини посматрано, према својствима скупа могућих вредности променљиве величине, и својствима области дефинисаности независно променљиве (времена), могу се разликовати четири категорије:

– аналогне величине непрекидне по времену;
– аналогне величине дискретне по времену;
– дигиталне величине непрекидне по времену;
– дигиталне величине дискретне по времену.

У најопштијем смислу, под називом “аналогни сигнал” се подразумева сигнал чији информациони параметар директно представља посматрану променљиву величину. Другим речима, аналогни сигнал може да буде сигнал

---

4 Променљива величина (*variable quantity*) је физичка величина чија вредност се мења.

5 Вредност посматране физичке величине може да буде идентична информационом параметру и тада се говори о вредности сигнала. Информациони параметар може да буде, на пример, амплитуда модулисаног носиоца синусног облика.

6 Опазити, открити, од лат *detectio*, откривање, изношење на видело.

7 Дигит је члан коначног скупа ненегативних целих бројева који се користи за представљање информација (бројчани знак, цифра, од лат. *digitus,* прст).

8 Назив бит предложио је Клод Шенон за јединицу количине информације (*binary digit*).

непрекидан или дискретан по вредности, непрекидан или дискретан по времену [8]. У ужем смислу, под овим називом се подразумева сигнал који **у било којем тренутку** може да има **било коју вредност** унутар неког опсега [9]. Такав сигнал може да представља електрични модел било које друге макроскопске физичке величине која представља информацију.

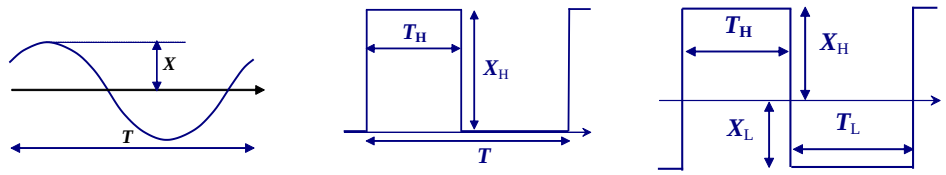
Под називом "дигитални сигнал" у општем смислу подразумева се сигнал представљен коначним бројем дефинисаних дискретних вредности које променљива величина може да има. Информациони параметар представља променљиву величину у кодованом облику, као симбол или скуп знакова [10]. У техници, дигитални сигнал је најчешће дискретан по вредности и дискретан по времену[9] [11].

Класична мерна техника обрађивала је аналогне сигнале. Дигитална (технолошка) револуција је истакла у први план сигнале који представљају величине које су дискретне и по вредности и по времену. Промена вредности таквих величина је скоковита, а може да се изврши само у одређеним тренуцима времена.

Мерни сигнал је величина која представља мерену величину и са којом је функционално повезана. Носилац информације може да буде, на пример, аналогна величина чија вредност представља хармонијску[10] функцију времена чија је кружна учестаност $\omega$ (слика 2.2.а):

$$x(t) = X\ \boldsymbol{sin}(\omega t + \varphi) = X\ \boldsymbol{sin}(2\pi f t + \varphi) = X\ \boldsymbol{sin}(2\pi \frac{t}{T} + \varphi)\,. \qquad (2.1)$$

Притом, било који од параметара сигнала чији математички модел представља синусна функција (амплитуда, учестаност, период или почетна фаза) може да представља информациони параметар који приказује мерену величину. Параметри сигнала који нису функционално повезани са мереном величином су неинформативни параметри. Жељена информација добија се мерењем одговарајућег параметра.




а) б) в)

Слика 2.2. Мерни сигнали

[9] Могуће вредности карактеристичног параметра и тренуци времена у којима су детерминисане могу да буду нумерисани и приказани бројевима коначне дужине.

[10] Функција синусног облика се у физици назива "хармонијска". Назив потиче од грч. *harmonikós* складан, благозвучан.

Када се као носилац информације користи периодични[11] сигнал правоугаоног таласног облика (слика 2.2.б), информациони параметар може да буде вршна (темена) вредност величине, учестаност, период или трајање импулса. Посебан значај у мерној техници имају информациони параметри који представљају бездимензионе величине. Такав парметар је, на пример, количник трајања импулса и периода њиховог понављања:

$$\theta = \frac{T_{\mathrm{H}}}{T}, \tag{2.2}$$

који се користи, уз одговарајуће скалирање, за представљање ненегативних величина ($0 \le \theta \le 1$). За представљање величина чија вредност може да буде позитивна или негативна користи се параметар дефинисан изразом (слика 2.2.в):

$$\psi = \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}} + T_{\mathrm{L}}}, \tag{2.3}$$

чија вредност може да буде у опсегу од минус један до један. То омогућује представљање величина које могу да имају оба знака (биполарне величине).

У електротехници сигнали су електричне величине[12], функције времена. У најједноставнијем облику, сигнал је електрична "копија" посматране променљиве физичке величине $a(t)$. У том случају информациони параметар је тренутна вредност изабране електричне величине $x(t)$, која је сразмерна вредности мерене величине $a(t)$ у датом тренутку.

У великом броју случајева мерене величине су по својој природи споро променљиве функције времена, тако да се може, са довољном тачношћу, сматрати да током временског интервала потребног да се мерење изврши (резултат очита) имају сталну вредност. Временски променљива мерена величина $x(t)$ може да се аналитички представи у облику:

$$x(t) = X_{\max}\, w(t), \tag{2.4}$$

где је $X_{\max}$ вршна вредност[13] унутар посматраног временског интервала (који траје од почетног тренутка $t_{\mathrm{p}}$, до свог краја у тренутку $t_{\mathrm{к}}$):

$$X_{\max} = \boldsymbol{max}\left|x(t)\right|;\ t \in [t_{\mathrm{p}}, t_{\mathrm{k}}], \tag{2.5}$$

а $w(t)$ представља бездимензиону величину, нормализовани сигнал јединичне амплитуде, којим је одређен таласни облик[14] функције $x(t)$. У таквим случајевима користе се карактеристичне вредности, показатељи који

---

[11] Придев "периодични" (*periodic*) користи се за опис променљиве величине $b$ који се идентично репродукује у једнаким интервалима независно променљиве $a$:
$b(a + A) = b(a),\quad -\infty < a < \infty,\ A > 0$ .
Назив потиче од грчких речи *perí*, око, около и *odós*, пут, ход (лат. *periodus*, обилазак).

[12] Електрични сигнал може да носи информацију о вредности неелектричне величине.

[13] Темена вредност, највећа вредност променљиве величине у одређеном временском интервалу (*peak value*). За периодичну величину интервал је једнак периоду.

[14] Талас (*wave*) је промена физичког стања средине која се простире у тој средини. Таласни облик (*waveform*) је приказ таласа помоћу дијаграма, цртежа, једначина, табела или статистичких података.

интегрално описују облик и интензитет мерене величине. У техници се највише примењују и мере средња вредност $\overline{x(t)}$, средња апсолутна вредност $\overline{|x(t)|}$ и ефективна вредност $X_{\text{eff}}$ [12].

Под називом **средња вредност** величине подразумева се величина која је дефинисана као аритметичка средина тренутних вредности посматране величине[15]. За низ од $n$ вредности $x_1$, $x_2$,… $x_n$ средња вредност је једнака:

$$\overline{x(t)} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + ...x_n)\,. \tag{2.6}$$

Средња вредност променљиве величине $x(t)$, посматрана у временском интервалу од почетног тренутка $t_p$, до крајњег тренутка $t_k$, једнака је:

$$\overline{x(t)} = \frac{1}{t_k - t_p}\int_{t_p}^{t_k} x(t)dt\,. \tag{2.7}$$

За периодичне величине интервал је једнак периоду.

Периодична величина времена чија је средња вредност једнака нули назива се **наизменична величина** [13]. Разлика периодичне величине $x(t)$ и њене средње вредности назива се наизменична компонента и означава са $x_{\sim}(t)$. Периодична величина чија средња вредност није једнака нули назива се **пулсирајућа**[16] **величина**. Таква величина може да се представи као збир:

$$x(t) = X + x_{\sim}(t)\,, \tag{2.8}$$

где је $X$ средња вредност периодичне величине $x(t)$:

$$X = \overline{x(t)} = \frac{1}{T}\int_0^T a(t)dt\,, \tag{2.9}$$

а $x_{\sim}(t)$ представља њену наизменичну компоненту.

**Средња апсолутна вредност**[17] је дефинисана као средња вредност апсолутне вредности наизменичне величине:

$$\overline{|x(t)|} = \frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|\,dt\,. \tag{2.10}$$

Математички, под називом **ефективна вредност** величине подразумева се величина која је дефинисана као позитиван квадратни корен из средње вредности квадрата:

$$X_{\text{q}} = \left[\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + ...x_n^2)\right]^{1/2}\,. \tag{2.11}$$

---

[15] Средња вредност (*mean value, Mittelwert*) величине *x* означава се и са $\overline{X}$ или $X_{\text{av}}$ (*average*)

[16] Придев "пулсирајући" (*pulsating*) користи се да означи периодичну величину чија је наизменична компонента различита од нуле и чија је средња вредности различита од нуле.

[17] Средња вредност апсолутне вредности наизменичне величине (*rectified value, Gleichrichtwert*).

Ефективна вредност променљиве величине $x(t)$, посматране у одређеном временском интервалу од $t_{\text{p}}$ до $t_{\text{к}}$, једнака је[18]:

$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\overline{x^2(t)}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{k}} - t_{\text{p}}} \int_{t_{\text{p}}}^{t_{\text{k}}} x^2(t)dt} \,. \tag{2.12}$$

За периодичне величине усваја се интервал посматрања једнак трајању једне периоде $T$:

$$X_{\text{eff}} = X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} T \int_{0}^{t_{\text{k}}} x^2(t)dt} \,. \tag{2.13}$$

У електротехници, физички смисао ефективне вредности је да описује снагу сигнала.

За уопштено карактерисање облика функције $x(t)$ користе се још и **показатељ облика** (*form factor*), $F$, који представља количник ефективне вредности и средње апсолутне вредности сигнала:

$$F = \frac{X_{\text{eff}}}{\overline{|x(t)|}} = \frac{\sqrt{\overline{x^2(t)}}}{\overline{|x(t)|}} \,, \tag{2.14}$$

као и количник максималне и ефективне вредности (*peak factor*). Вредности основних показатеља за типичне таласне облике периодичних сигнала јединичне амплитуде приказани су на слици 2.3.

Периодични сигнал произвољног таласног облика:

$$x(t+T) = x(t);\ -\infty < t < \infty \,, \tag{2.15}$$

који у сваком коначном интервалу времена има коначан број максимума и коначан број прекида прве врсте[19], може се апроксимирати тригонометријским редом:

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} X_n \sin(n\omega t + \varphi_n);\ \omega = \frac{2\pi}{T} \,. \tag{2.16}$$

који конвергира функцији $x(t)$ у свим тачкама где је она непрекидна[20]. Формално, математички, периодична функција може да се представи збиром

---

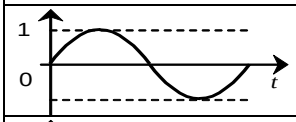
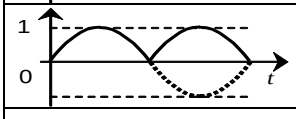
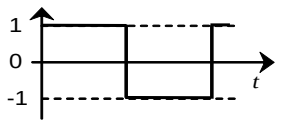
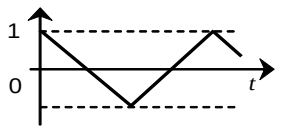
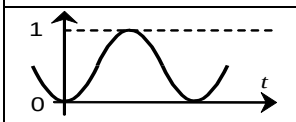
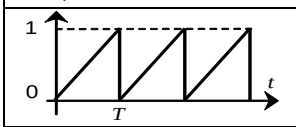
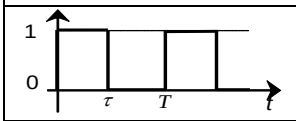
[18] Овако дефинисана ефективна вредност једнака је позитивној вредности квадратног корена средње вредности квадрата тренутних вредности величине током одређеног временског интервала (*root-mean-square-value, rms value, effective value, valuer efficience, Effektivwert*).

[19] Тачка $t = \tau$ представља прекид прве врсте функције $x(t)$ уколико постоје граничне вредности: $\lim_{t \to \tau -} x(t) = a$ , $\lim_{t \to \tau +} x(t) = b$ , и ако је $a \neq b$ .

[20] Функција $x(t)$ је непрекидна у тачки $t = \tau$ ако тачка т припада области дефинисаности функције $x(t)$ и ако је испуњен услов:

$$\lim_{t \to \tau} x(t) = x(\tau) \cdot$$

простопериодичних сигнала – хармоника. Учестаност хармоника представља умножак (мултипл) учестаности посматраног сигнала. Десна страна једначине 2.16 назива се **Фуријеов ред** функције $x(t)$ [14].

| таласни облик | $x(t)$ | $\overline{\lvert x(t)\rvert}$ | $X_{\text{eff}}$ | *form factor* | *crest factor*[21] |
|---|---|---|---|---|---|
|  | $\boldsymbol{sin}\frac{2\pi}{T}t$ | $\frac{2}{\pi}$ | $\frac{1}{\sqrt{2}}$ | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ | $\sqrt{2}$ |
|  | $\left\lvert \boldsymbol{sin}\frac{2\pi}{T}t \right\rvert$ | $\frac{2}{\pi}$ | $\frac{1}{\sqrt{2}}$ | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ | $\sqrt{2}$ |
|  | $\begin{cases} 1; 0 \le t < \frac{T}{2} \\ -1; \frac{T}{2} \le t < T \end{cases}$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
|  | $\begin{cases} 1-4\frac{t}{T}; 0 \le t < \frac{T}{2} \\ -3+4\frac{t}{T}; \frac{T}{2} \le t < T \end{cases}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | $\frac{2}{\sqrt{3}}$ | $\sqrt{3}$ |
|  | $\boldsymbol{sin}^2\frac{2\pi}{T}t$ | $\frac{1}{2}$ | $\sqrt{\frac{3}{8}}$ | $2\sqrt{\frac{3}{8}}$ | $\sqrt{\frac{8}{3}}$ |
|  | $\frac{t}{\tau}; 0 \le t < T$ | $\frac{1}{2}$ | $\sqrt{\frac{1}{3}}$ | $\frac{2}{\sqrt{3}}$ | $\sqrt{3}$ |
|  | $\begin{cases} 1; 0 \le t < \tau \\ 0; \tau \le t < T \end{cases}$ | $\frac{\tau}{T}$ | $\sqrt{\frac{\tau}{T}}$ | $\sqrt{\frac{T}{\tau}}$ | $\sqrt{\frac{T}{\tau}}$ |

Слика 2.3. Карактеристичне вредности типичних периодичних сигнала

Француски математичар и физичар Фурије (*Jean-Baptist Joseph Fourier*, 1768 -1830) није био први који је применио представљање функције тригонометријским редом, али је био први који је извршио уопштавање и закључио да се било која периодична функција може представити редом $x^*(t)$ који се састоји од хармонијских функција. Његов ученик Дирихле (*Gustav Dirichlet*) допунио је ову теорему условима које функција треба да испуни да би ред $x^*(t)$ конвергирао ка функцији $x(t)$.


Фурије

[21] *Crest factor* (*peak-to averege ratio, PAR)* је дефинисан као однос вршне и ефективне вредности. Обично се изражава у децибелима.

Скуп амплитуда, учестаности и фаза хармоника представља **спектар** посматраног сигнала[22]. Непрекидна периодична функција $x(t)$ једнозначно је одређена одговарајућим спектром, па приказ сигнала у временском домену може бити замењен приказом у домену учестаности тј. приказом његовог спектра.

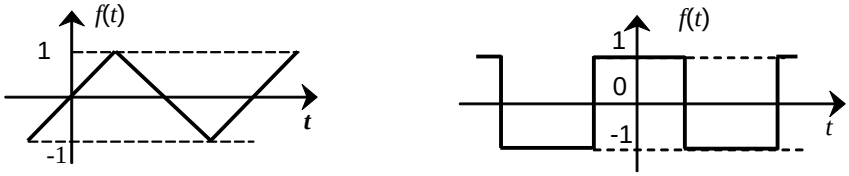
Фуријеов ред сигнала симетричног троугаоног таласног облика јединичне амплитуде, приказаног на слици 2.4.а, има облик:

$$\frac{8}{\pi^2}\left(\sin\omega t-\frac{1}{9}\sin 3\omega t+\frac{1}{25}\sin 5\omega t+\ldots\right). \qquad (2.17)$$

Посматрана функција $x(t)$ је непарна, $x(-t) = -x(t)$. У њеном спектру не постоје хармоници са парним индексима. Први члан (чији је период једнак периоду посматране функције) највише је изражен, а амплитуде виших хармоника опадају по квадратном закону.

На слици 2.4.б приказан је сигнал симетричног правоугаоног таласног облика јединичне амплитуде, који представља парну функцију, $x(-t) = x(t)$. Фуријеов ред овог сигнала садржи само чланове који представљају парне функције, $\cos(-\theta)=\cos(\theta)$:

$$\frac{4}{\pi}\left(\cos\omega t-\frac{1}{3}\cos 3\omega t+\frac{1}{5}\cos 5\omega t-\frac{1}{7}\cos 7\omega t+\ldots\right), \qquad (2.18)$$




Слика 2.4. Непарна и парна периодична функција

Средња вредност периодичног сигнала представља његову директну компоненту (*direct component*), односно нулту (константну) компоненту $X_0$ у његовом спектру (2.16). Директна компонента наизменичне величине једнака је нули. Променљива величина чија је директна компонента различита од нуле је пулсирајућа величина. Наизменична компонента је разлика периодичне величине и њене средње вредности:

$$x_{\sim}(t) = x(t) - X_0\,. \qquad 2.19)$$

Ефективна вредност $X_{\text{eff}}$ карактерише снагу сигнала. Количник ефективне вредности збира виших хармоника и ефективне вредности наизменичне величине [15]:

---

[22] Појам "спектар" (од лат. *spectrum*, авет, привиђење) увео је у физику Њутн (*Isaac Newton*) при описивању појаве разлагања светлости на компоненте различитих боја. У техничкој литератури користи се за означавање различитих скупова. Фреквенцијски спектар сигнала добија се применом Фуријеове трансформације.

$$d = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{\infty} X_{jeff}^2}}{X_{eff}}, \tag{2.20}$$

где је $X_{jeff}$ ефективна вредност *j*-тог хармоника, представља показатељ хармонијског састава[23] (*total harmonic factor*).

Ефективна вредност сложеноперидичног сигнала зависи само од ефективних вредности његових хармоника, а не зависи од њихове почетне фазе $\varphi_j$ (Парсевалова теорема):

$$X_{eff} = \sqrt{\sum_{j=0}^{\infty} X_{jef}^2} \ . \tag{2.21}$$

То значи да је за одређивање показатеља хармонијског састава довољно познавати само спектрални састав посматраног сигнала у погледу амплитуда његових хармоника.

Синусна компонента Фуријеовог реда периодичне величине чија је учестаност једнака учестаности саме величине назива се **основна компонента** (*fundamental component*). Основни чинилац наизменичног сигнала (*fundamental factor, g*) дефинисан је као количник ефективне вредности основне компоненте и ефективне вредности сигнала [16]:

$$g = \frac{X_{1eff}}{X_{eff}} . \tag{2.22}$$

Хармонијски садржај сигнала (*harmonic content*) је дефинисан као разлика наизменичне величине и њене основне компоненте. У телекомуникационој техници се као мера одступања таласног облика периодичног сигнала $x(t)$ од синусног облика користи однос ефективне вредности виших хармоника и ефективне вредности основне компоненте:

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{\infty} X_{jeff}^2}}{X_{1eff}} . \tag{2.23}$$

У употреби су и показатељ пулсације сигнала (*pulsating factor, s*) који представља количник ефективне вредности наизменичне компоненте пулсирајућег сигнала и ефективне вредности сигнала [17]:

$$s = \frac{X_{\sim eff}}{X_{eff}}, \tag{2.24}$$

[23] У литератури старијег датума користи се назив “фактор изобличења” односно дисторзије (*distortion factor, harmonic factor, Klirrfaktor*, коеффициент искажения).

где је:

$$X_{\sim\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x_{\sim}^2(t)dt}\ ,\ \ x_{\sim}(t) = x(t) - X_0\,, \tag{2.25}$$

и ефективни показатељ таласности (*rms-ripple factor, r*), који представља количник ефективне вредности наизменичне компоненте пулсирајућег сигнала према апсолутној вредности његове константне компоненте [18]:

$$\mathrm{r} = \frac{X_{\sim\text{eff}}}{|X_0|}\,. \tag{2.26}$$

Електроника је омогућила обраду сигнала којима су представљене величине које се мењају веома великом брзином, приказ и запис њиховог таласног облика током одређеног временског интервала, као и мерење различитих показатеља који на уопштени (интегрални) начин описују променљиве величине. Мерење одређене карактеристичне вредности временски променљивог сигнала, којим је мерна величина представљена, представља посебну мерну функцију. Савремени инструменти су вишенаменски. Као пример могу да послуже мерни уређеји намењени за рад у једнофазним и трофазним електричним мрежама, који мере амплитуду, средњу и ефективну вредност напона и струја, активну, реактивну и привидну снагу у свакој фази посебно, и укупно, као и запис вршних вредности мерених величина у току вишедневног интервала посматрања. На основу ових вредности одређују се интегрални показатељи енергетских процеса, као што су фактор снаге и показатељ изобличења, израчунава укупна пренета активна и реактивна енергија, као и просечна вредност снаге оптерећења.

## 2.2 МЕРНИ ИНФОРМАЦИОНИ СИСТЕМИ

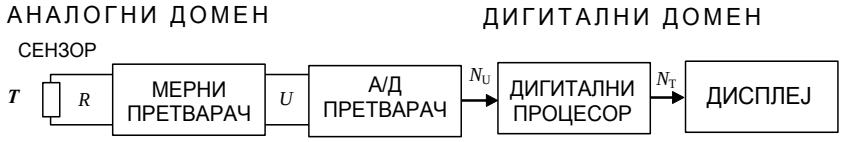
Физичке величине којима се представља стање неког процеса, а које се због тога надзиру или се њима управља (као што су, на пример, температура, притисак, ниво или количина течности), по својој природи представљају аналогне величине. Другим речима, могу да имају било коју вредност унутар граница одређеног опсега. Међутим, у електронским рачунарима (у којима се информације о надзираним процесима прикупљају и обрађују у складу са утврђеним алгоритмом[24], да би се одредили неки "посредни" показатељи стања, и на основу њих генерисали одговарајући управљачки налози), променљиве величине су дигиталне и могу да имају само коначан број вредности. Уношење информација о стању физичког процеса, изворно представљених аналогним величинама, у дигитални систем који треба да врши њихово прикупљање, обраду, приказ, складиштење или пренос,

[24] Поступак решавања математичког проблема низом узастопних корака (операција), од којих се неки понављају (лат. *algorismus*). Сматра се да назив потиче од имена арапског математичара Мохамеда ибн Муса Алхаризми (780-850). Може бити представљен описом поступка (процедуре), математичким изразом (формулом) или графички (дијаграм тока).

подразумева претварање[25] из аналогног у дигитални облик. Дигитални мерни инструменти, као и сложени мерни информациони системи[26] неизбежно садрже део (подсистем) којим се обавља потребна промена облика представљања информације, пресликавање из аналогног у дигитални домен.

Температура неког објекта, на пример, која представља карактеристични параметар процеса, односно стања посматраног система, пресликава се, помоћу одговарајућег сензора[27], на вредност неке електричне величине, као што је електрична отпорност платинске жице. Одговарајући мерни претварач обезбеђује да се вредност мерене величине (отпорности) представи у облику нормализованог напона, који се доводи на улаз аналогно-дигиталног претварача који омогућује добијање информације у дигиталном облику. Потом се врши одређена обрада (израчунавање вредности температуре на основу познатог математичког модела сензора) да би се податак о вредности мерене величине приказао (проследио) кориснику у одговарајућем облику.

У мерном ланцу[28], који повезује објект посматрања и посматрача, остварује се, са циљем постизања потребне тачности и представљања информације у облику најпогоднијем за корисника, низ претварања (слика 2.5). У описаном примеру, мерена величина (температура објекта) се пресликава на отпорност сензора који има улогу предајника информације.




$$T \Rightarrow R \Rightarrow U \Rightarrow N_{\mathrm{U}} \Rightarrow N_{\mathrm{T}}$$

Слика 2.5. Савремени мерни ланац

Помоћу одговарајућег електронског кола вредност отпорности сензора (односно њене промене у односу на референтну вредност) претварају се у једносмерни електрични напон. Применом аналогно/дигиталног претварача, вредност овог напона "постаје" нумерички податак, који се, потом, даље обрађује са циљем израчунавања бројне вредности мерене величине, изражене у одговарајућим мерним јединицама. Резултат мерења се

---

[25] Под претварањем се овде подразумева пресликавање вредности једне величине на вредност друге величине.

[26] У англоамеричкој литератури је уобичајено да се прикупљање и примарна обрада мерних података назива аквизицијом података (*Data acquisition- DAQ*, од лат. *acquisitio*, набављање, стицање). Назив који се користи у немачком (*Mess- Informatins- Systeme*) и руском језику (*Измерителные Информационные Системы - ИИС*) оправдано истиче у први план метролошки аспект ове класе техничких система.

[27] Назив потиче од лат. *sensus,* чуло, осетило. Сензор "осећа" деловање мерене величине на свом улазу и даје одговарајући мерни сигнал на свом излазу (рус. *чувствителуни елемент*). Са становишта електричних мерења, сензор је део мерног ланца који омогућује мерење физичких величина електричним средствима.

[28] Мерни ланац чини низ елемената мерног система који образују појединачну путању мерног сигнала, од сензора до излазног елемента.

“саопштава” кориснику као пријемнику информације. Мерење се у најопштијем смислу дефинише управо као скуп поступака који имају за циљ одређивање вредности неке величине. У електронским мерним системима ти поступци, који обухватају низ пресликавања вредности једне (физичке) величине на вредност неке друге величине, изводе се аутоматски.

Пресликавање неелектричне величине у електричну је најчешће, по природи физичког процеса којим се остварује, нелинеарно, односно, може се сматрати линеарним само у релативно уском мерном опсегу. Зависност електричне отпорности од температуре одређена је врстом сензора, који се бира тако да одговара намени (мерном опсегу и условима рада). Мерни претварачи и аналогно/дигитални претварачи се, у начелу, пројектују тако да остварују линеарно пресликавање. Потребна математичка обрада “поверава” се дигиталном процесору, који, у посматраном примеру, резултат обраде приказује у изабраним јединицама мерене величине на одговарајућем приказивачу (дисплеју).

Потреба за мешовитим (хибридним) системима, у којима се обрађују и аналогни и дигитални сигнали, постоји у многим областима технике. Дигитална обрада аналогних сигнала се данас примењује и у оним подручјима која “природно” припадају аналогној техници, као што су телефонија, радио и аудио техника. То подразумева остваривање аналогно-дигиталног претварања пре, односно дигитално-аналогног претварања након извршене обраде (преноса). Запис аналогних сигнала се врши у дигиталном облику. Сам запис може да представља меморисане резултат(е) претходно оствареног мерења (“снимања сигнала”), односно обраде остварене над измереним вредностима, или таблицу вредности жељеног таласног облика аналогног сигнала на излазу сигнал-генератора.

Развој технологије дигиталних електронских компонената условио је доминацију модуларне концепције, не само при реализацији мерно-управљачких система у процесној индустрији, него и у области лабораторијске мерне интструментације. Развијени су рачунарски управљани модуларни дигитални мерни системи образовани од специјализованих модула различите намене, који су смештени у стандардизовано кућиште у којем се налази и извор за њихово напајање. Концепција спреге овог типа заснована је на архитектури дигиталних рачунара. Иницијатива за дефинисање стандардизованог система, којим су дефинисани конструктивни параметри и начин међусобног повезивања ове врсте мерних уређаја, потекла је од америчких произвођача војне опреме. У ову категорију спадају и програмабилни мерни инструменати, реализовани у виду модула који се постављају у заједничко кућиште (*instrument on card - IOC)*.



*IOC*-мерни уређај



*PCI*-мерни уређаји

*PCI*-уређаји (*personal computer instrumentation*) су посебна врста мерних инструмената, код којих је спрега са корисником у потпуности остварена помоћу рачунара. Најчешће су реализовани као конвенционални дигитални мерни уређаји код којих су показни и командни део замењени функционалним блоковима преко којих се остварује повезивање са рачунаром. Развијени су и мерни уређаји засновани на непосредној примени хардверских и софтверских делова персоналног рачунара (меморија, улазно/излазна кола за размену података са другим уређајима, оперативни систем) којима се управља из програмског окружења *Windows*.

Доградњом одговарајућих мерних модула, рачунар опште намене преузима улогу комплетног мерног система (мерне станице). Притом, мерни модул може бити реализован као одређени мерни инструмент (на пример, волтметар или осцилоскоп) или као вишенаменски мерни подсистем. У оба случаја рачунар "даје" кућиште, напајање, управљачку јединицу, дисплеј (екран) и командну плочу (тастатура/миш), као и остале ресурсе који омогућују трајно меморисање мерних података, њихову обраду, штампање и прослеђивање другим корисницима.



Мерни модул
за уградњу у рачунар

Вишенаменски мерни модули су се показали веома погодним за реализацију *SCADA*-система са малим бројем процесних величина. На једној картици (модулу) може да се налази целокупан хардвер који омогућује вишеканално мерење, издавање аналогних управљачких (регулационих) сигнала, прихватање и издавање дигиталних сигнала (сигнализација и команди), прихватање, одбројавање и генерисање импулса. Међутим, основну препреку на путу ширења мерних система заснованих на примени рачунара опште намене представља неповољан утицај окружења на метролошка својства мерних склопова који се уграђују у кућиште рачунара. У случајевима када се захтевају високе перформансе, мерни склопови се оклапају или потпуно удаљују од микропроцесорске управљачке јединице.

Широко распрострањена примена рачунара у мерној техници је повезана са његовом улогом контролера мерног система заснованог на примени аутономних мерних уређаја међусобно повезаних стандардним интерфејсом. Хардверска основа за обављање ове функције је постала широко доступна: развијен је велики број спрежних модула намењених за доградњу у рачунар као периферијска улазно/излазна јединица (*peripheral I/O device*) којом се остварују мерне функције. Програмска основа мерних рачунарских система се показала као деликатнији задатак. Примена мерних

система заснованих на рачунарима и мерним склоповима опште намене подразумева располагање одговарајућим програмима. Уз хардвер се, обично, испоручује и одговарајући програмски модул који садржи известан број основних рутина[29] које се могу позивати из стандардних програмских језика.

Мултидисциплинарност мерне технике подразумева променљивост као резултат сопственог развоја, али и интеракције са окружењем које се непрекидно мења. Минијатуризација, интеграција, компјутеризација и друга технолошка обележја електронике последњих деценија двадесетог века, наметнули су потребу за другачијим приступом развоју и примени мерних средстава. Класични, аналитички метод описивања мерила и мерних поступака у појединим областима заменио је синтетички приступ сагледавању и обради проблема метрологије и методологије њиховог решавања на једном вишем, генерализованом нивоу, који је омогућило развој и примену нових, универзалних алата у мерној техници, као што су виртуелни инструменти и експертни системи. Рачунарске мреже су омогућиле формирање и заједничко коришћење метролошких база података, даљинску обуку корисника, као и реализацију просторно дистрибуираних мерних система.

Мерења су претрпела суштинске промене. Аутоматизовани мерни системи еволуирали су у сложене мерне информационе системе (слика 2.6), врхунско оруђе којим се стиче знање о физичкој основи света и управља њиме. Они обједињују мерну и информациону технику. Подједнак значај имају обрада мерних информација, као и њихов пренос.




Слика 2.6. Мерни информациони систем

Мерни информациони системи обезбеђују централизовано прикупљање и рачунарску обраду мерних података у великим лабораторијама за истраживање брзих динамичких процеса и прелазних појава. Балистичка и аеродинамичка испитивања у аеродинамичком тунелу (слика 2.7) захтевају специјализоване мерне системе који остварују истовремено праћење великог броја улазних величина, према унапред утврђеном "рецепту" узимања "узорака" њихове вредности, са великом прецизношћу и брзином од више стотина хиљада мерења у секунди.

[29] У рачунарској тениции, под називом рутина подразумева се програмски модул опште намене.



Слика 2.7. Аеродинамички тунел

У географски распрострањеним процесима са веома великим бројем мерних места (системи за производњу, транспорт и дистрибуцију производа као што су гас, вода, нафта, топлотна и електрична енергија) мерни информациони системи постали су неминовност, као предуслов за ефикасан надзор и управљање, и као решење проблема прикупљања мноштва мерних података за потребе обрачуна трошкова. Они омогућују не само прикупљање квантитативних показатеља различитих процеса, него и праћење трендова и благовремено откривање проблема у њиховом одвијању.




Слика 2.8. Диспечерски центар електромреже Србије

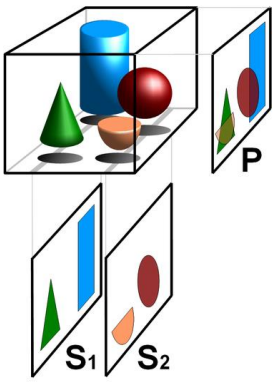
Дистрибуирани мерни информациони системи примењују се за аквизицију података у метеорологији, сеизмологији... и формирању глобалне метролошке мреже у одређеној области науке.

Развој неких специјализованих области науке повезан је са настанком мерних информационих система. Једна таква област је томографија[30]. То је

[30] Назив (енг. *tomography*) потиче од грчких речи *tome,* сећи (*tomos*, део, секција, кришка) и *graphein*, писати.

поступак формирања тродимензионалног приказа на основу низа дводимензионалних снимака, добијених применом продирујућег зрачења било које врсте.

Све већу примену има компјутеризована томографија (*computer tomography*, *CT*). Под овим називом се подразумева генерисање тродимензионалних слика снимљеног објекта на основу велике серије дводимензионалних снимака, математичком обрадом уз примену рачунара и одговарајућих програмских пакета. Омогућује сагледавање унутрашњих структура и функционисања тела.




Процесна томографија (*process tomography*) користи се у хемијском инжењерству, обради минерала, експлоатацији нафтних извора, преради нафте...

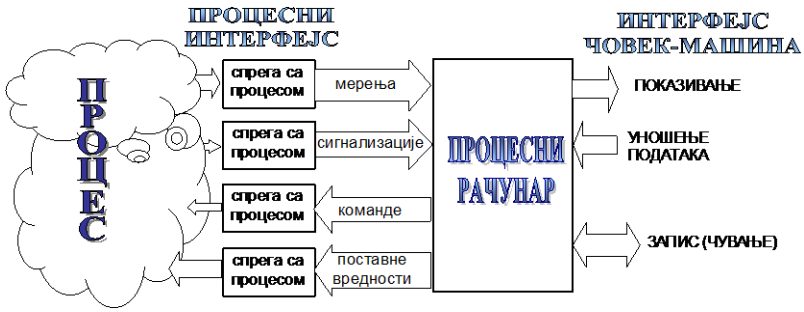
# ЛИТЕРАТУРА


1. *International Electrotechnical Commission, International Electrotechnical Vocabularu*, 60050.
2. *http://stf.iec/ch/glossary*.
3. *Electropedia, The World`s Online Electrotechnical Vocabulary, http://www.electropedia.org*.
4 Појмови из области математике који се користе у електротехници, Термини и дефиниције, ЈУС Н. А0. 101, 1990.
5 Електрична и магнетска кола, Термини и дефиниције, ЈУС Н. А0. 131, 1990.
6. *International Electrotechnical Vocabularu, IEC 60050: part 351, Control technology / Variables and signals*, 2013, 351-41-17.
7. Реф. 6, 351-41-18.
8. Реф. 6, 351-41-24.
9. *IEC 60050: part 702, Oscillations, signals and related devices / Signals, General terms*, 702-04-02.
10. Реф. 6, 351-41-25.
11. Реф. 9, 702-04-05.
12. *IEC 60050: part 103, Mathematics-Functions*, 103-02-03.
13. Реф. 12, 103-06-03.
14. Реф. 12, 103-07-18.
15. Реф. 12, 103-07-32.
16. Реф. 12, 103-07-23.
17. Реф. 12, 103-06-11.
18. Реф. 12, 103-06-12.

# 3.
# МЕРЕЊА У ИНДУСТРИЈИ

Повећање обима производње, проширење асортимана, побољшање квалитета и смањивање цене производа представљају основне циљеве развоја индустрије. То се постиже увођењем нових процеса, коришћењем савременије опреме, побољшавањем вођења процеса у целини, као и појединих фаза у току његовог одвијања. Аутоматско управљање представља један од најважнијих метода за побољшавање ефикасности и економичности процеса. А управљање је нераскидивим везама спојено са мерењем [1]. Процењује се да савремена индустрија у развијеном свету захтева да се тачност мерења повећа десет пута сваких 10 до 15 година.

Надзор и управљање сложеним технолошким процесима електропривреде, нафтне и хемијске индустрије, подразумева прикупљање и обраду мноштва разноврсних информација. Посебно место заузима авиоиндустрија. Да би се у целини сагледало стање система, потребно је обезбедити једновремено узимање података на много различитих места, њихово обједињавање и централизовану обраду. Да би се ефикасно управљало таквим системом потребно је остварити одговарајуће деловање на више начина и на различитим местима. Општи структурни блок-дијаграм таквог система приказан је на слици 3.1. Мерни и управљачки уређаји различитог степена сложености, посредством којих се остварује спрега са процесом, представљају спољне (периферијске) јединице специјализованог рачунара[1] који, на основу задатог програма и информација добијених од великог броја таквих терминалних[2] уређаја (*terminal unit*), генерише и издаје одговарајуће податке за управљање процесом.




Слика 3.1. Процесни систем

---

[1] Уобичајено је да се специјализовани рачунари, намењени за управљање технолошким називају процесни рачунари (*process computer*).

[2] Уређаји смештени на почетним или завршни крајевима мреже веза (лат. *terminus,* међаш, граница).

Спрега рачунара са процесом (*process interface*) остварује се сигналима који се обично сврставају у четири групе:

- мерења (аналогне и дигиталне процесне величине),
- сигнализације (бинарне процесне величине),
- команде (бинарне управљачке променљиве),
- поставне вредности (аналогне управљачке променљиве).

Савремени надзорни и управљачки системи образовани су од електронских уређаја. Са циљем успешнијег преноса, обраде или записивања, неелектричне мерене величине се пресликавају на електричне. То се постиже помоћу посебних елемената којима се остварује спрега са процесом. Спрезање подразумева и прилагођавање, па у општем случају мерни интерфејс обухвата и кола за кондиционирање[3] којима се остварују потребни услови који треба да обезбеде постизање захтеване тачности, али и безбедност људи и опреме.

У овом поглављу разматрају се првенствено својства мерног интерфејса. Обрађени су основни појмови и описани поступци анализе статичких и динамичких карактеристика[4]. Посебна пажња посвећена је приказу својстава савремених мерних претварача наизменичних електричних величина.

## 3.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Мерење низа неелектричних величина (као што су сила, притисак, деформација, транслаторни и угаони померај, брзина и убрзање при кретању тела, ниво течности, брзина и проток флуида, температура, влажност...) уз "подршку" електронике најефикасније се остварује ако се омогући да информациони параметар погодно одабраног електричног сигнала зависи од вредности мерене величине. Део мерног система на који непосредно делује величина коју треба мерити[5] назива се **сензор** [2]. Он је први елемент у мерном ланцу, беочуг којим се остварује спрега са процесом и која омогућује добијање[6] информације о мереној величини. Са становишта електронске мерне технике, сензор је део мерног система који мерену неелектричну величину пресликава у електричну[7], и тако омогућује добијање жељене информације у облику који је подесан за мерење, обраду, запис или пренос.

Према физичкој природи величине која се мери, сензори се могу поделити у две основне групе:

---

[3] Прилагођење, усклађивање са радним условима (од лат. *conditio,* услов, стање).

[4] Карактеристика преноса мерног елемента представља однос (исказан формулом, табелом или сликом) између улазног сигнала (побуда, лат *stumulus* - надражај, подстрек) и одговарајућег излазног сигнала (одзив, лат. *responsum* - одговор).

[5] Мерена величина (*measurand*). Под овим називом подразумева се својство појаве, тела или супстанције које се може квалитативно разликовати и квантитативно одредити.

[6] У литератури на нашем језику се користи и назив "давач" мерене величине (*detector, capteur, Geber*, *датчик*).

[7] У неким областима се употребљава назив "детектор" (енг. *detector*). У литератури се користе и називи: осетљиви елемент (*Meßfühler*), трансмитер (енг. *transmitter, од* лат. *transmissio*, преношење), и пријемник (мерне) информације (нем. *Aufnehmer*).

- сензори неелектричних величина (положај, угао, деформација, температура, притисак, проток, сила,...);
- сензори електричних величина (напон, струја, магнетски флукс,...).

Други критеријум за класификацију је принцип мерења[8]. Према физичкој основи начина рада сензори се могу класификовати као механички, електрични (електромеханички, електронски), оптички,...

Са становишта електронских мерних система, физичка основа (начин рада) и намена (функција) сензора су од секундарног значаја. Центар пажње усмерен је на начин генерисања излазног електричног сигнала, односно на карактеристике сензора као електричног елемента, које на одговарајући начин треба спрегнути са електронским колима. Ово посебно долази до изражаја при реализацији *SCADA*-система.

Електрични сензор је део мерног система који, када је побуђен неком физичком појавом производи електрични сигнал који карактерише ту појаву. Као елементи електричних мрежа, сензори се могу поделити на активне и пасивне. **Активни сензори** (*active sensors*) енергију за свој рад узимају из медијума чије стање одражавају (мере). **Пасивни сензори** (*passive sensors*) захтевају додатни извор енергије. Носилац информације (излазни сигнал) активних (генераторских) сензора може бити напон, струја или наелектрисање. У пасивне сензоре спадају **параметарски сензори** (*parametric sensors*), којима се остварује "претварање" мерене неелектричне величине у електричну величину која представља један од параметара електричне мреже (отпорност, индуктивност или капацитивност).

При мерењима у индустријским условима (процесна мерења) највећи број сензора, помоћу којих се мерена неелектрична величина трансформише у електрични сигнал, представља пасивне електричне елементе чији се параметри одређују (мере) уметањем сензора у одговарајуће електрично коло (параметарски сензори). Најширу примену имају **отпорнички сензори** (*resistive sensors*), чији је принцип рада заснован на зависности промене вредности електричне отпорности (*resistance*) од промена мерене величине. Помоћу индуктивних сензора остварује се мерење промена магнетског поља, што омогућује мерење помераја (*displacement*) и брзине кретања. Капацитивни сензори омогућују мерење низа величина, као што су померај, вибрације, притисак, ниво течности, проток, влажност...

Велики број лабораторија у свету се бави истраживањем нових принципа мерења и унапређењем поступака израде сензора[9]. Мерно-техничке карактеристике сензора непрестано се побољшавају, што доприноси квалитету и могућностима мерних уређаја. Тиме се стварају услови за

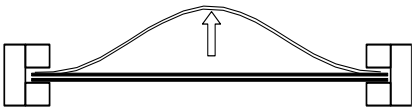
---

[8] Под називом принцип мерења (*measurement principle*) подразумева се појава (физичка, хемијска, биолошка) која служи као основа мерења.

[9] Непрекидно усавршавање технологије производње ствара основу на којој се заснива "експлозија" савремене мерне технике. Омогућавањем економичне производње остварени су услови за широку примену низа "нових" сензора, заснованих на већ познатим принципима.

непрестано ширење подручја њихове примене у индустрији, али и у свакодневном животу савременог човека.

При мерењу неелектричних величина, информација добијена помоћу сензора најчешће није у облику погодном за прецизно мерење. У таквим случајевима у мерни ланац умеће се део који остварује пресликавање вредности мерене величине у вредност неке друге физичке величине, погоднije за остварење процеса мерења. На пример, еластична мембрана (дијафрагма) представља сензор диференцијалног притиска (*pressure sensing element*). Величина притиска одређује величину деформације мембране (одступање од равнотежног положаја - слика 3.2).



Слика 3.2. Мембрански сензор притиска

Помоћу тензиометријске[10] мерне траке, деформација мембране тј. механичка величина (истезање), пресликава се на вредност електричне отпорности (тачније, на одступање отпорности). Физички гледано, ове су две функције веома блиске и најчешће тесно повезане, па се за означавање улазних елемената мерног ланца у литератури подједнако, а понекад и равноправно, користе називи сензор и претварач[11], или се под називом претварач подразумева и цео склоп који обухвата примарни осетљиви елемент (*primary sensing element*) и елемент (део) којим се остварује пресликавање вредности мерене нелектричне величине на вредност електричне величине која се мери.

Сензор, на који непосредно делује мерена величина, први је елемент у мерном ланцу којим се остварује спрега са процесом и која омогућује добијање информације о мереној величини. При мерењу неелектричних величина, помоћу сензора се формира електрични сигнал чији је неки параметар (или параметри) у одређеној функционалној зависности са мереном неелектричном величином.

**Кондиционер** остварује спрегу са сензором тако да се информација о вредности мерене величине добије у облику напонског или струјног сигнала у опсегу вредности подесном за мерење помоћу уобичајених мерних инструмената односно поступака. Помоћу кондиционера као "ускладника" остварује се спрезање са сензором, које треба да што мање утиче на процес трансформације, али и одређена "примарна" обрада мерног сигнала којом је мерена величина представљена. Под овим се најчешће подразумева појачање сигнала или смањивање сметњи суперпонираних мерном сигналу. Кондиционирање је често неизбежно и у случају мерења електричних величина. Оно се, на пример, врши са циљем галванског раздвајања мерног

[10] Назив „тензиометар" потиче од латинске речи *tensio*, затегнутост.

[11] У стручној литератури на страним језицима користе се различити "описни" називи: енг. *transducer, transmitter,* нем. *Wandler, Umformer*, рус. *преобразователь*.

уређаја од кола у којем се мерење обавља, или ради прилагођење нивоа мерног сигнала радном опсегу електронских мерних склопова (делитељи напона, мерни трансформатори).

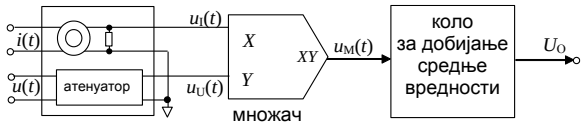
У случајевима када потребна информација није вредност споро променљивог мерног сигнала у одређеном тренутку, већ неки показатељ квазипериодичног сигнала различитог таласног облика, као што је на пример ефективна вредност, неопходна је одговарајућа, понекад врло сложена, обрада. Потреба за додатном обрадом се по правилу појављује и када се жели постизање веће тачности мерења (што захтева компензацију деловања неких извора систематске грешке, линеаризацију карактеристике сензора и слично). У таквим случајевима кондиционер прераста у знатно сложенију целину, **мерни претварач**, која се као "градивна јединица" примењује у разноврсним мерним, надзорним или управљачким системима.




Слика 3.3. Функционална шема мерног претварача

Мерење величина којима се представља стање неког технолошког процеса по правилу захтева трансформацију носиоца информације. Мерни претварач је део мерног ланца који једну величину претвара, у информационом смислу, у другу величину ради мерења. У најопштијем смислу, мерни претварач се дефинише као уређај (*device*) који на свом излазу даје величину која је у одређеном односу према улазној величини [3]. Примери мерних претварача су струјни (напонски) мерни трансформатор, мерна трака, електрода за мерење *PH*-фактора, биметална трака, Бурдонова цев, али и мерни претварач учестаности у напон, диференцијални мерни претварач отпорности, мерни претварач електричне снаге...

У мерним уређајима, намењеним за примену у склопу комплексних система за надзор и управљање сложеним индустријским постројењима, мерење процесних величина заснива се на примени мерних претварача који остварују пресликавање мерене величине у нормализовани једносмерни напонски или струјни сигнал. Са практичне тачке гледишта, проблеми реализација мерног претварача обухвата и проблем увођења улазних процесних величина у мерни систем. На струјном улазу претварача наизменичне електричне снаге, на пример, по правилу се користи струјни мерни трансформатор (слика 3.4). Напонски улаз се прикључује преко одговарајућег атенуатора, без галванске изолације [4]. Обрада мерних сигнала се своди на одређивање средње вредности производа.




Слика 3.4. Мерни претварач електричне снаге

У литератури се често назив ″мерни претварач″ користи и за означавање сензора, као и целине коју чине сензор и електронски део у којем се врши кондиционирање и целокупна обрада којом се постиже да је вредност електричног сигнала на његовом излазу у одређеној зависности од вредности мерене величине. Са становишта мерења процесних величина у производним, преносним и дистрибутивним постројењима електроенергетског система, мерни претварач је део мерног ланца који једну величину претвара, у информационом смислу, у другу величину ради мерења, при чему се мерни претварач електричне величине дефинише као уређај који мерену електричну величину (напон, струју, електричну снагу итд) претвара у једносмерну струју или напон [5].

Мерни претварач је мерно средство које служи да, према одређеној законитости и са одређеном тачношћу, трансформише (преслика) мерену величину (или већ трансформисане величине) у другу величину, или у другу вредност исте величине. Мерни претварач је, дакле, целина која се може употребити самостално, а чија је функција да информацију о вредности неке физичке величине преслика у информацију представљену у облику погодном за пренос, даље претварање, обраду и/или чување, али не и за непосредно приказивање кориснику [6], [7]. У том смислу и сам кондиционер се може посматрати као мерни претварач - мерно средство које даје излазну величину у одређеном односу са улазном величином, али је, с обзиром на намену и функције које обавља, оправдано користити и одговарајући, посебан назив. Структура кондиционера одређена је електричним карактеристикама сензора и практично не зависи од физичке природе величине која се мери, односно која делује на сензор. Исти тип кондиционера користи се у спрези са потенциометарским давачима за мерење положаја (дужине) и угла. Кондиционери типа ″мерни мост″ користе се при мерењу температуре, силе, деформације, притиска. Један исти тип кондиционера може да се користи за мерење потпуно различитих физичких величина, у зависности од тога какав сензор се прикључује на његов улаз [8]. У мерном претварачу, осим кондиционирања обавља се и, понекад веома сложена, обрада сигнала (слика 3.3) како би се добила информација о посредно мереној физичкој величини.

Зависно од динамичких карактеристика процеса, сензора и спољашних утицаја, може се појавити потреба да мерни ланац обрађује само сигнале који припадају одређеној категорији временских функција. По правилу, кондиционер процесних сигнала садржи фреквенцијски-селективно коло које пропушта само сигнале у одређеном фреквенцијском опсегу, а слаби (пригушује) сигнале свих других учестаности.

Пасивни сензори (резистивни, капацитивни као и неки индуктивни) захтевају помоћни извор енергије. Побуда пасивних сензора представља функцију која је практично нераздвојива од функције нормализације. Зависно од типа сензора, напајање мерног кола може бити из напонског или струјног извора. У случајевима када се захтева висока тачност обраде мерних сигнала ниског нивоа (напонски сигнали који се добијају помоћу сензора често су величине од само неколико миливолти), сензор се побуђује наизменичним сигналом правоугаоног таласног облика, чиме се смањује утицај оних извора

сигнала грешке чије се дејство на улазу кондиционера као једносмерни сигнал суперпонира са мерним сигналом.

У складу са претходним разматрањем, могу се дефинисати основни захтеви који се у начелу постављају пред мерни интерфејс:

- прилагођење сигнала који се добијају на излазима сензора радном опсегу улазних кола система за прикупљање, запис и/или локално управљање, одговарајућом поларизацијом[12] улазне величине и појачањем тако добијеног сигнала (**нормализација**),
- потискивање нежељених хармонијских компоненти у спектру мерног сигнала (фреквенцијска селекција, **филтрирање**),
- побуђивање сензора мерених величина (**екситација**[13]).

Мерни интерфејс се описује својствима као што су опсег вредности мерене величине, тачност, стабилност карактеристике, осетљивост, нелинеарност, мртва зона, хистерезис, услови околине.... Статички[14] квантитативни показатељи су ширина мерног опсега, статичка грешка, дрифт, као и показатељи утицаја услова околине. Динамичке[15] мерне карактеристике су брзина одзива и верност.

## 3.2 СТАТИЧКА КАРАКТЕРИСТИКА МЕРИЛА

Вредност величине $m$ која представља мерену величину, пресликава се помоћу одговарајућег сензора на вредност неке аналогне електричне величине $a$. Помоћу мерног претварача ова величина се затим пресликава на величину $x$ која се може обрађивати са потребном тачношћу. У општем случају пресликавање $a \rightarrow x$ дефинисано је функцијом као што је, на пример, множење константом (сразмерност), степеновање или функција квадратног корена. Статичка карактеристика описује ову функционалну зависност излазне величине $x$ од улазне величине $a$, када се може сматрати да излазна величина представља слику вредности улазне величине. Ако се улазна величина не мења, излазна величина је константна и једнака вредности која је одређена вредношћу улазне величине.

Функција $x(a)$ често само апроксимативно, у мањој или већој мери, одражава повезаност физичких величине $x$ са величином која се стварно мери. Да би се постигла већа тачност могуће је мерни претварач допунити

---

[12] Под поларизацијом (*bias*) се подразумева додавање одређене вредности мереној величини са циљем остваривања одговарајућих радних услова кола у саставу кондиционера, односно промене опсега вредности мерног сигнала. У Међународном речнику основних и општих термина у метрологији, термин *bias (of measuring instrument)* је употребљен за означавање померености која представља систематску грешку показивања мерила.

[13] Назив потиче од лат. *exscitare*, подстаћи, побудити.

[14] Статика је део механике (физике) који проучава услове под којима механички систем остаје у миру, стоји (грч. *statikê*). У електротехници термин "статички" се користи са више значења. Пре свега се односи на нешто што се не мења или показује мале промене, без прогресије.

[15] Динамика је део механике, односно физике који се бави силама и кретањима које те силе производе (грч. *dynamikê,* од *dynamis*, сила). Излаз динамичког елемента може, супротно од статичког, да се мења и ако је улазна величина стална.

одговарајућим коректором. У дигитализованим мерним системима, овај задатак обавља микропроцесор.

### 3.2.1 ЛИНЕАРНО ПРЕСЛИКАВАЊЕ

Кондиционирање има за циљ да омогући обраду информација електронским средствима и притом обезбеди постизање максималне тачности. Од кондиционера се најчешће захтева да се промене вредности улазне величине $a$ што је могуће верније пресликају у сразмерне промене вредности нормализованог електричног сигнала $x$ на његовом излазу. То значи да треба да буде задовољен услов:

$$\frac{\Delta x}{\Delta a} = const \ , \tag{3.1}$$

којим је дефинисано линеарно пресликавање промена величине $a$ на промене величине $x$. Карактеристика таквог кондиционера описана је линеарном диференцијалном једначином првог реда:

$$\frac{dx}{da} = k \ , \tag{3.2}$$

где је $k$ константа. На основу ове једначине следи:

$dx = kda$, односно: (3.3)

$$\int_{X_0}^{x} dx = k \int_{a}^{a} da \ , \tag{3.4}$$

где је $X_0$ почетна вредност величине $x$ која одговара вредности $a$ = 0. На основу једначине 3.4 следи линеарна зависност:

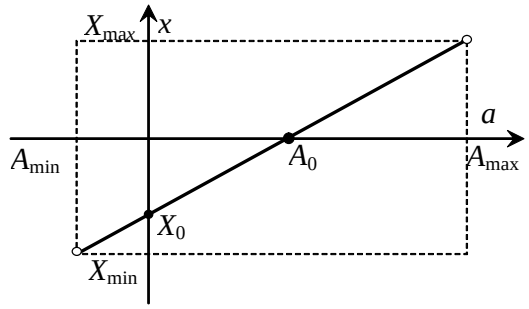
$$x - X_0 = k\,(a - A_0) \ . \tag{3.5}$$

Карактеристика преноса кондиционера помоћу којег се вредност улазне променљиве $a$ опсегу $[A_{\min}, A_{\max}]$ једнозначно пресликава на вредност излазне променљиве $x$ у опсегу $[X_{\min}, X_{\max}]$ одређена је једначином:

$$\frac{x - X_{\min}}{a - A_{\min}} = k \tag{3.6}$$

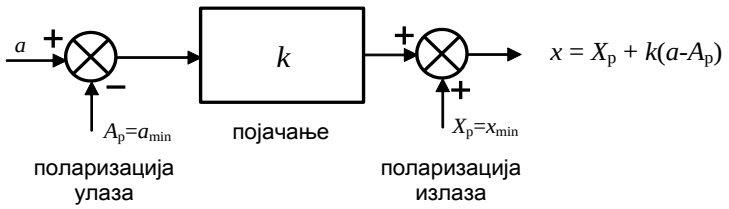
којом је дефинисана трансформација $a \rightarrow x$ (слика 3.5):

$$x = X_{\min} + k \cdot (a - A_{\min}), \quad k = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \ . \tag{3.7}$$




Слика 3.5. Линеарно пресликавање $a \rightarrow x$

Величина $A_{max}$ - $A_{min}$ је распон (*span*) односно ширина опсега вредности улазног сигнала кондиционера, док $X_{max}$ - $X_{min}$ представља излазни распон. Величина $k$ представља нагиб карактеристике $x(a)$. Једначина 3.7 дефинише математички модел кондиционера којем одговара структурни блок дијаграм приказан на слици 3.6.




Слика 3.6. Општи структурни блок-дијаграм кондиционера

Симболи $A_P$, $k$ и $X_P$ означавају параметре чија вредност се подешава сходно конкретним захтевима[16]. Величина $k$ одређује појачање, $A_P$ је померај (поларизација) улазног сигнала, а $X_P$ поларизација излаза. Поларизација улаза (тара[17]) омогућује да се појачава сигнал $a$ који представља одступање мерене величине од задате доње граничне вредности $A_P$ мерног опсега улазне величине кондиционера. Појачањем $k$ се постиже већа осетљивост, а тиме и боља резолуција мерења проширивањем опсега вредности излазне величине, док се поларизацијом излаза (суперпозицијом сигнала $X_P$ и сигнала на излазу појачавача), излазна величина $x$ доводи у жељени опсег вредности, тако да одговара мерном опсегу следећег дела у мерном ланцу. Слика 3.7. илуструје, као пример, процес размеравања којим се напон који се добија коришћењем термопара типа *K* при мерењу температуре у опсегу од 500 °C до 700 °C трансформише у напонски сигнал у опсегу од -5 V до +5 V.

Поступак размеравања је следећи. У првом кораку, поларизацијом се

---

[16] Због толеранција вредности елемената у колу, које утичу на улазну/излазну карактеристику кондиционера, подешавање је потребно и у случају када су границе опсега улазне и излазне величине унапред познате и сталне. Иницијалним подешавањем смањује се и утицај несавршености елемената у колу, чије се деловање манифестује као адитивна или мултипликативна грешка.

[17] Назив потиче од арапске речи *tarh*, одбитак тежине амбалаже од укупне тежине робе.

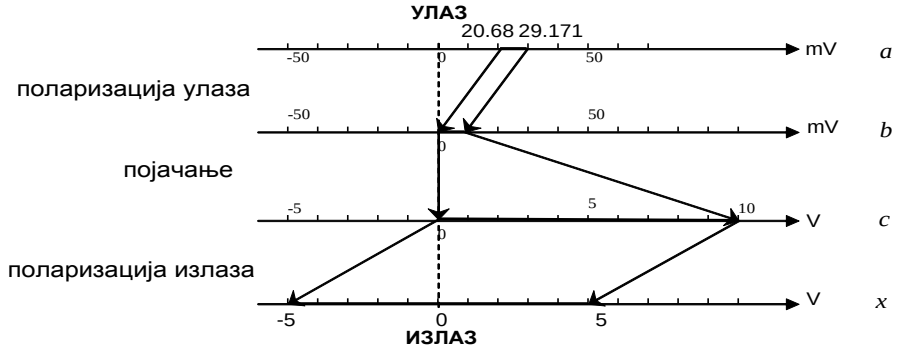
улазни сигнал $a$ у опсегу од 20.687 mV до 29.171 mV, трансформише у сигнал $b$ у опсегу од 0 до 8.484 mV. Затим се сигнал $b$ појачава тако да се добије сигнал $c$ чији је распон једнак 10 V. Поларизацијом се сигнал $c$ трансформише у излазни сигнал $x$ у опсегу од -5 V до +5 V.

Једначина 3.7 може да се напише у модификованом облику:

$$x(a) = k\,a + X_0, \tag{3.8}$$

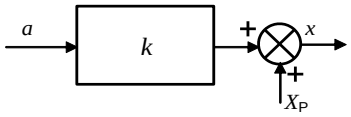
уобичајеном за експлицитно исказивање линеарне функционалне зависности. Величина $X_0$ представља померај нуле (*offset*) на излазу кондиционера:

$$X_0 = X(a=0) = \frac{X_{\min}\cdot A_{\max} - X_{\max}\cdot A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}\ . \tag{3.9}$$




Слика 3.7. Размеравање

Графички приказ улазно/излазне карактеристике кондиционера је права линија чији је коефицијент правца $k$, а $X_0$ представља одсечак на ординатној оси (слика 3.5). Структурни блок-дијаграм кондиционера, чији је математички модел дефинисан формулом 3.8, приказан је на слици 3.8. Симболи $k$ и $X_P$ означавају подесиве параметре кондиционера.



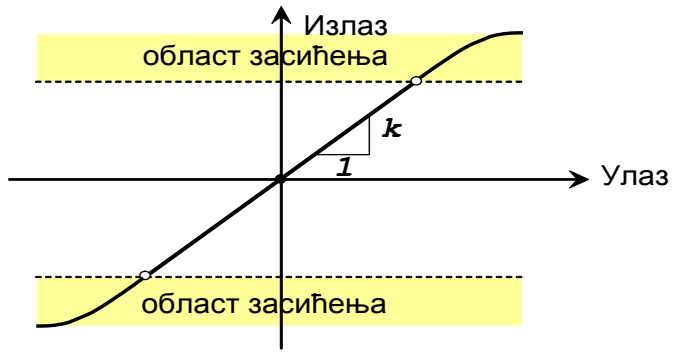

појачање поларизација

Слика 3.8. Модификована структура кондиционера

Математички гледано, формуле 3.7 и 3.8 су еквивалентне. Оне, међутим, описују структурне облике које се разликују са становишта практичне реализације и примене. Предност структуре засноване на математичком моделу 3.8 огледа се у чињеници да постоје само два параметра која се подешавају зависно од захтеваних радних опсега на улазу и излазу кондиционера: померај нуле (офсет) $X_P$ и појачање $k$ (слика 3.8). У случају када улазни сигнал $a$ представља електрични напон или струју, овакав модел омогућује једноставнији поступак подешавања. Прво се при $a$ = 0 (чему одговарају отворени улазни прикључци за струјни сигнал, односно кратак спој између напонских улазних прикључака), изврши подешавање офсета $X_P$ тако

да се на излазу кондиционера добије вредност жељеног помераја нуле ($x(0) = X_0$), а потом при $a = A_{max}$ изврши подешавање појачања $k$ тако да се на излазу добије вредност која одговара горњој граничној вредности излазног опсега. Ако се зависност сопственог помераја нуле програмабилног појачавача од вредности појачања $k$ може да занемари, описани поступак дефинисања радне праве, која представља улазно/излазну карактеристику, теоријски је егзактан и подешавање се може да оствари у два корака. То није могуће у структури приказаној на слици 3.6, која имплицира сложенији поступак подешавања. При $a = 0$ не зна се једнозначно шта треба подесити, $A_P$ или $X_P$.

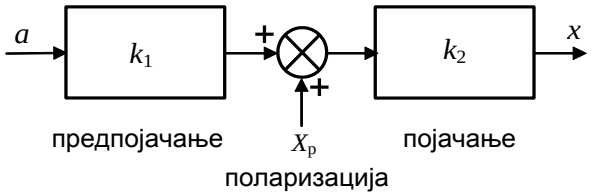
Поларизација улаза (претполаризација) има циљ да транспозицијом опсега вредности информационог параметра сигнала обезбеди оптималне радне услове појачавача, тако да се ограничен радни опсег електронских функционалних блокова што је могуће потпуније користи за обраду "корисног" (информативног) дела опсега могућих вредности улазног сигнала[18], који одговара стварном (радном) опсегу величине $a$. То је веома значајно у случајевима када је ширина мерног опсега знатно мања од одговарајућих вредности мерене електричне величине ($a_{min} >> a_{max}/2$) јер би тада без претполаризације већи део радног опсега излаза појачавача остао неискоришћен. Опсег вредности сигнала на излазу активних електричних кола је неизбежно ограничен величином напона којим се напајају, максималном струјом коју могу да дају задржавајући специфициране карактеристике, односно снагом коју могу да дисипирају, као и могућностима извора из којих се напајају. Због тога, директно појачање улазног сигнала у износу потребном у претходном примеру (приближно 1179 пута) није могуће без претходне поларизације, јер би довело до засићења (*saturation*) у излазном колу појачавача (слика 3.9) који се, типично, напаја напоном ±15 V, или мањим.




Слика 3.9. Карактеристика стварног појачавача

У практичним решењима обично се на улазу кондиционера налази претпојачавач сталног (неподесивог) појачања $k_1$ (слика 3.10), чија је додатна функција обезбеђивање велике улазне отпорности.

[18] За термопар типа *K* у претходном примеру, то је опсег од 20.687 mV до 29.171 mV.




Слика 3.10. Кондиционер сигнала ниског нивоа

На овај начин се елиминише проблем оптерећења кола у којем се налази сензор (*loading effect*). Потребно укупно појачање сигнала постиже се након извршене претполаризације, посебним колом чије се појачање $k_2$ може подесити тако да се оствари жељена трансформација 3.9:

$$x(a) = k_2(k_1\, a + X_{\mathrm{P}}),\ k_2 = \frac{k}{k_1},\ X_{\mathrm{P}} = \frac{k_1 X_0}{k}\ . \tag{3.10}$$

Када се на улаз кондиционера доводи сигнал ниског нивоа, за тачно мерење неопходна је примена диференцијалног појачавача који може да обезбеди потискивање заједничке сметње (*common mode rejection - CMR*), односно слабљење утицаја околних електричних извора (генератора) који су интерференцијом спрегнути са сигналним линијама.

## 3.2.2 НЕЛИНЕАРНО ПРЕСЛИКАВАЊЕ

Зависност мерене величине од величине која се стварно мери може бити нелинеарна, као што је то, на пример, случај при мерењу брзине протицања течности, која је сразмерна квадратном корену разлике притисака. Рад са таквим сензорима подразумева нелинеарне моделе[19]. Поступци линеаризације данас се поверавају микропроцесорима. Сензор се користи као извор информације која треба да буде поуздана, дефинисана одговарајућим математичким моделом, са што бољом тачношћу.

Када су својства процеса таква да је у одређеном делу радног опсега мерене величине потребно обезбедити мерење са већом осетљивошћу, користе се појачавачи чија се карактеристика улаз-излаз представља “у деловима линеарну” функцију. “Изломљена” карактеристика, која се састоји из два линеарна сегмента, омогућује да се већи део радног опсега вредности излазне величине (од $Y_{\mathrm{G}}$ до $Y_{\max}$) користи тако да одражава “мерни опсег од интереса” (од $X_{\mathrm{G}}$ до $X_{\max}$). Тако се постиже боља резолуција мерења у том подопсегу:

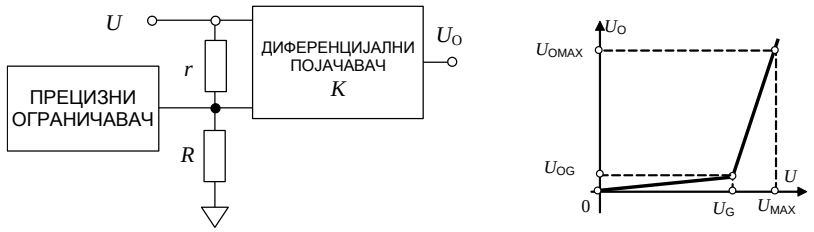
$$y = \begin{cases} k_1 x & \text{за } x < X_{\mathrm{G}} \\ Y_{\mathrm{G}} + k_2(x - X_{\mathrm{G}}) & \text{за } x \geq X_{\mathrm{G}} \end{cases}\ . \tag{3.11}$$

Појачавач напона, чија је карактеристика улаз-излаз “у деловима

[19] Из математике је познато да се, довољно малој околини неке тачке, било која нелинеарна функција може, са задовољавајућом тачношћу, да представи линеарном функцијом.

линеарна", може да се оствари применом диференцијалног појачавача, отпорничког делитеља напона и прецизног ограничавача, којим се обезбеђује да вредност напона $U_L$, у средишњој тачки делитеља напона, не може да буде већа од неке задате вредности $U_P$ (слика 3.11). Ако је улазна отпорност диференцијалног појачавача бесконачно велика, за напон $U_O$ на излазу овог кола важи:

$$U_O = \begin{cases} kU & \text{за } U < U_G = (1+\frac{r}{R})U_P \\ K(U-U_P) & \text{за } U \geq U_G = (1+\frac{r}{R})U_P \end{cases} . \quad (3.12)$$




Слика 3.11. Принципска шема појачавача са изломљеном карактеристиком

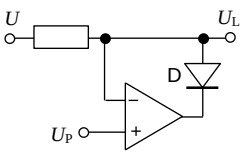
Појачање диференцијалног појачавача, $K$, одређује нагиб карактеристике када је улазни напон $U$ већи од задате вредности граничног напона $U_G$. Однос отпорности $r$ и $R$ подешава се тако да, када је $U < U_G$, нагиб карактеристике улаз-излаз има жељену вредност $k < K$:

$$k = \frac{K}{1+\frac{R}{r}} . \quad (3.13)$$

Вредност напона $U_P$ се подешава тако да се промена нагиба карактеристике оствари када је вредност улазног напона једнака вредности граничног напона $U_G$:

$$U_P = \frac{U_G}{1+\frac{r}{R}} . \quad (3.14)$$

Прецизно ограничавање напона се постиже помоћу диоде у грани повратне спреге операционог појачавача. У колу приказаном на слици, напон $U_L$ једнак је напону $U_P$, ако је диода D директно поларисана (Коло негативне повратне спреге операционог појачавача је тада затворено, његови улазни прикључци су на истом потенцијалу).

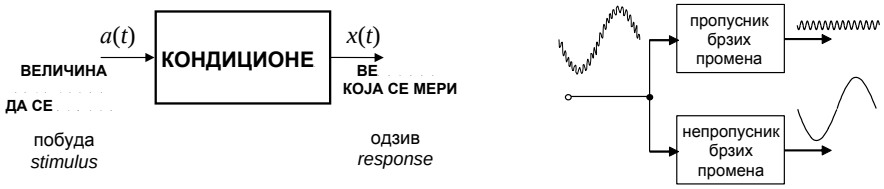



Када је диода инверзно поларисана ($U_I < U_P$), напон $U_L$ једнак је напону $U$, ако је отпорност којом је коло оптерећено бесконачно велика (улазна струја савршеног операционог појачавача је занемарљиво мала).

## 3.3 ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МЕРИЛА

У досадашњем разматрању пажња је била усредсређена на сагледавање основне законитости којом се остварује пресликавање вредности мерене физичке величине (положај, температура, деформација, напрезање) на вредност аналогне електричне величине $a$ (електрична отпорност, напон, струја) која се мери на погодан начин. Функција $x(a)$

дефинише статичку карактеристику кондиционера. Уколико се мерена величина мења у времену, мора се водити рачуна о његовим динамичким својствима.




Слика 3.12. Кондиционер као динамички елемент

Одзив сензора на промене мерене величине зависи од његових динамичких својстава која су одређена диференцијалним једначинама које описују физичко понашање сензора. Постојање места на којима долази до нагомилавања енергије или масе (електрична, термичка, флуидна или нека друга капацитивност) доводи до кашњења у одзиву, што се мора имату и виду када је сензор укључен у систем аутоматског управљања. Анализа динамичких карактеристика сензора у потпуности се ослања на општу теорију система која представља основу за проучавање сложених система у различитим областима технике: аутоматици, телекомуникацијама, електроници, енергетици...

Динамичка својства елемента типа улаз-излаз описују се оператором којим се улазна функција $a(t)$ пресликава на излазну функцију $x(t)$. Оператор преноса $a(t) \rightarrow x(t)$ описује закон пресликавања по којем свакој датој функцији $a(t)$, којом је представљен сигнал на улазу (побуда), одговара одређена функција $x(t)$ којом је представљен сигнал на излазу (одзив). Вредност излаза у сваком тренутку зависи од "предисторије". Пресликавање је линеарано ако је оператор линеаран, односно ако се може применити принцип суперпозиције[20]. У противном, веза $x(a)$ је нелинеарна. Из теорије динамичких система је познато да се, у ограниченом радном опсегу, нелинеарни систем може, са задовољавајућом тачношћу, представити линеарним моделом.

Зависно од динамичких карактеристика процеса, сензора и спољашних утицаја, може се појавити потреба да мерни ланац треба, на пример, да пригуши брзе (скоковите) промене величине $a(t)$ за које се, с обзиром на природу процеса, претпоставља да представљају само последице деловања поремећаја (шума). Могућ је и обрнут захтев, да се преносе само брзе промене улазног сигнала. Са тим циљем у мерни ланац се укључују елементи који различито реагују на споре и брзе промене информационог параметра мерног сигнала (слика 3.12.б). Такво коло се назива филтер[21] (*filter*) [9], [10]. Филтер је елемент са два приступа типа улаз-излаз, намењен да преноси

[20] Одзив елемента на побуду која може да се прикаже као суперпозиција (алгебраски збир) више (елементарних) побуда представља суперпозицију одзива на сваку побуду појединачно. Линеарни оператори су оператор диференцирања и оператор интеграљења.

[21] Назив, енг. *filter*, нем. *Filter*, потиче од лат. *filtrum,* цедило, цедиљка.

спектралне компоненте улазног сигнала у складу са одређеним законом. У општем случају филтер не утиче на компоненте које припадају одређеним опсезима учестаности, а слаби[22] све оне које припадају другим опсезима.

### 3.3.1 АНАЛИЗА У ВРЕМЕНСКОМ ДОМЕНУ

Посматрајући сензор као линеаран елемент, однос излазних и улазних величина може да се представи у облику интегрално-диференцијалне једначине или системом интегрално-диференцијалних једначина са константним коефицијентима. У најопштијем облику, математички модел сензора представља диференцијална једначина:

$$\sum_{0}^{n} X_i \frac{d^i x}{dt^i} = \sum_{0}^{m} A_j \frac{d^j a}{dt^j}, \qquad \frac{d^i x(0)}{dt^i} = X_{i0}; \quad m \le n, \tag{3.15}$$

у којој $a(t)$ представља улазну, а $x(t)$ излазну величину, $X_i$ и $A_j$ су константни коефицијенти, а $X_{i0}$ је вредност i-тог извода величине $x(t)$ у почетном тренутку $t$ = 0. Одзив када су сви почетни услови једнаки нули назива се нормални одзив.

Динамичко понашање појединих елемената испитује се и одређује анализом одзива на улазне сигнале карактеристичног таласног облика као што су импулсна, одскочна, нагибна и хармонијска (синусна) функција (слика 3.13) [11]. Јединична импулсна и јединична одскочна функција међусобно су повезане релацијом:

$$\delta(t) = \frac{dh}{dt}. \tag{3.16}$$

И друге карактеристичне функције побуде могу да се представе помоћу јединичне Хевисајдове функције. На пример, за функцију рампе, $r(t)$, и импулс, $d(t)$, важи:

$$r(t) = \frac{1}{T}\int h(t)dt, \tag{3.17}$$

$$d(t) = \frac{h(t-\tau+\frac{\Delta}{2}) - h(t-\tau+\frac{\Delta}{2})}{\Delta}. \tag{3.18}$$

При анализи динамичких система у временском домену најчешће се користе јединична одскочна и јединична импулсна функција. Одзив $g(t)$ на побуду јединичном импулсном функцијом $\delta(t)$ назива се импулсни одзив (*impulse response, weighting function*), а одзив $u(t)$ на јединичну одскочну функцију $h(t)$ прелазни одзив (*transient response*) или јединични одскочни одзив (*unit step response*).

---

[22] При описивању својстава фреквенцијски селективних кола користи се појам “слабљење” (*attenuatiion*).

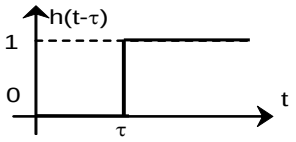
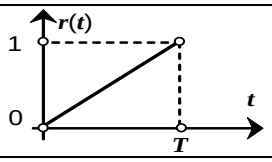
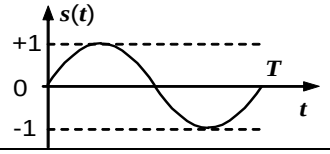
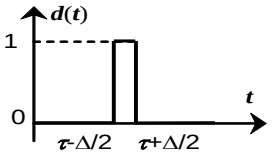
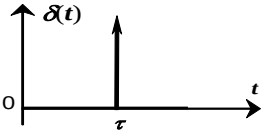
Постоји веза између импулсног $g(t)$ и прелазног одзива $u(t)$ сензора:

$$u(t)=\int_0^{\infty} g(t)\,dt\,. \tag{3.19}$$

У низу случајева као модел сензора може да се примени диференцијална једначина првог реда:

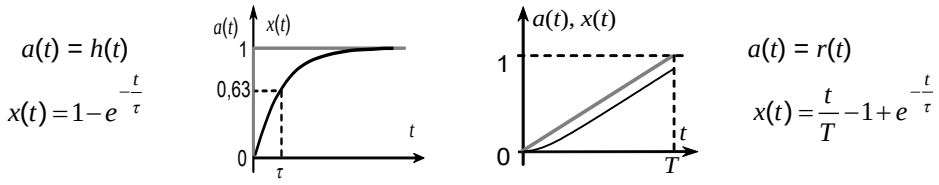
$$\tau\frac{dx}{dt}+x(t)=k\,a(t)\,,\ \ x(0)=X_0\,, \tag{3.20}$$

у којој $a(t)$ представља улазну величину (побуду), $x(t)$ излазну величину (одзив). Величине $\tau$ и $k$ представљају константе (параметре сензора). Величина $\tau$ има димензију времена и назива се временска константа. Димензија величине $k$ одређена је димензијама величина које представљају побуду и одзив.

| | | |
|---|---|---|
| Хевисајдова јединична одскочна функција (*step*) |  | $h(t-\tau)=\begin{cases}0\,;\,0\le t<\tau\\1\,;\,t\ge\tau\end{cases}$<br>$\tau\ge 0$ |
| нагибна (успонска) функција (*ramp*) |  | $r(t)=\dfrac{t}{T}\ ;\ t\ge 0$ |
| синусна функција (*sinus*) |  | $s(t)=\sin\dfrac{2\pi}{T}t;\ t\ge 0$ |
| импулс (*pulse*) |  | $d(t)=\begin{cases}0\,;0\le t<\tau-\dfrac{\Delta}{2}\\1\,;\ \tau-\dfrac{\Delta}{2}\le t<\tau+\dfrac{\Delta}{2}\\0\,;t>\tau+\dfrac{\Delta}{2}\end{cases}$ |
| Диракова јединична импулсна (делта) функција (*impulse*) |  | $\delta(t)=0;t\ne\tau$<br>$\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t)\,dt=1$ |

Слика 3.13. Карактеристичне функције побуде

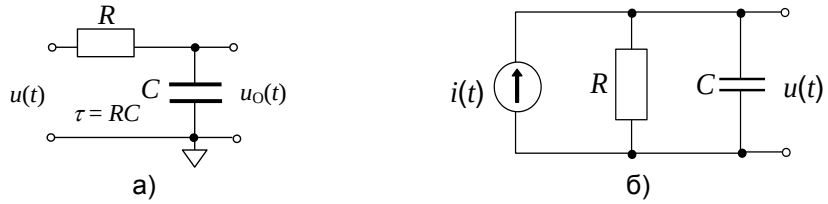
Динамичко понашање елемента чији је математички модел једначина 3.20 приказано је на слици 3.14. У теорији линеарних система, елемент који се моделује оваквом једначином назива се “инерцијални елемент првог реда”. Временска константа $\tau$ представља временски интервал потребан да одскочни одзив (*step response*) достигне 1- 1/e ≈ 63,2% коначне вредности.




а) одскочни одзив б) одзив на нагибну функцију

Слика 3.14. Динамичке карактеристике сензора

Овакав модел може да се примени на жироскоп, анемометар, термопар, као и отпорничке термометре [12]. Еквивалентно електрично коло приказано је на слици 3.15.а. Временска константна типичних платинских отпорних термометара Pt100 је од 0,1 s до 10 s, зависно од изведбе сензора, односно заштитног кућишта у које се он смешта.




а) б)

Слика 3.15. Еквивалентна електрична кола сензора

Пиезоелектрични сензор[23] може да се представи електричним колом приказаном на слици 3.15.б, за које важе једначине:

$$i = k\frac{dF}{dt},\quad RC\frac{du}{dt} + u = Ri, \tag{3.21}$$

где је $F$ сила која делује на сензор, а $R$ и $C$ су еквивалентна отпорност односно капацитивност сензора који чине кристал и електроде које се на њему налазе.

Уколико у физичком систему који сензор представља постоје два елемента чије се деловање манифестује нагомилавањем енергије, понашање система описује се диференцијалном једначином другог реда:

$$c_2\frac{d^2x}{dt^2} + c_a\frac{dx}{dt} + x(t) = ka(t),\ x(0) = X_0,\ \dot{X}(0) = X_1. \tag{3.22}$$

Овакав модел може да се примени на сензоре убрзања, влажности, угаоне брзине, као и на сензоре температуре који се налазе у заштитном омотачу. Потпунија анализа понашања неких сензора намеће потребу за применом модела са расподељеним параметрима. Пример таквог сензора је претходно описан мембрански сензор притиска.

---

[23] Пиезоелектрични ефекат се манифестује у појави наелектрисања дуж одређених површина кристала изложеног деформацији под дејством механичког напрезања. Назив потиче од грчке речи *piézō*, притискујем. Пиезоелектрични сензор се користи за мерење силе, притиска.

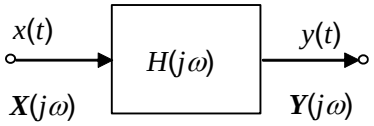
## 3.3.2 АНАЛИЗА У ФРЕКВЕНЦИЈСКОМ ДОМЕНУ

За анализу динамичких својстава сензора користе се и друге математичке методе, развијене у оквирима анализе кола и система. Поједностављење облика представљања математичког модела који описују динамичко понашање сензора и, што је још значајније, поједностављење анализе његових својстава, постиже се применом Фуријеове трансформације. Њоме се остварује пресликавање функције времена, $x(t)$, на функцију комплексне променљиве $X(j\omega)$, где је $\omega$ угаона учестаност сигнала $x(t)$. Ово пресликавање омогућује замену операција диференцирања и интеграљења једноставнијим операцијама множења и дељења. Тиме се значајно поједностављује поступак динамичке анализе. Линерани елеменат типа улаз-излаз описује се бездимензионом[24] комплексном величином $\boldsymbol{H}(j\omega)$ која приказује деловање сензора на амплитуду и фазу сигнала који представља побуду, зависно од његове учестаности:

$$\boldsymbol{Y}(j\omega) = \boldsymbol{H}(j\omega) \cdot \boldsymbol{X}(j\omega) . \tag{3.23}$$

где су $\boldsymbol{X}(j\omega)$ и $\boldsymbol{Y}(j\omega)$ комплексни представници (ликови) улазног односно излазног сигнала, добијени применом Фуријеове трансформације:

$$\boldsymbol{X}(j\omega) = F\left[x(t)\right] = \int_0^\infty x(t)\, e^{-j\omega t}\, dt \ , \ \boldsymbol{Y}(j\omega) = F\left[y(t)\right] = \int_0^\infty y(t)\, e^{-j\omega t}\, dt \ . \tag{3.24}$$




Слика 3.16. Фреквенцијска карактеристика

Комплексни представник хармонијског сигнала $x(t)$:

$$x(t) = X \cos \omega t \ , \tag{3.25}$$

где је $X$ амплитуда, $\Theta = \omega t$ фаза, а $\omega$ кружна учестаност:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} , \tag{3.26}$$

представља комплексну величину $X(j\omega)$ чији је модуо једнак амплитуди, а аргумент фази функције која представља побуду елемента:

$$\boldsymbol{X}(j\omega) = Xe^{j\omega t} . \tag{3.27}$$

Комплексни представник одзива $y(t)$, је комплексна величина $Y(j\omega)$ чији је модуо једнак амплитуди, а аргумент фази функције $y(t)$:

$$\boldsymbol{Y}(j\omega) = Y(\omega)e^{j(\omega t+\varphi)} , \tag{3.28}$$

[24] Претпоставка је да улазна и излазна величина имају исту физичку природу.

Величина $\boldsymbol{H}(j\omega)$ назива се фреквенцијска карактеристика (*frequency response*). Она може да се представи у облику:

$$\boldsymbol{H}(j\omega)=\frac{\boldsymbol{Y}(j\omega)}{\boldsymbol{X}(j\omega)}=H(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \tag{3.29}$$

где је $H(\omega)$ модуо:

$$H(\omega)=\left|\boldsymbol{H}(j\omega)\right|, \tag{3.30}$$

а $\varphi(\omega)$ фаза комплексне величине $\boldsymbol{H}(j\omega)$:

$$\varphi(\omega)=\boldsymbol{arg}\,\boldsymbol{H}(j\omega)=arctg\frac{\boldsymbol{ImH}(j\omega)}{\boldsymbol{ReH}(j\omega)}\ , \tag{3.31}$$

Фреквенцијска карактеристика је апстрактни појам. Физичко значење имају само модуо и аргумент функције $H(j\omega)$. Модуо фреквенцијске карактеристике је реална величина, $H(\omega)$, која је одређена количником амплитуде одзива и побуде:

$$H(\omega)=\left|H(j\omega)\right|=\frac{Y(\omega)}{X(\omega)}, \tag{3.32}$$

а назива се амплитудска фреквенцијска карактеристика. Аргумент фреквенцијске карактеристике, величина $\varphi(\omega)$ је фазна карактеристика, а физички представља разлику фаза излазног, $y(t)$, и улазног сигнала $xt$):

$$\varphi(\omega)=\boldsymbol{arg}\,H(j\omega)=\boldsymbol{arg}\,Y(j\omega)-\boldsymbol{arg}\,X(j\omega). \tag{3.33}$$

Амплитудска фреквенцијска карактеристика показује како елемент утиче на амплитуду сигнала на његовом путу од улаза до излаза. Фазна фреквенцијска карактеристика показује како елемент помера фазу. У општем случају ове величине зависе од учестаности улазног сигнала.

Логаритамска амплитудска карактеристика, $H_{\mathrm{L}}(\omega)$, дефинисана је једначином[25]:

$$H_{\mathrm{L}}(\omega)=20\,\boldsymbol{log}_{10}\,H(\omega)=\frac{Y(\omega)}{X(\omega)}. \tag{3.34}$$

Вредност $H_{\mathrm{L}}(\omega)$ се изражава у децибелима[26] (dB).

На слици 3.17 су приказане логаритамска амплитудска и фазна карактеристика сензора чији је математички модел дат једначином 3.20. Његова фреквенцијска карактеристика може да се представи изразом:

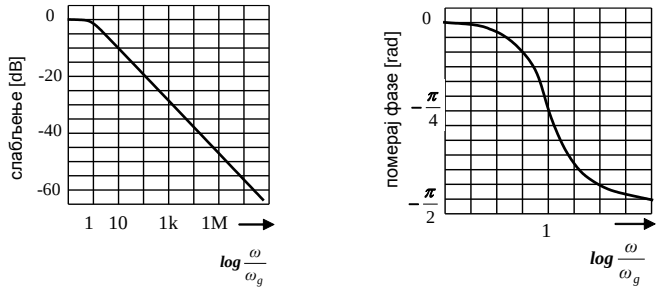
---

[25] Описивање односа величина помоћу логаритамске скале је опште прихваћено у техници, па се, најчешће, логаритамска амплитудска карактеристика означава истим симболом као и амплитудска карактеристика, $H(j\omega)$. Ради прецизности у овом тексту се користи индекс L.

[26] Децибел је десети део бела, јединице којом се однос две величине, које имају природу снаге, приказује декадним логаритмом броја који представља њихов количник.

$$H(j\omega)=\frac{1}{1+j\dfrac{\omega}{\omega_g}}\,. \tag{3.35}$$

где је $\omega_g$ гранична учестаност при којој је амплитудска фреквенцијска карактеристика $\sqrt{2}$ пута мања од максималне вредности $H(0)$, коју има када је учестаност побуде једнака нули. Излаз заостаје у односу на улаз за угао φ<0 који је по модулу мањи од $\pi$. Ако је учестаност побуде много већа од граничне учестаности $\omega_g$, однос амплитуда излаза и улаза је обрнуто сразмеран учестаности. Нагиб асимптотске логаритамске амплитудске карактеристике у непропусном опсегу је -20 децибела по декади (*dB/dec*).




$$H(\omega)=\frac{1}{\sqrt{1+(\dfrac{\omega}{\omega_g})^2}} \qquad \varphi(\omega)=-arctg\frac{\omega}{\omega_g}\,,$$

$$H(0)=1\,,\ H(\omega_g)=\frac{1}{\sqrt{2}} \qquad \varphi(0)=0$$

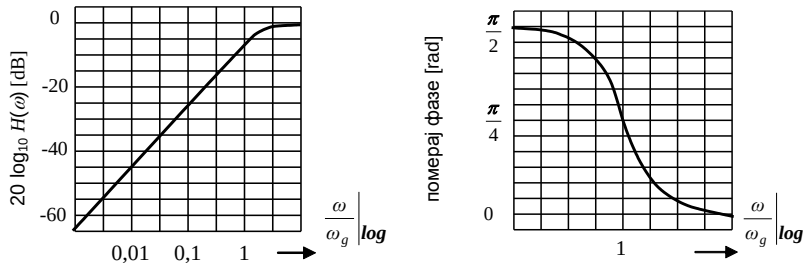
Слика 3.17. Фреквенцијска карактеристика инерцијалног елемента првог реда

Математички модел пиезоелектричног сензора (једначине 3.21) може да се представи једначином облика:

$$k_U\frac{du}{dt}+u=k_F\frac{dF}{dt}\,. \tag{3.36}$$

у којој $k_U$ и $k_F$ представљају константе. На слици 3.18 приказане су одговарајућа логаритамска амплитудска и фазна фреквенцијска карактеристика таквог елемента. Излазни сигнал предњачи у односу на улазни сигнал за угао φ > 0 који је мањи од $\pi$. За сигнале чија је учестаност много мања од граничне учестаности $\omega_g$, однос амплитуда излазног и улазног сигнала сразмеран је учестаности. Нагиб асимптотске логаритамске амплитудске карактеристике у непропусном опсегу је +20 *dB/dec*. Нормализована фреквенцијска карактеристика има облик:

$$H(j\omega)=\frac{j\dfrac{\omega}{\omega_g}}{1+j\dfrac{\omega}{\omega_g}}\,. \tag{3.37}$$




$$H(\omega)=\frac{\frac{\omega}{\omega_g}}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}}$$

$$\varphi(\omega)=\frac{\pi}{2}-arctg\frac{\omega}{\omega_g},$$

$$\varphi(\omega_g)=45°$$

$$H(\infty)=1,\ H(\omega_g)=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

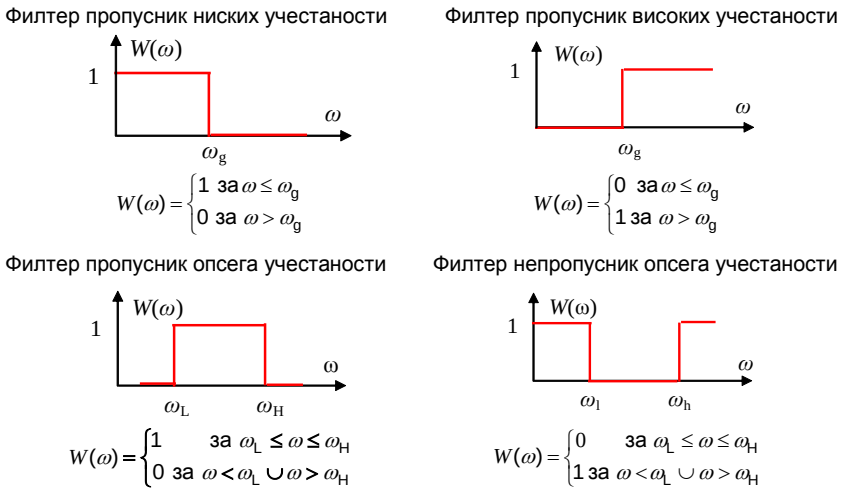
Слика 3.18. Фреквенцијска карактеристика пиезоелектричног сензора

Фреквенцијска карактеристика користи се и за описивање аналогних фреквенцијски селективних кола - филтера. Такво коло пропушта сигнале у одређеном фреквенцијском опсегу, а слаби сигнале свих других учестаности. Њихова примена у мерној техници је у многим случајевима неизбежна, посебно када се ради о индустријским мерењима, мерењима у истраживачким лабораторијама, као и при мерењима код којих се захтева велика прецизност. Испитивање модела авиона и летилица у аеродинамичком тунелу, на пример, подразумева екстракцију мерног сигнала из електричног сигнала чији је вредност резултат суперпозиције више утицаја. Одговарајућа обрада остварује се уношењем кола које преноси (пропушта) компоненте спектра чија је учестаност у одређеном опсегу, а потискује (не пропушта) компоненте свих других учестаности.

Аналогни филтер може да се дефинише као линеаран елемент типа улаз-излаз која преноси сигнале без слабљења за све учестаности унутар одређеног опсега, а са слабљењем које није нула за остале учестаности. Пропусни (непропусни) опсег[27] је опсег учестаности у којем слабљење остаје мање (веће) од задате вредности [13].

Практично, филтер је фреквенцијски-селективно коло пројектовано да обезбеди жељено слабљење сигнала у одређеном опсегу учестаности. Амплитудска фреквенцијска карактеристика филтра треба да има сталну вредност за сигнале чија је учестаност у опсегу од интереса, док за сигнале који се желе потиснути вредност $H(\omega)$ треба да је што је могуће мања. Притом, у непропусном опсегу слабљење не сме да буде мање од неке задате минималне вредности која је потребна да се нежељене спектралне компоненте довољно потисну. У пропусном опсегу слабљење не сме да буде веће од неке максималне допуштене вредности, како не би дошло до нежељеног "гушења" информативног дела спектра сигнала. Фазна карактеристика утиче на изобличење сигнала који пролази кроз филтерско коло. Изобличења нема уколико филтер има линеарну фазну карактеристику.

[27] Енг. *pass* односно *stop band,* нем. *Durchlasband (Sperrband),* рус. *полоса проппускания (затухания)*.




Слика 3.19. Фреквенцијске карактеристике савршених филтера

Филтер пропусник ниских учестаности (*low-pass filter, LPF*) има само један пропусни опсег који се протеже од нуле до неке граничне учестаности $\omega_g$ [14]. Филтер пропусник високих учестаности (*high-pass filter, HPF*) има само један пропусни опсег који обухвата све учестаности веће од граничне учестаности. Филтер пропусник опсега учестаности (*band-pass filter, BPF*) има само један пропусни опсег ограничен са две коначне учестаности које нису нула или бесконачне. Филтер непропусник опсега учестаности (*band-stop filter,BSF, band reject, notch*) има само један непропусни опсег ограничен са две коначне учестаности, које нису нула или бесконачне.

Савршени филтер (*ideal filter*) је елемент са два приступа за који је модуо функције преноса једнак јединици унутар једног или више фреквенцијских опсега, а једнак нули за све остале учестаности [15]. У пропусном опсегу савршени филтер преноси сигнал без слабљења. Изван пропусног опсега слабљење је бесконачно велико. Физички је немогуће реализовати електричну мрежу која би се одликовала скоковитим прелазом из непропусног у пропусни опсег. При пројектовању филтера настоји се да амплитудска фреквенцијска карактеристика има сталну вредност за сигнале чија је учестаност у опсегу од интереса, док за сигнале који се желе потиснути вредност $W(\omega)$ треба да буде што је могуће мања. С обзиром на толеранције вредности елемената, при пројектовању филтера постављају се захтеви да у пропусном опсегу слабљење није веће од задате вредности, а у непропусном опсегу слабљење није мање од задате вредности.

Карактеристика стварног фреквенцијски селективног кола увек представља само апроксимацију карактеристике савршеног филтра. Зависно од услова које намећу циљеви мерења, пажња може бити усредсређена на амплитудску (селективност) или фазну (изобличење) карактеристику филтра.

У мерној техници се често од фреквенцијски селективних кола у мерном ланцу захтева максимално глатка[28] амплитудска карактеристика. Такво својство имају филтри типа Батерворт (*Butterworth*) чија амплитудска

[28] Глатка функција (*flat function*) је функција која нема таласе (*ripple*). Максимално глатка функција у некој тачки $x_0$ је функција $f(x)$ чији је највећи број извода у тој тачки једнак нули.

фреквенцијска карактеристика за филтер пропусник ниских учестаности има облик:

$$H(\omega)=\frac{1}{\sqrt{1+(\frac{\omega}{\omega_g})^{2n}}}, \tag{3.38}$$

где је $n$ ред филтра, а $\omega_g$ представља граничну учестаност пропусног опсега, која се обично дефинише изразом:

$$H(\omega_g)=\frac{1}{\sqrt{2}}. \tag{3.39}$$

Функција $H(\omega)$ монотоно опада од максималне вредности једнаке јединици при $\omega$ = 0. Филтри овог типа се одликују максимално глатком амплитудском карактеристиком у околини $\omega = \omega_g$. За $\omega >> \omega_g$ важи апроксимација:

$$H(\omega)\cong\left(\frac{\omega_g}{\omega}\right)^n. \tag{3.40}$$

Фреквенцијска карактеристика Батервортовог филтра *n*-тог реда нема нула, а обично се представља у облику:

$$\boldsymbol{H}(j\omega)=\frac{1}{\boldsymbol{B}(j\omega)}, \tag{3.41}$$

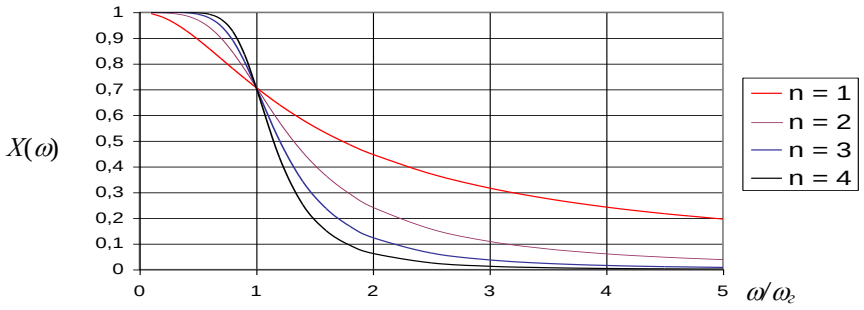
где је $\boldsymbol{B}(j\omega)$ полином по $j\omega$. Коефицијенти прва четири полинома дати су у табели.

| *n* | $\boldsymbol{B}(j\omega)$ |
|---|---|
| 1 | $j\omega T$+1 |
| 2 | $(j\omega T)^2 + \sqrt{2}\ j\omega T$+1 |
| 3 | $(j\omega T)^3 + 2(j\omega T)^2 + 2\, j\omega T$+1 |
| 4 | $(j\omega T)^4 + 2{,}613(j\omega T)^3 + 3{,}414(j\omega T)^2 + 2{,}613\, j\omega T$+1 |

Табела 3.1. Батервортови полиноми

Апроксимација карактеристике савршеног филтра је утолико боља уколико је ред филтра $n$ већи. Тиме се, међутим, повећава сложеност кола, па се филтри вишег реда најчешће остварују каскадном везом више филтара нижег реда. На слици 3.20 приказане су амплитудске фреквенцијске карактеристике филтера до четвртог реда.

Елемент чија је фреквенцијска карактеристика дата једначином 3.20 представља Батервортов филтер првог реда. Пасивно $RC$-коло приказано на слици 3.15.а је такав елемент. Филтри вишег реда се најчешће остварују применом операционих појачавача.




Слика 3.20. Амплитудска карактеристика Батервортових полинома

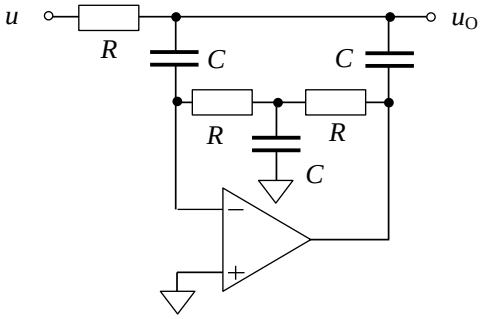
Коло приказано на слици 3.21, чија је фреквенцијска карактеристика одређена изразом:

$$\boldsymbol{H}(j\omega)=\frac{1}{(1+j\omega RC)\cdot[1+j\omega RC+(j\omega RC)^2]}\ , \tag{3.42}$$

представља Батервортов филтер трећег реда. Гранична учестаност једнака је:

$$f_g=\frac{1}{2\pi RC}\ . \tag{3.43}$$

Нагиб асимптотске логаритамске амплитудске карактеристике у непропусном опсегу је -60 dB/dec.




Слика 3.21. Батервортов филтер трећег реда

Потискивање нежељених компонената у спектру мерног сигнала остварује се помоћу кола са фреквенцијски селективном функцијом преноса које смањује амплитуду хармоника чија се учестаност налази у одређеном опсегу. У линеарном систему, фреквенцијски селективно коло које остварује потискивање нежељених компоненти у спектру мерног сигнала може, теоријски, да буде постављено било где у ланцу обраде мерног сигнала, али је са гледишта оптимизације радних режима појединих блокова, обично најпогодније да се филтрирање изврши пре нормализације.

### 3.3.3 АНАЛИЗА У КОМПЛЕКСНОМ ДОМЕНУ

Анализа у фреквенцијском домену заснива се на представљању сигнала Фуријеовом трансформацијом. Потребан услов да она може да се примени је да интеграл апсолутне вредности посматране функције $a(t)$ дуж целе осе $t$ има коначну вредност:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |a(t)|\, dt < \infty . \tag{3.44}$$

Међутим, овај услов не испуњавају неке основне функције које се користе у истраживању линеарних система, као што је, на пример, јединична одскочна функција (слика 3.13). Проблем се превазилази применом Лапласове трансформације којом се функција времена $a(t)$ пресликава у функцију комплексне променљиве $\boldsymbol{s} = \sigma + j\omega$. Ово пресликавање је дато интегралом:

$$\boldsymbol{A}(s) = L\left[A(t)\right] = \int_{0}^{\infty} a(t)\, e^{-\sigma t}\, dt . \tag{3.45}$$

где је $\sigma$ реални део комплексне променљиве $\boldsymbol{s}$, такав да је испуњен услов:

$$\int_{0}^{+\infty} \left| a(t) e^{-\sigma t} \right| dt < \infty . \tag{3.46}$$

Упркос сложеној математичкој основи, поступак анализе у комплексном домену се заснива на једноставним правилима. Применом Лапласове трансформације диференцијална једначина 3.15 се трансформише у алгебарску једначину:

$$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{s}) = \boldsymbol{H}(\boldsymbol{s})\, \boldsymbol{A}(\boldsymbol{s}) \ , \tag{3.47}$$

тако што се оператор диференцирања замењује комплексном променљивом $\boldsymbol{s}$, а променљиве $a(t)$ и $x(t)$ њиховим комплексним представницима $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{s})$ (једначина 3.45) и $\boldsymbol{X}(\boldsymbol{s})$:

$$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{s}) = L\left[X(t)\right] = \int_{0}^{\infty} x(t)\, e^{-\sigma t}\, dt \tag{3.48}$$

Величина $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s})$, која представља количник комплексних ликова $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{s})$ и $\boldsymbol{X}(\boldsymbol{s})$, назива се функција преноса (*transfer function*). Фреквенцијска карактеристика $\boldsymbol{H}(j\omega)$ добија се сменом $\boldsymbol{s} = j\omega$.

На основу дефиниционих израза следи да је Лапласова трансформација јединичне импулсне функције једнака јединици:

$$L[\delta(t)] = 1 , \tag{3.49}$$

па функција преноса $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s})$ представља комплексан лик нормалног одзива на јединичну импулсну побуду, односно:

$$g(t) = L^{-1}\left[\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s})\right] = \frac{1}{2\pi j}\int_{\sigma-j\omega}^{\sigma+j\omega} \boldsymbol{H}(s) e^{st}\, d\,\boldsymbol{s}\,. \tag{3.50}$$

Формално, функција преноса добија се на основу диференцијалне једначине заменом у њој симбола вишеструког диференцирања одговарајућим степеном комплексне променљиве $\boldsymbol{s}$. Једначини 3.15 одговара општи облик функције преноса:

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s}) = \frac{\boldsymbol{X}(\boldsymbol{s})}{\boldsymbol{A}(\boldsymbol{s})} = \frac{\sum_{0}^{m} A_j \cdot \boldsymbol{s}^j}{\sum_{0}^{n} X_i \cdot \boldsymbol{s}^i}\,. \tag{3.51}$$

Увођењем појма функције преноса омогућено је описивање динамичких својстава сензора на јединствен начин, без обзира на физичку природу аналогне величине $x(t)$ која се мери, односно величине која се жели да измери $a(t)$. На пример, сензорима са једним улазом и једним излазом, чије је понашање описано диференцијалном једначином првог реда (једначина 3.20) одговара функција преноса која има облик:

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s}) = \frac{k}{1+\boldsymbol{s}\,T}\,. \tag{3.52}$$

Математичком моделу пиезоелектричног сензора (једначине 3.32) одговара динамички елемент првог реда чија је функција преноса:

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s}) = \frac{\boldsymbol{U}(\boldsymbol{s})}{\boldsymbol{F}(\boldsymbol{s})} = K\,\frac{\boldsymbol{s}\,T}{1+\boldsymbol{s}\,T}\,, \tag{3.53}$$

где $\boldsymbol{U}(\boldsymbol{s})$ означава комплексни лик одзива, који представља напон, а $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{s})$ комплексни лик побуде која представља силу која делује на сензор.

Једначини (3.22) одговара функција преноса која се обично приказује у облику:

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{s}) = \frac{k}{1+2\xi T\,\boldsymbol{s}+T^2\,\boldsymbol{s}^2}\,. \tag{3.54}$$

Познавање функције преноса сензора омогућује да се, коришћењем познатих метода синтезе електричних кола, изврши одговарајућа компензација фреквенцијске карактеристике мерног ланца у целини.

## 3.4 МЕРНИ ПРЕТВАРАЧИ НАИЗМЕНИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА

Под називом мерни претварачи наизменичних електричних величина[29] подразумевају се мерна средства која омогућују мерење карактеристичних величина у системима наизменичне струје. У постројењима за производњу, пренос и дистрибуцију електричне енергије, мерни претварач наизменичне електричне величине је уређај који мерену електричну величину пресликава на вредност једносмерне струје или напона, у нормализованом опсегу (на пример: 0 до 10 mA, -5 mA до 5 mA, 4 mA до 20 mA, 0 до 10 V, -5 V до 5 V.

Мерни претварачи наизменичних електричних величина присутни су практично у свим објектима електропривреде, као неизбежни део опреме који омогућује ефикасну експлатацију и успешно управљање електроенергетским системима, односно њиховим деловима (објектима). С обзиром на намену, морају остварити високу поузданост у раду, посебно у условима хаваријских стања. Опште техничке карактеристике мерних претварача утврђују се националним техничким препорукама и упутствима, као и међународним стандардима [16], [17], [18], [19].

Конвенционални мерни претварачи, који омогућују мерење електричних величина, приказују измерене и израчунате вредности најчешће струјним једносмерним сигналом, а понекад једносмерним напоном. Величине које се мере у објектима електропривреде су:

- напон,
- струја,
- активна снага,
- реактивна снага,
- фактор снаге,
- разлика фаза напона и струје, и
- учестаност.

Индекс класе[30] (*class index*) за ове претвараче може да има четири вредности од 0,1 до 1. Границе дозвољене сопствене грешке (*intrinsic error*) при референтним условима дате су у табели 3.1.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| индекс класе | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 |
| границе грешке | ±0,1 % | ±0,2 % | ±0,5 % | ±1 % |

Табела 3.1. Границе дозвољене грешке

Опсег подешавања које врши корисник на напонском улазу је од 80 % до 120 % називне вредности. На струјном улазу тај опсег је од 60 % до 130 % називне вредности. Заостала наизменична компонента на аналогном излазу

---

[29] Стандардом је електрични мерни претварач (*electrical measuring tramsducer*) дефинисан као уређај који вредност наизменичне мерене величине пресликава на вредност једносмерне струје или напона или у дигитални сигнал за потребе мерења [5].

[30] Под овим називом се подразумева број који означава класу тачности мерила (*accuracy class*).

(*ripple content*), мерена од врха до врха, не треба да прелази двоструку вредност индекса класе.

Поред мерених величина дефинишу се и утицајне величине и њихове референтне вредности. То су температура околине, учестаност улазне величине, таласни облик сигнала, излазно оптерећење (*output load*), помоћни напон напајања (*auxiliary supply*) и магнетско поље страног порекла.

Према називном опсегу температуре околине претварачи су сврстани у три групе, приказане у табели 3.2.

| група | опсег температуре | релативна влажност |
|---|---|---|
| I | 10 ...35 °C | |
| II | 0 ...45 °C | до $93^{+2}_{-3}$ % |
| III | -10 ...55 °C | |

Табела 3.2. Температурске групе

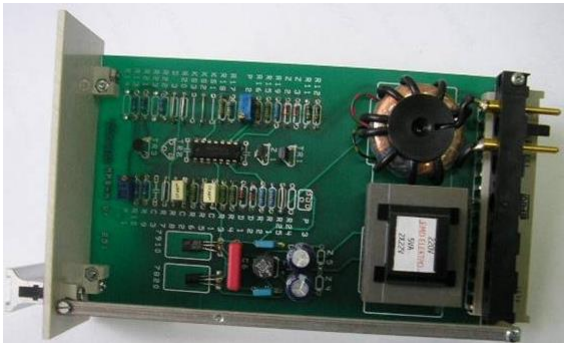
Дозвољени опсег промене напона за напајање приказан је у табели 3.3.

| група | наизменични напон | једносмерни напон |
|---|---|---|
| I | 90 ...110 % | |
| II | 80 ...120 % | 85 ...125 % |
| III | 80 ...120 % | |

Табела 3.3. Дозвољене промене напона напајања

Дозвољени опсег промене учестаности помоћног наизменичног напона за напајање је од 90 % до 120 % називне вредности. Стандардима су детаљно дефинисани и поступци испитивања карактеристика претварача.

Класични мерни претварачи су реализовани за сваку мерену величину посебно. У трофазној четворожичној енергетској мрежи, типично мерно место је опремљено комплетом мерних претварача који садржи три претварача струје, један претварач напона, и тросистемске претвараче активне и реактивне електричне снаге. Најширу примену имају претварачи са излазом у облику струјног сигнала чије су вредности стандардизованом опсегу од 4 mA до 20 mA, али стандард дозвољава и неке друге вредности.



Слика 3.22. Мерни претварач модуларног типа

Савремена решења, заснована су на примени микропроцесора. Развој дигиталне технологије омогућио је примену вишефункцијских мерних уређаја (*multi-transducer*) који у потпуности испуњавају све захтеве једног мерног места. Нове генерације мерних претварача одликују се високом тачношћу, и, што је посебно значајно, програмабилношћу карактеристике преноса улаз-излаз. Тиме је не само повећана функционалност уређаја са становишта прилагођавања конкретним условима рада, него и могућности да се то оствари на месту уградње (*in-field programming*). Савремени мерни уређаји поседују "сопствену интелигенцију" (*smart transducer*) која им омогућује праћење више разнородних величина, локалну обраду резултата мерења, показивање низа разноврсних информација о мереним величинама, даљински пренос података, као и имплементирање неких елементарних функција управљања.

Висок степен интеграције савремених интегрисаних кола омогућио је значајно смањивање димензија уређаја. Комплетан трофазни мерни систем може бити смештен у кућиште које се поставља на стандардну шину (слика 3.23).

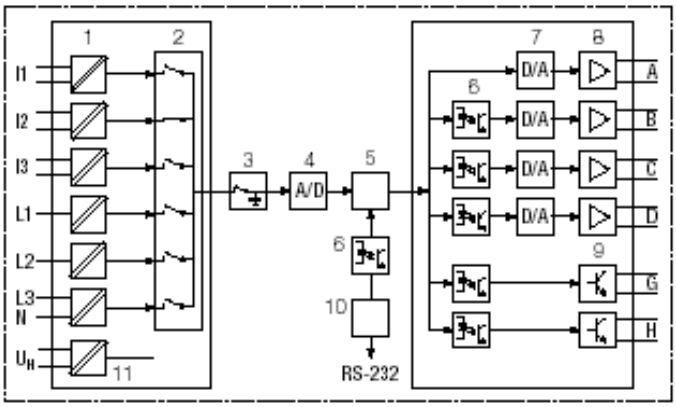
Програмабилност мерних претварача заснована је на постојању дигиталне процесорске јединице која омогућује уписивање и чување програмабилних параметара које дефинишу карактеристику преноса мерног претварача. Присуство дигиталне рачунске јединице условило је и дигиталну обраду мерних сигнала (*Digital Signal Processing - DSP*) као оптимално решење. На основу низа вредности, које представљају нумеричке вредности одбирака мерних сигнала, израчунавају се карактеристичне вредности наизменичних електричних сигнала, средња и ефективна вредност, као и вредности добијене њиховом обрадом: активна, реактивна и привидна снага, као и фактор снаге.




Слика 3.23. Микропроцесорски мерни претварач

Блок-шема микропроцесорског мерног претварача приказана је на

слици 3.24. Претварач намењен за рад у трофазном систему има шест мерних улаза (три фазна напона и три линијске струје). Мерни подсистем садржи напонске и струјне мерне трансформаторе, мултиплексер, коло за узорковање (*sampling*) и аналогно/дигитални претварач. Оваква структура је најповољнија са становишта економичности. Проблем добијања временски еквивалентних узорака напона и струје при одређивању тренутне вредности електричне снаге, решава се синхроним одмеравањем.




1. Улазни мерни трансформатори
2. Мултиплексер
3. *S/H* коло
4. А/Д претварач
5. Микропроцесор
6. Елемент за оптичку спрегу
7. Д/А претварач
8. Излазни појачавач
9. Импулсни излаз
10. Комуникациони интерфејс RS232
11. Напајање

Слика 3.24. Блок шема 6-каналног претварача

Измерене (израчунате) вредности се преко елемената са оптичком спрегом прослеђују излазном подсистему који омогућује издавање сигнала у аналогном и импулсном облику. Претварачи са бинарним (дигиталним) излазима могу да се користе као импулсни давачи бројила електричне енергије.

Програмирање претварача остварује се помоћу рачунара, посредством серијске комуникације.

Микропроцесорски заснован мерни претварач, намењен за примену у трофазном систему, омогућује остваривање десетина мерних функција. Осим уобичајених осам величина, које се мере на једном месту (ефективне вредности струја и напона, укупна активна и реактивна снага), такви мерни претварачи омогућују добијање потпуних информација за сваку фазу система, појединачних фактора снаге, као и неких величина које некада нису мерене, као што је привидна снага.

Поступак конфигурисања вишефункцијског програмабилног мерног претварача неизбежно је сложен и оперативно неизводив без помоћи рачунара. Мерни претварач се повезује са рачунаром помоћу одговарајућег кабла, посредством којег се остварује серијски пренос података. По правилу, спрега се остварује коришћењем стандардизованог интерфејса (*RS* 232 или *RS* 485).

Произвођачи опреме стављају корисницима на располагање потребну програмску подршку. Калибрациона процедура обухвата избор

комуникационог порта[31] рачунара, идентификацију претварача, конфигурисање мерног система (једнофазни, трофазни-трожични, трофазни-четворожични), уношење називних вредности напона и струја, учестаности, константи трансформације и конфигурисање излаза.

Програмабилни мерни претварачи обично имају више излаза који по својој природи могу да буду аналогни или бинарни. За аналогне излазе бира се природа сигнала (напон/струја), облик карактеристике и опсег вредности излазне величине. Бинарни излази могу да представљају импулсе чија је учестаност сразмерна мереној величини (*pulse output*), или сигнализације прекорачења задатих вредности (*limit signal*), који се могу применити као командни сигнали у аутоматизованом систему управљања. У првом случају дефинише се вредност константе импулса (на пример: imp/ kWh). Када се бинарни излаз користи као индикатор, задају се вредности граница, и логичке функције којима је дефинисан услов за издавање сигнализације прекорачења

У састав програмске подршке коју произвођачи дају спадају и "сервисни" програми, који омогућују испитивање функција претварача, као и симулацију појединих стања у систему, са циљем провере исправности задатог контролног алгоритма.

Стандардима су дефинисана основна техничка својства, као и захтеви у погледу тачности. Границе дозвољене грешке у референтним условима се изражавају у процентима од укупне вредности мерног опсега. Савремена мерна техника је омогућила да референтним условима границе допуштене грешке мерног претварача буду унутар 0,2 %. Поред тачности, значајну карактеристику представља и брзина одзива: при скоковитој промени мерене величине излазни сигнал мора достићи 90 % нове вредности за време које није дуже од 300 ms.

Програмабилност, као карактеристично својство савремених мерних уређаја, чини их флексибилнијим и прилагодљивијим специфичним захтевима одређеног мерног места, али и подразумева квалитативно другачији однос техничког особља према мерној опреми. Намена је остала иста, али су се функције и начин употребе значајно променили. Рачунарска подршка при дефинисању калибрационих константи постала је неопходна при раду са мерним системом који има велики број степена слободе. За спровођење процедура програмирања (параметрирања) мерног претварача неопходна је одговарајућа стручна едукација корисника, односно службе одржавања мерне опреме.

Развој технологије интегрисаних електронских кола је омогућио не само унапређење метролошких својстава уређаја који се примењују за надзор стања и управљање електронергетским системима и објектима у њему, него и побољшање њихове функционалности. Савремени мерни претварач

[31] Приступ преко којег уређај прима и/или предаје сигнале (енг. *port*).

омогућује праћење више разнородних величина, локалну обраду резултата мерења, приказ низа разноврсних информација о мереним величинама, даљински пренос података, као и имплементирање неких елементарних функција управљања.

# ЛИТЕРАТУРА


1. *Metrology - in short, 3rd edition, EURAMET*, 2008.
2 *International Electrotechnical Vocabularu, IEC 60050: part 351, Control technology / Specific functional units in contro technology,* 351-32-39.
3 *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and asotiated terms (VIM), 2007, 3.7, http://www1.bipm.org/en/publications/guide/vim.html*.
4 *P. Bošnjaković, B. Stojanović, P. Miljanić, V. Petrović, Elektronski instrument za merenje aktivne i reaktivne snage u trofaznim sistemima naizmenične struje, ETAN, 1984, Zbornik radova Sv. 2, s*. 83.-88.
5 *Electrical measuring transducers for converting a.c. electrical quantities to analogue or digital signals, CENELEC, EN60688, 2001*.
6 *М.Ф.Юдин, М.Н.Селиванов, О.Ф.Тищенко, А.И. Скороходв; Основные термины в области метрологии, Издателство стандартов,*1989.
7 Г. Я. Мирский, Злектроннъе измерения, Радио и связъ, 1986.
8 П. Бошњаковић, Б. Ђокић, С. Краинчанић, М. Дохчевић, Програмабилни кондиционери аналогних сигнала, ЈУРЕМА 35, 1990, XII саветовање о мерењу, Зборник радова, 2. свеска, с. 1. до 3.
9 Електрична и магнетска кола, Термини и дефиниције, ЈУС. Н.А0.131, 131-02-35
10 *IEV, IEC 60050: part 151-13, Electric and magnetic circuits, Particular electric devices*, 151-13-55.
11 М. Стојић, Континуални системи аутоматског управљања, Грађевинска књига, 1973.
12 *D. Stanković, Fizičko-tehnička merenja, Naučna knjiga*, 1991.
13 Електрични и магнетски уређаји, Термини и дефиниције, ЈУС. Н.А0.151, 151-01-64
14 *IEV, IEC 60050: part 151-13, Electric and magnetic circuits, Particular electric devices*, 151-13-56.
15 *IEV, IEC 60050: part 131-15, Circuit theory / Two-port and n-port networks*, 131-15-38.
16 Техничка препорука, Мерни претварачи и суматори, ТП-17, Здружена електропривреда-Београд, 1984.
17 *Meßumformer für Größen der Starstromtechnick, Beschreibung und Untersuchung, VDE/VDI* 2192, 1972.
18 *Electrical measuring transducers for converting a.c. electrical quantities to analogue or digital signals, IEC* 688, 1980, 1988, 1992, 1997, 2001.
19 *Electrical measuring transducers for converting a.c. electrical quantities to analogue or digital signals, IEC* 60688, Ed 2.2, 2002.

# 4.
# МЕРЕЊЕ НАИЗМЕНИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА

Мерење наизменичних електричних величина представља веома значајну област индустријске метрологије. Разлог за то лежи у значају који наизменичне величине имају у савременој техници. Пре свега, рад највећег броја система за производњу и дистрибуцију електричне енергије је заснован на наизменичним величинама, што имплицира потребу њиховог мерења, не само са становишта генерисања (производње), него и примене (потрошње) овог најзначајнијег облика енергије. Поред енергије, за функционисање савременог информатичког друштва, неопходна је и размена информација. Пренос информација, посебно даљински, остварује се наизменичним сигналима.

Осим изузетне практичне примене, неке специфичности мерења дају посебан значај овој области. Наизменичне величине се веома разликују по свом интензитету. Амплитуда наизменичног напона може да буде реда величине микроволта, али и неколико стотина киловолти. Други параметар периодичне величине, учестаност такође има посебан значај. Она није показатељ великости (интензитета) величине, али је веома значајна за сам процес, као и са становишта мерне технике, јер утиче на својства мерног средства. Таласни облик наизменичног сигнала представља још једну утицајну величину. Синусни таласни облик се узима као основни, у односу на који се дефинишу карактеристике мерила, али је у низу случајева потребно водити рачуна о томе да мерни сигнал није наизменична, већ пулсирајућа величина која може да има импулсни облик.

У овом поглављу приказани су основни поступци за мерење интензитета периодичних величина: мерење средње усмерене вредности и мерење ефективне вредности. Посебна пажња посвећена је мерењу наизменичног напона и наизменичне струје.

## 4.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Према дефиницији Међународне електротехничке комисије (*IEC*), придев “наизменични” (*alternating*) користи се да означи периодичну величину чија је средња вредност једнака нули [1]. Сходно томе, наизменична величина (*alternating quantity*) је периодична величина чија је средња вредност једнака нули, али се у општем случају назив “наизменични” примењује и када средња вредност није једнака нули, уколико се ова, директна компонента (*direct*

*component*) може да занемари[1] [2], [3]. За означавање наизменичних електричних величина, као што су напон и струја, користи се ознака *AC* или графички симбол ~ [4].

Основни показатељи интензитета наизменичне величине, чији је период $T$, су средња апсолутна вредност:

$$\overline{|x(t)|} = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)dt \text{ , и} \tag{4.1}$$

и ефективна вредност:

$$X_{\text{eff}} = X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt} \text{ .} \tag{4.2}$$

За квантитативно представљање таласног облика периодичне величине може да се посматра количник вршне (темене) и ефективне вредности[2]:

$$\text{CF} = \frac{X_{\text{max}}}{X_{\text{eff}}} \text{ ,} \tag{4.3}$$

где је $X_{\text{max}}$ вршна вредност:

$$X_{\text{max}} = \boldsymbol{max}\,|x(t)|;\ t \in (0,T) \text{ .} \tag{4.4}$$

За сигнал синусног таласног облика, који се, по правилу, узима као референтни таласни облик:

$$x(t) = X\ \boldsymbol{sin}(\omega t + \varphi) \text{ ,} \tag{4.5}$$

важи $X_{\text{max}} = X$. Средња вредност једнака је нули:

$$\overline{x(t)} = \frac{X}{T}\int_0^T \boldsymbol{sin}\,\omega dt = \frac{X}{\omega T}(-\boldsymbol{cos}\,\omega t)\Big|_0^T = \frac{X}{2\pi}(-\boldsymbol{cos}\,\omega t)\Big|_0^T = 0 \text{ ,} \tag{4.6}$$

а средња апсолутна вредност:

$$\overline{|x(t)|} = \frac{X}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} \boldsymbol{sin}\,\omega dt + \int_{\frac{T}{2}}^T (-\boldsymbol{sin}\,\omega)dt\right] = \frac{X}{\omega T}\left(-\boldsymbol{cos}\,\omega t\Big|_0^{\frac{T}{2}} + \boldsymbol{cos}\,\omega t\Big|_{\frac{T}{2}}^T\right) = \tag{4.7}$$

$$= \frac{X}{2\pi}\left(-\boldsymbol{cos}\,\omega t\Big|_0^{\frac{T}{2}} + \boldsymbol{cos}\,\omega t\Big|_{\frac{T}{2}}^T\right) = \frac{2}{\pi}X \cong 0{,}6266\ X\boldsymbol{.}$$

Ефективна вредност једнака је:

$$X_{\text{eff}} = X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt} = \sqrt{\frac{2X^2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \boldsymbol{sin}^2(t)dt} = \tag{4.8}$$

$$= X\sqrt{\frac{2}{T}\left(\frac{1}{2}t - \frac{1}{4\omega}sin2\omega t\right)\Big|_0^{\frac{T}{2}}} = X\sqrt{\frac{2}{T}\frac{T}{4}} = \frac{X}{\sqrt{2}} \cong 0{,}707\ X,$$

---

[1] У том смислу, једносмерна (директна) величина је величина која је временски непроменљива, али се овај назив може да односи и на периодичну величину чија је директна (константна) компонента од примарне важности (131-11-23).

[2] Ова величина се назива и крест фактор (*crest factor, CF*)

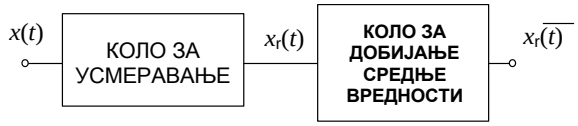
одакле следи:

$$CF = \sqrt{2}\,. \tag{4.9}$$

Као показатељ облика користи се однос ефективне и средње апсолутне вредности (*form factor*):

$$F = \frac{X_{\text{eff}}}{\overline{|x(t)|}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1{,}110\ . \tag{4.10}$$

За мерење наизменичних величина у индустријским условима користе се одговарајући мерни претварачи којима се остварује пресликавање наизменичне величине на погодно одабрану једносмерну величину, која се потом мери. Најједноставнији мерни претварач наизменичне величине састоји се од кола за усмеравање и кола за одређивање средње вредности усмереног (*rectified*) сигнала. Општи структурни блок-дијаграм ове врсте AC/DC претварача приказан је на слици 4.1.

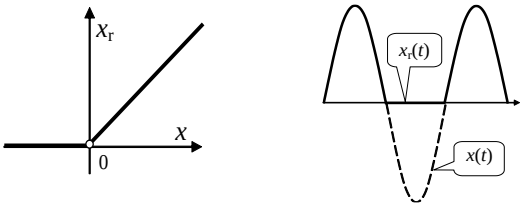



Слика 4.1. Општи структурни блок дијаграм претварача усмерачког типа

Кола за усмеравање електричних сигнала представљају нелинеарне електричне мреже чија се улазно-излазна карактеристика може представити у два основна облика у зависности од тога да ли преносе само један или оба поларитета улазног сигнала. Другим речима, могуће су две врсте усмерача.

Једнострани усмерач (полуталасни усмерач) "пропушта" само сигнал једног одређеног поларитета. Графички приказ статичке карактеристика усмерача који на излаз "преноси" само сигнал позитивног поларитета, не мењајући притом његов знак, дат је на слици 4.2. Приказан је и одзив на побуду наизменичним сигналом синусног таласног облика.

$$x_{\text{r}}(t) = \begin{cases} x(t);\, x(t) \geq 0 \\ 0;\ x(t) < 0 \end{cases}$$




Слика 4.2. Једнострано усмеравање

Параметри једнострано усмереног периодичног сигнала зависе од симетрије његовог таласног облика. Средња вредност једнострано усмереног сигнала синусног облика једнака је:

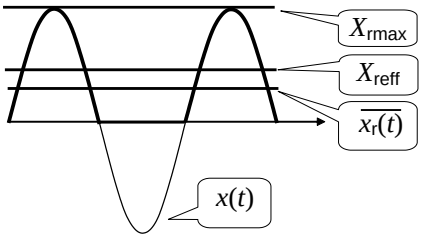
$$\overline{x_{\text{r}}(t)} = \frac{1}{T}\int_0^T x_{\text{r}}(t)dt = \frac{X}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \boldsymbol{\sin}\omega t\, dt = -\frac{X}{\omega T}\boldsymbol{\cos}\,\omega t\Big|_0^{\frac{T}{2}} = -\frac{X}{2\pi}\boldsymbol{\cos}\,\omega t\Big|_0^{\frac{T}{2}} = \frac{X}{\pi}\,. \tag{4.11}$$

где је $X$ амплитуда улазног сигнала. У овом случају, средња вредност једновремено представља и средњу апсолутну вредност сигнала. Ефективна вредност једнака је:

$$X_{\text{reff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x_{\text{r}}^2(t)dt} = \sqrt{\frac{X^2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \boldsymbol{sin}^2\ \omega t\ dt} = X\sqrt{\frac{1}{T}\left(\frac{1}{2}t - \frac{1}{4\omega}sin2\omega t\right)\Big|_0^{\frac{T}{2}}} \tag{4.12}$$

$$= X\sqrt{\frac{1}{T}\frac{T}{4}} = \frac{X}{2},$$

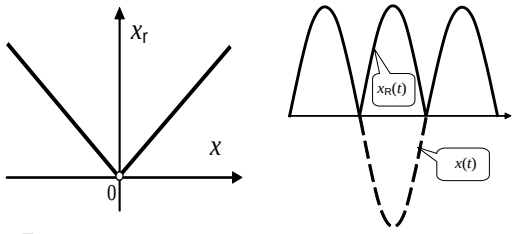
Однос максималне, $X_{\text{max}}$, ефективне, $X_{\text{reff}}$, и средње вредности једнострано усмереног синусног сигнала је приказан на слици 4.3.




Слика 4.3. Резултат једностраног усмеравања

Двострани усмерач (пуноталасни усмерач) остварује модуо-функцију. Учестаност основног хармоника сигнала на излазу је двоструко већа од учестаности сигнала на улазу овог елемента. Графички прикази статичке карактеристика таквог усмерача и његовог одзива на побуду наизменичним сигналом синусног таласног облика, дати су на слици 4.4.

$$x_{\text{R}}(t) = \begin{cases} x(t); x(t) \geq 0 \\ -x(t);\ x(t) < 0 \end{cases} = \left|x_{\text{r}}(t)\right|$$




Слика 4.4. Двострано усмеравање

Параметри пуноталасно усмереног сигнала не зависе од симетрије његовог таласног облика. Средња вредност сигнала једнака је његовој средњој апсолутној вредности. За сигнал синусног облика ова вредност је двоструко већа него у случају при једностраном усмеравању:

$$\overline{x_{\text{R}}(t)} = \frac{1}{T}\int_0^T \left|x(t)\right|dt = 2\frac{X}{\pi}. \tag{4.13}$$

Ефективна вредност двострано усмереног сигнала једнака је ефективној вредности синусног сигнала:

$$X_{\text{Reff}} = X_{\text{eff}} = \frac{X}{\sqrt{2}}. \tag{4.14}$$

Средња вредност периодичног сигнала представља нулту (сталну, једносмерну) компоненту $X_0$ у његовом спектру (формула 2.16), па се као коло за добијање средње вредности у аналогној мерној техници најчешће користи

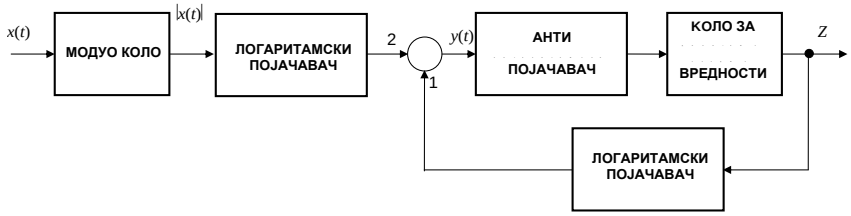
филтер пропусник ниских учестаности (*low-pass filter*, *LPF*). Карактеристике филтра одређују се на основу компромиса у погледу његове сложености, величине заостале наизменичне компоненте на излазу (*ripple*) и брзине одзива. Када се користе дигитални мерни инструменти, смањивање поигравања резултата мерења (*jitter*) постиже се применом аналогно-дигиталних претварача интеграционог типа[3] и подешавањем трајања мерног интервала тако да представља целобројни умножак периода мерних сигнала.

Мерење ефективне вредности периодичног сигнала произвољног таласног облика захтева сложенију обраду јер, у складу са дефиницијом 4.2 подразумева нелинеарне операције: степеновање и кореновање. На слици 4.5 приказан је блок-дијаграм мерног претварача чија је структура изведена из дефиниционе формуле као математичког модела.




Слика 4.5. Мерење ефективне вредности периодичне величине

Овакав поступак је заснован на експлицитом методу моделовања карактеристике преноса мерног кола. Постоји и друга могућност заснована на примени логаритамског и антилогаритамског појачавача. Блок-дијаграм таквог мерног претварача приказан је на слици 4.6.




Слика 4.6. Мерење ефективне вредности применом логаритамске функције

Под називом "логаритамски појачавач" (*logarithmic amplifier*) подразумева се нелинеарни елемент којим се физички остварује математичка операција логаритмовања. Излазна величина, зависно променљива $y$, сразмерна је логаритму вредности независно променљиве величине $x$:

$$y \propto \log_b x\,;\, x > 0\,,$$

где је $b$ основа логаритма.

Према дефиницији, појам логаритма броја $x$ за основу $b > 0$, $b \neq 1$ означава експонент са којим треба степеновати $b$ да би се добио број $x$. Логаритми за основу 10 зову се декадни или Бригсови логаритми. Пише се:

$\log_{10} x = \lg x$.

Логаритми за основу е зову се природни или Неперови логаритми. Пише се:

$\log_e x = \ln x$.

[3] Аналогно-дигитални претварач (*analogue-to-digital converter*) интеграционог типа начином свог рада остварује мерење средње вредности напона.

Према дефиницији, функција природног логаритма је инверзна функција експоненцијалне функције:

$\ln(e^x) = x$ .

Појачавач чија се излазна величина $z$ мења у зависности од улазне величине $x$ по експоненцијалном закону (експоненцијални појачавач), назива се антилогаритамски појачавач, односно антилог-појачавач (*antilog amplifier*):

$z = e^x$ .

Сигнал на улазу антилогаритамског појачавача $y(t)$ у колу приказаном на слици 4.6 одређен је изразом:

$$y(t) = 2\ln|x(t)| - \ln Z = \ln\frac{|x(t)|^2}{Z}, \tag{4.15}$$

при чему за величину $Z$ важи:

$$Z = \frac{1}{T}\int_0^T e^{y(t)}dt, \tag{4.16}$$

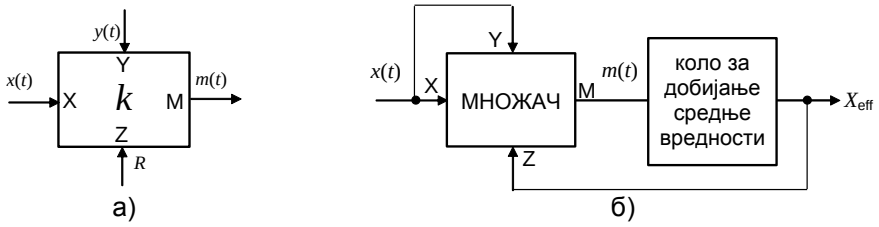
одакле следи:

$$Z = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{|x(t)|^2}{Z}dt, \tag{4.17}$$

односно:

$$Z = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt} = X_{\text{eff}}. \tag{4.18}$$

Могуће је применити и имплицитни метод израчунавања, заснован на успостављању повратне спреге у колу множача аналогних величина, као што је то приказано на слици 4.7.




Слика 4.7. Имплицитни метод мерења ефективне вредности

Множач је коло са два улаза и једним излазим (слика 4.7.а) чија је карактеристика дата изразом:

$$m(t) = k_{\text{M}}\frac{x(t)\cdot y(t)}{R}, \tag{4.19}$$

у којем $x(t)$ и $y(t)$ представљају улазне величине, $m(t)$ је излазна, $R$ референтна величина, а $k_{\text{M}}$ је константа множача која обезбеђује димензиону једнакост леве и десне стране једначине 4.16, када величине $x(t)$, $y(t)$, $m(t)$ и $R$ имају исту физичку димензију [5].

Општи структурни блок-дијаграм мерила ефективне вредности наизменичне величине, чији је рад заснован на овом приступу, приказан је на слици 4.7.б. Увођењем повратне спреге са излаза *M*, преко кола за добијање средње вредности, на референтни улаз *Z* множача:

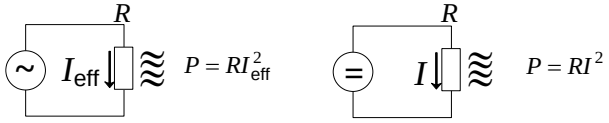
$$R = \overline{m(t)}\,, \tag{4.20}$$

добија се, при $y(t) = x(t)$:

$$R = \sqrt{k_{\mathrm{M}}\,\overline{x^2(t)}} = kX_{\mathrm{eff}}\,, \tag{4.21}$$

где је $k$ константа мерила. Овакав поступак омогућује једноставније техничко решење. Ограничење представљају неповољни услови за рад множача када је ефективна вредност улазне величине једнака или блиска нули.

У електротехници, средња и ефективна вредност имају посебно значење. Средња вредност периодичне електричне струје сразмерна је укупној количини електрицитета која је протекла (пренета) у одређеном смеру за време једне периоде. Као мера интензитета наизменичних величина узима се еквивалентна по енергијском дејству једносмерна величина. При протицању струје кроз проводник електрична енергија се претвара у топлоту (Џулов ефекат). Овај процес је неповратан. Губитак електричне енергије у неком отпорнику сразмеран је квадрату вредности струје која кроз њега протиче (Џулов закон). Ефективна (делатна) вредност променљиве електричне струје једнака је вредности сталне струје при којој би се у отпорнику сталне вредности за једнако време ослободила једнака количина топлоте (слика 4.8).




Слика 4.8. Дефиниција ефективне вредности електричне струје

Количина енергије ослобођене током временског интервала од почетног тренутка $t_{\mathrm{p}}$ до $t_{\mathrm{k}}$ једнака је:

$$W\big|_{t\in[t_{\mathrm{p}},\,t_{\mathrm{k}}]} = \int_{t_{\mathrm{p}}}^{t_{\mathrm{k}}} p(t)dt = T\cdot\overline{p(t)}\,,$$

где је $p(t) = u(t)\ i(t)$ снага којом се енергија преноси. Снага Џулових губитака у неком отпорнику сразмерна је средњој вредности квадрата струје која кроз њега протиче:

$$P = \overline{p(t)} = \frac{1}{t_{\mathrm{k}}-t_{\mathrm{p}}}\int_{t_{\mathrm{p}}}^{t_{\mathrm{k}}} p(t)dt = \frac{1}{t_{\mathrm{k}}-t_{\mathrm{p}}}\int_{t_{\mathrm{p}}}^{t_{\mathrm{k}}} u(t)i(t)dt = R\frac{1}{t_{\mathrm{k}}-t_{\mathrm{p}}}\int_{t_{\mathrm{p}}}^{t_{\mathrm{k}}} i^2dt = RI_{\mathrm{eff}}^2$$

Ослобођена енергија, ако је струја стална, једнака је:

$W_{=}[t_{\mathrm{p}},t_{\mathrm{k}}] = RI^2(t_{\mathrm{k}}-t_{\mathrm{p}})$.

На основу једнакости:

$$W = W_{=} \Leftrightarrow RI_{\mathrm{eff}}^2(t_{\mathrm{k}}-t_{\mathrm{p}}) = R\int_{t_{\mathrm{p}}}^{t_{\mathrm{k}}} i^2(t)dt$$

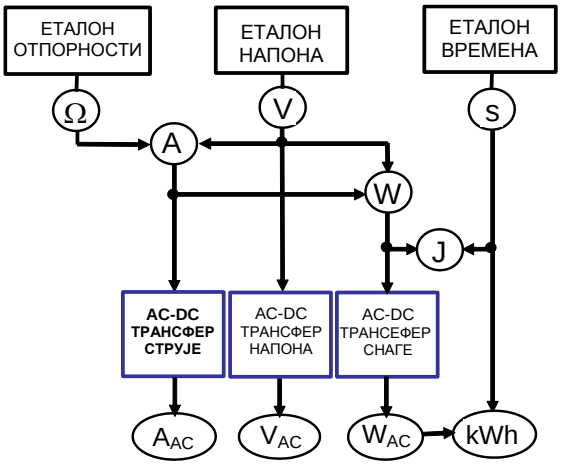
следи дефиниционi образац ефективне вредности променљиве струје:

$$I_{\mathrm{eff}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\mathrm{k}}-t_{\mathrm{p}}}\int_{t_{\mathrm{p}}}^{t_{\mathrm{k}}} i^2(t)dt}$$

У складу са овом дефиницијом, ефективна вредност променљивог електричног напона једнака је вредности сталног електричног напона при којем је вредност електричне снаге, којом се у непроменљивом резистивном оптерећењу врши претварање електричне енергије у топлотну, једнака вредности средње

електричне снаге којом се топлотна енергија ствара када посматрани периодични напон делује на крајевима тог оптерећења[4].

Основна електрична величина у међународном систему величина је електрична струја, али је базични електрични еталон еталон напона заснован на Џозефсоновом ефекту[5]. Примена интегрисане технологије омогућила је да мерна несигурност поређења еталона напона достигне ниво од $10^{-10}$. Еталон електричне отпорности заснован на квантном Холовом ефекту има релативно стандардно одступање мање од један према $10^9$ и омогућује практично остваривање еталона јединице електричне струје са одговарајућом мерном сигурношћу. На основу њих дефинише се еталон јединице електричне снаге, на основу којег се, повезивањем са атомским часовником, као еталоном времена, може остварити и еталон електричне енергије. Тако остварена еталонска база односи се на сталне, временски непроменљиве електричне величине: напон, отпорност и струју. Мерење наизменичне величине остварује се њеним свођењем на еквивалентну по дејству једносмерну (сталну) величину. Ова операција се назива *AC*/*DC* трансфер. Шема остваривања еталона наизменичних величина приказана је на слици 4.9.




Слика 4.9. *AC*/*DC* трансфер

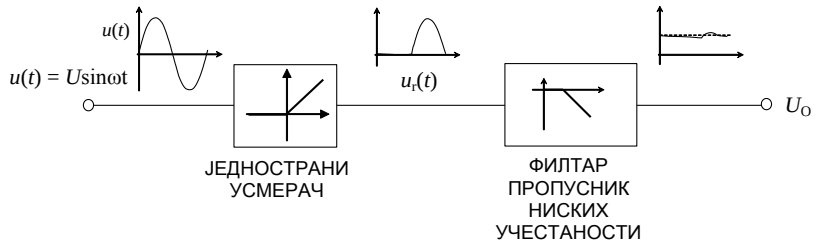
## 4.2 МЕРЕЊЕ НАИЗМЕНИЧНОГ ЕЛЕКТРИЧНОГ НАПОНА

Мерење наизменичног електричног напона синусног облика спада у основна мерења у електропривреди. Као што је већ истакнуто, *AC*/*DC* мерни

[4] Ефективна вредност периодичног електричног напона једнака је вредности сталног електричног напона при којем је вредност електричне снаге, којом се у константном отпорном оптерећењу од 1 Ω врши претварање електричне енергије у топлотну, једнака вредности средње електричне снаге којом се топлотна енергија ствара када посматрани периодични напон делује на крајевима тог оптерећења.

[5] Џозефсонов ефекат је квантно-механичка појава интеракције електрона и кристалне решетке.

претварач напона може да се оствари применом исправљача. На слици 4.10 приказан је општи структурни блок-дијаграм мерног претварача у којем је примењен једнострани (полуталасни) усмерач.




Слика 4.10. Мерни претварач наизменичног напона

Математички модел овог кола чине једначине којима су дефинисане карактеристике преноса појединих елемената:

$$u_{\mathrm{r}}(t)=\begin{cases} k u(t) \text{ за } u(t)\geq 0 \\ 0 \quad \text{за } u(t)<0 \end{cases} \quad \text{(једнострани усмерач) и} \tag{4.22}$$

$$U_{\mathrm{O}}=\overline{u_{\mathrm{r}}(t)} \quad \text{(филтер пропусних ниских учестаности),} \tag{4.23}$$

где је $k$ сачинилац преноса усмерача. При побуди хармонијским сигналом чија је амплитуда једнака $U$, а период понављања једнак $T$:

$$u(t)=U\ \boldsymbol{sin}\frac{2\pi}{T}t\ , \tag{4.24}$$

једносмерна компонента излазног напона $U_{\mathrm{O}}$ једнака је:

$$U_{\mathrm{O}}=\frac{1}{T}\int_0^T u_{\mathrm{r}}(t)dt=kU\frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}}\boldsymbol{sin}\frac{2\pi}{T}t\ dt=-\frac{kU}{2\pi}\boldsymbol{cos}\frac{2\pi}{T}t\Big|_0^{\frac{T}{2}}=\frac{kU}{\pi}. \tag{4.25}$$

Да би, при побуди синусним напоном, вредност излазног једносмерног напона $U_{\mathrm{O}}$ била једнака амплитуди $U$ улазног напона, потребно је да буде:

$$k=\pi\ . \tag{4.26}$$

Да би вредност напона $U_{\mathrm{O}}$ била једнака ефективној вредности улазног напона:

$$U_{\mathrm{eff}}=\frac{U}{\sqrt{2}}\ . \tag{4.27}$$

потребно је да константа преноса усмерача, $k$, буде једнака:

$$k=\frac{\pi}{\sqrt{2}}\ . \tag{4.28}$$

Филтер пропусник ниских учестаности потискује хармонике у спектру сигнала који се добије на излазу усмерача. При једностраном усмеравању основни хармоник је доста изражен у односу на средњу вредност.

Смањивањем граничне учестаности смањује се заостала наизменична компонента на излазу (*ripple*), али се повећава време одзива на промене амплитуде улазног сигнала.

Подесније је да се примени двострани исправљач који на свом излазу даје апсолутну вредност улазног сигнала:

$$u_{\mathrm{R}}(t) = \left|u(t)\right| = \begin{cases} u(t);\ u(t) \geq 0 \\ -u(t); u(t) < 0 \end{cases}, \tag{4.29}$$

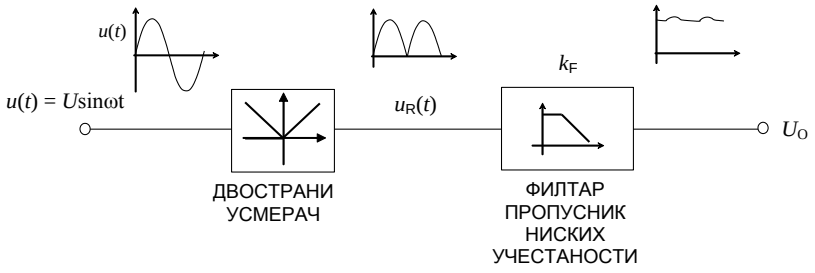
јер је тада однос средње вредности и заостале наизменичне компоненте повољнији. Мерењем средње вредности напона $u_{\mathrm{R}}(t)$ и одговарајућим скалирањем може да се одреди амплитуда напона синусног облика:

$$U = \frac{2}{\pi} \cdot \overline{\left|u_{\mathrm{R}}(t)\right|} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{T} \int_0^T \left|u(t)\right| dt\,, \tag{4.30}$$

односно његова ефективна вредност:

$$U_{\mathrm{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \overline{\left|u_{\mathrm{R}}(t)\right|}\ . \tag{4.31}$$

На слици 4.11 приказан је структурни блок-дијаграм мерног претварача у којем је примењен двострани (пуноталасни) усмерач.




Слика 4.11. Мерни претварач наизменичног напона
са двостраним усмеравањем

Једначине којима су дефинисане каратеристике преноса појединих елемената овог претварача су:

$u_{\mathrm{R}}(t) = \left|u(t)\right|$ , (двострани усмерач) и (4.32)

$U_{\mathrm{O}} = k_{\mathrm{F}} \overline{u_{\mathrm{R}}(t)}$ (филтер пропусних ниских учестаности), (4.33)

где је $k_{\mathrm{F}}$ сачинилац преноса филтерског кола. При побуди синусним сигналом, чија је амплитуда једнака $U$, а кружна учестаност једнака $\omega = 2\pi/T$, једносмерна компонента излазног напона једнака је:

$$U_{\mathrm{O}} = \frac{k_{\mathrm{F}}}{T} \int_0^T u_{\mathrm{r}}(t) dt = \frac{\omega k_{\mathrm{F}} U}{\pi} \int_0^{\frac{T}{2}} \boldsymbol{\sin}\, \omega t\, dt = -\frac{k_{\mathrm{F}} U}{\pi} \boldsymbol{\cos}\, \omega t \Big|_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2k_{\mathrm{F}}}{\pi} U\ , \tag{4.34}$$

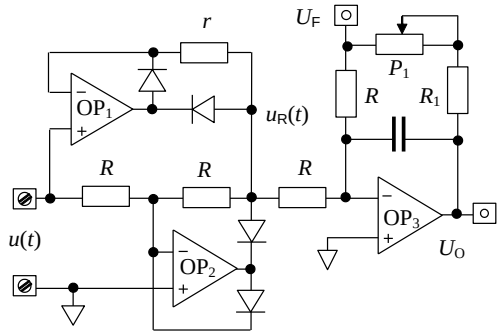
Да би вредност напона $U_O$ била једнака амплитуди $U$ улазног напона, потребно је да сачинилац преноса филтра, $k_F$, буде једнак:

$$k = \frac{\pi}{2} \ . \tag{4.35}$$

Да би излазни једносмерни напон бројевно био једнак ефективној вредности улазног напона потребно је да сачинилац преноса $k_F$ буде једнак:

$$k_F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \ . \tag{4.36}$$

Принципска електрична шема претварача приказана је на слици 4.12. Операциони појачавачи *OP*1 и *OP*2 формирају модуо коло (једначина 4.32). Операциони појачавач *OP*3 представља филтер првог реда, пропусник ниских учестаности.




Слика 4.12. Мерни претварач наизменичног напона
са двостраним усмеравањем

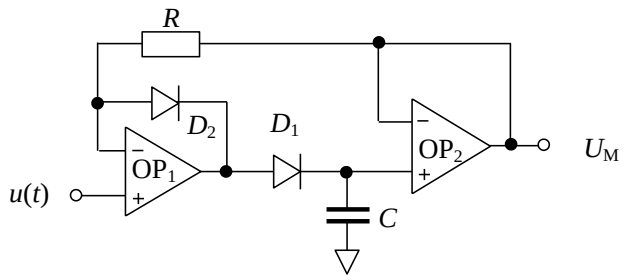
Коло филтра има два излаза. Сачинилац преноса од улаза филтра $u_R(t)$ (пулсирајући сигнал који представља двострано усмерен улазни сигнал $u(t)$) до излаза претварача $U_F$ (једносмерни напон), једнак је јединици:

$$U_F = -\overline{|u_R(t)|} = \overline{|u(t)|} . \tag{4.37}$$

Сачинилац преноса до излаза $U_O$ једнак је $\pi/2\sqrt{2} \cong 1{,}110$ . Његова тачна вредност подешава се потенциометром $P_1$. На тај начин је постигнуто да, када на улазу *AC/DC* претварача делује наизменични напон синусног облика, вредност једносмерног напона $U_O$ бројевно је једнака ефективној вредности улазног напона $u(t)$.

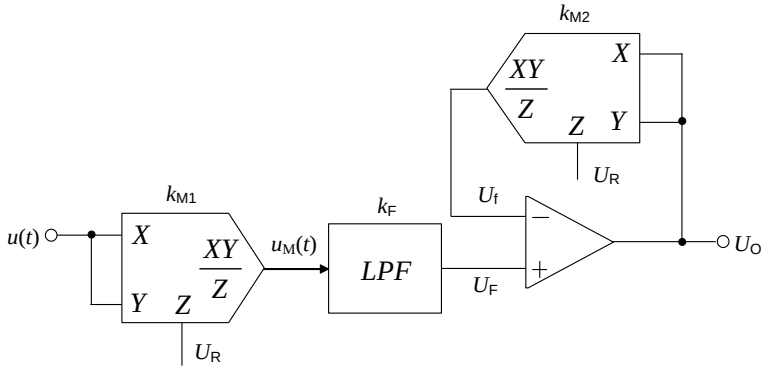
На слици 4.13 приказана је принципска шема кола за мерење максималне вредности напона (*peak detector*). У основи ове структуре је операциони појачавач *OP*1 у неинвертујућој спрези остварној преко диода *D*1 и *D*2. Појачавач *OP*2 је јединични неинвертујући појачавач који делује унутар петље повратне спреге појачавача *OP*1. Она обезбеђује да напон $U_M$ прати напон $u(t)$ када напон $u(t)$ расте, без обзира на пад напона на диоди *D*1. Када је елазни напон мањи од напона $U_M$ диода *D*2 води обезбеђујући повратну

спрегу за појачавач $OP_1$. Да улазна струја појачавача $OP_2$ не би празнила меморијски кондензатор, улазни степен појачавача $OP_2$ треба да буде остварена са транзисторима са ефектом поља (*FET*).




Слика 4.13. Детектор вршне вредности

Општи структурни блок-дијаграм мерног претварача, којим се ефективна вредност улазног наизменичног напона пресликава на вредност једносмерног излазног напона, “по дефиницији” ове величине, приказан је на слици 4.14.




Слика 4.14. Принципска електрична шема
кола за одређивање ефективне вредности напона “по дефиницији”

Операција степеновања остварена је применом аналогног множача у функцији квадратора. Операција кореновања је остварена применом множача у колу негативне повратне спреге операционог појачавача. Такав систем описан је једначинама:

$$u_{\mathrm{M}}(t) = k_{\mathrm{M1}} \frac{u^2(t)}{U_{\mathrm{R}}}, \tag{4.38}$$

где је $k_{\mathrm{M1}}$ сачинилац преноса првог множача,

$$U_{\mathrm{F}} = k_{\mathrm{F}} \overline{u_{\mathrm{M}}(t)}, \tag{4.39}$$

где је $k_{\mathrm{F}}$ сачинилац преноса филтра,

$$U_{\mathrm{f}} = U_{\mathrm{F}}, \text{ и} \tag{4.40}$$

$$U_{\mathrm{f}} = k_{\mathrm{M2}} \frac{U_{\mathrm{O}}^2}{U_{\mathrm{R}}}, \tag{4.41}$$

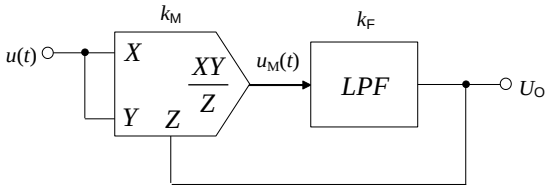
где је $k_{\mathrm{M2}}$ сачинилац преноса другог множача. На основу ових једначина следи:

$$U_{\mathrm{O}} = \sqrt{\frac{U_{\mathrm{f}} U_{\mathrm{R}}}{k_{\mathrm{M2}}}} = \sqrt{\frac{U_{\mathrm{F}} U_{\mathrm{R}}}{k_{\mathrm{M2}}}} = \sqrt{\frac{k_{\mathrm{F}}}{k_{\mathrm{M2}}} \overline{u_{\mathrm{M}}(t) U_{\mathrm{R}}}} = \sqrt{k_{\mathrm{F}} \frac{k_{\mathrm{M1}}}{k_{\mathrm{M2}}} \overline{u^2(t)}}\,. \tag{4.42}$$

Дакле, излазни напон $U_{\mathrm{O}}$ сразмеран је ефективној вредности напона $u(t)$. У овом случају, сачинилац преноса пресликавања $u(t) \to U_{\mathrm{eff}}$ зависи само од сачиниоца преноса филтра пропусника ниских учестаности, $k_{\mathrm{F}}$, а не зависи од сачиниоца преноса множача, ако су они упарени[6]. Ако је $k_{\mathrm{F}}$ = 1, добија се:

$$U_{\mathrm{O}} = U_{\mathrm{eff}} = U_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}\,. \tag{4.43}$$

Општи структурни блок-дијаграм мерног претварача којим се ефективна вредност улазног наизменичног напона пресликава у вредност једносмерног излазног напона, применом повратне спреге у колу множача аналогних величина (имплицитни метод израчунавања), приказана је на слици 4.15. Аналогни множач омогућује остваривање операције дизања на квадрат. Филтер пропусних ниских учестаности има улогу кола за добијање средње вредности пулсирајућег напона на излазу множача. Референтни улаз *Z* аналогног множача је искоришћен за остваривање негативне повратне спреге.




Слика 4.15. Модел имплицитног мерења ефективне вредности наизменичног напона применом повратне спреге

Математички модел овог система представљају једначине:

$$u_{\mathrm{M}}(t) = k_{\mathrm{M}} \frac{u^2(t)}{U_{\mathrm{Z}}} \text{ (множач)}, \tag{4.44}$$

$$U_{\mathrm{O}} = k_{\mathrm{F}} \overline{u_{\mathrm{M}}(t)} \text{ (филтер) и} \tag{4.45}$$

[6] Треба, ипак, имати у виду да нису исти услови рада за множач у улазном и множач у излазном делу система. Улазни множач обрађује променљиви улазни напон, због чега његова динамичка својства добијају на значају. Излазни множач обрађује сталан (или споро променљиви) напон, што значи да је значајна само његова статичка карактеристика.

$U_Z = U_O$ (повратна спрега), (4.46)

на основу којих следи:

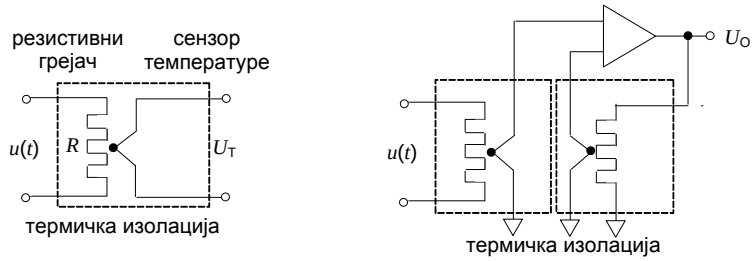
$\overline{u_M(t)} = \frac{k_M}{U_Z}\overline{u^2(t)} = \frac{U_O}{k_F}$, односно (4.47)

$U_Z{}^2 = k_M k_F \overline{u^2(t)}$, (4.48)

Излазни напон $U_O$ сразмеран је ефективној вредности напона $u(t)$.

$U_O = U_Z = k\sqrt{\overline{u^2(t)}}, \quad k = \sqrt{k_F k_M}$ . (4.49)

Мерење ефективне вредности може да се оствари мерењем температуре коју ствара топлота која се у погодно одабраном отпорнику (грејачу) ослобађа Џуловим ефектом. Принцип деловања приказан је на слици 4.16.а. Променљиви напон, чија се ефективна вредност мери, загрева отпорнички грејач чија се температура мери одговарајућим сензором.




а) б)

Слика 4.16. Мерење ефективне вредности засновано на топлотном ефекту

Сензор температуре, уграђен у заједничко кућиште са грејачем, може да буде полупроводнички (диода или транзистор) или термоелемент. Напон $U_T$ сразмеран је ефективној вредности улазног напона $u(t)$.

$U_T = kU_{eff}^2$ . (4.50)

где је $k$ сачинилац преноса сензора. Основни недостаци оваквог поступка су нелинеарност сензора и мала вредност излазног напона. Овај проблем се превазилази применом повратне спреге као што је то приказано на слици 4.16.б. За ово коло важи:

$U_O = A(k_1 U_{eff}^2 - k_2 U_O^2)$ , (4.51)

где је $A$ појачање диференцијалног појачавача, а $k_1$ и $k_2$ су сачиниоци преноса сензора. Решавањем ове једначине добија се:

$U_O = \frac{Ak_1 U_{eff}^2}{1 + Ak_2 U_O}$ . (4.52)

Ако је појачање $A$ довољно велико, важи:

$$U_{\mathrm{O}} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} U_{\mathrm{eff}} \,. \tag{4.53}$$

Тачност мерења зависи само од упарености елемената, а не зависи од таласног облика променљивог сигнала.

Конвенционални дигитални инструменти опште намене, који омогућују мерење правих ефективних вредности променљивих величина, засновани су на примени специјализованих аналогних функционалних блокова који на свом излазу дају једносмерни напон сразмеран ефективној вредности улазне величине. Применом неког од стандардних поступака за аналогно/дигитално претварање добија се затим податак у одговарајућем дигиталном облику који се визуелно приказује помоћу светлећих цифарских показивача. Овај метод може да се поједностави изменом карактеристике преноса А/Д претварача тако да она има облик функције квадратног корена [6]. Таква карактеристика омогућује да се, додавањем аналогног множача, реализује дигитални инструмент за мерење правих ефективних вредности напона и струје.

У богатом спектру метода електронског аналогно/дигиталног претварања посебно место заузимају поступци код којих се процес пресликавања $U \rightarrow N$ остварује на бази претварања улазне аналогне величине у неку другу погодно одабрану величину која се дигитално може лако да мери. Због низа предности које пружа, најширу примену има пресликавање напона у временски домен. То се остварује помоћу одговарајућег претварача којим се информација садржана у вредности улазног напона пресликава у однос временских параметара импулсног низа. Дигитално одмеравање овог односа остварује се помоћу референтног осцилатора и бројача.

Рад претварача напона у временски домен синхронисан је импулсима осцилатора. Средња вредност односа ширине импулса $T_{\mathrm{H}}$ и периода њиховог понављања једнака је односу улазног $U$ и референтног напона $U_{\mathrm{R}}$:

$$\bar{\theta} = \frac{\overline{T_{\mathrm{H}}}}{T} = \frac{U}{U_{\mathrm{R}}} \,. \tag{4.54}$$

А/Д претварање се остварује помоћу бројача који одбројава импулсе из осцилатора за време трајања импулса на излазу претварача. Одбројавање се врши током временског интервала чије је трајање једнако мултиплу периода понављања синхронизационих импулса $T_0$:

$$T_{\mathrm{M}} = N_{\mathrm{M}} T_0 \,. \tag{4.55}$$

где је $N_{\mathrm{M}}$ цео број који одговара максималној вредности броја $N$.

Садржај бројача на крају временског интервала $T_{\mathrm{M}}$ једнак је:

$$N = N_{\mathrm{M}} \bar{\theta} = N_{\mathrm{M}} \frac{\overline{T_{\mathrm{H}}}}{T} = N_{\mathrm{M}} \frac{U}{U_{\mathrm{R}}} \,. \tag{4.56}$$

У оваквом систему карактеристика А/Д претварача може да се модификује тако да пресликавање $U \rightarrow N$ одговара функцији квадратног корена. То се постиже увођењем повратне спреге тако да је референтни напон претварача у временски домен сразмеран вредности броја $N$.

$$U_{\mathrm{R}} = U_{\mathrm{REF}} \frac{N}{N_{\mathrm{M}}} \,. \tag{4.57}$$

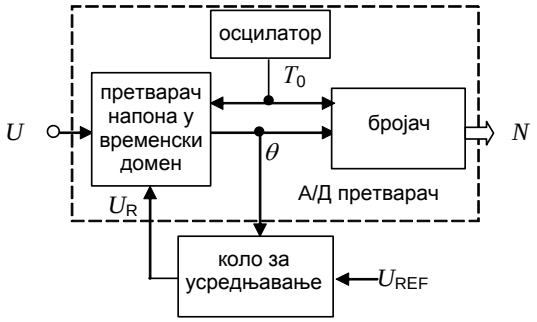
На основу једнакости:

$$N = \frac{N_{\mathrm{M}}^2}{N} \frac{U}{U_{\mathrm{REF}}} \,, \tag{4.58}$$

следи:

$$N = N_{\mathrm{M}}\sqrt{\frac{U}{U_{\mathrm{REF}}}}\,, \tag{4.59}$$

Принципска блок шема А/Д претварача са карактеристиком квадратног корена приказана је на слици 4.17. Напон сразмеран вредности броја $N$ добија се једноставним усредњавањем импулса на излазу претварача у временски домен. Да би се добио систем који остварује мерење ефективне вредности потребно је додати множач на улазу.




Слика 4.17. А/Д претварач са карактеристиком квадратног корена

Мерни претварачи и преносиви (ручни) сервисни инструменти омогућују мерење наизменичног напона до 1000 V са грешком реда величине 1%. Еталонски инструменти омогућују мерење наизменичног напона у шест мерних опсега од 0,1 V до 1000 V са грешком мањом од 100 ppm. Дуго година, еталонску основу метрологије наизменичних величина чинили су термални претварачи. Мерна несигурност савремених вишеструких термалних претварача (*Multijunction Thermal Converter, MJTC*) је око $5\cdot10^{-7}$.

Други приступ реализацији еталона наизменичних величина заснован је на синтези периодичног сигнала одређеног таласног облика. Најбоље карактеристике у данашње време има квантни еталон наизменичног напона заснован на Џозефсоновом ефекту (*AC Josephson Voltage Standard, ACJVS*). Овакав приступ је омогућио да мерна несигурност за наизменични напон буде смањена испод 0,1 μV/V.

## 4.3 МЕРЕЊЕ НАИЗМЕНИЧНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СТРУЈЕ

Према дефиницији Међународне електротехничке комисије (*IEC*), пулсирајућа струја је периодична струја чија је средња вредност различита од нуле:

$\overline{i(t)} \neq 0;\quad i(t+T) = i(t);\quad -\infty < t < \infty$ .

Наизменична струја је периодична струја чија је средња вредност једнака нули:

$\overline{i(t)} \equiv 0;\quad i(t+T) = i(t);\quad -\infty < t < \infty$ .

Константна компонента, $I_0$, једнака је средњој вредности пулсирајуће струје рачуната за један период:

$$I_0 = I_{DC} = \overline{i(t)} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} i(t)dt$$

Наизменична компонента (пулсирајуће струје) је величина добијена одузимањем од пулсирајуће струје њене константне компоненте:

$i_{\sim}(t) = i(t) - I_0$ .

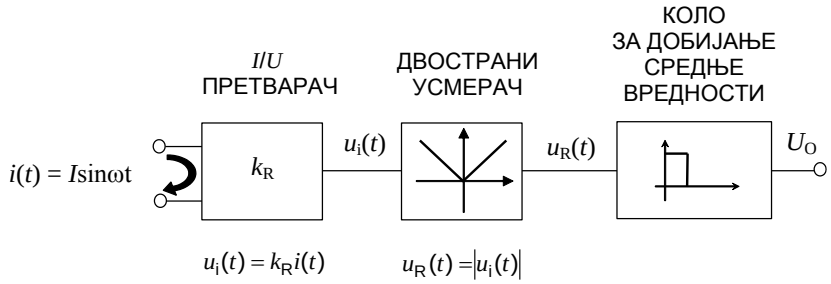
Другим речима, важи:

$i(t) = I_0 + i_{\sim}(t)$ ,

где је $i_{\sim}(t)$ наизменична компонента посматране струје

Једносмерна струја је струја у којој је константна компонента од примарне важности.

Структурни блок-дијаграм мерног претварача наизменичне струје у једносмерни напон приказан је на слици 4.18. Примењен је двострани (пуноталасни) усмерач.




Слика 4.18. Мерни претварач наизменичне струје

Математички модел овог претварача чине једначине којима су дефинисане карактеристике преноса појединих елемената:

$u_{\text{I}}(t) = k_{\text{R}} i(t)$ , (U/I претварач), (4.60)

$u_r(t) = |u_{\text{I}}(t)|$ , (двострани усмерач), и (4.61)

$U_{\text{O}} = \overline{u_r(t)}$ (филтер пропусних ниских учестаности), (4.62)

При побуди струјним сигналом синусног облика, чија је амплитуда једнака $I$, а учестаност једнака $\omega$:

$$i(t) = I\,\boldsymbol{sin}\omega t \quad , \tag{4.63}$$

једносмерна компонента излазног напона једнака је:

$$U_{\text{O}} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{r}}(t)dt = \frac{2k_{\text{R}}I}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \boldsymbol{sin}\,\omega t\,dt = -\frac{k_{\text{R}}I}{\pi}\boldsymbol{cos}\,\omega t\Big|_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2k_{\text{R}}}{\pi}I \;,\; T = \frac{2\pi}{\omega}\,, \tag{4.64}$$

односно:

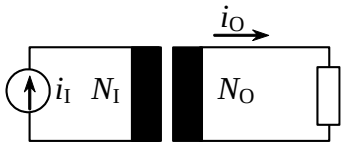
$$U_{\text{O}} = \frac{2\sqrt{2}k_{\text{R}}}{\pi} I_{ef}\,; I_{ef} = \frac{I}{\sqrt{2}} \tag{4.65}$$

Да би излазни једносмерни напон $U_O$, изражен у волтима, био једнак ефективној вредности улазне струје синусног таласног облика, изражене у милиамперима, потребно је да константа преноса $U/I$ претварача, $k_R$, буде једнака:

$$k_R = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{mA}} . \tag{4.66}$$

У мерилима намењеним искључиво за примену у колима наизменичне струје често се користи струјни мерни трансформатор, који истовремено обезбеђује галванско раздвајање електронског дела мерног инструмента од електричног кола у којем се мерење врши. Струјни мерни трансформатори су неопходни при мерењима у електроенергетској мрежи на високом напону.

Савршени трансформатор је мрежа са два приступа без губитака, за коју је тренутна вредност напона (струје) на једном приступу сразмерна тренутној вредности напона (струје) на другом приступу. Индуктивни трансформатор је електрични уређај (без покретних делова) чији рад се заснива на магнетској спрези два индуктивна намотаја. Помоћу њега се остварује спрега између извора електричне енергије и оптерећења. Намена мерног трансформатора је да пренесе сигнал од извора до оптерећења, омогућујући притом промену величине напона и струје, и тако оствари усаглашавање услова рада извора и оптерећења



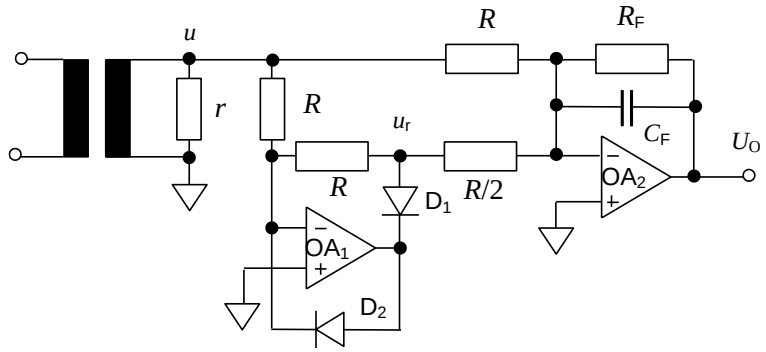

Слика 4.19. Струјни трансформатор

Однос трансформације примарне и секундарне струје одређен је односом броја навојака секундарног и примарног намотаја (слика 4.19):

$$i_O = \frac{N_I}{N_O} \cdot i_I . \tag{4.67}$$

Савршени услови за струјни мерни трансформатор су краткоспојени излазни крајеви, односно мали напон између прикључака секундара.

На слици 4.20 приказана је основна шема претварача наизменичне струје заснованог на потпуном (двостраном) исправљању. Отпорник $r$ у колу секундара струјног мерног трансформатора омогућује добијање напона сразмерног вредности мерене струје. Вредност отпорности $r$ се бира у зависности од називне вредности секундарне струје и величине показатеља *CF* (*crest factor*) који се жели да оствари.




Слика 4.20. Електрична шема мерног претварача наизменичне струје

Помоћу операционог појачавача $OA_1$, отпорника и диода $D_1$ и $D_2$ остварује се полуталасно исправљање. Операциони појачавач $OA_2$, у чијем колу повратне спреге се налазе отпорник и кондензатор, остварује улогу сабирача и нископропусног филтра помоћу којег се одређује средња вредност исправљеног сигнала. На излазу појачавача се добија позитиван напон сразмеран средњој вредности збира два напона од којих је један наизменични улазни напон, а други добијен његовим полуталасним усмеравањем.

Непозитивни напон $u_\mathrm{r}$ је са излаза исправљачког кола прикључен на улаз операционог појачавача $OA_2$, преко отпорника чија је отпорност $R/2$. Наизменични напон $u$, сразмеран вредности мерене струје, доведен је са отпорника у колу секундара мерног трансформатора преко отпорника чија је отпорност $R$. На овај начин је постигнуто да се коло за усредњавање понаша као да на његовом улазу делује еквивалентан напон:

$$u(t) - 2\,u_\mathrm{r}(t) = \left|u(t)\right| \ , \tag{4.68}$$

при чему је сачинилац преноса једнак $R_\mathrm{F}/R$. Напон на излазу кола једнак је:

$$U_\mathrm{O} = r\frac{R_\mathrm{F}}{R}\left|i(t)\right| \ . \tag{4.69}$$

Фреквенцијска карактеристика излазног кола представља карактеристику нископропусног филтра првог реда:

$$W(j\omega) = \frac{1}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_g}} \tag{4.70}$$

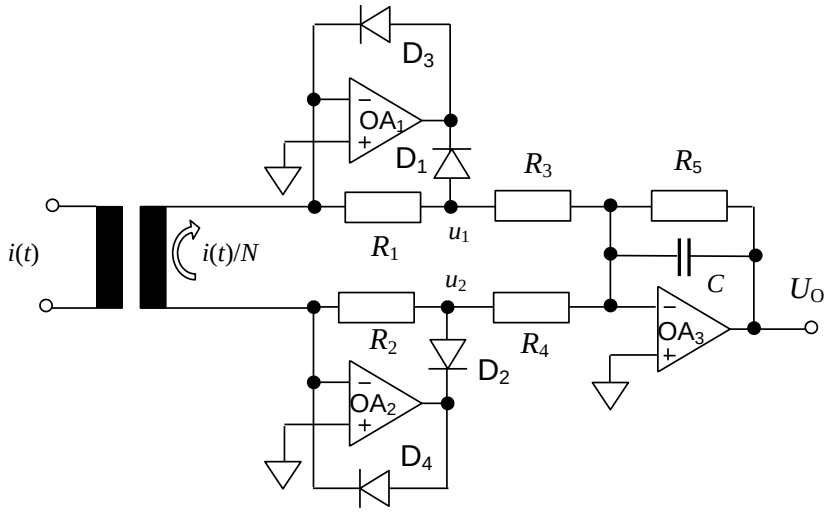
где је $\omega_\mathrm{g}$ гранична учестаност, која је једнака:

$$\omega_g = \frac{1}{R_\mathrm{F}C_\mathrm{F}} \ . \tag{4.71}$$

На слици 4.21 приказана је модификована шема у којој је секундар струјног мерног трансформатора тако повезан да се привидно налази у

кратком споју. Претварач се састоји од два идентична исправљачка кола за полуталасно исправљање, реализована са два операциона појачавача, по један у сваком колу, при чему је секундар струјног мерног трансформатора прикључен између инвертујућих упаза операционих појачавача. На тај начин је формиран комплементарни пар кола за једнострано исправљање, на чијим се излазима добијају напонски сигнали који имају исти поларитет, али одговарају различитом поларитету улазног сигнала.

На излазима операционих појачавача добијају се непозитивни напонски сигнали који одговарају полуталасно исправљеном струјном сигналу генерисаном на секундару струјног мерног трансформатора. Посматрани један у односу на други, ови напони одговарају различитим полупериодама струјног мерног сигнала. То омогућује да се ефекат потпуног, двостраног исправљања постигне њиховим сабирањим, што се остварује колом са операционим појачавачем *OA*3, које истовремено обавља и функцију кола за добијање средње вредности.




Слика 4.21. Модификовани мерни претварач наизменичне струје

Напон $u_1(t)$ који се добија на аноди диоде $D_1$ одређен је изразом:

$$u_1(t) = \begin{cases} -R_1 i(t) & \text{за } i(t) \geq 0 \\ 0 & \text{за } i(t) < 0 \end{cases}, \tag{4.72}$$

у којем $i(t)$ представља секундарну струју мерног трансформатора за коју је усвојено да има позитиван смер када утиче у привидну нулу (инвертујући прикључак) операционог појачавача *OA*1.

Напон $u_2(t)$ који се добија на аноди диоде $D_2$ одређен је изразом:

$$u_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{за } i(t) \geq 0 \\ -R_2 i(t) & \text{за } i(t) < 0 \end{cases}, \tag{4.73}$$

у којем $i(t)$ представља секундарну струју мерног трансформатора која има позитиван смер када истиче из привидне нуле операционог појачавача $OA_2$.

Укупна струја $j(t)$, која кроз отпорнике $R_3$ и $R_4$ утиче у привидну нулу појачавача $OA_3$ једнака је:

$$j(t)=\frac{u_1(t)}{R_3}+\frac{u_2(t)}{R_4}=\begin{cases} -\dfrac{R_1}{R_3}i(t) \text{ за } i(t)\geq 0 \\ \dfrac{R_2}{R_4}i(t) \text{ за } i(t)<0 \end{cases}, \tag{4.74}$$

при чему је за позитиван смер усвојен смер струје $j(t)$ која утиче у привидну нулу појачавача $OA_3$. Уколико вредности отпорности задовољавају услов:

$$\frac{R_1R_4}{R_3R_2}=1, \tag{4.75}$$

струја $j(t)$ представља двострано исправљену секундарну струју $i(t)$:

$$-j(t)=\mathbf{mod}\,i(t)=\begin{cases} i(t) \text{ за } i(t)\geq 0 \\ -i(t) \text{ за } i(t)<0 \end{cases}. \tag{4.76}$$

Отпорник $R_5$ и кондензатор $C$ у колу повратне спреге операционог појачавача $OA_3$ омогућују добијање ненегативног напона сразмерног средњој вредности струје $j(t)$.

Оваква спрега обезбеђује неколико значајних предности у поређењу са претходно описаним решењем:

1) Секундар струјног мерног трансформатора практично се налази у условима кратког споја. Оба краја секундара се налазе на истом потенцијалу (привидне нуле операционих појачавача), независно од тренутне вредности мерене струје. Тиме је постигнут савршени радни режим струјног мерног трансформатора. У претходном решењу, пад напона на отпорнику $r$ представља извор информације о вредности мерене струје, а истовремено извор грешке у преносу струјног мерног трансформатора, која настаје због његове несавршености.

2) Ово решење захтева мањи број прецизних мерних отпорника, а осим тога и погоднији однос њихових вредности. У начелу, сви мерни отпорници могу да имају исту вредност, што није случај у колу са слике 4.18.

3) Модификовано решење мерног кола не оптерећује извор референтног нултог потенцијала у односу на који је дефинисан излазни напон. У претходном решењу, део секундарне струје мерног трансформатора протиче кроз извор референтног потенцијала стварајући нежељени пад напона на његовој унутрашњој отпорности.

Мерни претварачи и преносиви (ручни) сервисни инструменти омогућују мерење струје до 20 А са грешком мањом од 1%. Врхунски вишефункцијски инструменти омогућују мерење наизменичне струје у опсегу од 100 μA до 1 А са грешком мањом од 500 *ppm*. Мерна несигурност еталона за наизменичну струју је мања 0,1 μA/A.

# ЛИТЕРАТУРА


1. *International Electrotechnical Vocabularu, IEC 60050: part 103, Mathematic/Periodic quantities*, 103-06-03.
2. Реф, 1, 103-06-05.
3. *International Electrotechnical Vocabularu, IEC 60050: part 131, Circuit theory/ General*, 131-11-25.
4. *International Electrotechnical Vocabularu, IEC 60050: part 151, Electrical and magnetic devices/ Behaviour and use*, 151-15-01.
5. П.Бошњаковић, Специјална електронска кола, ВИШЕР, 2013.
6. *B.Stojanovic, P.Bosnjakovic, V.Petrovic, High accuracy A/D converter with square-root transfer function, IMEKO 9th World Congress, pp* 251-257

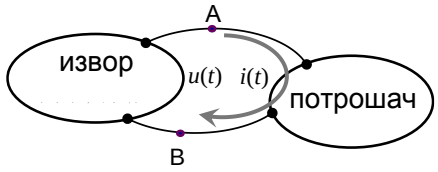
# 5.
# МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СНАГЕ И ЕНЕРГИЈЕ

У Међународном систему величина (*ISQ*), снага и енергија представљају изведене физичке величине [1]. Електрична снага је по својој природи брзина којом се електрична енергија ствара (генерише), преноси, односно користи (претвара у неки други други облик). Веза између снаге $p(t)$ и енергије, $W$, одређена је диференцијалном једначином првог реда:

$$p(t) = \frac{dW}{dt}. \tag{5.1}$$

Тренутна електрична снага која се предаје, односно троши, једнака је производу тренутне вредности напона $u(t)$, који делује између крајева који представљају приступ извора енергије, и тренутне вредности струје $i(t,)$ коју извор даје, односно која протиче кроз потрошач (слика 5.1):

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \tag{5.2}$$




Слика 5.1. Дефиниција електричне снаге

Одговарајуће јединице имају посебне називе. То су ват (W), за снагу, и џул (J) за енергију. Између њих постоји веза:

$$\mathrm{J} = \mathrm{W}s. \tag{5.3}$$

У електротехници употребљавају се умношци џула изражени као ватчас, киловатчас и мегаватчас. На тај начин се лако израчунава утрошена енергија, ако је снага потрошача позната у ватима, а време у сатима.

За мерење електричне снаге користи се посебно мерило намењено за њено мерење, или се мерење врши посредно, мерењем других величина, чији је физички однос са процесом размене енергије познат[1]. Мерило снаге се назива ватметар. Начин мерења зависи од својстава сигнала који тај процес карактеришу, од њихове учестаности и таласног облика, али и од величине снаге, као и тачности која се захтева. С обзиром на то, постоји мноштво различитих мерних поступака и инструмената.

---

[1] На пример, у колу једносмерне струје мерење снаге која се преноси из једног дела електричног кола у други, може да се оствари помоћу волтметра и амперметра.

Мерење електричне енергије се превасходно врши са циљем обрачуна трошкова за преузету (испоручену) енергију. Својства мерила енергије су стандардизована и исказана у одговарајућим националним документима. Такви уређаји спадају у мерила за која је обавезно да постоји одобрење типа и да се врши периодични преглед и оверавање.

У овом поглављу пажња је усмерена на мерења електричне снаге и енергије у систему наизменичних величина, посебно на мерења која се врше у електроенергетској мрежи, јер та мерења имају и највећи практичан значај.

# 5.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Када су напон и струја непроменљиви, електрична енергија се преноси сталном брзином:

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = RI^2, \tag{5.4}$$

где је $R$ величина која се назива електрична отпорност. Она карактерише неповратно претварање електричне енергије у неки други облик, процесом који се у потрошачу одвија.

Када су $u(t)$ и $i(t)$ периодично променљиве величине:

$$u(t+T) = u(t)\,,\; i(t+T) = i(T)\,, \tag{5.5}$$

где је $T$ њихов период, електрична снага $p(t)$ је такође периодична величина. Средња вредност тренутне снаге, посматране током временског интервала чије је трајање једнако једном периоду напона на крајевима кола, представља активну снагу (*active power*) $P$:

$$P = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} p(t)dt = \frac{1}{T}\int_{0}^{T} p(t)dt = \frac{1}{T}\int_{0}^{T} u(t)i(t)dt\,. \tag{5.6}$$

Активна снага је "делујућа" (реална) снага[2] која се преноси од извора електричне енергије потрошачу, односно од једног дела електроенергетског система другом.

Ако су напон и струја синусне (хармонијске, простопериодичне) функције времена:

$$u(t) = \sqrt{2}U\,\boldsymbol{sin}(\omega t + \alpha)\,, \text{ и} \tag{5.7}$$

$$i(t) = \sqrt{2}I\,\boldsymbol{sin}(\omega t + \beta)\,, \tag{5.8}$$

где су $U$ и $I$ одговарајуће ефективне вредности за које важи:

$$U = U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{0}^{T} u^2(t)dt}\;,\quad I = I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{0}^{T} i^2(t)dt}\,, \tag{5.9}$$

[2] У немачком језику се назива *Wirkeistung,* од *Wirkung* дејство.

тренутна вредност снаге $p(t)$ у било којем тренутку $t$ одређена је производом:

$$p(t) = 2UI\,\boldsymbol{sin}(\omega t+\alpha)\boldsymbol{sin}(\omega t+\beta)\,. \tag{5.10}$$

Величине α и β представљају почетну фазу напона односно струје.

На основу једнакости која важи за тригонометријске функције:

$$2\,\boldsymbol{sin}\,a\,\boldsymbol{sin}b = \boldsymbol{cos}(a-b)-\boldsymbol{cos}(a+b)\,, \tag{5.11}$$

следи једначина:

$$p(t) = UI\,\boldsymbol{cos}(\alpha-\beta)-UI\,\boldsymbol{cos}(2\omega t+\alpha+\beta)\,. \tag{5.12}$$

Снага $p(t)$ садржи члан који не зависи од времена и члан који представља периодичну функцију времена. Временски променљиви члан у изразу за тренутну снагу (наизменична компонента) има двоструко већу учестаност од учестаности извора енергије. Његова средња вредност је једнака нули, па је активна снага, на основу израза 5.6 и 5.12, једнака:

$$P = UI\boldsymbol{cos}\,\varphi\,. \tag{5.13}$$

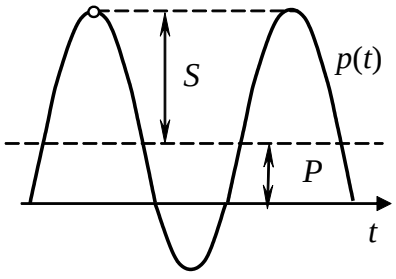
где φ представља разлику фаза напона и струје (фазни угао):

$$\varphi = \alpha-\beta\,. \tag{5.14}$$

Величина $S$, дефинисана производом ефективних вредности напона и струје:

$$S = UI\,, \tag{5.15}$$

назива се привидна снага (*apparent power, Scheinleistung*). То је математичка величина која представља амплитуду наизменичне компоненте тренутне снаге (слика 5.2). Наизменична снага, дакле, осцилује између извора и потрошача, али је њена средња вредност унутар сваке осцилације једнака активној снази.




Слика 5.2. Временски дијаграм наизменичне снаге

Однос активне и привидне снаге означава се са λ:

$$\lambda = \frac{P}{S}\,, \tag{5.16}$$

и назива фактор снаге. То је вредност којом треба помножити привидну снагу $S$ да би се добила вредност активне снаге $P$. За коло у којем су напон и струја синусне функције исте учестаности, фактор снаге је одређен разликом фаза:

$$\lambda = \cos\varphi . \tag{5.17}$$

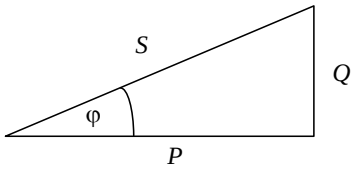
У таквом колу, реактивна снага (*reactive power*) је математичка величина дефинисана изразом:

$$Q = UI\sin\varphi , \tag{5.18}$$

тако да важи једначина:

$$S^2 = P^2 + Q^2 . \tag{5.19}$$

Геометријски, однос између ове три величине може да се представи троуглом (слика 5.3).




Слика 5.3. Троугао снаге

Активна снага је "права" снага (*true power*) којом се обавља рад. Мери се у ватима. Реактивна електрична снага је апстрактна величина која не "обавља" рад. Примењује се да опише ток енергије у електроенергетском систему. Она се може представити као брзина којом се енергија наизменично складишти у електричном односно магнетском пољу (која се успостављају унутар електричног кола потрошача), а потом враћа назад[3]. Мери се у волтамперима реактивним (*var*). Математички, реактивна снага може да се посматра као имагинарни део комплексне величине која се назива комплексна снага (*complex power*). Комплексна снага је векторски збир активне и реактивне снаге (слика 5.3). Мери се у волтамперима (*VA*). Привидна снага је модуо активне снаге. Фазни став $\varphi$ је угао (*phase angle*) између напона и струје. Уколико је разлика фаза напона и струје већа, већа је реактивна снага у систему.

У симетричном $N$-фазном систему наизменичних величина важи:

$$\sum_{n=1}^{N} u_n(t) = 0 \text{ и} \tag{5.20}$$

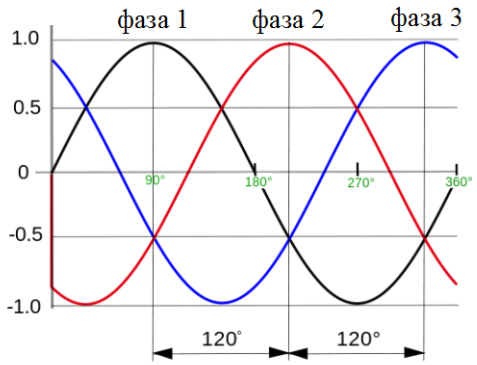
$$\sum_{n=1}^{N} i_n(t) = 0 . \tag{5.21}$$

Укупна снага у вишефазном систему једнака је збиру снага у појединим фазама:

$$p(t) = \sum_{n=1}^{N} p_n(t) . \tag{5.22}$$

[3] Електрично и магнетско поље нису одвојени већ чине једну целину. Теорију електромагнетског поља поставио је Максвел у деветнаестом веку.

У трофазној електричној мрежи напони су фазно померени за угао 120 ° (2π/3), као што је то приказано на слици 5.4.




Слика 5.4. Временски дијаграми напона у трофазном систему

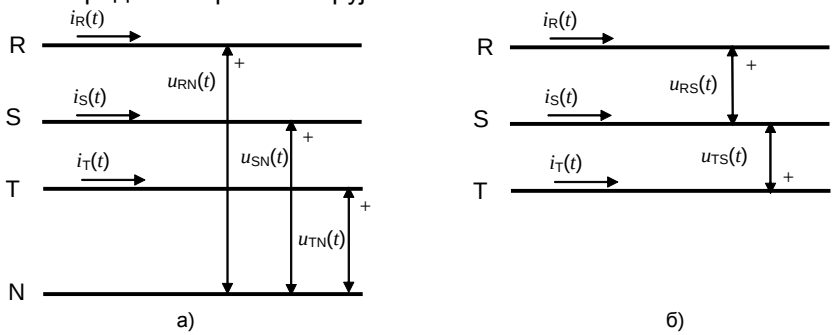
У трофазном четворожичном систему, чије су фазе означене са *R*, *S* и *T*, (слика 5.5.а) важи:

$$p(t) = u_{RN}(t)i_R(t)+u_{SN}(t)i_S(t)+u_{TN}(t)i_T(t) \tag{5.23}$$

односно:

$$P = U_{RN}I_R \cos\varphi_R + U_{SN}I_S \cos\varphi_S + U_{TN}I_T \cos\varphi_T \,, \tag{5.24}$$

где су $U_{RN}$, $U_{SN}$ и $U_{TN}$ ефективне вредности фазних напона, а $I_R$, $I_S$ и $I_T$ ефективне вредности фазних струја.




Слика 5.5. Трофазни систем

У трофазном трожичном систему (слика 5.5.б) важи:

$$i_R(t)+i_S(t)+i_T(t)=0 \,, \tag{5.25}$$

на основу чега следи формула:

$$p(t)=u_{RS}(t)i_R(t)+u_{TS}(t)i_T(t) \,, \tag{5.26}$$

у којој $u_{RS}(t)$ и $u_{TS}(t)$ представљају међуфазне напоне:

$$u_{RS}(t)=u_{RN}(t)-u_{SN}(t) \,, \tag{5.27}$$

$$u_{TS}(t)=u_{TN}(t)-u_{SN}(t)\,. \tag{5.28}$$

У симетричном систему тренутна снага је константна и једнака:

$$P = 3UI\cos\varphi\,. \tag{5.29}$$

Тренутна снага $p(t)$ и активна снага $P$ су величине које имају сасвим одређен физички смисао, чија су својства у складу са принципом одржања (конзервације) енергије. За разлику од њих, привидна и реактивна снага имају димензију (електричне) снаге, али не представљају реалне физичке величине, и на њих се, у општем случају, не може применити принцип очувања енергије. Привидна снага је показатељ највеће способности система у погледу преноса енергије. Реактивна снага није повезана са дисипацијом електричне енергије[4]. Она може, али не мора, да буде повезана са енергијом електричног или магнетског поља. У посебном случају, у линеарном колу са синусном побудом, реактивна снага је повезана са процесом акумулације енергије у електричном и/или магнетском пољу, и може се алгебарски сабирати.

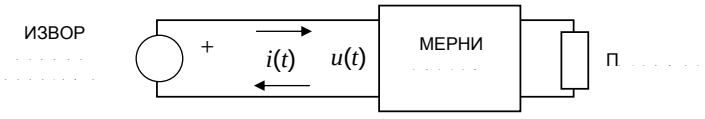
Мерење електричне енергије остварује се интеграцијом измерене електричне снаге током одређеног временског интервала $[t_P, t_K]$,:

$$W[t_P, t_K] = \int_{t_P}^{t_K} p(t)dt\,, \tag{5.30}$$

где је $p(t)$ тренутна електрична снага, интензитет размене енергије током интервала посматрања $t \in [t_P, t_K]$. Мерило електричне енергије је, дакле, интеграторски уређај.

## 5.2 МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СНАГЕ

Мерење електрична снаге, којом се енергија преноси из једног дела електричне мреже у други, подразумева, у општем случају, истовремену обраду две величине: напона и струје (слика 5.6). Да би се измерила електрична снага коју извор енергије даје, потрошач се напаја кроз систем којим се снага мери. То значи да снага коју извор напона троши није једнака снази коју потрошач узима.

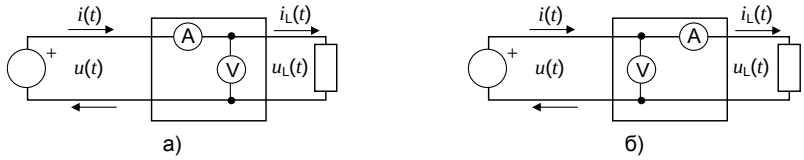



Слика 5.6. Мерење електричне снаге

Заправо, постоје два улаза у мерни систем који прихватају сигнале различите физичке природе: струјни и напонски. Притом су могућа два начина њиховог прикључивања (слика 5.7). Оба доводе до систематске грешке.

[4] Проблем дефинисања реактивне снаге у општем случају, за нелинеарна кола са несинусном побудом, обухвата и проблем њеног мерења.

Преузета снага је за снагу коју узимају улазна кола мерног система мања од снаге коју извор улаже.

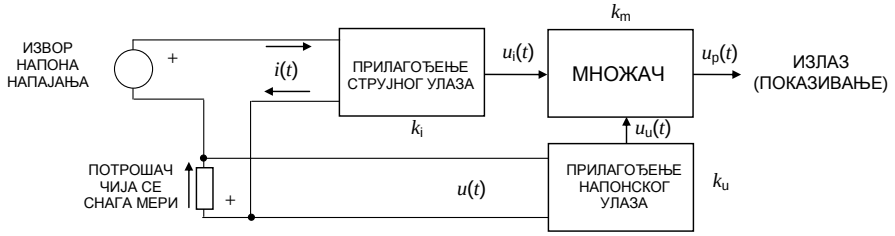



Слика 5.7. Систематска грешка при мерењу електричне снаге

С обзиром на дефинициону једначину 5.3, основну функционалну јединицу мерила електричне снаге чини множач аналогних величина. На његов улаз доводе се нормализовани[5] напонски сигнали, јер улазне величине множача по својој физичкој природи обично представљају напон. Ови сигнали представљају улазне величине потрошача: напон $u(t)$ и струју $i(t)$ (слика 5.8):

$$u_{\mathrm{u}} = k_{\mathrm{u}} u \text{ , и} \tag{5.31}$$

$$u_{\mathrm{i}} = k_{\mathrm{i}} i \text{ .} \tag{5.32}$$




Слика 5.8. Ватметар

Сачинилац преноса $k_{\mathrm{u}}$ је бездимензиона величина. Сачинилац $k_{\mathrm{i}}$ има димензију електричне отпорности. Прилагођавање сигнала је неопходно да би се постигло да електронски множач ради у условима који обезбеђују његова најбоља метролошка својства.

Напон на излазу множача једнак је:

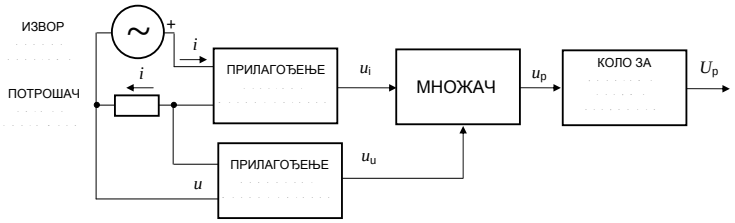
$$u_{\mathrm{p}} = k_{\mathrm{m}} u_{\mathrm{u}} u_{\mathrm{i}} \text{ .} \tag{5.33}$$

Погодним избором вредности $k_{\mathrm{u}}$, $k_{\mathrm{i}}$ и $k_{\mathrm{m}}$ може се постићи да излазни напон $u_{\mathrm{p}}$, изражен у волтима, показује вредност електричне снаге у одговарајућим мерним јединицама (mW, W, kW).

У систему наизменичних величина, сигнал на излазу множача је пулсирајућа величина чија је вредност сразмерна тренутној вредности електричне снаге (слика 5.2). Учестаност сигнала на излазу множача је доструко већа од учестаности мерних сигнала. Величина која се мери је

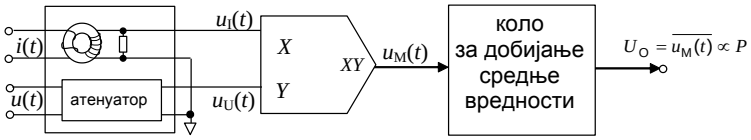
[5] Под нормализацијом се подразумева прилагођење величине сигнала мерном опсегу улазних кола за обраду. У случају мерења на ниском напону (230 $V_{\mathrm{eff}}$), напон се слаби, а струја (која може бити и стотину ампера) пресликава на напон ниског нивоа.

средња снага, јер она одређује снагу којом потрошач узима електричну енергију из извора. На слици 5.9. приказани су основни функционални делови мерила активне електричне снаге у систему наизменичних електричних величина. Мерење се своди на одређивање средње вредности сигнала добијеног на излазу множача аналогних величина.




Слика 5.9. Структурни блок-дијаграм мерила наизменичне снаге

Са практичне тачке гледишта, проблеми реализације електронског ватметра обухватају и проблем увођења улазних величина у мерни систем (слика 5.10). На струјном улазу се, по правилу, користи струјни мерни трансформатор. Напонски улаз се, најчешће, прикључује преко одговарајућег атенуатора, без галванске изолације [2].

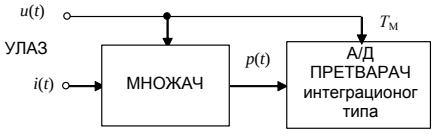



Слика 5.10. Принципска шема мерења активне електричне снаге у мрежи наизменичне струје

Улогу кола за добијање средње вредности обавља филтер пропусних ниских учестаности, којим се наизменична компонента напона $u_M(t)$ потискује (слаби) до потребног нивоа. Јаче потискивање наизменичне компоненте, нажалост, смањује брзину одзива мерног система.

Разултат мерења може да се добије у дигиталном облику, тако што се сигнал сразмеран вредности тренутне електричне снаге, добијен помоћу множача аналогних величина, доведе на улаз интеграционог А/Д претварача (слика 5.11) [3]. Ако је интервал интеграције једнак целобројном умношку периода улазног напона, показивање А/Д претварача је сразмерно средњој вредности пулсирајућег сигнала на излазу множача:

$$N \propto \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} p(t)dt = P \,. \tag{5.34}$$




Слика 5.11. Дигитални ватметар

Савремени мерни претварачи електричне снаге су дигитални. Вредности мерених величина одређују се израчунавањем на основу низа нумеричких вредности одбирака мерних сигнала. На слици 5.12 приказан је вишефункцијски инструмент предвиђен за уградњу у контролну таблу електроенергетског објекта. Вредности привидне, активне и реактивне снаге приказују се дигитално.




Слика 5.12. Инструмент за мерење привидне, активне и реактивне снаге

Када су у питању инструменти за прецизно мерење електричне снаге, значајно место заузимају уређаји засновани на примени импулсних[6] множача. Код ових кола се излазни сигнал добија као средња вредност низа правоугаоних импулса, чији су временски параметри дефинисани вредношћу једне од улазних величина ($u_X$), док је амплитуда импулса одређена вредношћу друге улазне величине ($u_Y$). Општи структурни блок-дијаграм множача напона, чији је рад заснован на пресликавању сигнала $u_X(t)$ из аналогног у импулсни домен, приказан је на слици 5.13.




Слика 5.13. Импулсни множач

Импулсни претварач је управљани генератор импулса правоугаоног таласног облика. Помоћу њега се улазна величина, представљена напоном $u_X(t)$, пресликава у величину исказану временским параметрима поворке импулса $u_B(t)$ која се може представити изразом:

$$u_B(t) = \begin{cases} U_H \text{ за } 0 \le t < T_H \\ U_L \text{ за } T_H \le t < T \end{cases}, \tag{5.35}$$

где је $T_H$ трајање импулса, а $T$ период њиховог појављивања. Сигнал на излазу импулсног претварача може да се посматра као бинарна величина $b(t)$:

$$b(t) = \begin{cases} 1 \text{ за } 0 \le t < T_H \\ 0 \text{ за } T_H \le t < T \end{cases}, \tag{5.36}$$

[6] У општем случају, импулс (*impulse*) је елемент сигнала окарактерисан брзом променом величине која представља носиоц информације (напон, струја, учестаност, импеданса), након које следи брза промена којом се поновно успоставља основно стање.

која је повезана са величином $u_X(t)$ на начин који је одређен карактеристиком претварача. Модулацијом[7] амплитуде импулса $b(u_X)$ улазним напоном $u_Y(t)$ добија се амплитудски и временски модулисан сигнал чија је средња вредност сразмерна производу улазних величина:

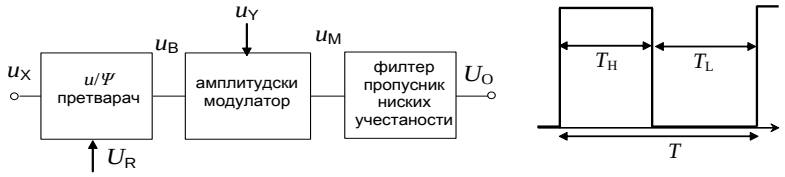
$$u_O = \overline{u_M(t)} = \overline{b(t)u_Y(t)} \propto \overline{u_X(t)u_Y(t)} . \tag{5.37}$$

Најбоље карактеристике имају множачи код којих се као информациони параметар сигнала $u_B(t)$ користи величина $\Psi$, која је дефинисана као количник разлике и збира трајања једног и другог бинарног стања, тако да важи:

$$\Psi = \frac{T_H - T_L}{T_H + T_L} = k_\Psi \frac{u_X}{U_R} , \tag{5.38}$$

где је $k_\Psi$ бездимензиона константа. Према дефиницији, $\Psi$ је биполарна величина, што омогућује реализацију множача у сва четири квадранта[8]. Структурни блок дијаграм таквог множача[9] приказан је на слици 5.14 [4]. Излазни напон $u_O$ одређен је изразом:

$$u_O = \overline{u_M} = \frac{1}{T}\int_0^T u_M dt = k_A u_Y \Psi = k_\Psi k_A \frac{u_X u_Y}{U_R} . \tag{5.39}$$




Слика 5.14. Четвороквадрантни импулсни множач са $u/\Psi$ претварачем

Све три операције које се извршавају у импулсном множачу (пресликавање у импулсе, амплитудска модулација импулса и њихово усредњавање) могу да се обаве са високом тачношћу, због чега се множачи овог типа примењују када се захтевају високе перформансе. Њихов основни недостатак је ограничен фреквенцијски опсег. Пропусни опсег ватметра ограничен је учестаношћу осциловања импулсног претварача.



Слика 5.15. Еталон наизменичне снаге *MSB 100*

Еталон наизменичне електричне снаге, *MSB*, приказан на слици 5.15, развијен у Институту Михајло Пупин, заснован је на импулсном множачу [5]. Његова тачност је на нивоу 50 ppm. Примењен је као трансфер[10] еталон у

---

[7] Под називом "модулација" подразумева се промена вредности неке величине (електричног параметра) под дејством друге величине. На тај начин се остварује "утискивање" информације у сигнал. Назив потиче од лат. *modulari*, мењати (глас, тон)

[8] За све четири комбинације предзнака величина које се множе.

[9] У стручној литератури на енглеском језику уобичајено је да се такав множач назива "*time-division multiplier* " или Гилбертов множач.

[10] Трансфер-уређај (*transfer measurement device*) је уређај који се користи као посредник при поређењу еталона.

међународној компарацији еталона наизменичне снаге у којој су учествовале националне метролошке институције Канаде, Сједињених Америчких Држава, Немачке и Југославије [6]. Данас представља национални еталон Републике Србије.

Посебну категорију мерних средстава чине калибратори, подесиви еталонски уређаји којима се остварује испитивање ватметара и мерних претварача наизменичних величина [7]. На слици 5.16 приказан је један такав уређај.



Слика 5.16. Калибратор снаге *FLUKE 6105A*

Калибратор има два излаза, један за напонски, а други за струјни сигнал, који се прикључују на одговарајуће улазе мерила које се испитује (*phantom load power source*). Уређај може да обезбеди напон до 1000 V и струју до 20 A са резолуцијом која одговара приказу са шест декадних цифара и тачношћу реда величине 100 ppm. Подешавање угла се врши са резолуцијом од 0,001 °. Учестаност се задаје са резолуцијом од 0,01 Hz и тачношћу од 50 ppm. Дигитална техника је учинила да овакви уређаји буду и програмабилни, што је предуслов за остваривање, мање или више, аутоматизованих система за метролошко испитивање разноврсних мерних средстава.

Лабораторија за електричну снагу Дирекције за мере и драгоцене метале остварује, одржава и унапређује српске еталоне електричне снаге, фазног угла, хармоника електричне струје и напона (слика 5.17). У лабораторији се еталонирају: инструменти за мерење активне, реактивне и привидне електричне снаге, инструменти за мерење и генерисање фазног угла, претварачи електричне снаге и инструменти за мерење хармоника електричне струје односно напона.



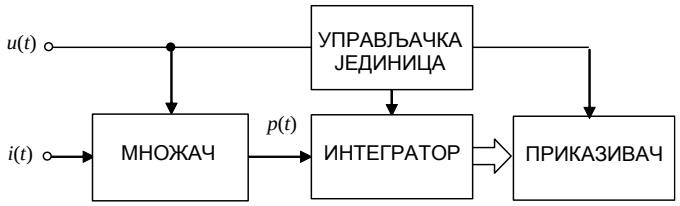
Слика 5.17. Национална лабораторија за електричну снагу

Могућности еталонирања дате у следећој табели.

- активна електрична снага: до 48 kW, 50 Hz; до 20 kW, 16 Hz до 450 Hz;
- реактивна електрична снага: до 48 kvar, 50 Hz; до 20 kvar, 16 Hz до 450 Hz;
- привидна електрична снага: до 48 kVA, 50 Hz; до 20 kVA, 16 Hz до 450 Hz;
- хармоници електричне струје и напона: до 100;
- фазни угао: 0° до 360°, 50 Hz до 100 kHz, 10 mV до 350 V.

## 5.3 МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Изрази 5.1, 5.2 и 5.30 дефинишу општи структурни блок дијаграм мерила електричне енергије (слика 5.18). Множењем вредности напона и струје одређује се вредност електричне снаге којом се енергија преноси. Интеграцијом снаге добија се информација о електричној енергији. Разлика вредности које представљају стање интегратора, на почетку и на крају мерног интервала, сразмерна је вредности енергије пренете током посматраног временског интервала. Сачиниоци преноса појединих функционалних блокова се тако подешавају да резултат представља мерену величину у одговарајућим јединицама. Стање интегратора се визуелно представља помоћу одговарајућег приказивача (*display*).




Слика 5.18. Мерење електричне енергије

Да би се обезбедила довољно висока резолуција очитавања, резултат мерења се приказује у дигиталном облику[11]. То значи да мерни процес неизбежно обухвата и пресликавање информације из аналогног у дигитални облик представљања. Као резултат мерења добија се број $N$ за који важи:

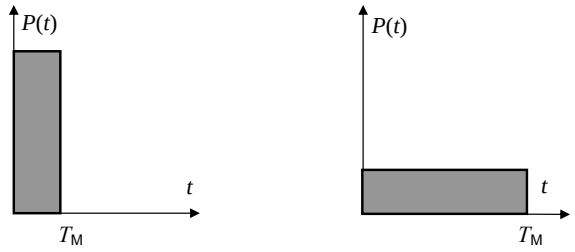
$$N = \left[ \frac{W}{\delta W} \right], \tag{5.40}$$

где је $\delta W$ резолуција мерења енергије, а угласте заграде означавају највећи цео број који одговара вредности израза у загради. Измерена електрична енергије представља збир елементарних количина које одговарају резолуцији

[11] Треба имати у виду да су нека прва мерила потрошње електрчне енергије била заснована на аналогном очитавању (посредством градуисане цевчице).

мерења $\delta W$. Током мерења врши се њихово акумулирање, одбројавање. Отуда потиче и назив за ову врсту мерила: бројило[12].

Карактер мерења условљава да се као критеријум перформанси уређаја за мерење електричне енергије користи права релативна грешка. То имплицира велику резолуцију приказивања резултата мерења, утолико већу уколико је шири радни опсег вредности мерене снаге. Одређена количина енергије (површина на $P$-$t$ дијаграму, слика 5.19) мора да буде измерена са истом највећом дозвољеном релативном грешком, без обзира на интензитет потрошње (вредност ангажоване снаге) и трајање мерења.




Слика 5.19. Дијаграми једнаке потрошње у режиму великог и малог оптерећења

Захтев за високом резолуцијом је утолико тежи уколико је шири опсег трајања временског интервала у току којег се мерење врши. У случају мерења класом тачности[13] 2, на пример, приказни уређај мора, према важећим прописима, да омогући испитивање (проверу) мерила у временском интервалу који је практично за четири реда величине краћи од прописаног најкраћег времена потребног да се при максималној вредности снаге оптерећења региструје енергија која одговара максималном показивању[14] излазног регистра[15]. Због тога се, иако је у питању величина која је по својој природи аналогна, неизбежно прибегава нумеричком (цифарском) облику приказивања, што подразумева и обављање операције аналогно/дигиталног претварања у процесу мерења.

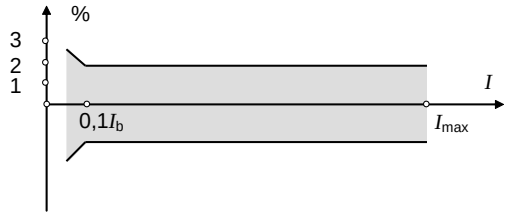
---

[12] У енглеском говорном подручју још увек је у опотреби назив “мерило електрицитета” (*electricity meter* или једноставно *meter*). Примеренији назив “бројило” потиче вероватно из немачког (*Elektrizitëtzëhler*), а користи се и у руском језику (*счетчик*). У општем случају, бројило је мерни уређај који одбројава (сабира) елементарне прираштаје мерене величине која по својој природи представља количину нечега: гаса, течности, електричне енергије, топлотне енергије, пређеног пута...

[13] Индекс класе тачности бројила је број који означава допуштену границу процентуалне грешке, за све вредности струје унутар дефинисаног опсега вредности, при јединичном фактору снаге (у случају вишефазних бројила при уравнотеженим оптерећењима) и при референтним вредностима утицајних величина. Бројила су првобитно разврстана у погледу индекса класе тачности: 0.2S, 0.5S, 0.5, 1, 2 и 3. Према новим правилницима, индекси класе означавају се латиничним словима *A*, *B* и *C*.

[14] Овај захтев повезан је са роковима очитавања обрачунских бројила.

[15] Регистар је електромеханички или електронски уређај који чува и приказује измерене вредности електричне енергије [18].




Слика 5.20. Границе процентуалне грешке мерила енергије класе тачности 2

Да би се испунили метролошки услови прописани за мерила потрошње електричне енергије на ниском напону (до 1000 V), на доњој граници мерног опсега (5 % вредности основне струје), грешка која потиче од помераја нуле на улазу интегратора мора бити мања од 0.025% максималне вредности мерног сигнала на излазу множача. То је веома строг захтев, ако се има у виду да се ради о мерењу класом тачности 2 (слика 15.20). При мерењу класом тачности 0.2 дозвољена грешка на доњој граници мерног опсега (1 % вредности називне струје) мања је од 0.004% максималне вредности.

Независно од принципа рада мерила (електромеханичког или електронског), односно од метода примењених за реализацију појединих операција, резултат мерења у сваком тренутку представља разлику текућег приказа и регистроване почетне вредности:

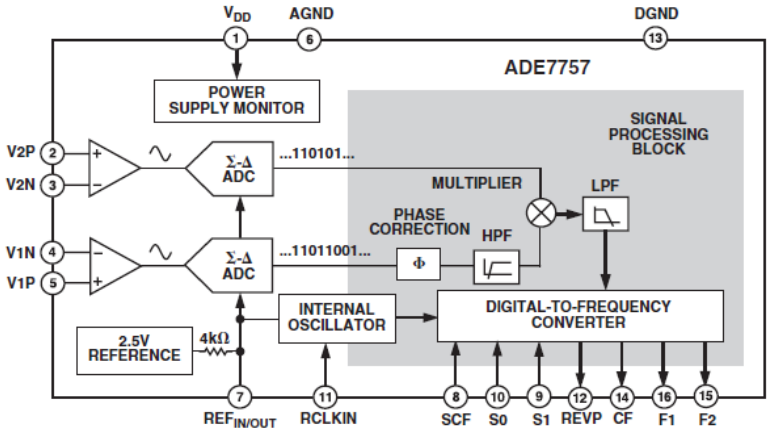
$$\Delta N = \frac{\Delta W}{\delta W}. \tag{5.41}$$

где је $\Delta W$ енергија измерена од тренутка очитавања почетне вредности до тренутка у којем се резултат посматра. На основу претходне једначине следи да је брзина промене садржаја регистра у којем се налази резултат налази, независно од начина на који се тај резултат образује, одређена формулом:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left[ \frac{P}{\delta W} \right]. \tag{5.42}$$

где је $P$ средња вредност снаге током интервала посматрања $\Delta t$. Ако се регистар посматра као бројач импулса који одговарају елементарним количинама енергије $\delta W$, на основу претходне једначине следи да је учестаност њиховог појављивања сразмерна вредности мерене електричне снаге. У основи процеса мерења енергије, дакле, налази се пресликавање електричне снаге у учестаност.

Уобичајено је да се у прецизним бројилима, која се користе за мерење на местима са великим протоком енергије, у једном или оба смера, А/Д претварач реализује управо пресликавањем информације из аналогног у импулсни облик, тачније у временске параметре поворке импулса. Тако се процес интеграције своди на одбројавање импулса од којих сваки представља елементарну (јединичну) количину енергије. Независно од начина на који се образује садржај регистра, свако бројило има импулсни излаз који служи за испитивање бројила приликом његове овере.




Слика 5.21. Интегрисано бројило AD7757

Прво једнофазно електронско бројило намењено за мерење у широкој потрошњи, развијено у Јапану, било је остварено применом диодног множача и претварача аналогне величине у учестаност [8]. Прво југословенско бројило било је засновано на импулсном (*time-division*) множачу [9]. Такав множач је примењен и у прецизном бројилу класе тачности 0,2 S [10]. Развој микропроцесора довео је до појаве специјализованих интегрисаних кола намењених за бројила електричне енергије. Једно такво коло приказано је на слици 5.21.

Метод заснован на дигиталном процесирању одбирака напонског и струјног мерног сигнала, примењују се за мерење потрошње електричне енергије на ниском напону, код којег су захтеви у погледу тачности знатно блажи.

Српски еталон јединице електричне енергије је трофазни уређај класе тачности 0,01 о којем се стара Лабораторија за електричну енергију Дирекције за мере и драгоцене метале. Лабораторија је опремљена стационарним и преносним системом за еталонирање и испитивање бројила електричне енергије који садрже еталон електричне енергије и трофазни извор наизменичног електричног напона и струје.

## 5.4 МЕРЕЊЕ РЕАКТИВНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ СНАГЕ И ЕНЕРГИЈЕ

Активна електрична снага описује процес преношења електричне енергије од извора напона ка потрошачу. Пренета (преузета) енергија током мерног интервала $T_m$ сразмерна је средњој вредности активне снаге током посматраног интервала:

$$\Delta W[t_\mathrm{p}, t_\mathrm{p}+T_\mathrm{m}] = \int_{t_\mathrm{p}}^{t_\mathrm{p}+T_\mathrm{m}} p(t)dt \cong P_\mathrm{m}T_\mathrm{m}\,. \tag{5.43}$$

Вредност активне снаге зависи од ефективних вредности напона и струје, али и од фазног помераја струје у односу на напон, $\varphi$:

$$P = U\,I\cos\varphi\,. \tag{5.44}$$

Величина $\cos\varphi$ представља фактор снаге. Ако је он мали, активна снага је мала иакоје ефективна вредност струје велика. Међутим, тада су губици при преносу

великиˡ⁶. Да би се урачунали трошкови преноса потребно је водити рачуна о привидној снази односно енергији. У пракси се то постиже на једноставнији начин, мерењем реактивне електричне енергије.

Са становишта обраде мерних сигнала, мерење реактивне електричне снаге и енергије представља сложенији захтев од мерења активне снаге односно енергије, јер захтева додатну обраду улазних сигнала. Формула 5.18 дефинише вредност реактивне електричне снаге, али се као таква не користи за мерење, јер подразумева веома сложену структуру мерног система. Према "практичној" дефиницији, реактивна енергија $W_Q$ једнофазног система је величина мерена савршеним бројилом активне енергије, кроз чије струјно коло пролази струја потрошача, док му је напонско коло прикључено на напон који је по амплитуди једнак напону потрошача, али који је у односу на тај напон фазно померен уназад за 90°:

$$u^*(t) = \sqrt{2}U\,\boldsymbol{sin}(\omega t - \frac{\pi}{2})\cdot \tag{5.45}$$

Наиме, у том случају, с обзиром на однос између тригонометријских функција синус и косинус:

$\boldsymbol{sin}\,\varphi = \boldsymbol{cos}(\varphi - \frac{\pi}{2})$, важи: (5.46)

$$\overline{u^*(t)i(t)} = UI\,\boldsymbol{cos}(\varphi - \frac{\pi}{2}) = Q\cdot \tag{5.47}$$

Другим речима, мерење реактивне електричне енергије $W_Q$ се своди на мерење активне електричне енергије, уколико се на улаз мерила доведе напон који је у односу на стварни напон $u(t)$ померен у времену за интервал који је тачно једнак четвртини периоде $T$:

$$W_Q[t_0, t_1] = \int_{t_0}^{t_1} u(t - \frac{T}{4})\cdot i(t)dt\cdot \tag{5.48}$$

Одговарајући израз за реактивну снагу $Q$ има облик:

$$Q = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} u(t - \frac{T}{4})\cdot i(t)dt\cdot \tag{5.49}$$

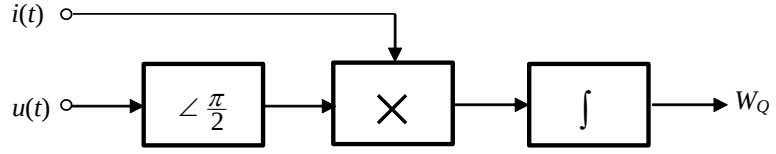
Средња вредност величине $q(t)$, дефинисане изразом:

$$q(t) = u(t - \frac{T}{4})i(t)\cdot = 2UI\,\boldsymbol{sin}(\omega t - \frac{\pi}{2})\cdot \boldsymbol{sin}(\omega t - \phi) = U\,I\,\boldsymbol{cos}(\phi - \frac{\pi}{2}) - UI\,\boldsymbol{cos}(2\omega t - \frac{\pi}{2} - \phi), \tag{5.50}$$

где је φ разлика фаза напона и струје, једнака је:

$$\overline{q(t)} = U\,I\,\boldsymbol{cos}(\varphi - \frac{\pi}{2}) = UI\,\boldsymbol{sin}\,\varphi = Q\cdot \tag{5.51}$$

Потребно је, дакле, извршити тачну промену фазе напонског улазног сигнала за π/2, пре његовог множења са струјним улазним сигналом (слика 5.22). Притом, ова промена фазе не сме да зависи ни од амплитуде ни од учестаности мерног сигнала.

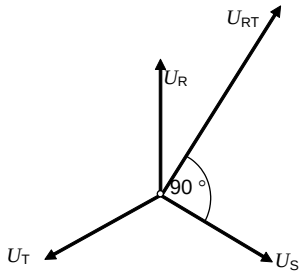



[16] Губици зависе од квадрата ефективне вредности струје.

Слика 5.22. Мерење реактивне електричне енергије

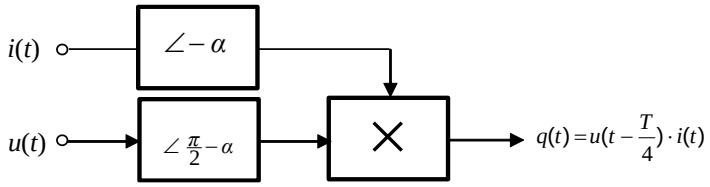
Померање фазе наизменичног сигнала за $\pi/2$ представља специфичан облик процесирања који се примењује у различитим областима, као што су на пример телекомуникације и акустика. У мерним системима користи се у високонапонским индуктивним делитељима, генераторима сигнала, инструментима за мерење капацитивности и губитака високонапонских кондензатора.

Конвенционални поступци за мерење реактивне електричне енергије у вишефазним системима засновани су на обради разлике фазних напона[17] (слика 5.23) или разлика фазних струја. Они, међутим, имају као полазну предпоставку симетрију фазних напона. Неиспуњавање овог услова доводи до систематске грешке. Проблем је знатно сложенији када је реч о мерењу у једнофазном систему, с обзиром на нужност примене посебних кола да би се остварио мерни систем чија функција преноса одговара дефиницији.




Слика 5.23. Однос фазних и међуфазних напона

За мерење у једнофазном систему неопходна је заправо промена фазне разлике улазних сигнала (напона и струје) пре њиховог међусобног множења. Са практичне тачке гледишта потпуно је неважно да ли се померање фазе врши на напонском, струјном или оба ова улаза у мерни систем (слика 5.24). У сваком случају, мора се узети у обзир фреквенцијска карактеристика кола за померање фазе, а управо у том погледу једноставна решења, заснована на линеарним колима за померање фазе, не представљају и задовољавајуће решење.




Слика 5.24. Принципска блок шема мерења реактивне електричне снаге

У општем случају фреквенцијска карактеристика кола за померање фазе има облик:

$$H(j\omega) = H(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \tag{5.52}$$

где је $\omega$ угаона учестаност улазног сигнала, а $H(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ су амплитудна и фазна карактеристика кола, респективно. Да би се постигло фреквенцијски независно фазно померање потребно је да буде:

[17] Међуфазни напон је $\sqrt{3}$ пута већи од фазног напона, па је неопходно одговарајуће скалирање.

$$\frac{dH}{d\omega} \equiv 0 \text{, и } \frac{d\varphi}{d\omega} \equiv 0 \tag{5.53}$$

Анализа показује да се линеарним колима са временски непроменљивим параметрима не може постићи да оба постављена услова 5.48 буду истовремено остварена. Таква решења представљају само апроксимацију жељене карактеристике [11]. Проблем се може решити на задовољавајући начин само применом нелинеарних кола.

Коло за померање фазе за $\pi/2$ трансформише улазни сигнал $x(t)$, који представља синусну функцију времена чија је амплитуда једнака $X$, а кружна учестаност једнака $\omega$:

$$x(t) = X \sin \omega t \text{ ,} \tag{5.54}$$

у излазни сигнал $y(t)$ који задовољава услов квадратуре[18]:

$$\frac{x^2(t)}{X^2} + \frac{y^2(t)}{Y^2} = 1 \text{ .} \tag{5.55}$$

Излазни сигнал $y(t)$ је такође синусна функција времена, једнаке учестаности $\omega$, амплитуде $Y$, која је у односу на улазни сигнал померена у времену за интервал једнак четвртини периода $T$ улазног сигнала:

$$y(t) = \pm Y \cos \omega t = \frac{Y}{X} x(t \pm \frac{T}{4}) \cdot \tag{5.56}$$

Коло које остварује овакву трансформацију назива се квадратурни померач фазе (КПФ). На основу претходних релација следи да карактеристика преноса фреквенцијски независног квадратурног померача фазе (ФНКПФ) може да буде описана диференцијалном једначином првог реда:

$$y(t) = \pm \frac{Y}{X} \frac{1}{\omega} \frac{dx}{dt} \text{ , или} \tag{5.57}$$

$$\frac{dy}{dt} = \mp \frac{Y}{X} \omega x(t) \cdot \tag{5.58}$$

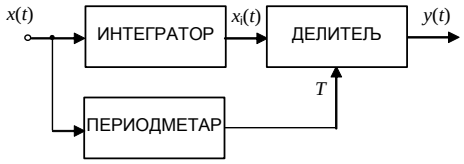
Обе ове једначине се могу узети као полазна основа за моделовање ФНКПФ.

Диференцијална једначина 5.56 може да се трансформише у две еквивалентне интегралне једначине:

$$y(t) = \mp \frac{Y}{X} 2\pi \frac{\int x(t)dt}{T} \text{ , и} \tag{5.59}$$

$$y(t) = \mp \frac{Y}{X} 2\pi f \int x(t)dt \text{ ,} \tag{5.60}$$

где је $f$ учестаност улазног сигнала. Ове једначине заправо представљају математичке моделе ФНКПФ. Једначини 5.57 одговара структурна форма приказана на слици 5.25.




Слика 5.25. Структурни блок дијаграм ФНКПФ

[18] За две простопериодичне величине, $x(t)$ и $y(t)$, исте учестаности, чија је разлика фаза једнака $\pm\pi/2$, каже се да су "у квадратури" (*in quadrature*), ако важи једначина 5.53. Ако се један излаз посматра као синусна функција времена, други представља косинусну функцију.

Жељени циљ остварује се каскадном везом интегратора и делитеља. Интегратор је инерцијални елемент који остварује фазни померај (кашњење) за $\pi/2$. Амплитуда сигнала на његовом излазу, међутим, обрнуто је сразмерна учестаности:

$$x_i(t)=\int x(t)dt=\frac{X}{2\pi f}\cos\omega t\ , \tag{5.61}$$

Другим речима, он делује као несавршени, амплитудски зависан квадратурни померач фазе (*quadrature phase shifter*). Ова зависност се компензује у следећем кораку, помоћу делитеља. Дели се величином која је сразмерна периоду улазног сигнал, а то је еквивалентно множењу са учестаношћу.

Функционално, делитељ у овом колу се понаша као појачавач са контролисаним појачањем које је обрнуто сразмерно вредности контролне величине добијене мерењем периода улазног сигнала. Да би се постигла висока тачност неопходно је да се период улазног сигнала мери дигитално, одбројавањем импулса референтног осцилатора у току временског интервала који представља период улазног сигнала:

$$N_{\mathrm{T}}=\left[\frac{T}{T_0}\right]\ , \tag{5.62}$$

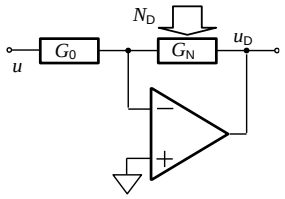
где је $T_0$ трајање референтног временског интервала који дефинише резолуцију мерења.

Функцију програмабилног појачавача може да оствари тзв. множећи дигитално/аналогни претварач (*multiplying digital-to-analogue converter - MDAC*) који у суштини представља отпорничко-прекидачку мрежу за коју важи једнакост:

$$\frac{G_{\mathrm{N}}}{G_{\mathrm{O}}}=\frac{N_{\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{FS}}}\ , \tag{5.63}$$

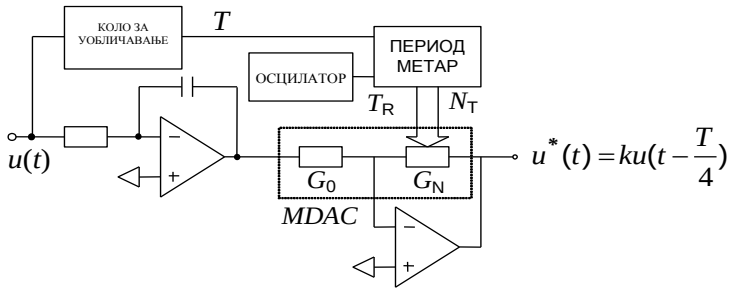
у којој $G_{\mathrm{N}}$ представља дигитално контролисану проводност, $G_O$ референтну проводност, $N_{\mathrm{D}}$ је дигитална величина која представља улаз Д/А претварача, а $N_{\mathrm{FS}}$ је њена максимална вредност. Постављањем дигитално управљане проводности $G_{\mathrm{N}}$ у грану негативне повратне спреге операционог појачавача (слика 5.26) постиже се да је напон $u_{\mathrm{D}}$ на његовом излазу обрнуто сразмеран броју $N_{\mathrm{D}}$.

$$u_{\mathrm{D}}=-u\,\frac{N_{\mathrm{FS}}}{N_{\mathrm{D}}}\ , \tag{5.64}$$




Слика 5.26. Програмабилни појачавач

Принципска електрична шема кола за фреквенцијски независно квадратурно померање фазе, остварено применом интегратора и фреквенцијски контролисаног појачавача, приказана је на слици 5.27 [12].




Слика 5.27. Фреквенцијски независно квадратурно померање фазе

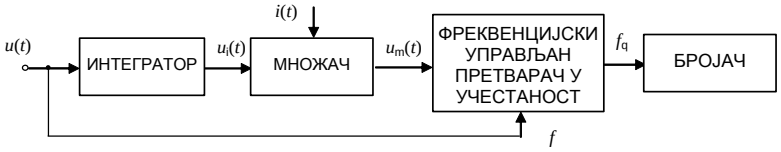
Коло омогућује остваривање високе тачности. Применом 18-битног Д/А претварача постиже се да је граница релативне грешке услед квантизације периода $5 \cdot 10^{-6}$. При побуди константним напоном, одступање напона на излазу од рачунски одређених вредности, које одговарају променама учестаности у опсегу од 45 Hz до 65 Hz, су унутар $\pm 7 \cdot 10^{-6}$.

Мерење реактивне енергије пружа могућност једноставног остваривања компензације фреквенцијске зависности квадратурног померања фазе. Наиме, ако је фазна карактеристика савршеног интегратора једнака $-\pi/2$, али је амплитудска карактеристика обрнуто сразмерна учестаности улазног сигнала:

$$H(j\omega) = \frac{k_i}{j\omega} = \frac{k_i}{\omega} \cdot e^{-j\pi/2}, \tag{5.65}$$

где је $k_\mathrm{i}$ сачинилац преноса интегратора, компензацију фреквенцијске зависности амплитуде могуће је остварити у следећем кораку обраде мерног сигнала, а то је интеграција сигнала добијеног на излазу множача.

Процес интеграције, коју формула за реактивну енергију 5.46 захтева, остварује се одбројавањем импулса чија је учестаност сразмерна сигналу на излазу множача којим се одређује производ фазно помереног напона $u^*(t)$ и струје $i(t)$. Фреквенцијска компензација интегратора као кола за померање фазе, може да се остави применом фреквенцијски управљаног (синхронизованог) пресликавања у учестаност. На слици 5.28 приказан је општи структурни блок дијаграм једнофазног бројила реактивне електричне енергије [13].




Слика 5.28. Једнофазно бројило реактивне електричне енергије

Математички модел оваквог бројила чине једначине:

$$u_\mathrm{i}(t) = \frac{k_\mathrm{i}}{\omega} u^*(t), \tag{5.66}$$

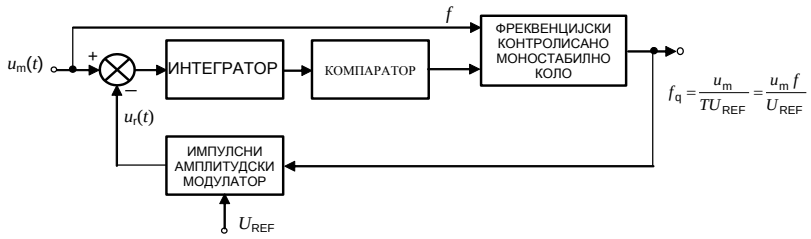
$$u_\mathrm{m}(t) = k_\mathrm{m} u_\mathrm{i}(t) i(t) = k_\mathrm{m} \frac{k_\mathrm{i}}{\omega} u^*(t) i(t) = \frac{k_\mathrm{m} k_\mathrm{i}}{2\pi f} q(t), \text{ и} \tag{5.67}$$

$$f_\mathrm{q} = k_\mathrm{f} f u_\mathrm{m}(t), \tag{5.68}$$

на основу којих следи израз за средњу вредност учестаности импулса који се одбројавају:

$$F_\mathrm{q} = \frac{k_\mathrm{f} k_\mathrm{m} k_\mathrm{i}}{2\pi} Q. \tag{5.69}$$

Општи структурни блок дијаграм синхронизованог претварача у учестаност приказан је на слици 5.29. Коло представља нелинеаран систем са јаком негативном повратном спрегом која обезбеђује динамичко (интегрално) уравнотежавање улазног напона импулсима који се генеришу помоћу фреквенцијски контролисаног моностабилног кола и амплитудског модулатора. Трајање моностабилног стања једнако је периоду напонског мерног сигнала.




Слика 5.29. Фреквенцијски управљани претварач у учестаност

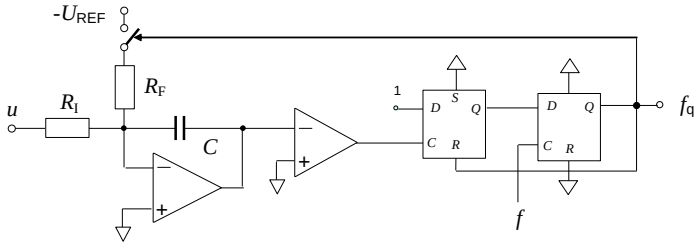
Сигнал који се са излаза множача доводи на улаз интегратора динамички се уравнотежава импулсима који се доводе са излаза импулсног амплитудског модулатора, чије је трајање једнако $T$, а амплитуда једнака $U_{REF}$:

$$\overline{u_m(t)} = \frac{U_{REF} T}{T_q} . \tag{5.70}$$

где је период осциловања претварача у учестаност. С обзиром на једначину 5.65 следи да ће средња вредност ових импулса бити сразмерна реактивној снази [14]:

$$F_q = \frac{\overline{u_m(t)}}{TU_{REF}} = \frac{k_m k_i}{2\pi U_{REF}} Q \cdot \tag{5.71}$$

Принципска електрична шема претварача приказана је на слици 5.30.




Слика 5.30. Принципска шема синхронизованог *u*/*f* претварача

С обзиром да период појављивања излазних импулса не може да буде краћи од периода синхронизационог сигнала (улазног напона), максимална теоријска вредност учестаности $F_q$ не може бити већа од $f$. Када се ради о обрачунском мерењу, ово ограничење не представља технички проблем, с обзиром да сам процес мерења (интеграције) траје веома дуго (месец дана). Међутим, када се ради о лабораторијском мерењу, при испитивању типа односно баждарењу бројила, потребно је да учестаност $F_q$ буде довољно висока да би се обезбедила задовољавајућа резолуција мерења и у кратким временским интервалима од неколико секунди. Овај проблем решава се применом множача учестаности. Најраспрострањенији начин множења учестаности заснован је на примени кола са фазном петљом (*phase-locked loop*, *PLL*).

$$f_n = n \cdot f \tag{5.72}$$

Перформансе еталона реактивне електричне снаге и енергије, реализованог на овом принципу, верификују се поређењем са калибрационим системом заснованим на примени струјног компаратора [15], [16]. Грешка нелинеарности у опсегу од 1% до 100% називне струје је мања од 15 ppm, а утицај учестаности 6 ppm/Hz [17].

## 5.5 МЕРЕЊЕ У СВРХЕ ОБРАЧУНА

Електрична енергија је производ који има друштвену, употребну и тржишну вредност, а који се од осталих роба разликује по томе што се не може држати на складишту. Она се мора потрошити (трансформисати у други облик) у истом тренутку када се производи. Ово обележје непосредно се одражава на функционисање електроенергетског система, као и на одређивање цене електричне енергије, на начин на који се продаја обавља, а самим тим и на функције мерне опреме. Вредност енергије битно зависи од тренутка у којем је испоручена. Због тога је неопходна додатна обрада резултата мерења у складу са усвојеним принципима система за обрачун трошкова за испоручену електричну енергију. Једноставнија обрада може се обављати аутономно, на месту мерења, аутоматски, према унапред дефинисаном алгоритму. У данашње време, међутим, обрачун трошкова за енергију испоручену великим потрошачима захтева и податке који се дефинишу (генеришу) у одговарајућем центру.

Развој обрачунских мерила је започео од мерила количине електрицитета (бројила са клатном и електрохемијских направа), да би, са стицањем нових знања у електротехници, довео до моторних бројила електричне енергије, која су већ 30-тих година двадесетог века постала доминантна, и чији је принцип рада још увек у употреби. Од њихове појаве је протекло више од стотину година и у стручној литератури детаљно су обрађени сви аспекти њихове конструкције и примене.

Стотину година након што су Едисон, Сименс, Феранти, Тесла и други својим проналасцима учинили да електрична енергија уђе у људске домове веома удаљене од места на коме се она производи, електроника је достигла ниво који је омогућио да се управљање дистрибутивном мрежом, мерење и обрачун трошкова за испоручену енергију у потпуности врше даљински.



Мерило електричне енергије, некад и сад

Усавршавање технологије интегрисаних кола унело је велике измене у методологију пројектовања мерних уређаја и допринело ширењу поља њихове примене. Незадрживи продор дигиталне технике, чак и у оним областима које су, не тако давно, представљале подручја апсолутне доминације аналогних решења, условио је значајне измене у области мерења. Остварили су се услови за сагледавање и дефинисање нових конструкција и концепција мерних уређаја и система. Микропроцесорска техника је отворила нове хоризонте и пружила неслућене могућности, не само у обради резултата мерења, него и при реализацији мерног процеса.

Још крајем 60-тих година двадесетог века технологија електронских компонената је достигла ниво који је омогућавао реализацију комерцијалних електронских уређаја за мерење електричне енергије. У области прецизних мерења електронска решења су веома брзо показала своје предности и било је само питање времена када ће класична бројила бити дефинитивно потиснута из примене. Стање је, међутим, било сасвим другачије када се радило о мерењу електричне енергије у такозваној широкој потрошњи - код потрошача као што су

домаћинства, занатске радионице, мањи погони и слично, који се енергијом напајају из дистрибутивне мреже на ниском напону. Први пут су електронска бројила[19] у области широке потрошње уведена у употребу у Јапану почетком седамдесетих година, у доба пре почетка енергетске кризе у свету, када се у Европи чак постављало питање оправданости мерења потрошње електричне енергије у широкој потрошњи. Прва електронска бројила широке потрошње на овим просторима развијена су почетком 80-тих година у Институту Михајло Пупин. У погледу метролошких својстава електронска бројила су превазилазила могућности индукционих[20], па су у међународним стандардима, који су се нешто касније појавили, одговарајући захтеви били строжи. Кроз деценијама уигравран процес производње, конструкција индукционог бројила практично је доведена до максимума савршенства, а цена до минимума. Имајући у виду њихову дуговечност, као и средства која су инвестирана у њихову производњу, могло се очекивати да ће ова врста уређаја још дуго бити у употреби.

Основне предности електронских бројила представљају ефикаснија технологија производње и могућност једноставне имплементације логичких функција уз минимално повећање производне цене. Прва комерцијална решења електронских бројила појавила су се у домену прецизних мерења, тамо где класична решења нису могла да задовоље све строже захтеве у огледу метролошких особина уређаја. У међувремену нова технологија је преузела водећу улогу и електромеханички уређаји полако прелазе у заборав.

Електронска трансформаторска бројила типа *PBO*, намењена за прецизно мерење активне и реактивне електричне енергије, која се преноси у једном или оба смера, развијена су у Институту Михајло Пупин за потребе мерења електричне енергије на ХЕ Ђердап 2. На основу резултата испитивања, тадашњи Савезни завод за мере и драгоцене метале издао је 1983. године одговарајуће решење – прво електронско бројило одобрено за употребу у Југославији. Производња ових бројила касније је пренета у МИНЕЛ.



Мерење потрошње електричне енергије представља проблем мерне технике, али и предмет законске метрологије. Бројила спадају у мерила која учествују у промету роба и услуга, која (као и мерна средства која се употребљавају за мерења у областима заштите здравља и опште безбедности, заштите животне околине, контроле и безбедности саобраћаја) могу да се користе и ставе на тржиште само ако су усаглашена са прописаним захтевима, ако су означена у складу са прописима и ако свако мерило "прати" прописана документација. Одговарајућим подзаконским актима прописују се захтеви које мерила одређене врсте морају да испуне,

---

[19] Електронско бројило електричне енергије (*electronic energy meter*) је мерни уређај у којем се информација о вредности пренете енергије добија на основу ефекта деловања мерних сигнала напона и струје на електронске (полупроводничке) елементе (*solid-state meter*). У нашем језику, на жалост, још увек се користи архаични назив "статичко" бројило који указује на конструкцију (а не на начин рада), односно истиче да уређај не садржи покретне делове. То је само условно тачно, јер приказни уређај (регистар) електронског бројила може да буде и електромеханички [18].

[20] У литератури се обично проналазак индукционог бројила везује за италијанског инжењера Ферариса (*Gallileo Ferraris*) који је 1988. године описао принцип мерења заснован на деловању фазно померених магнетних поља на метални диск (Ферарисов принцип). То је заправо индукциони мотор са малим бројем обртаја и великим клизањем, спрегнут са механичким бројачем обртаја. Треба имати у виду да је први модел индукционог мотора реализовао још 1883. године Никола Тесла, на бази идеје обртног магнетног поља коју је осмислио 1882. године.

поступак оцењивања усаглашености, означавање, исправе и документација које прате мерило.

Законска контрола мерила (*legal control of measuring instruments*), у најопштијем смислу, обухвата законске радње (*legal operation*), којима могу да подлежу мерила, као што су, на пример, одобрење типа и оверавање. **Тип мерила** *(patern of measuring instrument)* је израз којим се означавају мерила истог произвођача која су међусобно једнака у погледу намене и начина употребе, израде (принципа рада, облика саставних делова, материјала и технологије) и метролошких својстава (границе утврђених одступања), а могу се међусобно разликовати по мерном опсегу и називним вредностима.

**Одобрење типа** (*type approval*) је одлука од законске важности којом се одобрава стављање у промет и употреба одређене врсте мерила одређеног произвођача. Мерило може да се стави на тржиште само ако је усаглашено са прописаним захтевима, што се утврђује прописаним поступком. Документ којим се потврђује да је одобрење типа додељено назива се "уверење о одобрењу типа" (*type approval certificate*). Преглед броја бројила одобрених у нашој земљи у периоду од 2001. до 2009. године дат је на слици 5.31. Послове испитивања типа у Србији обавља Дирекција за мере и драгоцене метале [18].

**Оверавање мерила** (*verification of a measuring instrument*) је поступак који обухвата преглед и жигосање (*marking*) и/или издавање уверења о оверавању (*verification certificate*), којим се утврђује и потврђује да је мерило усклађено са законским захтевима. Може да се овери само мерило за које постоји одобрење типа. Оверавање се врши у складу са одговарајућим документима [19], [20], [21]. Послове оверавања могу да обављају овлашћена тела која имају одговарајући акт о акредитацији [22].




Слика 5.31. Одобрена бројила

## 5.5.1 ФУНКЦИОНАЛНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ОБРАЧУНСКОГ МЕРИЛА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Мерило електричне енергије је интеграциони инструмент који у току произвољно изабраног интервала посматрања (мерења), од неког почетног

тренутка $t_p$ до његовог краја $t_k$, одређује вредност интеграла производа тренутних вредности напона и струје у колу потрошача:

$$W[t_p, t_k] = \int_{t_p}^{t_k} p(t)dt = \int_{t_p}^{t_k} u(t)i(t)dt \cdot \tag{5.73}$$

Обрачунско мерило даје податке о измереној енергији преко:

- нумеричког приказивача,
- давача импулса за даљинско мерење,
- контролног излаза за потребе испитивања мерила.

Нумерички приказивач може да буде електронски дисплеј који приказује стање регистра или електромеханички бројчаник. Његовим очитавањем одређује се количина измерене електричне енергије:

$$W[t_p, t_k] = [N(t_k) - N(t_p)]\delta W\,, \tag{5.74}$$

где је $\delta W$ елементарна количина енергије која представља резолуцију приказивања измерене вредности, а $N(t)$ показивање регистра (бројчаника) у тренутку очитавања. Вредност $\delta W$ прилагођена је чињеници да је трајање мерног интервала дуго (номинално месец дана). Приликом прегледа бројила само се проверава да ли је тачан податак о константи бројила одређивањем односа прираштаја показивања регистра (бројчаника) и броја импулса добијених преко давача импулса за даљински пренос, док се тачност бројила испитује преко оптичког давача или импулсног излаза за даљински пренос.

Брзина промене садржаја регистра зависи од вредности електричне снаге којом се енергија преноси (мери). Средња вредност учестаности инкрементирања садржаја регистра током временског интервала у којем је бројило измерило енергију $W[t_p, t_k]$ једнака је:

$$f_R = \frac{N(t_k) - N(t_p)}{t_k - t_p} = \frac{W[t_p, t_k]}{\delta W(t_k - t_p)}\,, \tag{5.75}$$

одакле следи:

$$f_R = \frac{P}{\delta W}\left[\frac{\text{имп}}{\text{h}}\right] = \frac{P}{3600\ \delta W}\,[\text{Hz}]\,, \tag{5.76}$$

где је $\delta W$ резолуција очитавања регистра приказана у Wh, а $P$ средња вредност електричне снаге током интервала мерења, од $t_p$ до $t_k$, исказана у W:

$$P = \frac{1}{t_k - t_p}\int_{t_p}^{t_k} p(t)dt \cdot \tag{5.77}$$

На пример, вредност $\delta W$ једнака је 1 Wh за бројила која се прикључују преко мерних трансформатора (трансформаторска бројила) чија је називна (референтна) струја 1A, односно 10 Wh за бројила чија је називна струја 5 A. При називним вредностима мерних величина, инкрементирање бројчаника се врши сваких 20,78 s на бројилу чија је називна струја 1A, односно сваких 41,56 s на бројилу чија је називна струја 1A.

Давач импулса за даљинско мерење (*transmitting device*) у електронским бројилима је реле или елемент са оптичком спрегом (*optocoupler*). Давач је побуђен током одређеног временског интервала, сваки пут када бројило измери одређену количину електричне енергије.Учестаност активирања давача импулса, $f_{\text{I}}$, директно је сразмерна електричној снази $P$ коју бројило мери:

$$f_{\text{I}} = \frac{P}{C_{\text{I}}}\,[\frac{\text{имп}}{\text{h}}] = \frac{P}{3600\ C_{\text{I}}}\,[\text{Hz}]\,, \tag{5.78}$$

где је $C_{\text{I}}$ константа давача импулса у Wh/имп. Укупан број импулса $N_{\text{I}}$ генерисаних током интервала мерења сразмеран је количини протекле енергије:

$$W = N_{\text{I}} C_{\text{I}}\,[\text{Wh}]\,. \tag{5.79}$$

На овај начин омогућено је одмеравање енергије са резолуцијом која је за ред величине боља од резолуције коју обезбеђује бројчаник на самом бројилу. Осим тога, импулсни излаз бројила омогућује и једноставно спрезање бројила и испитне опреме, а тиме и аутоматизацију испитивања.

Код трансформаторских бројила, константе давача импулса за даљинско мерење су 0,5 Wh/имп за бројила чија је називна струја 5 A, односно 0,1 Wh/имп за бројила чија је називна струја 1 A. Називна вредност учестаности $f_{\text{I}}$ импулса на излазу за даљинско мерење је једнака 0,48112 Hz, независно од вредности називне струје (1A или 5 A). Трајање ових импулса је реда величине 100 ms.

Контролни излаз бројила (*test output*) намењен је за њихово испитивање приликом овере. Уобичајено је да излазни орган електронских бројила представља оптички давач импулса (светлећа диода) која даје светлосне импулсе чија је учестаност директно сразмерна електричној снази коју бројило мери:

$$f_{\text{L}} = PC_{\text{L}}\,[\frac{\text{имп}}{\text{h}}] = \frac{PC_{\text{L}}}{3600}\,[\,\text{Hz}]\,, \tag{5.80}$$

где је $C_{\text{L}}$ константа бројила у имп/Wh. Укупан број импулса $N_{\text{L}}$ генерисаних током интервала мерења сразмеран је количини протекле енергије:

$$W = \frac{N_{\text{L}}}{C_{\text{L}}}\,[\text{Wh}]\,. \tag{5.81}$$

На овај начин омогућено је одмеравање енергије са великом резолуцијом и у релативно кратким временским интервалима. За трансформаторска бројила чија је називна струја 5 A, на пример, константа импулса оптичког давача је 640 имп/Wh, односно 3200 имп/Wh за бројила чија је називна струја 1 A. Учестаност ових импулса при називним вредностима мерених величине једнака је 153,96 Hz, независно од вредности називне струје (1A или 5 A).

Практично, однос учестаности импулса оптичког давача, $f_{\text{L}}$, учестаности импулса на излазу за даљински пренос, $f_{\text{I}}$, и учестаности инкрементирања регистра односно бројчаника, $f_{\text{R}}$, представља карактеристику датог типа бројила. По правилу, то је однос целих бројева:

$$f_L : f_I : f_R = C_L : \frac{1}{C_I} : \delta W \,, \tag{5.82}$$

На пример, за трансформаторска бројила типа РВ чија је називна струја 5 А, важи:

$$f_L : f_I : f_R = 6400 : 20 : 1, \tag{5.83}$$

док је за бројила чија је називна струја 1 А:

$$f_L : f_I : f_R = 3200 : 10 : 1. \tag{5.84}$$

## 5.5.2 ЛОКАЛНА ОБРАДА

Бројило представља прву карику у ланцу мерења електричне енергије у сврхе обрачуна. Тарифним системом[21] за обрачун електричне енергије одређују се тарифни елементи и тарифни ставови за обрачун цена електричне енергије, начин израчунавања цена по тарифним ставовима, као и категорије и групе тарифних купаца у зависности од места предаје, начина мерења и других карактеристика продате електричне енергије [23].

Уређаји за локалну обраду података о потрошњи електричне енергије, по својој намени представљају, пре свега, инструменте тарифног система. Отуда потичу и основни задаци које они треба да обаве:

- тарифирање, односно селективно одмеравање утрошене електричне енергије у зависности од текућег тарифног става - практично се своди на приказивање измерене енергије за сваки тарифни став посебно;
- мерење снаге оптерећења - у обрачуну за електричну енергију испоручену већим потрошачима фигурише не само утрошена енергија него и просечна снага оптерећења односно њена максимална вредност (вршна снага);
- сумарно мерење - омогућује добијање податка о укупној ангажованој снази великих индустријских постројења која се снабдевају енергијом преко већег броја прикључака на енергетску мрежу;
- регистрација, односно запис података добијених мерењем за потребе постаквизиционе обраде (регионалног обрачуна, као и истраживања оптерећења и анализе рада електроенергетског система).

Неке од функција локалне обраде могу бити обављене у самом бројилу. Међутим, када је реч о мерилима која се уграђују код малих потрошача (домаћинстава), на бази класичних решења није било комерцијално изводљиво да се оствари обраду мерних података у складу са потребама тарифног система. Електроника је веома ефикасно решавала проблеме одмеравања електричне енергије у тарифном систему са већим бројем временских тарифних ставова. Омогућила је и посебно одмеравање утрошене енергије кад год је снага

[21] Тарифа је утврђена такса која се наплаћује за нека (значајна) добра и услуге. Назив потиче од арап. *ta'rifä*, обзнанити, објавити. Тарифни систем је систем обрачунавања којим се одређују тарифни елементи за наплату робе или услуга. Примењује се у електропривреди, даљинском грејању, водоводу и канализацији, пошти, телекомуникацијама, превозу...

потрошача већа од задате вредности. Међутим, имплементирањем математичких функција у само бројило не могу се решити сви проблеми обраде обрачунских података, посебно у случају потрошача са већим бројем мерних места на једној локацији.

Дуги низ година функције локалне обраде обављали су разни електромеханички уређаји изведени као самосталне функционалне целине: сумарна бројила, вишетарифни бројчаници, бројчаници прекомерне потрошње, показивачи максималне вредности, писачи, бушачи, нумерички штампачи итд. Ова технологија, међутим, није била у стању да на задовољавајући начин испуни све комплексније захтеве који се у погледу обрачуна за утрошену електричну енергију постављали. Прва генерација електронских уређаја за локалну обраду података о потрошњи електричне енергије представљала је, ипак, само промену технологије. У функционалном погледу она није донела ништа ново. Касније достигнућа у области интегрисаних електронских кола створила су услове не само за надмашивање могућности класичних решења, већ и за сагледавање и дефинисање другачије концепције система за обрачунско мерење електричне енергије.

Уређаји развијани на принципима рачунарске технике пружили су могућност обављања на самом објекту веома сложене обраде података који карактеришу обим и режим потрошње електричне енергије, програмабилност радних параметара, као и њихово лако прилагођавање. Присуство микропроцесора омогућило је и увођење контролних функција као што је, на пример, сигнализација прекорачења задате вредности електричне снаге, односно увођење програма за контролу снаге оптерећења.

Основне функције додатне опреме на обрачунским мерним местима су:

- **аквизиција** података о утрошеној енергији, добијених од једног или више бројила у облику електричних сигнала који представљају нормализоване импулсе или кодиране поруке; и
- **регистрација**, запис података о измереној енергији у сваком појединачном мерном интервалу (стандардно 15 минута) током одређеног периода.

Подаци се уписују на преносиви меморијски медијум (диск, меморијска картица, *FLASH* меморија) или се чувају у меморији уређаја одакле се, са циљем њиховог прослеђивања обрачунском центру, очитавају посредством одговарајућег преносивог читача.

Најједноставнији начин за преношење мерне информације од бројила до уређаја за локалну обраду заснован је на примени импулсне технике. У бројило се уграђује давач импулса (*impulse device*). Појава сваког импулса означава да је у временском интервалу који је протекао од појаве претходног импулса регистрована тачно одређена количина енергије која се мери. Бројевна вредност ове елементарне количине енергије $\Delta W$ представља константу давача импулса $C_{\mathrm{I}}$ изражену у одговарајућим јединицама (Wh/имп, varh/имп или VAh/имп). Укупан број импулса генерисаних у току неког интервала времена, $N$, сразмеран је количини електричне енергије измерене током интервала посматрања:

$$W\left[t_0, t\right] = C_{\mathrm{I}} N\left[t_0, t\right] \tag{5.85}$$

Уређај помоћу којег се остварује жељена обрада садржи пријемник (*receiver*) импулса и одговарајући функционални блок помоћу којег се (са циљем одређивања и визуелног приказа вредности измерене енергије или

средње снаге мерене током одређеног временског периода) врши претварање (пресликавање) информације представљене у импулсном облику у информацију представљену у дигиталном облику.

Карактеристична обележја савремених уређаја, заснованих на примени технологије интегрисаних електронских кола, су модуларност капацитета и функција, висока пузданост, флексибилност и погодност за одржавање. Електронски уређаји, осим обављања функције аквизиције и регистрације, остварују и разноврсну обраду чиме је омогућено да корисник на лицу места добије све релевантне обрачунске податке, као и податке који карактеришу режим потрошње електричне енергије. Локална обрада омогућује:

- формирање изведених величина као алгебарских сума изабраних улаза са коефицијентима тежине који одговарају примарним константама бројила на појединим мерним местима;
- одређивање вредности ангажоване снаге као просечне снаге у предефинисаном мерном интервалу (интервал интеграције), за свако мерно место (бројило), односно за сваку изведену величину (суму);
- формирање кумулативних вредности по бројилу и тарифи, од тренутка пуштања уређаја у погон или замене појединог бројила;
- налажење максимума средње ангажоване снаге по тарифама, за сваки од улаза и максимума сумарних снага за сумарне величине;
- издавање сигнала аларма у случају детекције нерегуларног статуса уређаја;

По правилу, велики индустријски комплекси напајају се енергијом из преносне мреже на више места, на којима су уграђене независне обрачунске мерне групе које омогућују мерење активне и реактивне електричне енергије. Тарифни систем дозвољава да се у енергетским постројењима, у којима се произведена или потрошена енергија мери на више места, извршти обједињавање мерења са циљем формирања јединственог обрачуна. Сумарно бројило је уређај који омогућује акумулирање (одбројавање) и сабирање електричних импулса из више извора са једнаким или различитим сачиниоцима тежине (импулсне константе). Сумирање импулса добијених из појединачних бројила енергије (давача импулса) омогућује добијање података о укупној потрошњи по тарифама.

Захтев великог броја корисника да има на располагању могућност симултаног коришћења разноврсних апарата веће снаге намеће обавезу произвођачу да енергетски систем има адекватну резерву у снази и одговарајућу дистрибутивну мрежу. Са становишта производње електричне енергије, резерва снаге је нужно зло, па се настоји да она буде минимална. У складу са тиме формира се и тарифна политика која намеће неке форме ограничења потрошачу у погледу снаге прикљученог оптерећења. Код великих потрошача то се остварује помоћу посебних уређаја који региструју максимум снаге оптерећења у току обрачунског периода.

Снага којом потрошач оптерећује електроенергетску мрежу (*power demand*) одређује се на основу просечне снаге мерене у временском

интервалу усредњавања (*demand integration period*) чије је трајање унапред дефинисано $T_{\text{M}}$. С обзиром да је $T_{\text{M}} >> T$, користи се формула:

$$P_{\text{M}} = \frac{W\left[t_0, t_0 + T_{\text{M}}\right]}{T_{\text{M}}}, \tag{5.86}$$

у којој $T_{\text{M}}$ представља константну вредност, тако да се мерење своди на одређивање вредности излаза интегратора снаге који је на почетку мерења доведен на нулу. Стандардне вредности интеграционог периода су 10, 15, 30 и 60 минута. У нашој земљи он износи 15 минута (900 s). Средња петнаестоминутна снага $P_{15}$ одређена је формулом:

$$P_{15} = 4W_{15}, \tag{5.87}$$

где је $W_{15}$ измерена вредност енергија пренете током петнаестоминутног мерног интервала.

Одређивање просечне вредности снаге оптерећења врши се на основу импулса добијених из бројила електричне енергије. На крају сваког мерног интервала податак о измереној средњој снази уписује се у меморијски регистар за "текућу" вредности просечне снаге у претходном мерном интервалу. Измерена вредност уписује се и у меморијски регистар за детектовање и приказивање максимума, уколико је већа од до тада регистроване максималне вредности. Ово упоређивање врши се на крају сваког мерног интервала. Максимална вредност средње снаге може да се утврђује за сваку тарифу посебно. Податак мора да остане сачуван и у случају прекида напајања уређаја.

С обзиром на могућност једноставне доградње логичких функција електронско бројило може ефикасно да допринесе решавању проблема тарифне политике. Могуће је посебно одмеравање утрошене енергије кад год је снага потрошача већа од задате вредности. Уређаји који то омогућују су били у употреби већ у првој половини двадесетог века, али је тек електроника обезбедила еихову ефикасну реализацију, без утицаја на перформансе основног мерног система. С обзиром да је информација о вредности измерене електричне снаге на приказана у облику учестаности појављивања импулса, компарација се своди на одмеравање временског интервала између два суседна импулса.

Основни тарифни елементи за обрачун испоручене електричне енергије су: обрачунска снага, преузета активна енергија и прекомерно преузета реактивна енергија. Обрачунска снага утврђује се према највећој вредности просечне снаге у току месечног обрачунског периода - вршно оптерећење (*maximum demand*). Ако се мерење вршног оптерећења потрошача обавља на више мерних места тада, уколико потрошач обезбеди одговарајућу техничку могућност за сабирање истовремених оптерећења, обрачунска снага одређује се на основу максималне вредности укупног оптерећења. У противном, укупно вршно оптерећење представља збир вршних оптерећења на свим местима мерења.

Прекомерна реактивна енергија дефинисана је као позитивна разлика између преузете реактивне енергије и реактивне енергије која одговара фактору снаге једнаком 0.95.

Одмеравање преузете енергије према тарифним ставовима (тарфирање) се по правилу обавља у самом бројилу а понекад у посебним уређајима (вишетарифни бројчаници).

Уклопни часовник (*time switch*) је сатни уређај чији се рад заснива на принципу периодичног понављања унапред задатог програма уклапања. Намењени су за управљање потрошачима, вишетарифним бројилима[22] и показивачима вршног оптерећења (*maximum demand indicator*). Састоје се од сатног механизма и елемента за уклапање (прекидача), који се по унапред задатом програму побуђује (отвара и затвара) у одређено доба, одређеног дана, током године. Мерни период $T_{\text{M}}$ електромеханичког уклопника максимума састоји се од времена укључења и времена искључења показивача максимума. Временску базу савремнаих уклопних часовника одређује електронски осцилатор чија је учестаност осциловања одређена кристалом кварца.

Текући тарифни став бројила односно мерне групе[23], као и трајање мерног периода могу се задавати даљински, посредством одговарајућег система за даљинско командовање. Широку примену у пракси има систем мрежне тонфреквентне команде (МТК) који као преносни медујум користи саму енергетску мрежу преко које се врши и напајање потрошача.

Локална обрада може да обухвати и одређивање просечне вредности фактора снаге $\lambda$ на основу измерених односно израчунатих просечних вредности активне $P$ и реактивне снаге $Q$ током одређеног временског периода:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} . \tag{5.88}$$

## 5.5.3 РЕГИСТРАТОРИ ИМПУЛСНИХ ПОДАТАКА

Основне функције регистратора снаге и енергије представљају:

- прикупљање података о утрошеној енергији, добијених на више мерних места у облику електричних сигнала који представљају нормализоване импулсе или кодиране поруке; и

- запис низа вредности које представљају износ енергије протекле у појединачном мерном интервалу унапред одређеног трајања (интервал интеграције $T_{\text{M}}$):

$$\left\{\Delta W_{\text{ij}}\right\};\ i = 1 \ldots I;\ j = 1 \ldots J\ , \tag{5.89}$$

где је i редни број улаза који одговара мерењу одређеног облика енергије (активне, реактивне или привидне) у одређеном смеру преноса, $I$ је укупан број улаза регистратора, а $j$ редни број интервала интеграције у текућем обрачунском периоду.

Запис мерних података се врши складиштењем (меморисањем на погодном медијуму) низа вредности које представљају број импулса $\Delta N_{\text{ij}}$,

---

[22] Вишетарифно бројило је бројило с више регистара (*multi-tariff register*), од којих сваки постаје активан у одређеним временским интервалима који одговарају различитим тарифним ставовима.

[23] Класична мерна група се састоји од бројила електричне енергије и уклопног часовника.

регистрованих на *i*-том улазу током *j*-тог интервала интеграције, или одговарајући износ енергије, $\Delta W_{ij}$:

$$\Delta W_{ij} = CP_i \cdot \Delta N_{ij};\ i = 1...I;\ j = 1...J\ , \tag{5.90}$$

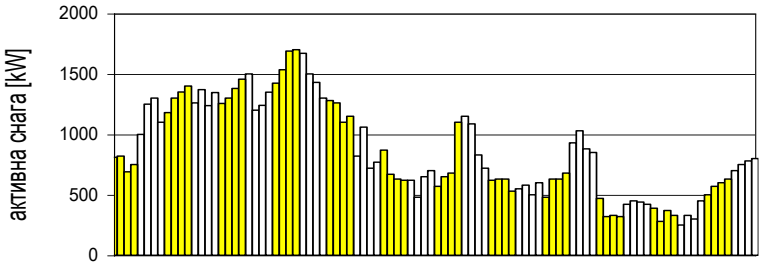
где је $CP_i$ тежински коефицијент импулса на *i*-том улазу који представљају елемантарне количине енергије испоручене потрошачу, а одговарају мерилима на појединим мерним местима[24]. Подаци се уписују на преносиви меморијски медијум или у батеријски напајану меморију уређаја, одакле се накнадно, са циљем њиховог прослеђивања центру, очитавају посредством посебног уређаја.

Осим ових основних функција, прикупљања и архивирања вредности добијених мерењем, регистратори остварују и нумеричку обраду која омогућује да се на самом месту мерења добију и подаци који карактеришу обим и режим потрошње електричне енергије. На основу регистрованих вредности $\Delta W_{ij}$ одређује се вредност ангажоване снаге $P_{ij}$ као просечне снаге у j-том интервалу интеграције:

$$P_{ij} = \frac{\Delta W_{ij}}{T_M}, \tag{5.91}$$

што омогућује омогућује одређивање функције потрошње (*load profile*) (слика 5.32), и максималне вредности $maxP_i$ ангажоване снаге у одређеном периоду:

$$\boldsymbol{max}\ P_i = \boldsymbol{max}\left\{P_{ij}\right\}. \tag{5.92}$$




Слика 5.32. Дијаграм потрошње

Са циљем провере обраде мерних података, за сваки од улаза израчунавају се збирне (кумулативне) вредности од одређеног почетног тренутка (пуштања уређаја у погон или замене појединог бројила), по појединим тарифним ставовима:

$$WVT_i = WVT_i(t_0) + \sum_{j=1}^{J} CS_i \Delta N_{ij}\ ,\ \text{у доба важења тарифног става } \textit{VT}, \tag{5.93}$$

$$WMT_i = WMT_i(t_0) + \sum_{j=1}^{J} CS_i \Delta N_{ij}\ \text{ у доба важења тарифног става } \textit{MT}, \tag{5.94}$$

где су $WVT_i(t_0)$ и $WMT_i(t_0)$ почетна стања одговарајућих регистара бројила на i-том улазу, за тарифни став *VT* и *MT*, респективно, а $CS_i$ представља секундарну константу импулса[25]. Вредности $WVT_i$ и $WMT_i$ пореде се са очитавањем одговарајућих регистара бројила на мерном месту.

---

[24] Ови сачиниоци, којима треба помножити сваки импулс бројила да би се одредила елементарна количина испоручене енергије, називају се “примарне константе”.

[25] Секундарна константа одговара нормализованим улазима бројила и износи 0,5 Wh/имп за бројила чија је називна струја 5 A, односно 0,1 Wh/имп за бројила чија је називна струја 1 A.

Локална обрада омогућује мерење укупне енергије у систему са више улаза (мерних места) формирањем виртуелних мерних места као алгебарских[26] сума изабраних улаза са коефицијентима тежине $CP_i$ који одговарају примарним константама на појединим мерним местима. Биланс енергије током j-тог интервала интеграције, $\Delta W_{sj}$, одређује се на основу прираштаја еквивалентног броја импулса виртуелног бројила:

$$\Delta W_{sj} = \sum_{i=1}^{I} a_i \cdot CP_i \cdot \Delta N_{ij};\ a_i \in \{-1, 0, 1\},\ s = 1 \ldots S \cdot \tag{5.95}$$

где је $\Delta N_{ij}$ број импулса регистрованих на i-том улазу током j-тог интервала интеграције, а $CP_i$ примарна константа импулса на i-том улазу.

На основу укупне енергије $\Delta W_{sj}$, одређују се вредност просечне укупне снаге у j-том интервалу интеграције:

$$P_{sj} = \frac{\Delta W_{sj}}{T_M}\ , \tag{5.96}$$

максимална вредност $maxP_s$ просечне укупне снаге у изабраном периоду:

$$\boldsymbol{max}\ P_s = \boldsymbol{max}\{P_{sj}\}\ , \tag{5.97}$$

и релативно учешће појединих улаза (потрошача) у достигнутом максимуму:

$$\eta_i = \frac{P_i(t_{MAX})}{\boldsymbol{max}\ P_s}\ . \tag{5.98}$$

За потребе обрачуна укупних трошкова за испоручену електричну енергију, за сваку виртуелну (сумарну) величину одређују се кумулативне вредности од тренутка последњег очитавања. Измерене и израчунате вредности приказују се на алфанумеричком приказивачу на командној плочи уређаја и штампају у облику извештаја унапред одређеног формата.

Регистратор APEC, произведен у институту Михајло Пупин (слика 5.33), атестиран је и прихваћен за употребу у системима за обрачунско мерење потрошње електричне енергије у објектима Електропривреде Србије [24].




Слика 5.33. Регистратор импулсних података

## 5.5.4 ТАРИФНИ СИСТЕМ ОБРАЧУНА ТРОШКОВА ЗА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГИЈУ

Ради омогућавања јединства тржишта електричне енергије, осигурања технолошког јединства електроенергетског система, рационалне употребе

[26] Зависно од смера преношења енергије поједини чланови у суми могу да буду позитивни или негативни.

електричне енергије, развоја и оптималног коришћења електроенергетских капацитета, као и обезбеђивања уредног снабдевања потрошача квалитетном електричном енергијом, прописима се утврђују основни принципи за испоруку и продају електричне енергије који се примењују на испоручиоце, купце и потрошаче електричне енергије[27] са циљем остваривања заједничког интереса електропривреде и потрошача. Место предаје електричне енергије је место прикључења потрошача на мрежу испоручиоца. Место мерења је место на којем се мери електрична енергија коју потрошач преузима од испоручиоца. На једном месту предаје може бити више места мерења.

Испорука електричне енергије врши се под условима и на начин утврђен законом и другим прописима и општим условима испоруке. Оператор система дужан је да одржава напон у систему уз допуштено одступање од ±10 % називног напона за све напонске нивое изузев 400 kV, где је допуштено одступање од ±5 % називног напона [25].

Цена електричне енергије изражава се тарифним ставовима по тарифним елементима за обрачун електричне енергије и то по категоријама, степенима и групама испоруке, односно потрошње, који се дефинишу тарифним системом. Основа за утврђивање релативних односа цена појединих категорија потрошње су укупни трошкови који настају до места испоруке електричне енергије (трошкови производње, преноса и дистрибуције)

**Категорије купаца** одређују се у зависности од називног напона мреже са које се предаје електрична енергија, врсте мерних уређаја, начина мерења и других критеријума утврђених тарифним системом. Категорије купаца су:

1) потрошња на високом напону;
2) потрошња на средњем напону;
3) потрошња на ниском напону;
4) широка потрошња;
5) јавно осветљење.

У категорији "Потрошња на високом напону" су купци којима је место предаје на преносној или дистрибутивној мрежи високог напона - 110 kV или вишег. У категорији "Потрошња на средњем напону" су купци којима је место предаје на дистрибутивној мрежи напонског нивоа вишег од 1 kV, а нижег од 110 kV. У категорији "Потрошња на ниском напону" су купци којима је место предаје на дистрибутивној мрежи напонског нивоа до 1 kV и којима се преузета активна снага, активна и реактивна енергија утврђују мерењем. У категорији "Широка потрошња" су купци којима је место предаје на дистрибутивној мрежи напонског нивоа до 1 kV, којима се активна снага утврђује према одобреној снази прикључка, у складу са тарифним системом, преузета активна енергија утврђује мерењем, а реактивна енергија не мери. У категорији "Јавно осветљење" су купци који електричну енергију користе за осветљење улица, тргова, тунела, пешачких пролаза, паркова, путева, историјских и других обележја, уређаја за путну сигнализацију и друга потрошња за осветљење јавних површина и јавних објеката и купци који електричну енергију користе за осветљавање рекламних паноа, којима се преузета активна енергија утврђује мерењем или обрачуном према времену преузимања, а активна снага и реактивна енергија се не мере.

Тарифни елементи су:

1) "снага";
2) "активна енергија";
3) "реактивна енергија";

---

[27] Испоручиоци електричне енергије су електропривредна предузећа која електричну енергију коју су произвела или преузела продају купцима. Купци електричне енергије преузимају енергију ради коришћења за своје потребе или ради испоруке потрошачима. Потрошачи електричне енргије су купци који преузету електричну енергију користе искључиво за своје потребе.

4) "мерно место".

Месечна максимална активна снага за једног купца се утврђује мерењем средње петнаестоминутне активне снаге током календарског месеца. Ако један купац електричну енергију преузима из више трафостаница 10/0,4 kV/kV који се напајају из исте трансформаторске станице 35/10 kV/kV, месечна максимална активна снага је највећи збир једновремених средњих петнаестоминутних активних снага измерених на свим мерним местима у трафостаницама 10/0,4 kV/kV на истом напонском нивоу, ако су остварене техничке могућности за утврђивање тог збира. Купцима из категорије Широка потрошња, активна снага се обрачунава за календарски месец, по правилу, према одобреној снази - вршном оптерећењу утврђеном одобрењем за прикључење купца на систем, односно електроенергетском сагласношћу. Снага се изражава у киловатима (kW).

Активна енергија једног купца је сума активних енергија које су измерене на свим мерним местима током обрачунског периода у оквиру исте категорије и групе купаца. Активна енергија се изражава у киловатчасовима (kWh).

Реактивна енергија једног купца је сума реактивних енергија које су измерене на свим мерним местима током обрачунског периода у оквиру исте категорије и групе купаца. Реактивна енергија се изражава у киловарчасовима (kvarh).

Тарифни елемент "мерно место" је укупан број мерних места на којима се купцима мери продата електрична енергија.

Основни критеријуми за стимулацију потрошача на рационално коришћење капацитета електроенергетског система изражени су диференцирањем цена на тарифне ставове за обрачуне електричне енергије, по тарифним елементима. **Тарифни ставови** према добу дана су "виши дневни тарифни став за активну енергију" који одговара интервалу већег оптерећења, и "нижи дневни тарифни став за активну енергију" који одговара интервалима мањег оптерећења. За тарифне купце из категорије " широка потрошња ", тарифни ставови за активну енергију утврђују се и у зависности од месечне количине, намене и начина потрошње активне енергије:

1) "тарифни став за рационалну потрошњу" ( до 350 kWh, зелена зона);
2) "тарифни став за умерену потрошњу" (до 1600 kWh, плава зона);
3) "тарифни став за велику потрошњу" (преко 1600 kWh, црвена зона).

Начин мерења, обрачунски период, као и начин обрачуна и наплате продате електричне енергије, уређују енергетски субјект и купац, у складу са законом, прописима о условима испоруке електричне енергије, правилима о раду преносног и дистрибутивног система, издатим одобрењем за прикључење на преносни и дистрибутивни систем и тарифним системом.

# ЛИТЕРАТУРА


1 *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and asotiated terms (VIM), 2007, 3.7, http://www1.bipm.org/en/publications/guide/vim.html*.

2 *P. Bošnjaković, B. Stojanović, P. Miljanić, V. Petrović, Elektronski instrument za merenje aktivne i reaktivne snage u trofaznim sistemima naizmenične struje, ETAN, 1984, Zbornik radova Sv*. 2, s. 83.-88.

3 П. Бошњаковић, Умеће мерења, ВИШЕР, 2011, с. 268.

4 *E. Goldberg, A high-accuracy time-division multiplier, RCA/Review, Sept. 1952*.

5 *P. Miljanic, B. Stojanovic, and P. Bosnjakovic, "The development of a high precision time-division power meter," in Dig., CPEM 84*, 1984, pp. 67–68.

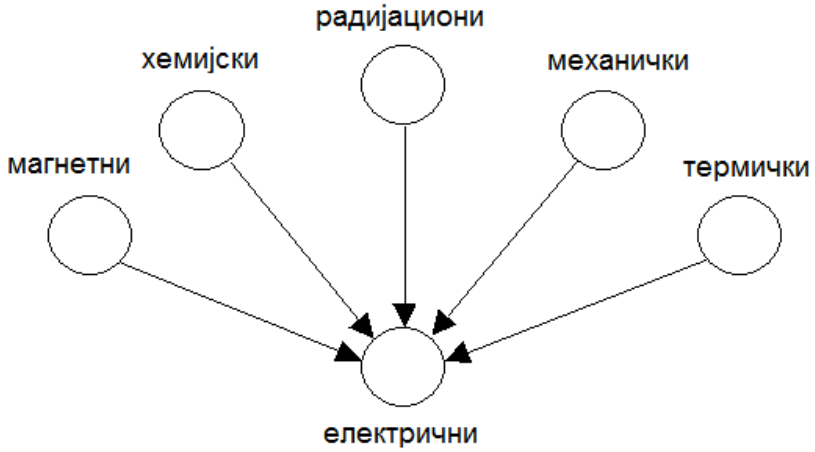
6 *W. J. M. Moore, E. So, N. M. Oldam, P. N. Miljanic, and R. Bergeest, "An international comparison of power meter calibrations conducted in* 1987," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 38, pp. 395–401, *Apr.* 1989.

7. *FLUKE 6105A*, *Calibrator*.

8 *S. Kusui, Y. Ikeda, An Electronic Watthour Meter Using Diode Arrays, IEE MATES, Conference Publication No* 92, l972.
9 *B. Stojanovic, P. Bosnjakovic, P. Miljanic, V. Petrović, Kućno elektronsko brojilo električne energije, ETAN, 1983, Zbornik radova, Sv. 2, str.3-10*.
10 *P.Bosnjakovic, B.Stojanovic, P.Miljanic, A New Approach to Electrical Energy Measurement, 14th Conference on Precision Electromagnetic Measurements,1984, Proceedengs CPEM/84, pp.73-74*.
11 П. Бошњаковић, Развој еталона јединице реактивне електричне снаге и енергије, Техника, год 57, бр 3, 2002, Стандардизација, квалитет и метрологија, год 2, бр 3, стр. 1-10, 2002.
12 *B.Đokić, E.So, P.Bošnjaković: "A High Performance Frequency Insensitive Quadrature Phase Shifter and its Application in Reactive Power Measurements," IEEE Instr. And Meas. Conf, Proceedengs IMTC98, pp. 807-811.*
13 *P. Bošnjaković, B.Đokić, The Development of Precision Var-hour Meter, Conference on Precision Electromagnetic Measurements, CPEM 1990, Ottawa, Kanada, pp 322-333.*
14 *P.Bošnjaković, B.Djokić, "Reactive energy measurement using frequency controlled analog-to-pulse-rate converter", Archiv fur Elektrotechnik 75 (1992), pp 131-135.*
15 *P. Bošnjaković, B. Đokić, Novo rešenje problema elektronskog merenja reaktivne električne energije u jednofaznim i višefaznim sistemima, Elektroprivreda, Vol. XLIV, br. 9-10, 1991, s 361-366*
16 *Đokić B., Bošnjaković P., Begović M.: "New Method for Reactive Power and Energy Measurement," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 41, No. 2, 1992, pp. 280-285.*
17 *B.Đokic, P.Bošnjaković: "A high accuracy reactive power and reactive energy meter", Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), 81, Feb. 1998, pp. 41-44.*
18 Реф 3, с 320.
19 Метролошко упутство за оверавање електронских (статичких) вишефункционалних бројила електричне енергије, „Гласник ЗМДМ", бр. 1/2007
20 *Pravilnik o brojilima reaktivne električne energije klase tačnosti 2 i 3, "Sl. glasnik RS", br*. 118/2013.
21 *Pravilnik o overavanju merila, "Sl. glasnik RS", br*. 1/2012.
22 Правила акредитације, АТС ПА-01, 2010.
23 Тарифни систем за обрачун електричне енергије за тарифне купце, "Службени гласник РС", 1/2007.
24 P. Bošnjaković, D. Šuvaković, V. Vučurević, M. Jerotić, Registracija impulsnih podataka u sklopu merenja električne energije sa aspekta primene savremenih tehnologija i implementiranja funkcija daljinskog merenja, Združena elektroprivreda Srbije, 1992.
25 Уредба о условима испоруке и снабдевања електричном енергијом, "Сл. гласник РС", бр. 63/2013.

# 6.
# СЕНЗОРИ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА

При конструкцији електричних сензора неелектричних величина примењују се различити начини трансформације својстава процеса, односно различите методе претварања енергије из мерног окружења, на основу познатих физичких закона, у електрични домен. Основни облици енергије одређују шест домена из којих потичу сигнали који се мере и обрађују (слика 6.1):




Слика 6.1. Претварање сигнала из различитих домена у електрични

- домен радијационог сигнала се односи на сва зрачења, са интензитетом, фреквенцом, поларизацијом и фазом као најважнијим параметрима;
- домен механичког сигнала се односи на спољашње параметре објекта као што су позиција, димензије, брзина и сила;
- домен термичког сигнала има само један сигнал – температуру објекта;
- домен магнетног сигнала има само један битан параметар – јачину магнетног поља;
- домен хемијског сигнала, односи се на унутрашњу структуру материје, са концентрацијом, кристалном структуром и агрегатним стањем;
- домен електричног сигнала се односи на електричне параметре: напон, струју, отпор, капацитет, индуктивност и друге.

Сензори,односно мерни претварачи се међусобно веома разликују и то како по принципу рада, тако и по сложености конструкције. Једноставнији су

сензори код којих неелектрична мерена величина непосредно делује на промену електричних параметара сензора. Код сложенијих сензора, претварање неелектричне величине у електрични сигнал врши се у две или више фаза. С обзиром на веома широку област примене, и веома различите физичке појаве или ефекте који се користе за претварање мерене неелектричне величине у електрични сигнал (слика 6.2), постоји више класификација сензора.

| Физичка појава, ефекат или својство | | | |
|---|---|---|---|
| | Пироелектрични ефекат | Температура у електрицитет | Генерисање наелектрисања на површини кристала при повећању температуре |
| | Термоелектрични ефекат | Топлотна енергија у емисију електрона | Одвајање електрона са површине метала при загревању у вакууму |
| | Фотогалвански ефекат | Светлост у електрицитет | Појава слободних електрона и електромоторне силе у осветљеном p-n споју |
| | Зебеков ефекат | Температура у електрицитет | Генерисање електромоторне силе у колу са два метала, при чему су температуре спојева различите |
| | Фотоотпорни ефекат | Светлост у електрични отпор | Промена електричне отпорности осветљеног полупроводника |
| | Холов ефекат | Магнетизам и електрицитет у електрицитет | Настаје разлика потенцијала на површини полупроводника када тече струја, настаје магнетно поље чији је правац нормалан на правац струје |

Слика 6.2. Физички ефекти примењени у сензорима са електричним излазом

Као што је већ поменуто у трећем поглављу ове књиге ("Мерења у индустрији"), најчешћа је подела на **пасивне** сензоре, који захтевају додатни извор енергије и **активне** сензоре који енергију узимају из медијума чије стање одражавају (мере). Такође је назначено да при мерењима у индустријским условима (процесним мерењима) највећи број сензора којима се мерена неелектрична величина трансформише у електрични сигнал, представља пасивне електричне елементе чији се параметри одређују (мере) уметањем сензора у одговарајуће електрично коло, због чега носе назив и **параметарски сензори**.

**Пасивни сензори** као излазну величину дају промену неког електричног параметра: отпорности $R$, индуктивности $L$ или капацитивности $C$, који се мењају под утицајем мерене величине, при чему отпорнички сензори имају најширу примену.

**Активни сензори** као излазни сигнал имају електромоторну силу или струју која се генерише директно под утицајем неелектричне величине. У ову групу спадају на пример: фотоелементи, где је електромоторна сила директна последица осветљености, пиезоелектрични претварачи, где је струја сразмерна притиску на претварач, или индукциони претварачи, где је индукована ems сразмерна брзини обртања, транслаторном кретању или вибрацијама.

# 6.1 ОТПОРНИЧКИ СЕНЗОРИ

**Отпорнички сензори** се примењују за мерење величина које су у вези са деловањем механичке силе или температуре. Праве се од метала или полупроводника. У наставку ће бити представљен принцип рада типичних представника отпорних сензора. Отпор металних сензора одређује се на основу формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{6.1}$$

где је $R$ [Ω] отпор на номиналној температури амбијента ($t$ = 20 °C), $\rho$ [Ω$m$] је специфични отпор, који зависи од особина материјала, од кога је отпорник направљен, $l$ је дужина отпорника [$m$], и $S$ [$m^2$] је попречни пресек отпорника.

Деловање механичке силе одражава се на отпорнички сензор као промена његове дужине $l$ и пресек $S$. Осетљивост на промену дужине $l$ је константна:

$$\frac{\Delta R}{\Delta S} = \frac{\rho}{S} \tag{6.2}$$

док је осетљивост на линеарну промену попречног пресека нелинеарна:

$$\frac{\Delta R}{\Delta S} = -\rho \frac{l}{S^2} \tag{6.3}$$

Основно својство свих отпорника је да им отпор у мањој или већој мери зависи од температуре. Зависност отпора од температуре је непожељан ефекат када је у питању мерење механичких величина, али се користи за реализацију температурних сензора. У општем случају промена отпора са температуром је експоненцијална:

$$R_t = Ae^{\alpha T} \tag{6.4}$$

где су: $A$ [Ω] константа, α [1/°C] температурни коефицијент и $T$ [°C] температура. Обично се промена отпора посматра у односу на неку референтну температуру $T_0$, најчешће у односу на $T_0$ = 0 °C или $T_0$ = 20 °C, тако да отпор на температури $T$ може да се израчуна на основу

модификоване једначине:

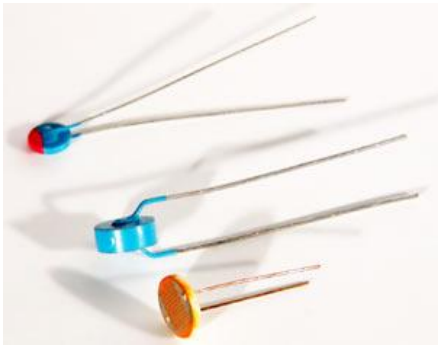
$$R_t = R_0 e^{\alpha(T-T_0)} \tag{6.5}$$

Када се претходна једначина развије у Тејлоров ред, трансформише се у полином $n$ - тог степена:

$$R_t = R_0\left[1+\alpha(T-T_0)+\beta(T-T_0)^2+...\right] \tag{6.6}$$

где је $R_t$ отпор на актуелној температури $T$, $R_0$ отпор на референтној темеператури $T_0$, а $\alpha$ и $\beta$ су температурни коефицијенти отпора. Анализа полинома показује да је температурна осетљивост отпорничких сензора: $\Delta R / \Delta \mathrm{T}$ нелинеарна. За метале је ова осетљивост позитивна, а за полупроводнике је негативна или позитивна. За примену у мерној техници најзначајнији су метали и полупроводници који имају константну осетљивост.

**Термистор** је осетљиви отпорник који се прави од чистог германијума, оксида метала хрома, кобалта, гвожђа, никла и других. Термистори имају веће отпоре у односу на отпоре метала за исту температуру. За већину термистора отпор опада са порастом температуре, што значи да је температурни коефицијент отпора негативан. Такви термистори се називају NTC отпорници (*Negative Temperature Coefficient*). Температурни коефицијент термистора може бити и позитиван, као што је код метала. Тада је реч о PTC-отпорницима (*Positive Temperature Coefficient*). Термистори најчешће имају облик диска, прстена или цилиндра (слика 6.3).



Слика 6.3. Примери разних облика термистора

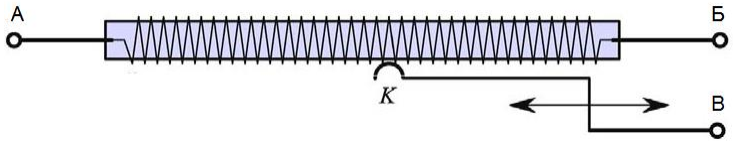
Код **полупроводничких отпорника** интензитет осветљености има утицај на промену отпора. Унутрашњи отпор $R_u$ већине полупроводника линеарно се смањује са повећаем интензитета осветљености. То је унутрашњи фотоефекат. Од полупроводника са израженим фотоефектом се праве фотоотпорници, који користе за реализацију фотосензора. Промена унутрашњег отпора $\Delta R_\mathrm{u}$ фотосензора у зависности од промене интензитета осветљености $\Delta E_\mathrm{s}$ је осетљивост, која је константна:

$$\frac{\Delta R_u}{\Delta E_S} = -k\left[\frac{\Omega}{lx}\right] \tag{6.7}$$

Осетљивост отпорника на деловање силе готово је занемарљива. Међутим, фотоотпорник је веома осетљив на деловање температуре.

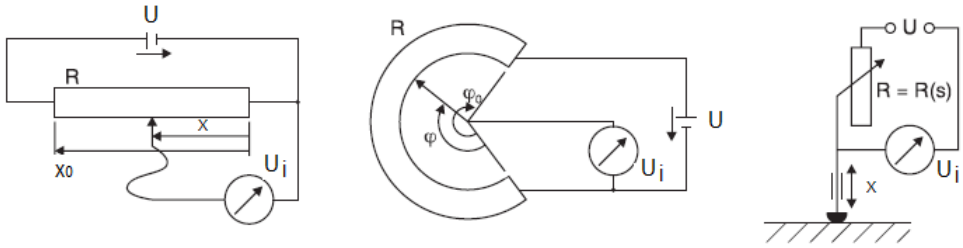
Принцип рада сензора са топлом жицом заснива се на промени електричног отпора услед струјања флуида, око топле жице, кроз коју протиче струја. Жица се хлади струјањем гасовитог флуида, при чему је промена отпорности пропорционална брзини флуида.

Од свих отпорничких сензора за производна мерења се највише користе **потенциометарски сензори** (слика 6.4). Тело потенциометра је облика штапа или плочице од отпорног материјала или изолатора на који је намотана отпорна жица. Преко отпорног тела се помера клизач (К) који представља средњи извод (В) разделника напона. Принцип рада потенциометара се заснива на промени отпора услед промене положаја клизног контакта. Омски отпор се мења са променом дужине проводника, што доводи до промене потенцијала између две тачке када се на крајеве потенциометра А і Б доведе напон.




Слика 6.4. Потенциометарски сензор

Сензор у облику потенциометра је погодан за мерење механичких величина, јер омогућава мерења дужина и углова. Отпор се мења пропорционално линеарном или угаоном померању при кретању клизача (слика 6.5).




Слика 6.5. Шеме за детекцију промене отпора потенциометарског сензора

Ако је $r$ део отпора потенциометра који је пропорционалан деловању неке механичке величине и ако се излаз потенциометра води на мерни инструмент који има бесконачно велику улазну отпорност он неће оптерећивати потенциометарски сензор, тако да је статичка карактеристика сензора линеарна функција, а излазни напон је:

$$U_i = U\frac{r}{R} \tag{6.8}$$

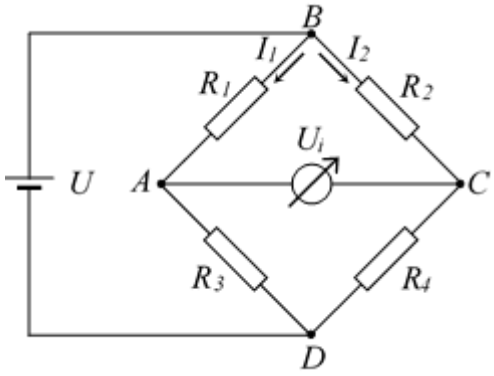
Осетљивост ових типова сензора ограничена је додирном површином клизача односно дебљином отпорне жице.

### 6.1.1 ОТПОРНИ МОСТ

Витстонов мост (слика 6.6) састоји се од четири гране са отпорницима извора за напајање који се налази у једној дијагонали моста. Уколико је вредност отпорника $R_4$ непозната, његова вредност може да се одреди из услова равнотеже моста, која се постиже подешавањем вредности

$$R_4 = \frac{R_3 R_2}{R_1} \tag{6.9}$$

отпорника у једној или у обе гране моста. Када је мост у равнотежи, важи $V_{R3} = V_{R4}$ и $V_{R1} = V_{R2}$, а непозната отпорност може да се одреди из услова:




Слика 6.6. Витстонов мост

Витстонов мост је нашао примену код мерења промене отпорности мерних трака, до које долази услед напрезања (деформације).

## 6.2 МЕРНЕ ТРАКЕ

Мерне траке су посебна врста отпорничких сензора. Принцип рада се заснива на промени отпорности траке услед промене дужине и попречног пресека при њеном издужењу или сабијању. Прве мерне траке су биле од жице, а данас се производе у облику фолија, танког филма или полупроводника. Ако је танка метална жица изложена истезању, мењаће се њена дужина, пресек и специфична проводност, што доводи до промене отпорности која је линеарна или нелинеарна функција истезања. Према Хуковом закону:

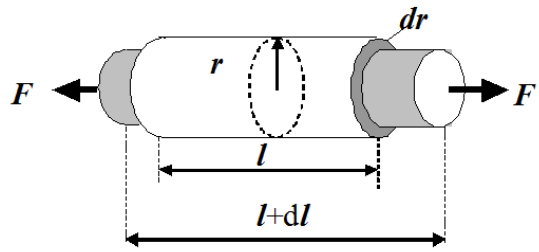
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{6.10}$$

где је $\sigma$ механичко напрезање, $E$ модул еластичности, а $\varepsilon$ деформација. Ова промена је такође и функција силе $F$ која изазива напрезање:

$$E = \frac{F}{S} \tag{6.11}$$

где је $S$ површина попречног пресека жице.

Физичке основе рада мерних трака могу да се објасне на моделу жице кружног попречног пресека (слика 6.7).




Слика 6.7.. Модел жице са кружним попречним пресеком

При малим истезањима сила је линеарно сразмерна промени отпорности. Полазећи од општег израза за отпорност проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{6.12}$$

где је $\rho$ специфична отпорност материјала проводника [$\Omega mm^2/m$], а $S$ површина попречног пресека проводника [$mm^2$] следи да је отпорност жице са кружним попречним пресеком дата изразом:

$$R = \rho \frac{l}{r^2 \pi} \tag{6.13}$$

При издужењу жице дужине $l$ за $\Delta l$, њен полупречник ($r$) се мења за $\Delta r$, при чему је:

$$\frac{\Delta r}{r} = -\mu \frac{\Delta l}{l} \tag{6.14}$$

где је $\mu$ Поасонов коефицијент (вредност за метале у опсегу 0.24 до 0.4).

Диференцирањем израза (6.13) добија се:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2\frac{\Delta r}{r} \tag{6.15}$$

Комбинацијом израза (6.14) и (6.15) добија се:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l}\left(1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho l}{\rho \Delta l}\right) = k\frac{\Delta l}{l} \tag{6.16}$$

одакле следи да постоји линеарна зависност релативне промене отпора од истезања, где је $k$ коефицијент осетљивост чија вредност зависи од врсте материјала (од -12.1 за никл до 3.6 за легуру никла хрома и молидбена). Коефицијент осетљивости је константан у границама употребљивости елемента при сталној температури. Код различитих материјала овај коефицијент се мења са температуром пропорционално температурној промени проводљивости метала.

Типичне вредности релативне промене отпорности услед напрезања су $10^{-4}$ до $10^{-3}$, а иста оволика промена се дешава и при порасту температуре за 10 $^{O}$C. Због тога, за време мерења мора да се обезбеди или константна

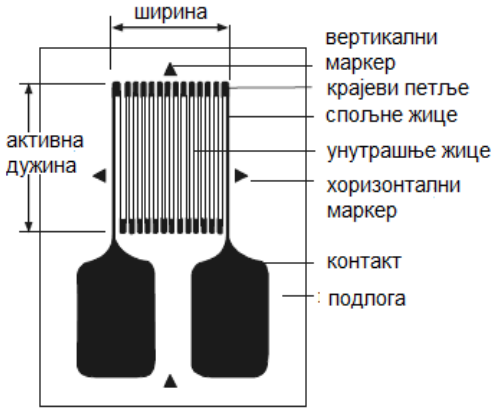
температура или мора да се изврши компензација промене отпора због промене температуре. Пошто је релативна промена отпорности веома мала, при мерењу је неопходна примена прецизне методе мерења отпорности, као што је Витстонов мост.

Отпорност мерних трака на собној температури је у распону од 100 Ω до 700 Ω, а произвођач поред отпора даје и вредности температурног коефицијента отпора $k$, температурне области применљивости, максималног напона напајања и др. Материјали који се најчешће користе за израду мерних трака су легуре на бази бакра и никла (манганин, константан, никром и кромел). Ове легуре имају добре електричне и термичке карактеристике и могу да се користе у опсегу температура до око 300 $^{O}$C. Метални филмови се наносе напаравањем. Платина (Pt) и легуре на бази платине са волфрамом (W) и иридијумом (Ir) примењују се у опсегу високих температура око 1000 $^{O}$C. Имају типичну осетљивост $k = 6$, велики термички коефицијент отпорности и малу специфичну отпорност. Мерне траке са напареним филмом показују знатно већу осетљивост од трака са жицом или фолијом, али и појаву нелинеарности, хистерезиса и старења.

Полупроводничке мерне траке на бази силицијума су веома осетљиве. Употребом полупроводничких филмова је постигнута минијатуризација елемената за мерење напрезања и притисака, међутим ови елементи имају нелинеарну карактеристику. Термичка стабилност и температурни опсег су лошији него код металних трака. Обично се користе за мерења малих промена вредности силе.

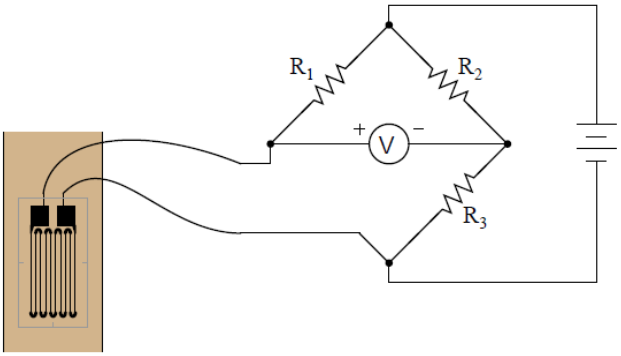
### 6.2.1 РЕАЛИЗАЦИЈА И МОНТАЖА МЕРНИХ ТРАКА

Уобичајене реализације мерних трака су тзв. лепљене мерне траке, код које се вишеструко увијена танка жица, односно фолија, лепи између два листа од папира или пластике, тако да се добије претварач који може да буде у облику правоугаоника (слика 6.8), дужине од 5 mm до 5 и више cm, ширине од 1 до 15 mm или неког другог облика, при чему је укупна дебљина мања од 0.1 mm. Облик и величина мерне траке зависе од њене функације, односно области примене.



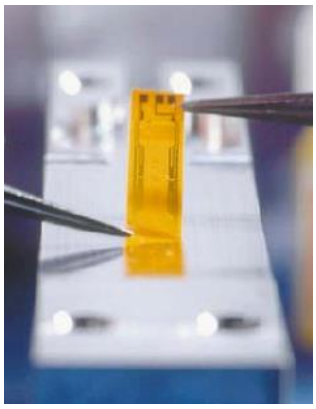

Слика 6.8. Основни облик мерне траке

На крајевима проводника се налазе изводи већег пречника. Они се лемљењем спајају са кабловима којима се мерно место повезује са мерним уређајем, односно Витстоновим мостом (слика 6.9). У Витстоновом мосту се користе активне мерне траке, које се налазе на објекту мерења, компензационе мерне траке, које служе за компензацију утицаја температуре или других ефеката и метални (фолијски) отпорници велике тачности и стабилности. У зависности од тога колико се активних мерних трака користи у мосту, користе се називи 1/4 (једна активна трака), 1/2 (полумост са две активне траке) и 1/1 (пун мост у коме су сви елементи активне траке). Наведени типови спреге применљиви су за различите типове елементарних напрезања, као што је аксијално (изазвано силом која делује дуж осе симетрије), савијање, смицање или торзија (увртање).




Слика 6.9. Мерење промене отпорности мерне траке Витстоновим мостом

Мерне траке се причвршћују на површину еластичног објекта чије се деформације мере одговарајућим лепковима на бази епоксидних смола, или се метализирају на керамички слој (слика 6.10). Од квалитета смоле и самог монтирања зависи квалитет мерења, односно зависи исправно преношење деформације са конструкције на мерну траку.

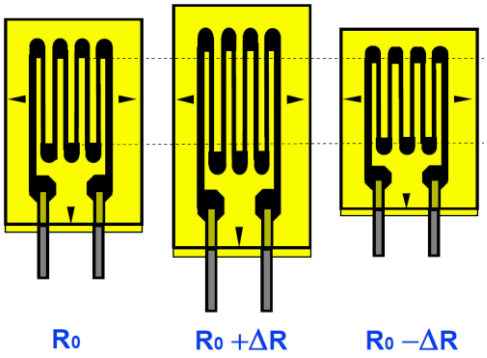


Слика 6.10. Постављање мерне траке на подлогу

Лепљењем се остварује чврст спој траке и подлоге, тако да су деформације које настају на објекту у активном правцу (правцу у коме се

врши мерење) практично једнаке деформацији траке. Зато лепкови морају да осигурају добро приањање, треба да буду отпорни на утицај влаге, а између лепка и жице мерне траке не сме да дође до хемијске реакције.

Линеарне мерне траке омогућавају мерење деформације само у једном правцу. Мерна трака, у првој апроксимацији, реагује само на деформације у правцу нити, а не и на деформације у нормалном правцу (слика 6.11). То се објашњава чињеницом да је уздужни пресек жице много већи од нормалног (попречног) пресека, па лепак којим је трака причвршћена за подлогу може у пуној мери да пренесе деформацију по дужини али не и по ширини жице.



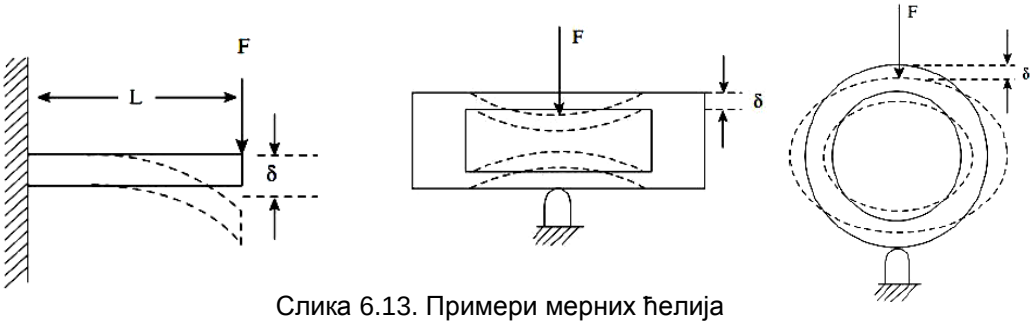

Слика 6.11. Принцип рада мерне траке

У пракси се бирају материјали код којих је однос осетљивости попречних делова свега неколико процената осетљивости уздужних, чиме се обезбеђује да грешке услед попречних деформација могу да се занемаре. С друге стране, напрезање материјала у металним конструкцијама може да буде сложено, тако да мерење деформација само у једном правцу није довољно. Због тога се траке праве у облику розета које се састоје од трака постављене под различитим угловима (слика 6.12), које омогућавају мерење деформација у два или три правца. Такође се некада примењују и ланци мерних трака.



Слика 6.12. Примери розета

Када се мерне траке примењују за мерење силе налазе се у оквиру еластичних елемената који су облика конзола. Овакви елементи се зову мерне ћелије (*load cell*) (слика 6.13). Пожељно је да деформација буде линеарна са примењеном силом, како би и деформација самих мерних трака била линеарна са променом силе.




Слика 6.13. Примери мерних ћелија

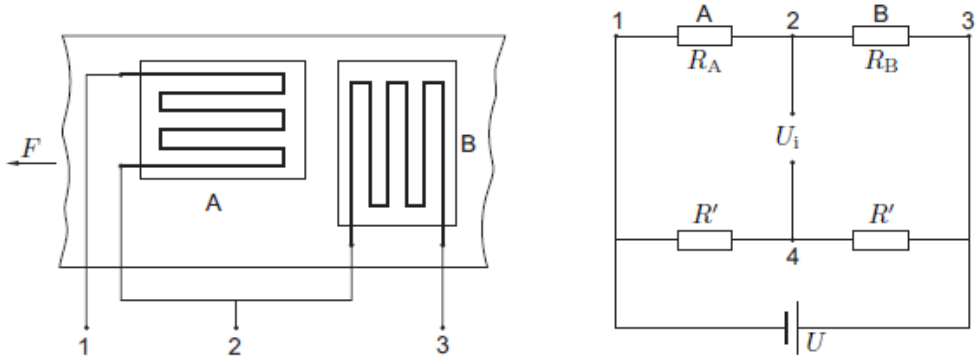
На слици 6.14. приказане су мерне ћелије код којих су мерне траке интегрисане у току производње. Максимална дозвољена сила не зависи од мерних трака, већ од мерне ћелије (долази до пластичне деформације или пуцања мерне ћелије).



Слика 6.14. Практичне реализације мерних ћелија

## 6.2.2 УТИЦАЈ ТЕМПЕРАТУРЕ И КОМПЕНЗАЦИЈА

На тачност мерења највише утиче промена температуре. Температура утиче на промену проводљивости жице или филма, као и на различито ширење траке у односу на подлогу. Промена температуре се најчешће компензује применом друге истоветне мерне траке која је изложена променама температуре, али не и променама напрезања, као што је приказано на слици 6.15. Мерне траке А и В имају исту промену отпорности услед промене температуре, међутим промена отпора услед уздужне деформације се јавља само на мерној траци А, док су попречне деформације које се јављају на траци В занемарљиве у односу на уздужне.




Слика 6.15. Компензација температуре помоћу две мерне траке

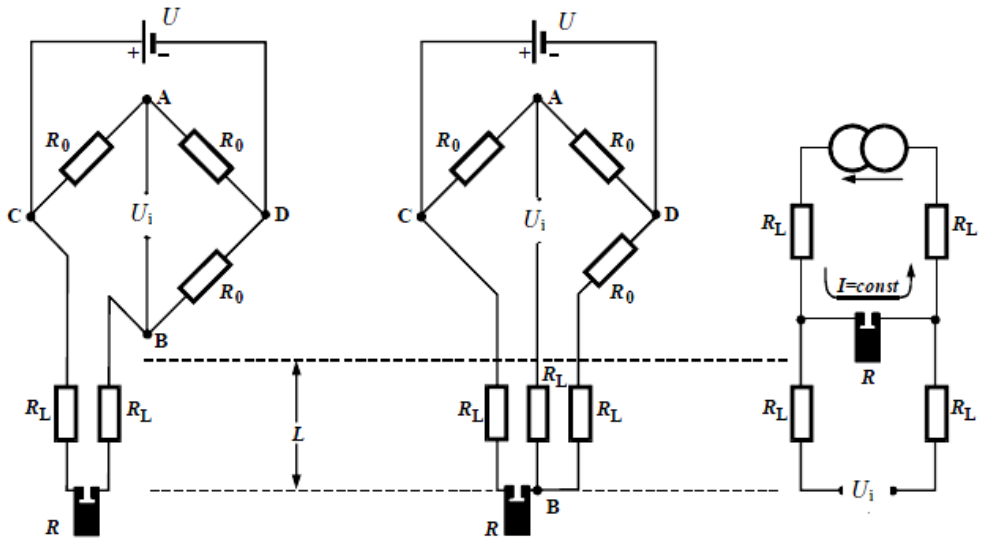
Ако су отпорности трака A и B једнаке $R$ и ако се отпор $R$ на мерној траци A промени за $\Delta R$, тако да је $R_A=R+\Delta R$ јавља се напон у мосту $U_{iz}=U_{24}$. Може да се покаже да је израз за излазни напон $U_{24}$ (ако $\Delta R<<R$):

$$U_{24}=\frac{U_0}{4}\frac{\Delta R}{R}=\frac{U_0}{4}k\frac{\Delta l}{l} \tag{6.17}$$

На траку може да утиче и влажност ваздуха, а у процесној индустрији и корозивна средина у којој се налази елемент. У оваквим случајевима је неопходна заштита траке неким постојаним премазом. Заштита од влаге захтева поштовање одговарајућих препорука произвођача мерне опреме. Мерне траке су у стању да издрже хидростатички притисак до 10000 bara.

## 6.2.3 УТИЦАЈ ОТПОРА ПРОВОДНИКА

Осим промене отпорности мерних трака, са променом температуре се мења и отпор каблова преко којих се мерна трака прикључује у Витстонов мост. Ова промена отпора прикључених каблова утиче на тачност мерења, јер омета праћење промене отпора мерних трака и мора да се узме у обзир чим отпорност промене отпорности водова буде већа од 0.1% вредности отпорности мерне траке $R$. Међутим, овај утицај може да се коригује двожичним, трожичним или четворожичним повезивањем мерне траке у Витстонов мост (слика 6.16). Двожична веза мерне траке (слика 6.16а је најнепогоднија са становишта тачности, јер се повећање отпора каблова услед температуре у потпуности додаје на мерени отпор мерне траке. Трожична веза расподељује отпор каблова на две суседне гране моста, чиме се анулира њихов ефекат на излаз (слика 6.16б). Најбољи резултати у погледу тачности мерења постижу се прикључивањем мерне траке на извор константне струје до 1μA. Пад напона се мери квалитетним волтметром или напонским детектором, а отпор прикључених каблова не утиче на мерење, јер се кроз волтметар не затвара струјно коло (слика 6.16в).




а) б) в)

Слика 6.16. Прикључење мерних трака у Витстонов мост

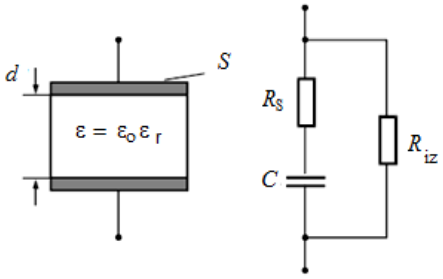
## 6.3 КАПАЦИТИВНИ СЕНЗОРИ

Две металне плоче између којих се налази диелектрични (изолациони) материјал граде кондензатор капацитета:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \tag{6.18}$$

где су: $S$ [m$^2$] површина плоче, $d$ [m] растојање између плоча $\varepsilon_r$ релативна диелектрична константа, $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \left[\frac{\text{F}}{\text{m}}\right]$ диелектрична константа вакуума.

Уколико се на $S$, $d$ или $\varepsilon$ утиче неком неелектричном величином, тада капацитет $C$ зависи од те величине па се на тај начин добија капацитивни сензор. Рад капацитивних сензора се базира на промени капацитета кондензатора који се мења под утицајем мерене неелектричне величине (слика 6.17а). Капацитивни сензори немају само капацитет, већ увек поседују и извесну индуктивност и омски отпор. Индуктивност им је мала, и најчешће се занемарује, док отпор може бити значајан. (слика 6.17б). Постоје разне конструкције сензора, у зависности од тога да ли се утиче са $S$, $d$ или $\varepsilon$. Добре карактеристике капацитивних сензора су: једноставност, висока осетљивост, могућност праћења стационарних и брзопроменљивих физичких величина, као и могућност примене код виших температура.




а) б

Слика 6.17 Капацитивни сензор

Код капацитивних сензора са променљивом површином разликују се реализације код којих се промена капацитета остварује променом активне површине између плоча (електрода), мењањем растојања између електрода или променом диелектрика.

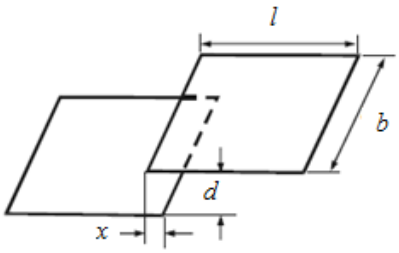
## 6.3.1 СЕНЗОРИ СА ПРОМЕНЉИВОМ ПОВРШИНОМ

**Прости плочасти капацитивни сензор** са променљивом површином између плоча (слика 6.18) састоји се од плочастог кондензатора, који има једну непокретну и једну покретну плочу, тако да је капацитет одређен преклапајућом површином плоча на дужини $x$:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{xb}{d} \tag{6.19}$$

или у релативном облику за $x = l$ :

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{x}{l} \tag{6.20}$$




Слика 6.18. Прости плочасти капацитивни сензор

Плочасти **диференцијални сензор са променљивом површином** (слика 6.19а) састоје се од две непокретне и једне покретне плоче кондензатора. Такав сензор има два радна кондензатора. При померању покретне плоче капацитет једног кондензатора се повећава, а другог смањује:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{(a + x)b}{d} \tag{6.21}$$

и

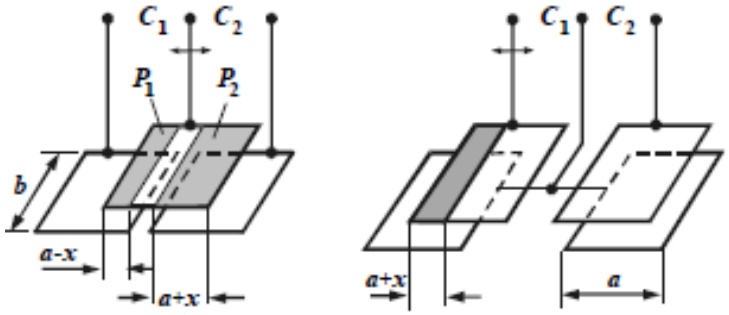
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{(a - x)b}{d} \tag{6.22}$$

Плочасти **полудиференцијални сензор са променљивом површином** (слика 6.19б) састоје се од два кондензатора, од којих је један радни,а други фиксни:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{(a+x)b}{d} \tag{6.23}$$

и

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{ab}{d} \tag{6.24}$$



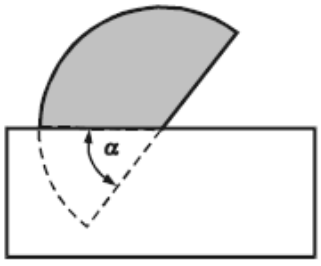

а) б)

Слика 6.19. Плочасти капацитивни сензор са два кондензатора
а) диференцијални и б) полудиференцијални

Уградњом диференцијалног капацитивног сензора у мост омогућава се истовремено праћење промена на оба кондензатора, чиме се проширује мерни опсег и постиже већа тачност у односу на прости капацитивни сензор. Сви поменути типови капацитивних сензора са плочастим кондензаторима имају линеарну статичку карактеристику.

**Угаони капацитивни сензор** (слика 6.20) састоји се од статорске (непокретне) плоче и роторске која се закреће за угао $\alpha$.

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{\alpha}{180} \tag{6.25}$$



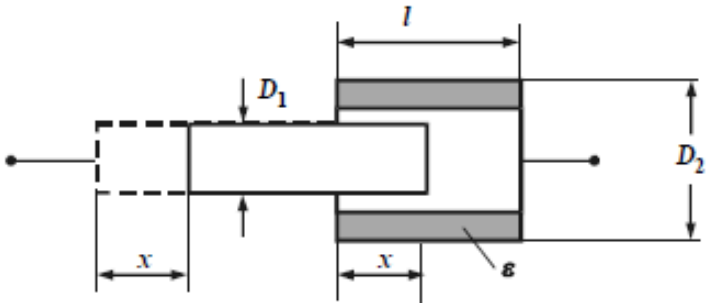

Слика 6.20. Угаони капацитивни сензор

За ове кондензаторе важи све оно што важи за плочасте капацитивне сензора са уздужним померањем.

**Цилиндрични капацитивни сензор** је веома погодан за практичне примене. Металне електроде су у облику цилиндра полупречника $r_1$ и $r_2$, а између њих је диелектрик диелектричне константе $\varepsilon$:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi x}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \tag{6.26}$$

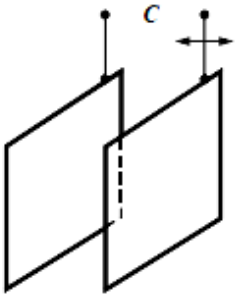
Према слици 6.21, максимална вредност капацитета се добија за $x = l$.




Слика 6.21. Цилиндрични капацитивни сензор

## 6.3.2 СЕНЗОРИ СА ПРОМЕНЉИВИМ РАЗМАКОМ ИЗМЕЂУ ПЛОЧА

Промена размака између плоча сензора веома се много одражава на капацитивност, па се због тога сензори који раде на ово принципу примењују за праћење физичких величина које се манифестују као мали помаци (реда милиметра, микрометра и мање). Са порастом помака капацитет сензора опада и обрнуто (слика 6.22).



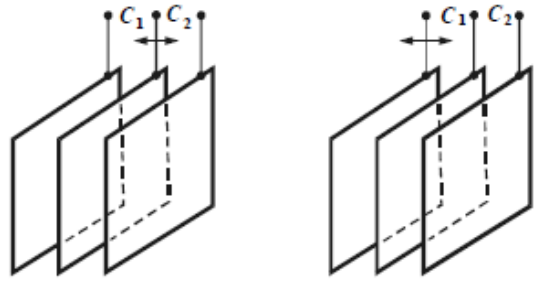

Слика 6.22. Прости капацитивни сензор са променљивим размаком

Основни недостатак **простих капацитивних сензора** са променљивим размаком је што капацитет не зависи само мерене величине која доводи до размака између плоча, већ и од других величина, тако да тачно измерен капацитет не значи и тачно одређивање мерене величине. Проблем се превазилази применом **диференцијалног капацитивног сензора** који има три електроде (слика 6.23а). Код ових сензора, средишња електрода се покреће у складу са деловањем мерене величине, а капацитет кондензатора је:

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{lb}{d_0 - x} = C_{\max} \frac{1}{1 - \frac{x}{d_0}} \tag{6.27}$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{lb}{d_0 + x} = C_{\max} \frac{1}{1 + \frac{x}{d_0}} \tag{6.28}$$

Код полудиференцијалних сензора са променљивим растојањем (слика 6.23б), постоје два излазна електрична параметра: капацитет $C_1$, који се мења са променом мерене величине и капацитет $C_2$ на који не утичу промене мерене величине. Ова врста сензора се примењује када треба да се прати однос две физичке величине, од којих је једна непроменљива.




а) б)

Слика 6.23. Капацитивни сензор са променљивим размаком
а) диференцијални и б) полудиференцијални

Основне одлике диференцијалних и полудиференцијалних капацитивних сензора са два кондензатора у односу на сензор са једним кондензатором је мања осетљивост на сметње, већа стабилност и веће могућности примене.

## 6.3.3 СЕНЗОРИ СА ПРОМЕНЉИВИМ ДИЕЛЕКТРИКОМ

Принцип рада сензора са променљивим диелектриком заснива се на линеарној зависности капацитета од диелектричне константе изолатора. Хомогени диелектрик је најчешће вишеслојни и може да буде постављен паралелно са електродама или управно на електроде (слика 6.21). Уколико је постављен паралелно, еквивалентна шема сензора представља серијску везу (слика 6.24а):

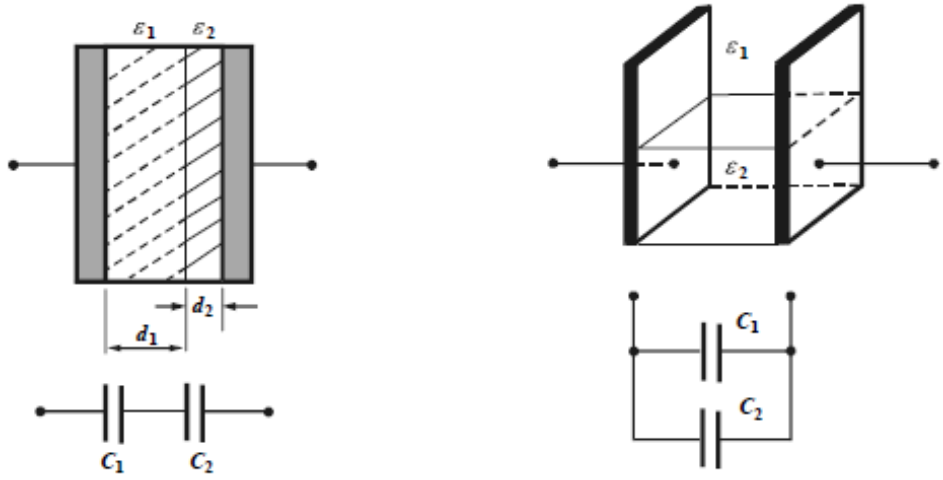
$$C = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \varepsilon_0 \frac{S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} - \frac{d_2}{\varepsilon_2}} \tag{6.29}$$

где је $S$ површина електрода сензора, $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$ су релативне диелектричне константе материјала, а $d_1$ и $d_2$ су дебљине слојева материјала између

електрода. Када су слојеви диелектрика постављени управно на електроде, еквивалентна шема сензора представља паралелну капацитивну везу (слика 6.24б):

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{b(l-x)}{d} + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{bx}{d} \tag{6.30}$$

Овакви сензори се користе за праћење нивоа течних диелектрика, док се за мерење нивоа сипкастих и течних материјала примењују цилиндрични капацитивни сензори са променљивим диелектриком код кога се димензије диелектрика мењају управно на електроде.




а) б)

Слика 6.24. Капацитивни плочасти сензор са променљивим диелектриком

## 6.4 ИНДУКТИВНИ СЕНЗОРИ

Рад индуктивних сензора се заснива на зависности индуктивности калема од промене отпора електромагнетног кола. Промена магнетног отпора може да се оствари променом укупне дужине намотаја, зазора, пермеабилности материјала језгра, променом међусобног положаја калема и језгра, као и променом положаја два намотаја. Најчешће се користе сензори код којих се промена магнетног отпора остварује променом величине зазора или променом магнетне пермеабилности гвозденог језгра μ.

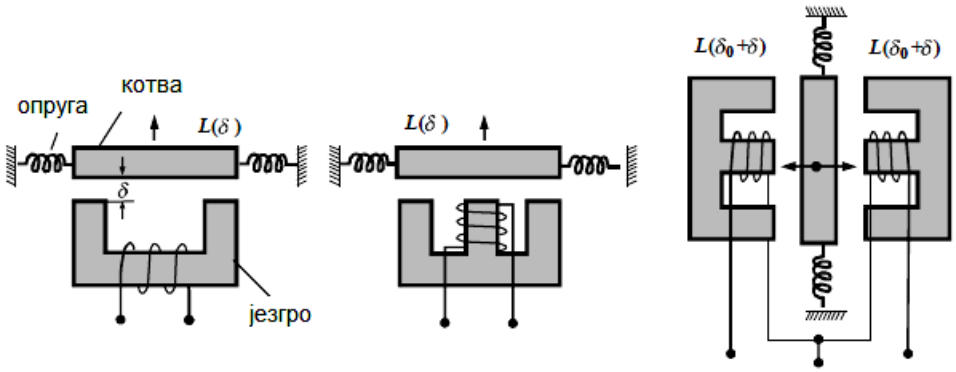
Индуктивност калема, који садржи језгро од феромагнетног материјала и ваздушни зазор, одређује се изразом:

$$L = \frac{N^2}{Z_m} = \frac{\mu_0 N^2 S_\delta}{2\delta} \tag{6.31}$$

где је: $N$ број намотаја калема, $Z_m$ [H$^{-1}$] укупни магнетни отпор (релуктанса)

кола, $\mu = 4\pi 10^{-7}\frac{N}{A^2}$ магнетна пермеабилност вакуума, $S_\delta\,[\mathrm{m}^2]$ површина попречног пресека зазора.

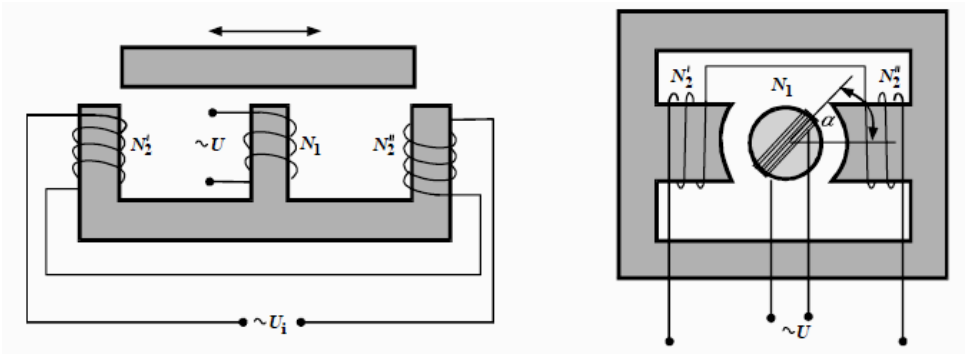
**Индуктивни сензори са променљивим зазором** мењају индуктивност у зависности од промене ваздушног зазора између језгра и покретног дела од феромагнетног материјала (котве). Прост индуктивни сензор има језгро у облику слова U (слика 6.25а) или E (слика 6.25б). Када се котва приближи језгру, зазор се смањи, а повећа се индуктивност. Статичка карактеристика ових сензора је линеарна само за мале релативне промене ваздушног зазора и то је уједно и највећи недостатак ових сензора. Много бољу карактеристику има диференцијални индуктивни сензор (слика 6.25в), који се састоји од два индуктивна сензора E типа. Диференцијални сензор омогућава мерење позитивног и негативног помераја котве у двоструко већем опсегу у односу на један прости сензор E типа.




а) б) в)

Слика 6.25. Индуктивни сензори са променљивим зазором

Посебан тип сензора са променљивим ваздушним зазором су **диференцијални трансформаторски сензори** који имају по два магнетно повезана навоја. Назив овог типа сензора потиче од тога што између извора напајања и излаза постоји трансформаторска веза. Конструкција трансформаторског сензора омогућава проширење мерног опсега и бољу линеарност у односу на реализације сензора са једним намотајем. Амплитуда излазног сигнала пропорционална је померају котве, а фаза излазног сигнала померају котве у односу на нулти положај. Примери трансформаторских индуктивних сензора са линеарним и кружним померањем котве приказани су на слици 6.26а) и 6.26б) респективно.

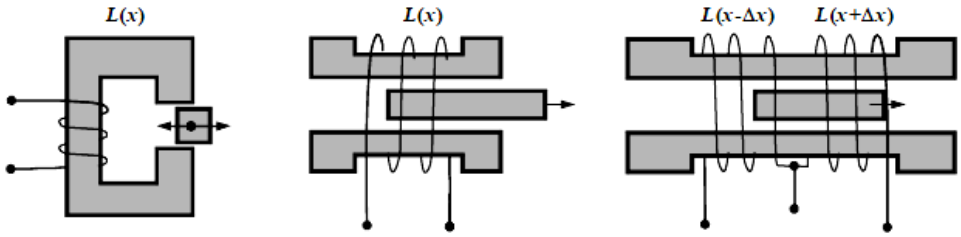



а) б)

Слика 6.26. Диференцијални трансформаторски сензори

На примарни намотај $N_1$, који је равномерно распоређен по целој дужини сензора, прикључен је напон напајања $U$. Секундар је подељене на два намотаја $N_2'$ и $N_2''$ који су намотани супротно и повезани серијски. На њима се у зависности од положаја покретног језгра индукују напони $U_2'$ и $U_2''$ тако да је укупан излазни напон $U_i = U_2' - U_2''$. Приликом проласка кроз средишњи положај излазни сигнал мења знак, што одговара промени фазе за $180^0$.

Код **индуктивних сензора са променљивом површином ваздушног зазора**, котва се помера паралелно са навојима. Постоје варијанте простих сензора U или E типа (слика 6.27а). Међутим, са становишта практичне реализације много су практичније реализације са покретним језгром приказане на слици 6.27б. Постоји и диференцијална варијанта приказана на слици 6.27в, којом се постиже боља линеарност.




а) б) в)

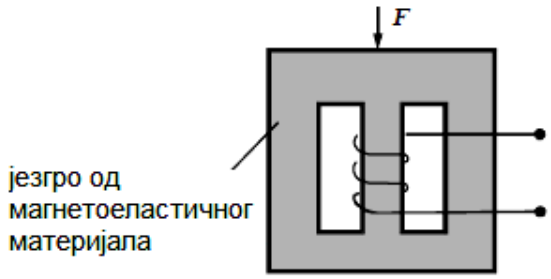
Слика 6.27. Индуктивни сензори са променљивом површином

Међу **индуктивним сензорима са променљивом пермеабилношћу** по једноставности конструкције и карактеристикама издвајају се магнетоеластични сензори (слика 6.28), чијеј је језгро од магнетоеластичног материјала. Ови сензори мењају пермеабилност услед механичког напрезања (инверзна магнетострикција). Основна карактеристика магнетоеластичних сензора је фактор магнетоеластичне осетљивости $K_\mu$ који представља однос релативне промене пермеабилности материјала и релативне деформације:

$$K_\mu = \frac{\Delta\mu / \mu}{\Delta l / l} \tag{6.32}$$

На тачност ових сензора највише утиче температура и заостали механички

напони, тако да им је тачност обично 3 − 4%.




Слика 6.28. Магнетоеластични сензор

## 6.5 ЕЛЕКТРОДИНАМИЧКИ СЕНЗОРИ

Принцип рада електродинамичких (индукционих) сензора заснива се на електродинамичкој индукцији, односно на појави да се на крајевима проводника који се креће и пресеца линије сталног магнетног поља индукује напон:

$$U = NlBv \tag{6.33}$$

где је $N$ број намотаја, $l = \pi D$ дужина једног намотаја, $B[\mathrm{T}]$ магнетна индукција, $v$ брзина кретања калема. Када покретни део сензора мирује, излазни напон је једнак нули.

Брзина кретања калема (слика 6.29а) или магнета (6.29б) може да буде линеарна ($v = dx/dt$) или угаона ($\omega = d\theta/dt$). Пошто је промена напона пропорционална првом изводу помераја, односно брзини, ови сензори се користе за детекцију брзине. Ако је брзина кретања линеарна, на основу ње може да се одреди пређени пут

$$s = \int v dt \tag{6.34}$$

или убрзање

$$a = \frac{dv}{dt} \tag{6.35}$$

а ако је брзина кретања угаона, може да се одреди број обртаја

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \tag{6.36}$$

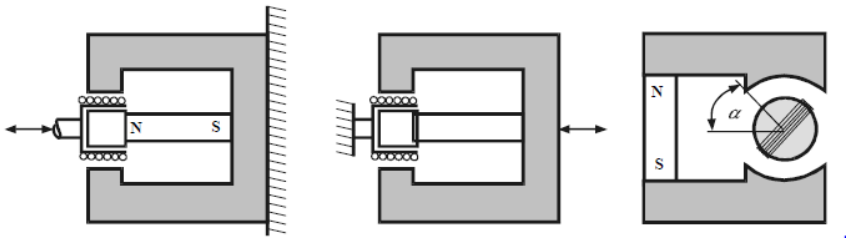
и угаоно убрзање

$$a = \frac{d\omega}{dt} \tag{6.37}$$

Када калем уместо праволинијског кретања врши ротацију између полова магнета (слика 6.29в), индукује се електромоторна сила:

$$e = -Blr\frac{d\rho}{dt} \tag{6.38}$$

где је $r$ полупречник калема, а $\varphi$ угао закретања. Овако индуковани напон директно зависи од брзине обртања мотора.




а) б) в)

Слика 6.29. Електродинамички (индукциони) сензори

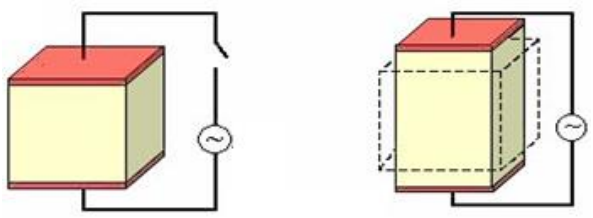
Електродинамички сензори су у суштини генератори, па због тога спадају у групу активних сензора. Могу да се користе као детектори вибрације. На тачност ових сензора утичу температура и нестабилност параметара магнета услед старења, као и нелинеарност магнетног поља у зазору. Уобичајена тачност је 0,1 – 1%.

## 6.6 ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ

Код пиезоелектричних сензора искоришћен је принцип пиезоелектричног ефекта, који су открила браћа Кири. Они су приметили да извесни диелектрични материјали монокристалне структуре када се напрежу механички развијају електрични потенцијал. Ако се на материјал који има овакве особине делује силом $F$, кристална решетка ће се деформисати. Услед деформације решетке ће се јавити пиезоелектрицитет, чији се напон мери на електродама које су постављене на површину кристала (слика 6.30). При дејству притиска на пиезоелектричну плочицу добија се количина наелектрисања

$$Q = k \cdot F = kp \cdot A \tag{6.39}$$

где је $F$ сила којом се делује на површину претварача $A$, $k$ је константа претварача, а $p$ је притисак којим сила делује на површину.



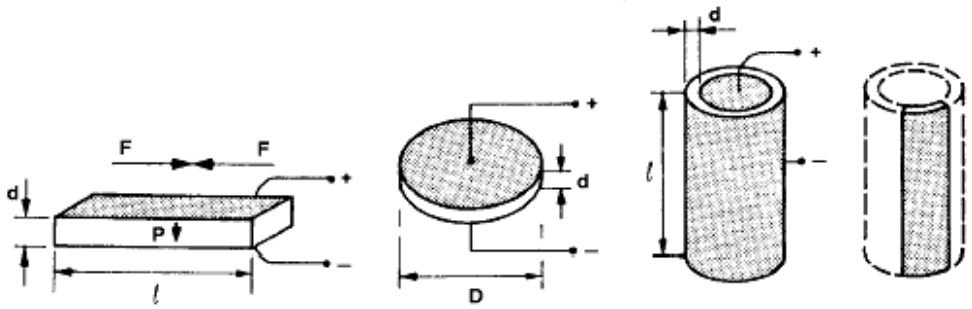
Слика 6.30. Појава електричног напона при деформацији кристала под дејством силе због пиезоелектричног ефекта

Напон између електрода је одређен изразом:

$$U = \frac{Q}{C} \tag{6.40}$$

где је $Q$ количина електрицитета, а $C$ капацитивност.

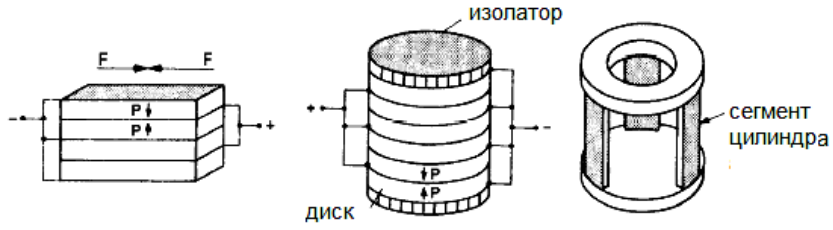
Пиезоматеријали се због добрих особина употребљавају у сензорима различитих електричних и неелектричних величина. Прости пиезоелектрични сензори се граде у облику: призме, диска, цилиндра или дела цилиндра (слика 6.31).




6.31. Примери простих пиезоелектричних сензора

Излазни напон је позитиван када је призма подвргнута сабијању. Највећа осетљивост је када је максималан однос $l/d$ тј. када је пиезоелектрик у облику траке. Трака, наиме, има малу чврстину па се лако ломи под уздужним оптерећењем. Облик диска је повољнији у погледу чврстине. Површине диска се посребрују како би контакт између пиезоелектрика и прикључних водова био што бољи. Најбољу чврстину има сензор у облику цилиндра, али је најтежи за производњу, јер треба обезбедити да попречни пресек што мање одступа од кружног пресека и да дебљина прстена буде једнака по целом обиму.

Недостаци простих пиезоелектричних сензора су мали излазни напон и слаба механичка чврстина па се граде вишеструки или сложени сензори паралелно-серијским спајањем више простих пиезоелектричних сензора (слика 6.32).




6.32. Примери сложених пиезоелектричних сензора

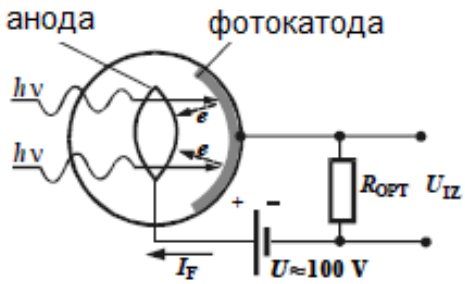
Пиезоелектрични сензори примењују се у радним условима подложним

јаком утицају околине као што су: температура, влажност и брзе промене притиска окружења, односно појава звучних таласа. Високе температуре узрокују смањење напонске осетљивости сензора. Међутим, кад сензор прође одговарајући температурни третман, на радном температурном опсегу поново се успоставља декларисана осетљивост. Изложеност сензора температурама близу Киријеве, међутим, доводи до деполаризације и трајног оштећења сензора. Зато се препоручује да горња вредност радне температуре буде на половини између 0 $^0$C и Киријеве тачке која је обично 80 $^0$C. Међутим, постоје и пиезоелектрици који могу да раде и на температурама од 300 $^0$C до 400 $^0$C.

## 6.7 ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ

Основ рада ових сензора заснива се на промени параметара оптичког сигнала са променом мерене физичке величине тј. првенствено се базира на физичкој појави фотоелектричног ефекта. Фотоелектрични ефекат може да буде унутрашњи и спољашњи.

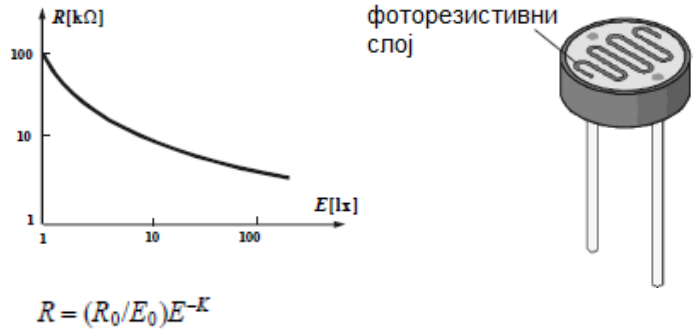
**Спољашњи фотоелектрични ефекат** настаје када под дејством светлости неки проводници или полупроводници емитују електроне. Сензори са **фотоелектронском емисијом** могу да буду у облику вакуумске фотоцеви, фотодиоде или фотомултипликатора (слика 6.33). Фотокатода је прекривена слојем фотоемисионог материјала, чији електрони имају мали излазни рад.




Слика 6.33. Принцип рада фотоелектричног сензора фотодиоде

Када се фотокатода осветли монохроматском светлошћу таласне дужине λ, апсорбовани фотон предаје електрону довољно енергије да савлада енергетску баријеру и сасвим напусти материјал. Помоћу спољашњег извора фотоелектрони се даље убрзавају између аноде и катоде и сакупљају на аноди. Настала фотострује се региструје директно или као пад напона на отпорнику. Фотоелектроде се праве од фотоемисионих материјала осетљивих на видљиву или инфрацрвену светлост.

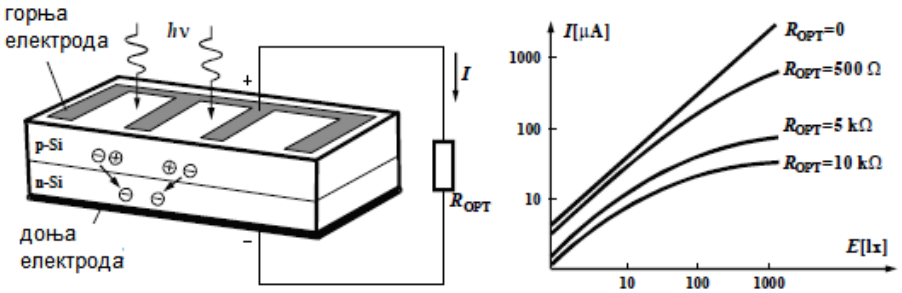
Уколико се под дејством светлости на одговарајуће материјале ослобађају електрони у унутрашањости материјала, онда је то **унутрашњи фотоелектрични ефекат**. Ефекат се састоји у промени електричног отпора материјала на који пада светлост. Сензори код којих је примењен овај ефекат су **сензори са ефектом фотопроводности** или **фотоотпорници** (слика 6.34).




Слика 6.34. Карактеристика и изглед фотоотпорника

Електрични отпор осветљеног полупроводничког материјала експоненцијално опада. У зависности од примењених једињења од којих су направљени, сензори могу да реагују на ултраљубичасто зрачење (ZnO и ZnS), инфрацрвено (PbS, PbSe, InSb и GeAu ) или видљиво светло (CdS, CdSe и Si). Однос отпора у мраку и на светлу је до $10^6$:1. Недостатак је релативно велика временска константа T>50ms. Такође су осетљиви и на деловање температуре, па је неопходан хладњак.

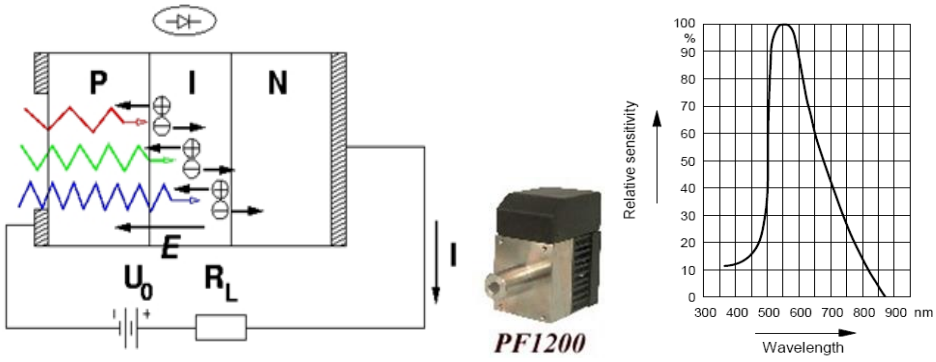
**Сензори са фотонапонским ефектом (фотоелементи)** су активни сензори, јер се под утицајем светлости унутар p-n прелаза полупроводника јављају слободни електрони и шупљине, тако да се генерише *ems,* при чему се p-слој понаша као анода, а n-слој као катода. Линеарност статичке карактеристике излазна струја-јачина светлости зависи од оптерећења (слика 6.35), а типичан фотонапонски елемент је соларна ћелија од силицијума или селена.




Слика 6.35. Фотонапонски елемент и статичка карактеристика

Посебну категорију представљају **сензори са променом отпорности p-n споја**. Када се фотонапонски елемент инверзно поларише помоћу спољашњег напонског извора, инверзна струја засићења постаје директно пропорционална јачини светлости (слика 6.36). Инверзна поларизација има велику брзину одзива (1 μs до 1 ns). Представници сензора који раде на овом принципу су фотодиоде (p-n, p-и-n или лавинске) и фототранзистори (pnp или npn). Упадом електрона на фотодиоду стварају се парови електрон-шупљина на граници испражњене области. Претварање фотона у наелектрисање

карактеристична је за CCD елементе (*Charge Coupled Devices* ) који се користе у видео камерама.




а) б) в)

Слика 6.36. p-i-n диода
а) принцип рада, б) изглед компоненте и в) спектрална карактеристика

# ЛИТЕРАТУРА

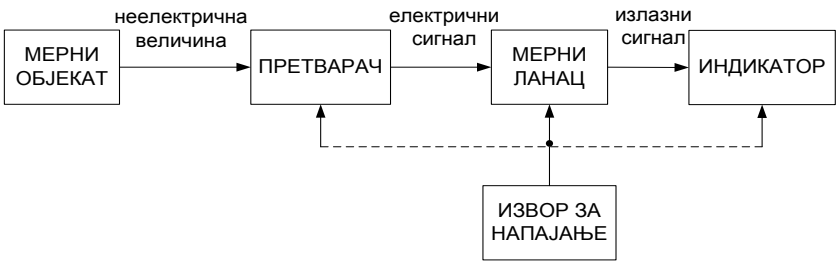

1. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and asotiated terms (VIM), 2007, 3.7, http://www1.bipm.org/en/publications/guide/vim.html*.
2. D. Stanković, *Fizičko-tehnička merenja*, Naučna knjiga, 1991.
3. W. Nawrocki, *Measurement systems and sensors*, Artech House, 2005.
4. J. G. Webster, *Measurement, instrumentation, sensors*, CRC Press, 1999.
5. M. Popović, *Senzori i imerenja*, četvrto izdanje, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Srpsko Sarajevo, 2004.
6. A. S. Morris, *Measurement and instrumentation principles*, Elsevier, 2001.
7. П. Бошњаковић, *Умеће мерења*, Висока школа електротехнике и рачунарства струковних студија, Београд, 2011.
8. *www.capacitance-sensors.com*
9. *www.baumer.com/us-en/products/presence-detection/inductive-sensors/*
10. *www.baumer.com/us-en/products/presence-detection/photoelectric-sensors/*
11. *www.baumer.com/us-en/products/presence-detection/magnetic-sensors/*
12. *http://www. section/pressure-transducers.html omega.com/*
13. *Pressure and strain measurement handbook and encyclopedia,* Omega Engineering, Inc, USA, 2002.
14. A. D. Helfrick, W.D. Cooper, *Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques*, PHI, 5th Edition, 2002.

# 7.
# МЕТОДЕ И УРЕЂАЈИ ЗА МЕРЕЊЕ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИНА

Мерење неелектричних величина је од великог значаја за индустријску метрологију. За контролу, управљање и регулацију у процесној индустрији често је неопходна информација о притиску, температури, протоку, нивоу, вискозности, сили, маси, механичким осцилацијама, брзини, померају... Иако су развијене различите методе за мерење, које су нашле практичну примену, највећи значај имају мерења електричним путем, јер за разлику од механичких метода, омогућавају пренос електричних сигнала на даљину без већих утицаја на тачност мерења, као и математичку обраду применом микропроцесора. Осим тога, уређаји за електрично мерење неелектричних величина су релативно мало осетљиви на утицаје мерног окружења, имају високу тачност и омогућавају брзо и једноставно очитавање резултата мерења.

Основни елементи уређаја за мерење неелектричних величина електричним путем (слика 7.1) су претварач, систем за пренос и прилагођење мерног сигнала, који се назива мерни ланац, индикатор за очитавање резултата мерења и извор за напајање уређаја.

Мерни претварачи обично имају велику осетљивост и малу инерцију Код електричних мерних претварача улазне неелектричне величине изазивају према одређеним законитостима промену неког електричног или магнетног параметра претварача, као што су струја, напон, отпор, капацитет или индуктивност, при чему је пожељно да између улазне и излазне величине постоји линеарна зависност.




Слика 7.1. Општи блок-дијаграм уређаја за мерење неелектричних величина електричним путем

Сигнал са претварача обично има малу енергију и није погодан за директно регистровање помоћу уобичајених индикатора. Због тога је неопходна додатна обрада у мерном ланцу. Сигнал се појачава, а промена отпорности, капацитивности или индуктивности се претвара у промену струје или напона. У мерном ланцу могу да се реализују и сложенији поступци обраде сигнала, као што су разне модулације, демодулације (у циљу преноса

сигнала на даљину), А/Д и Д/А конверзија, линеаризација, филтрирање ... Највећи број претварача је аналогног типа, што значи да дају сигнал који се континуално мења под утицајем мерене величине. Због потребе даље обраде у мерном ланцу, овакви сигнали могу да се претворе у дигиталне сигнале применом А/Д конвертора. Дигитални претварачи непосредно претварају мерену величину у дискретно променљив сигнал изражен у неком од стандардних кодова.

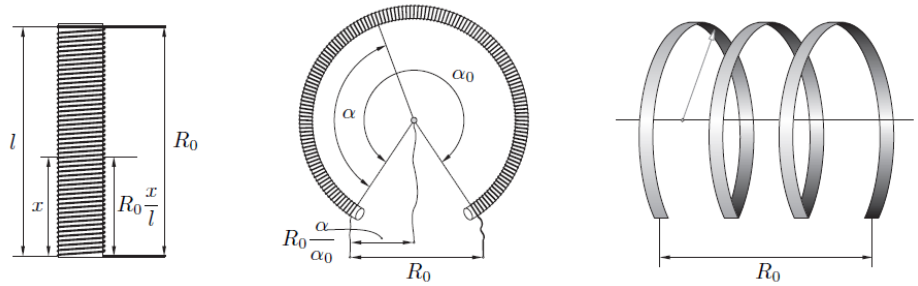
Мерни ланац се напаја помоћу једносмерног или простопериодичног струјног или напонског извора. У неким случајевима напаја се и сам претварач, а код дигиталних индикатора се напаја и индикатор.

# 7.1 МЕРЕЊЕ ПОМЕРАЈА

Мерења дужине високе тачности потребна су у многим гранама технике и индустрије и у ту сврху се користи велики број мерних уређаја. Електричне методе мерења помераја базирају се на непосредној конверзији помераја у неки електрични параметар. У ланцу конверзија померај може прво да сепретвори у неку другу физикчку величину, која онда делује на промену електричних параметара. Као сензорски елементи употребљавају се контакти, потенциометарски, тензоотпорнички, индуктивни, капацитивни, пиезоелектрични, оптоелектронски и други претварачи код којих је улазна величина осетљива на померај. Примена инкременталних енкодера који омогућавају добијање дигиталног излазног сигнала, повећава се тачност ових метода.

## 7.1.1 ПОТЕНЦИОМЕТАРСКИ ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ ТРАНСЛАТОРНИХ И УГАОНИХ ПОМЕРАЈА

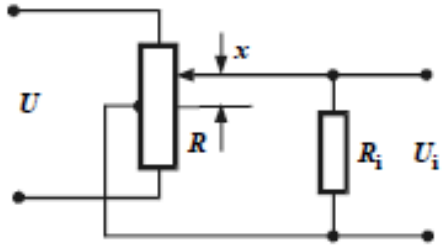
Отпорнички потенциометарски сензор линеарног помераја због једноставности и добрих карактеристика нашао је широку примену у техничкој пракси. Отпорни потенциометарски сензор састоји се од отпорника и покретног контакта. Најчешће се користе жичани потенциометри који се састоје од танке жице, хомогено намотане око правог или кружног изолатора константног попречног пресека (слика 7.2а и 7.2б). Угаона померања већа од $360^{O}$ могу да се мере хеликоидалним потенциометром са више обртаја клизача (7.2в).




а) б) в)

Слика 7.2. Принцип рада потенциометара
а) линијски, б) кружни и в) хеликоидални

Помераји се мере тако што се потенциометар прикључи на извор константног напона $U$, а излазни напон се мери између клизача и једног краја потенциометра, при чему је унутрашњи отпор волтметра $R_i$ (слика 7.3).




Слика 7.3. Потенциометарски сензор у електричном колу за мерење помераја

Рад потенциометра се заснива се на линеарној зависности:

$$\frac{x}{l} = \frac{r}{R_0} = \frac{U_i}{R} \tag{7.1}$$

при чему су: $L$ дужина потенциометра, $R$ отпор потенциометра, $l$ дужина од места контакта клизача до референтног краја потенциометра, $r$ отпор од места контакта клизача до референтног краја потенциометра, $U$ напон на крајевима потенциометра и $U_i$ излазни напон између тачке контакта клизача и краја потенциометра.

Када је клизач на растојању $x$ од почетка, на основу слике 7.2. излазни напон у функцији релативног положаја клизача (који мери волтметар) дат је изразом:

$$U_i(x) = U \frac{\frac{x}{l}}{1 + (1 - \frac{x}{l})\frac{xR}{lR_i}} \tag{7.2}$$

Одавде следи да ће излазни напон бити линеарна функција помераја:

$$U_i(x) = U \frac{x}{l} \tag{7.3}$$

једино ако волтметар има веома велики унутрашњи отпор.

Век потенциометарског сензора процењује се према броју прелаза клизача са једног на други крај потенциометра. Жичани потенциометри имају $1x10^6$ оваквих прелаза, потенциометри са слојем угљеника $5x10^6$, док потенциометри са полупроводничким слојем имају $30x10^6$ прелаза. Типична вредност жичаног потенциометра је у опсегу од 10 Ω до 50 000Ω, а тачност је око ±1%. Полупроводнички потенциометри имају отпор од 100 Ω до 500 Ω и тачност ±0,01% пуног опсега. Примери реализације потенциометарских сензора приказани су на слици 7.4.






а) б)

Слика 7.4. Примери потенциометара
а) обртни и б) линеарни

Основне мане потенциометарских сензора су мала осетљивост, присутност термичких шумова и променљиви прелазни отпор између контакта клизача и навоја. Међутим, због једноставности конструкције, малих габарита и цене, као и могућности напајања из једносмерног или наизменичног извора веома много се употребљавају у детекцији и аутоматској регулацији помераја.

### 7.1.2 КАПАЦИТИВНИ ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ ЛИНЕАРНИХ ПОМЕРАЈА

На основу израза за плочасти кондензатор:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d} \tag{7.4}$$

види се да постоји линеарна зависност капацитета кондензатора од диелектричне константе $\varepsilon$ и површине плоче $S$ и хиперболична зависност од размака плоча $d$. У шестом поглављу је објашњено како све ове три зависности могу да се употребе за мерење неелектричних величина, укључујући и померај.

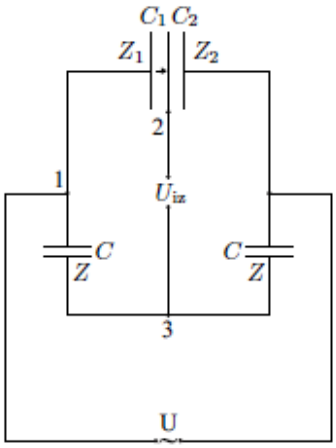
Код капацитивних претварача се такође користи диференцијална веза. Два идентична кондензатора се вежу у две суседне гране моста, при чему је једна плоча заједничка за оба кондензатора (слика 7.5). Померањем ове плоче мења се капацитет оба кондензатора за исти износ, али са супротним знаком.

$$C_1 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d + \Delta d} \tag{7.5}$$

$$C_2 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d - \Delta d} \tag{7.6}$$

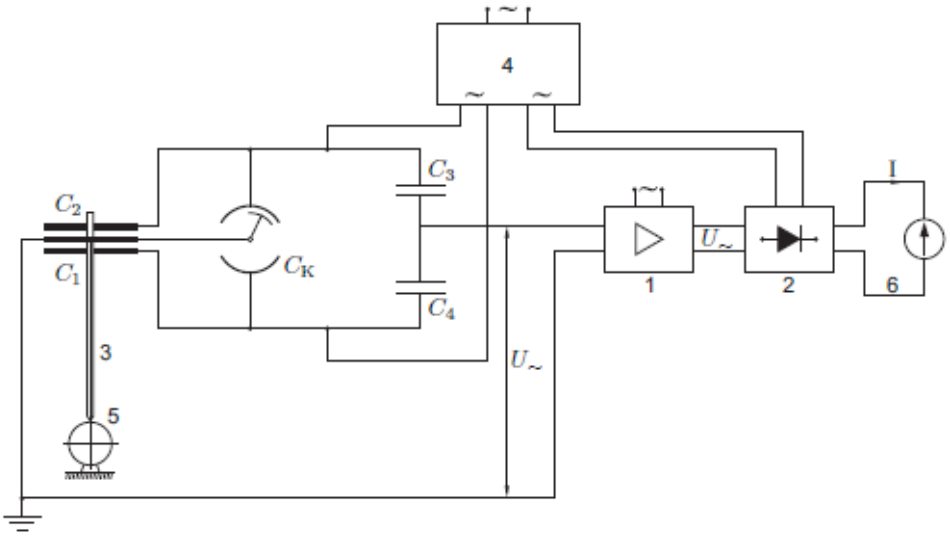
Ако је $U$ наизменичан напон којим се напаја мост, излазани напон $U_{iz}$ је:

$$U_{iz} = U \frac{\Delta d}{2d} \tag{7.7}$$




Слика 7.5. Диференцијална веза у капацитивном претварачу

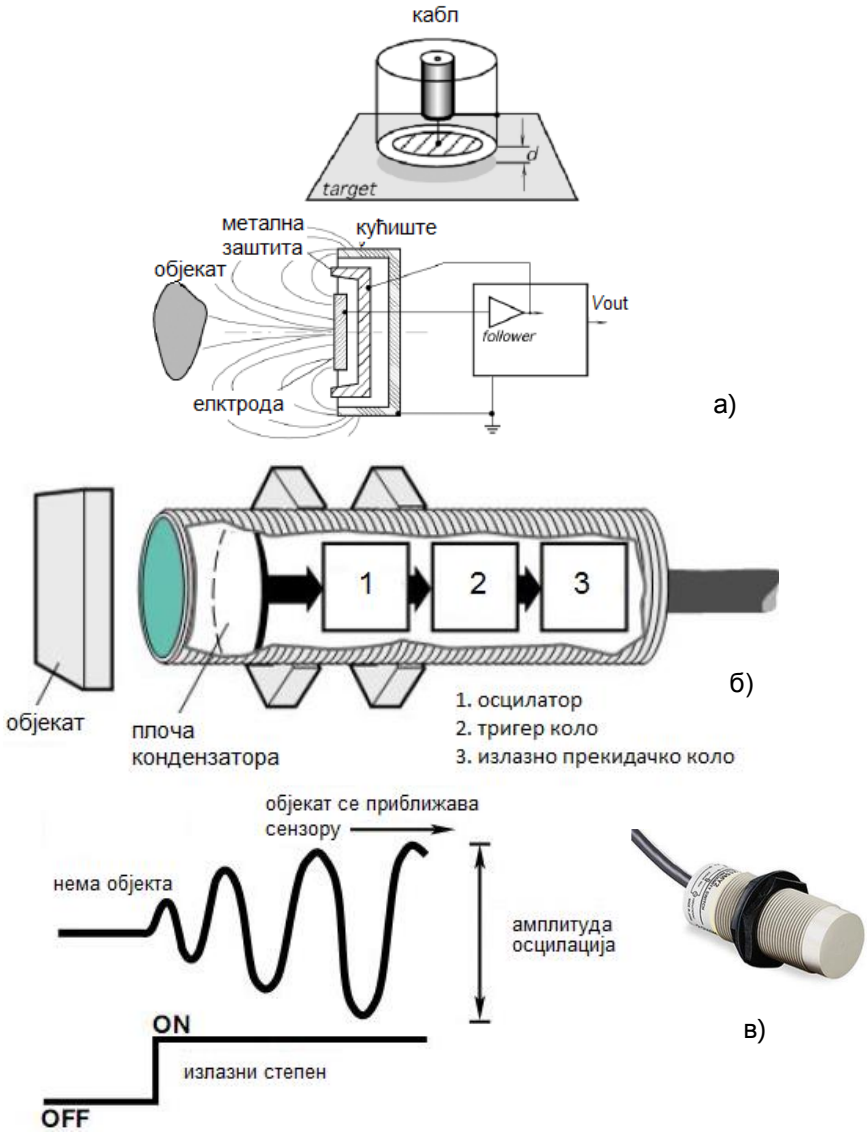
Диференцијални кондензатор се користи код капацитивног микрометра (слика 7.6).




Слика 7.6. Капацитивни микрометар

Крак (3) који се ослања на мерени предмет управља диференцијалним кондензаторима C1 и C2, који са кондензаторима C3 и C4 чине мост. Осцилатор (4) даје наизменичан напон од 500kHz. Кондезатор Ск који је везан паралелно са C1 и C2 служи за подешавање нуле инструмента када је мост у равнотежи. Одступање димензије мереног предмета од прописане вредности квари равнотежу моста, при чему се јавља напон на дијагонали моста, који се након појачања појачавачем (1) и исправљања исправљачем (2) доводи на инструмент (6). Ови инструменти имају одступања у границама ±1 до ±20μA.

У многим апликацијама, објекат може да представља једну од плоча кондензатора, док је друга плоча помоћу коаксијалног кабла повезана са остатком електричног кола (слика 7.7а). Радна фреквенција ових претварача је око 3 MHz, и могу да региструју веома брзе промене положаја (реда 40 kHz). Додатна метална заштита која је на истом потенцијалу као и мерна електрода спречава капацитивну спрегу између металног предмета на који је сензор постављен и мерне електроде. Овакав принцип рада има близински капацитивни сензор (слика 7.7б), код кога се капацитивност коју стварају покретни објекат и тест електрода повећава када објекат прилази. Осцилатор у сензору почиње да осцилује када капацитивност постане довољно велика.



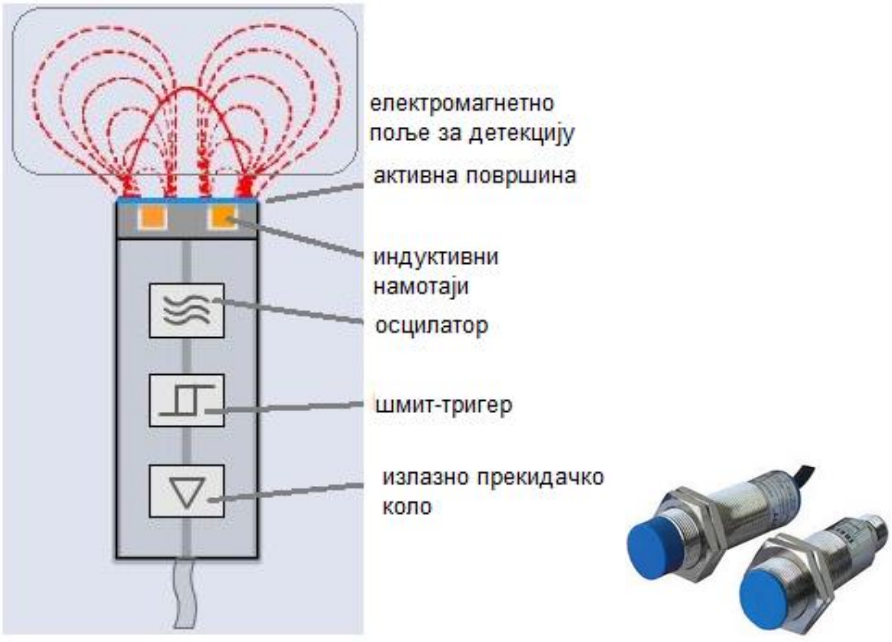

Слика 7.7. Близински капацитивни сензор
а) принцип рада, б) структура сензора и в) изглед сензора

Капацитивни претварачи омогућавају мерење линеарног помераја са тачношћу ± 0,01% и резолуцијом до 1 μm. Специјалне конструкције намењене су за мерење малих помака (до 0,1 nm), односно великих помака (реда метра). Добре особине капацитивних сензора помераја су дуговечност, одсуство покретних контаката и трења, као и мала осетљивост на температуру, радијацију и корозију. Основни проблем у примени је висока излазна импеданса овог сензора, односно подложност сметњама. Проблем се решава пажљивим избором дужине и положаја прикључччних каблова, као и оклапањем каблова.

## 7.1.3 ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ СЕНЗОРИ ПОМЕРАЈА

Електромагнетни сензори помераја праве се у форми пасивних индуктивних и међуиндуктивних (трансформаторских сензора) или у форми активних индукционих сензора.

**Електромагнетни индуктивни сензори** имају у глави сензора намотаје око феритног језгра. Овакви сензори називају се близински или проксимити сензори (слика 7.8).




а) б)

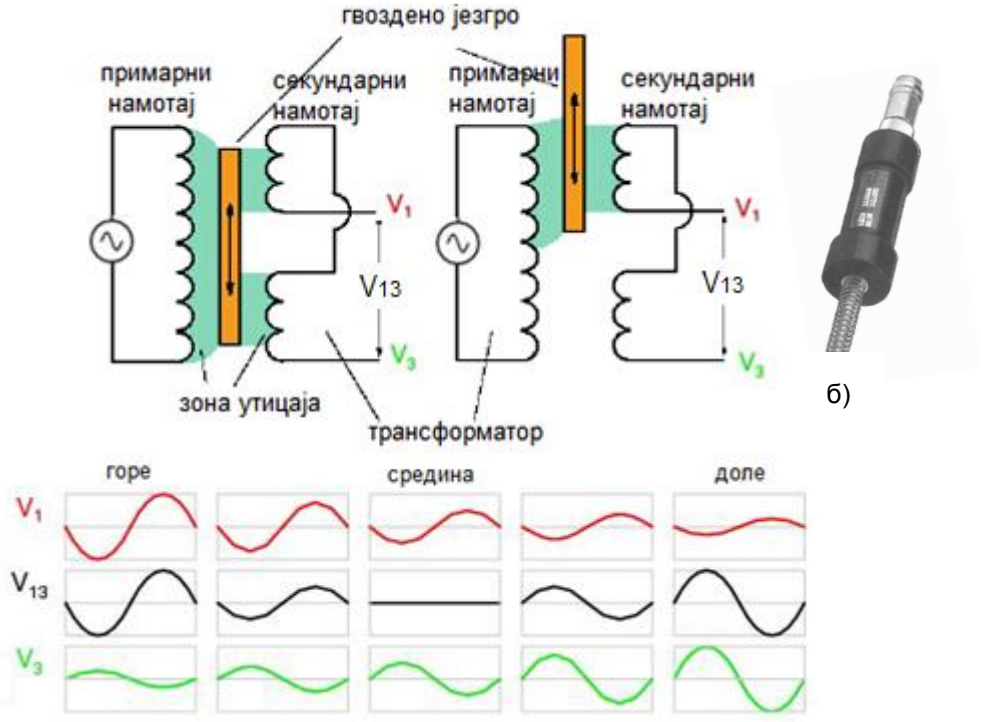
Слика 7.8. Близински индуктивни (проксимити) сензор
а) структура и б) изглед сензора

Напон високе фреквенце генерише осцилаторно магнетно поље. Високофреквентно магнетно поље генерише се у калему L у осцилаторном колу. Проласком металног објекта ствара се струја у објекту, па се услед трансформаторског ефекта смањују осцилације, а на довољно блиском растојању и престају. Сензор детектује ту промену осцилација преко кола за детекцију амплитуде и генерише одговарајући сигнал на излазу. Због примене

електромагнетног поља могућ је и рад у срединама са присуством воде, уља и прашине.

Оклопљени сензори усмеравају сноп електрооомагнетног поља на чеону површину сензора, али се тиме смањује домет. Неоклопљени сензори имају значајно већи домет, међутим не могу да се монтирају у равни са металном површином.

**Међуиндуктивни сензори** помераја праве се као диференцијални трансформатори. Постоје различите реализације овог типа сензора. Широку практичну примену је нашао линеарни варијабилни диференцијални трансформатор *LVDT.* Примењује се за детекцију малих помераја, То су робусни и поуздани сензори, На слици 7.9 приказан је принцип рада и изглед *LVDT* сензора са једним примарним и два једнака секундарна намотаја, Објекат чије се померање детектује повезан је са покретним феромагнетним језгром.




а)

Слика 7.9. *LVDT* сензор
а) принцип рада и б) изтлед

Секундарни намотаји су супротно намотани, односно спојени су у опозицију,тако да је за централни (нулти) положај језгра излазни напон једнак нули. Помак језгра за исто одстојање од нултог положаја за $+x$ и $-x$ индукује излазне напоне исте амплитуде и фаза које се разликују за 180$^o$. Према томе, код *LVDT* сензора амплитуда излазног напона пропорционална је позицији, а

његова фаза смеру кретања. Пропорционалност је линеарна, при чему коефицијент пропорционалности $C$ зависи од конструктивних својстава сензора:

$$V_{out} = Cx \tag{7.8}$$

*LVDT* сензор показује добре особине у практичној примени. Робустан је и поуздан, неосетљив на механичке ударе и вибрације. Типична тачност је ±0,5%, опсег од ±100 μm до ±250 mm. Максимална радна температура је до 500 $^0$C. Динамички помераји могу да се прате највише до фреквенције 1 kHz. Може да се употребљава и у агресивној средини под условом да се навоји обложе заштитним епокси-смолама.

## 7.1.4 ПРЕТВАРАЧИ НА ПРИНЦИПУ СТРУНЕ

Претварач на принципу струне представља танку затегнуту жицу чија се учестаност сопствених осцилација мења у зависности од силе затезања, односно од одговарајућих деформација жице. Струна-претварачи спадају у фреквентне претвараче, код којих се неелектрична величина директно претвара у учестаност сопствених осцилација, која се региструје помоћу фреквенцметра или тајмера.

Основна резонантна учестаност жице која осцилује као полуталасни осцилатор дата је Тејлоровом формулом:

$$\vartheta = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{S\rho}} \tag{7.9}$$

где је $l$ дужина жице, $\rho$ густина материјала и $\sigma$ механичко напрезање које изазива сила затезања $F$. Применом Хуковог закона за истезање:

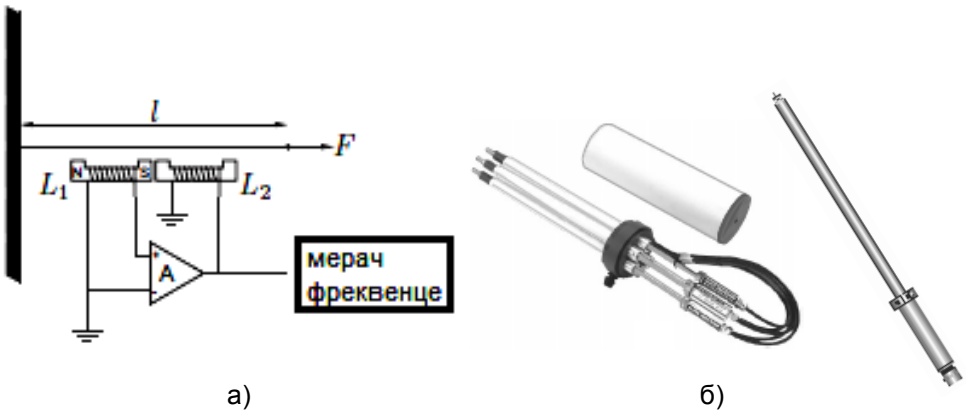
$$\vartheta = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{\Delta lE}{l\rho}} \tag{7.10}$$

где је $E$ коефицијент еластичности, мерећи учестаност слободних осцилација жице може да се мери сила $F$ или мала померања краја жице $\Delta l$.

Практична мерења помераја помоћу струна-претварача врше се на два начина: појединачним побуђивањем (окидањем) жице или помоћу осцилатора који осцилује на учестаности једнакој резонантној учестаности саме жице. Типични претварачи имају дужину око 15 cm и дебљину од 0.15 mm до 0.35 mm, а опсег нормалне учестаности је 500 Hz до 1 kHz. Као индикатори могу да се користе тајмери или фреквенцметри.

На слици 7.10 приказана је једна реализација претварача на принципу струне. Намотај $L_1$ је на језгру од сталног магнета, па се при треперењу жице у њему индукује наизменична струја са фреквенцом једнакој учестаности механичких осцилација. Сигнал из намотаја $L_1$ се појачава и води на намотај $L_2$. Фаза излазног сигнала је подешена тако да магнетно поље калема $L_2$ појачава механичке осцилације жице. На тај начин коло осцилује на сопственој учестаности жице која је одређена истезањем, односно силом.

Фреквенција је нелинеарна функција померања и само при малим померањима може да се сматра приближно линеарном, што сужава опсег сила или померања који могу да се мере. Имају високу поузданост и занемарљив дрифт. Тачност сензора је $\pm 0,025\%$ у опсегу од 60 mm до 100 mm.




а) б)

Слика 7.10 Струна претварачи

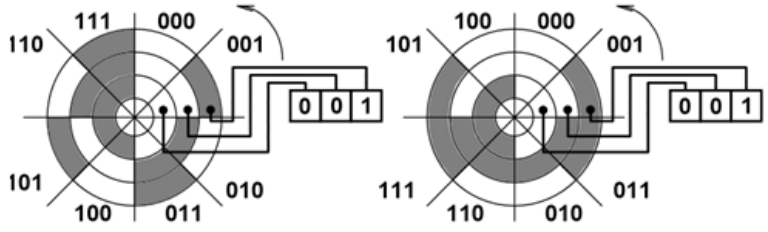
а) принцип рада и б) примери типичних струна-претварача

Основна намена струна-претварача је мерење помераја, силе, момента, угла, притиска и температуре у сложеним условима. Због високе поузданости и занемарљивог дрифта примењује се за мерење геомеханичких и структурних деформација. Сензори код којих се струна побуђује повремено служе за статичка мерења, а сензори са сталним побуђивањем струне намењени су за динамичка мерења.

## 7.1.5 МЕРЕЊЕ УГАОНОГ ПОМЕРАЈА

Сензори угаоног помераја детектују помак објекта око неке осе. У пракси се примењују **апсолутни** и **инкрементални енкодери.**

**Апсолутни енкодери** (слика 7.11) дају јединствен дигитални код за сваку различиту позицију објекта (осовине или вратила).



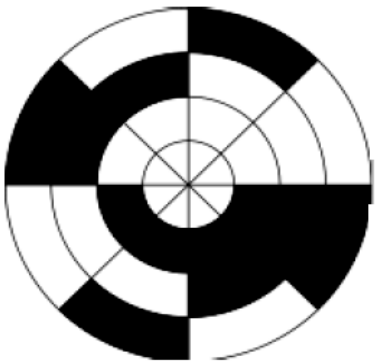

а) б)

Слика 7.11 Апсолутни енкодер са а) BCD и б) Грејовим кодом

Овим енкодерима се одређује тачан положај осовине. Принцип рада оптичког енкодера се заснива на блокади светлости одређеном маском. Број детектора

зависи од броја бинарних цифара. За кодовање позиције се користи BCD (слика 7.11а) или Грејов код (слика 7.11б). Пун угао се мери са $2^N$ дискретних нивоа, где је N број бита који се користи за кодовање.

Пример кодовања углова закретања применом тробитног BCD кода приказан је на слици 7.12. У пракси се користе претварачи који имају осам или више бита због веће прецизности. Диск се прави од пластике или је метални, уколико се користи за рад на високим температурама.

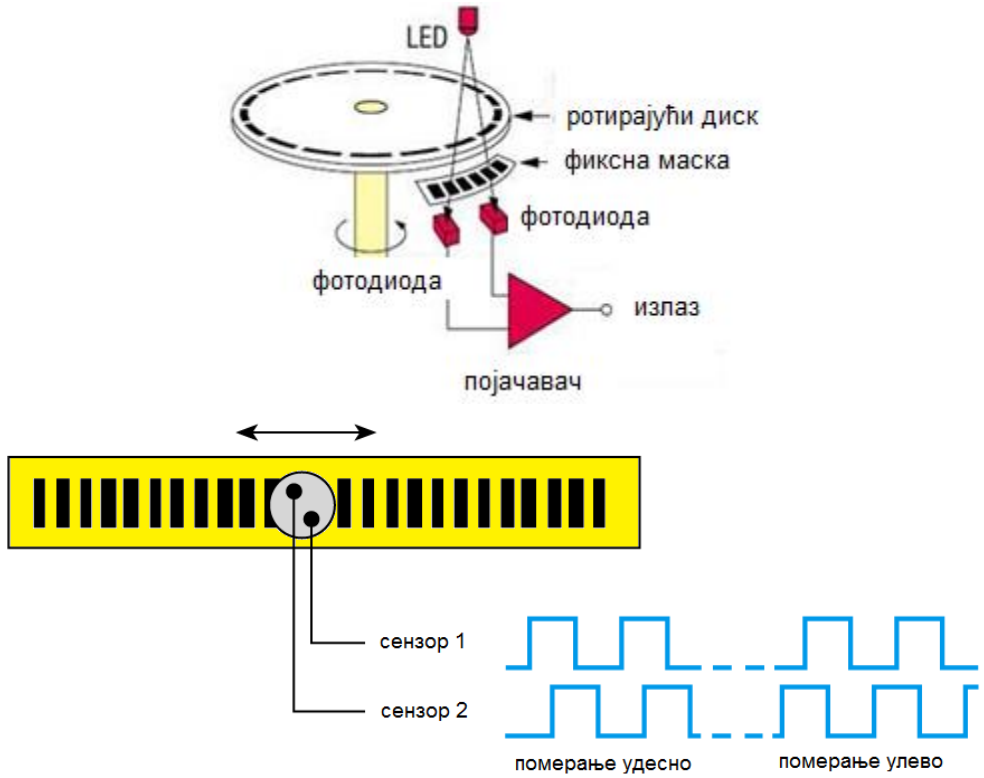


| Sector | Contact 1 | Contact 2 | Contact 3 | Angle |
|---|---|---|---|---|
| 1 | off | off | off | 0° to 45° |
| 2 | off | off | on | 45° to 90° |
| 3 | off | on | off | 90° to 135° |
| 4 | off | on | on | 135° to 180° |
| 5 | on | off | off | 180° to 225° |
| 6 | on | off | on | 225° to 270° |
| 7 | on | on | off | 270° to 315° |
| 8 | on | on | on | 315° to 360° |

Слика 7.12. Илустрација рада апсолутног енкодера и пример давача

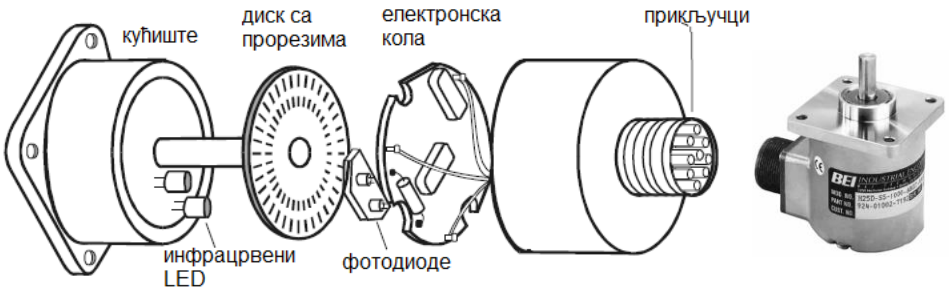
**Инкрементални енкодер** се састоје од претварача мереног угла у низ импулса и бројача импулса. Број импулса се памти у односу на почетну позицију. Када дође до промене угла, генеришу се само додатни импулси пропорционално тој промени и њихов број се додаје на претходно стање бројача. На тај начин се на излазу добија индикација укупног угаоног померања. Ови енкодери су јефтинији за реализацију од апсолутних. Истовремено, постиже се велика брзина одзива, али губитак само једног импулса доводи до грешке која не може да се надокнади. У бројачу импулса, импулси се сабирају за позитивне, а одузимају за негативне помераје. Претварање мереног угла у низ импулса остварује се електромагнетним или оптоелектронским средствима. У првом случају се на осовину, чији се угаони померај мери, поставља назубљени диск од феромагнетног материјала, а за читање позиције се примењује трансформаториски приступ.

Оптоелектронски инкрементални енкодери могу да се користе за мерење угаоног и транслаторног померања. Код претварача за угаоно померање мерни уређај је диск са провидним и непровидним сегментима једнаке ширине, док се за мерење транслаторних помераја уместо диска користи плоча. Оптоелектронски енкодер за мерење угаоног померања састоји се од извора светлости и диска са два низа прореза, равномерно распоређених по ободу, као и од одговарајућих електронских кола за обраду сигнала са пријемника светлости. (слика 7.13).




Слика 7.13. Принцип рада инкременталног оптичког енкодера

Извори светлости су најчешће инфрацрвене LED диоде, а као пријемници се користе фотодиоде. Пролаз светлости кроз прорезе када се окрене осовина детектује се у фотодиоди, на основу чега се генеришу правоугаони импулси. Број импулса одговара величини угла закретања осовине. Прорези на унутрашњој страни ротирајућег диска померени су за 1/2 ширине у односу на прорезе по ободу, па импулси фотопријемника на унутрашњој стази касне или предњаче у зависности од смера ротације. Изглед кућишта и унутрашња структура инкеременталног енкодера приказани су на слици 7.14.

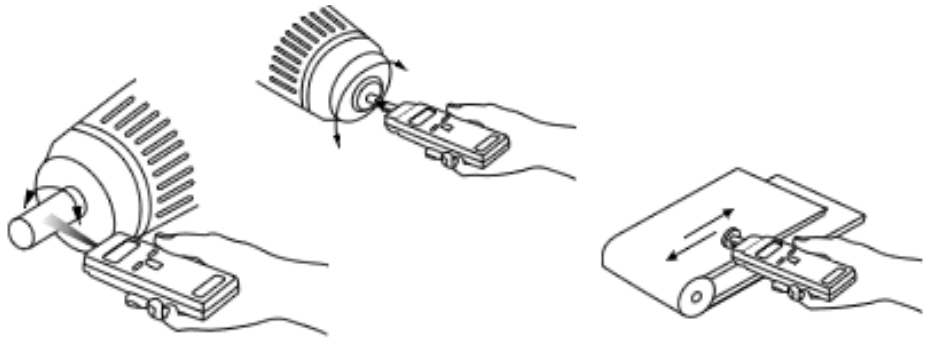



Слика 7.14. Конструкција и изглед инкременталног оптичког енкодера

## 7.2 МЕРЕЊЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ

Угаона брзина неког објекта се дефинише као промена вредности угла ротације у јединици времена и представља меру брзине којом се објекат обрће. Најчешћа јединица је број обртај у минути, али може да се користи било која јединица мере угла у јединици времена. Транслаторна и угаона брзина у техничкој пракси мере се у широком опсегу: транслаторна брзина од 0 m/s до 15000 m/s, а угаона 0 rad/s до 20000 rad/s. Уређаји за мерење угаоне брзине, којом се обрћу ротирајући елементи, називају се тахометри.

Проблеми мерења и регулације угаоне брзине мотора, трансмисија и других механизама, срећу се ·често у индустрији и електроенергетици. Уређаји за мерење угаоне брзине могу се поделити на механичке и електричне. Електрични уређаји користе различите типове мерних претварача од којих највећи значај имају индукциони (електродинамички), оптоелектронски, отпорни, капацитивни и претварачи на бази Холовог ефекта. Мерења могу да се врше: контактним, безконтактним или оптичким методама, као и контактним методама на траци (слика 7.15).



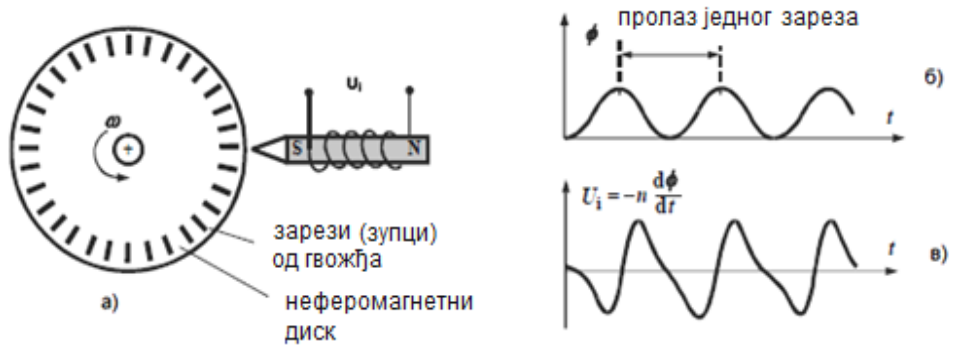
Слика 7.15. Начини мерења угаоне брзине

### 7.2.1 ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ ПРЕТВАРАЧИ УГАОНЕ БРЗИНЕ

Електромагнетни (релуктантни) сензори угаоне брзине индукционог типа раде на принципу промене отпорности магнетног кола услед проласка металних зареза (зубаца на зупчанику) распоређених по ободу диска који је монтиран на ротирајућу осовину. У непосредној близини ротирајућег дела фиксиран је индукциони детектор помераја. Магнетно коло детектора се састоји од сталног магнета и наставка од меког гвожђа (слика 7.16а).

У индукционим претварачима **са сталним магнетом**, електромагнетни флукс који ствара сталан магнет је директно пропорционалан магнетопобудној сили $M$ и обрнуто пропорционалан магнетној отпорности између полова магнета. Приближавањем феромагнетног зареза на диску или зупца на зупчанику смањује се магнетни отпор, па због тога расте магнетни флукс (слика 7.16б):

$$\rho = \frac{M}{R_m} \tag{7.11}$$



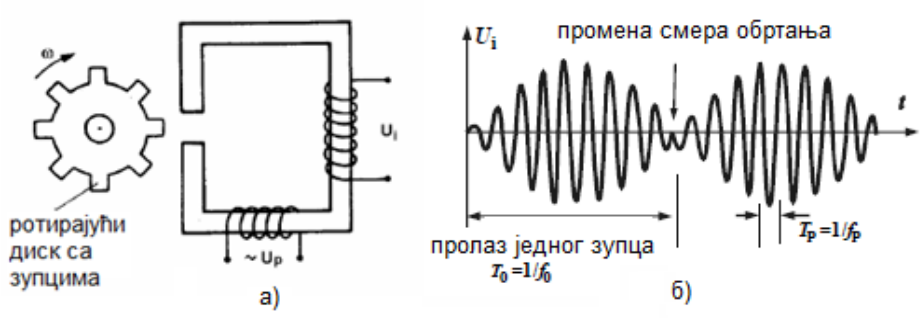

Слика 7.16. Индукциони претварач са сталним магнетом
а) принцип рада, б) временски дијаграм магнетног флукса, в) излазни напон

Променом флукса у калему услед промене релуктансе добија се индуковани излазни напон $U_\text{i}$ који има неправилан импулсни облик (слика 7.16в). Ако осовина има N зубаца, фреквенца излазног напона је:

$$f = Nf_0 \tag{7.12}$$

где је $f_0$ број обртаја осовине у једној секунди. Пошто су амплитуда и фреквенца напона $U_\text{i}$ пропорционални угаоној брзини осовине, за очитавање могу да се користе наизменични волтметри и кола за мерење учестаности. Основни недостатак релуктантних претварача са сталним магнетом је ограниченост примене код малих угаоних брзина. Код спорог обртања амплитуда импулса постаје веома мала, тако да шумови и индуковане сметње онемогућавају коришћење волтметра и фреквенцметра. Навећа угаона брзина која може да се мерие на овај начин је 15000 обртаја у минути.

Индукциони претварачи **трансформаторског типа** су сличне конструкције, али немају језгро од феромагнетног материјала (слика 7.17а). Примар се напаја из наизменичног извора учестаности $f_\text{p}$ од неколико kHz. Проласком сваког зупца мења се коефицијент спреге примар-секундар. Секундарни напон $U_\text{i}$ је по својој природи амплитудски модулисан (слика 7.17б), а то значи да мора да буде задовољено: $f_p \gg Nf_0$.




Слика 7.17. Електромагнетни претварач трансформаторског типа
а) принцип рада, б) излазни напон

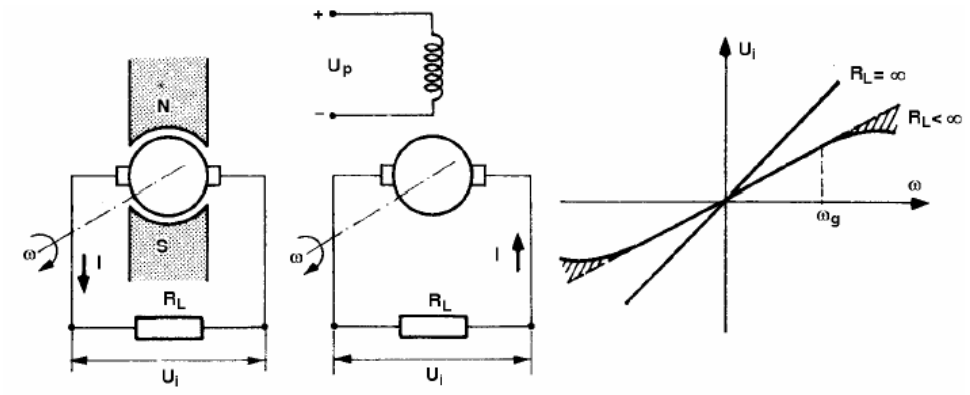
Мерење угаоне брзине индукционим претварачем трансформаторског

типа врши се искључиво фреквенцметром. Пре тога је непходна демодулација и уобличавање излазног напона у правоугаони импулс. Треба имати у виду да је ограничавајући фактор учестаност напајања, која треба да буде довољно висока.

## 7.2.2 ТАХОГЕНЕРАТОРИ

**Једносмерни тахогенератор** ствара електромоторну силу која је пропорционална брзини обртања ротора. Побуда тахогенератора се остварује преко сталних магнета (слика 7.18а) или преко намотаја са константном и независном побудом (слика 7.18б). Када роторски део пресеца линије магнетног поља, индукује се електромоторна сила (*E*) пропорционална флуксу побуде $\varphi$ и брзини обртаја $\omega$, при чему константа пропорционалности *c* зависи од конструкције генератора:

$$E = c\rho\omega \tag{7.13}$$




а) б) в)

Слика 7.18. Принцип рада једносмерног тахотенератора
а) побудно коло са сталним магнетом, б) независно побудно коло, в) утицај оптерећења на статичку карактеристику

У реалним условима на излаз тахогенератора је прикључено неко оптерећење $R_{\mathrm{L}}$. Ако је $R_{\mathrm{r}}$ унутрашњи отпор тахогенератора, струја у ротору кола је:

$$I = \frac{E}{R_r + R_L} = \frac{c\rho\omega}{R_r + R_L} \tag{7.14}$$

Излазни напон на оптерећењу $R_{\mathrm{L}}$ пропорционалан је брзини обртања, а поларитет му се мења са променом смера обртања:

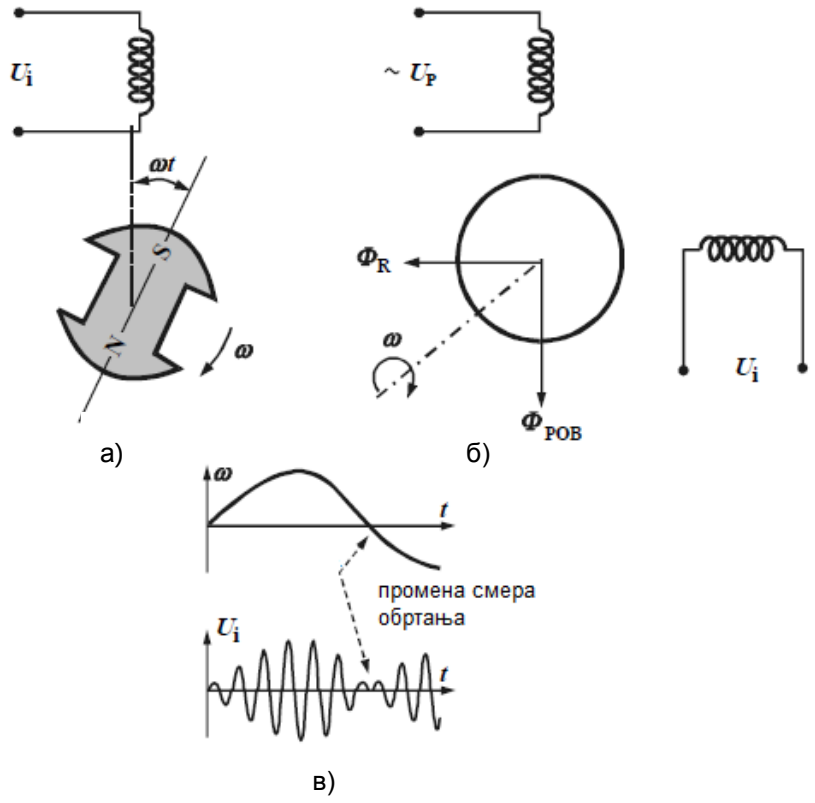
$$U_i = \frac{c\rho\omega}{R_r + R_L} R_L = k\omega \tag{7.15}$$

где је *k* коефицијент статичког преноса који износи 3−100mV/ob/min.

На тачност линеарне карактеристике највише утиче оптерећење,

прелазни отпор четкица и температура. Свакој вредности отпора оптерећења $R_L < \infty$ одговара одређени опсег промене брзине од 0 до $\omega_g$ за који је излазни напон линеаран. Са порастом брзине расту струја ротора и индукција. За $\omega$ које је једнако $\omega_g$ индукција достиже засићење, па статичка карактеристика постаје нелинеарна (слика 7.18в). Због тога се оптерећење бира тако да струја ротора буде од 0,01 А до 0,02 А. Прелазни отпор четкица утиче на појаву зоне неосетљивости, јер се при малим брзинама генерише електромоторна сила приближно истог реда као и пад напона на прелазном отпору.

**Наизменични тахогенератори** праве се као синхрони или асинхрони. Синхрони тахогенератор је једнофазни мотор са ротором од сталног магнета (слика 7.19а). Промена угаоне брзине ротора доводи до промене амплитуде и фреквенце излазног напона. Основни недостатак овог тахогенератора је нелинеарна карактеристика. Због тога се тахогенератор много чешће прави као двофазни асинхрони мотор (слика 7.19б).




Слика 7.19. Принцип рада наизменичног тахогенератора
а) синхрони тахогенератор б) асинхрони тахогенератор в) излазна карактеристика

Кратко спојени ротор се израђује у облику шупљег алуминијумског кавеза, док се на статору налазе побудни и генераторски намотај који су постављени под углом 90°. Побудни намотај је прикључен на наизменични

извор фреквенце 50 или 400Hz, а са генераторског намотаја се добија излазни напон пропорционалан угаоној брзини.

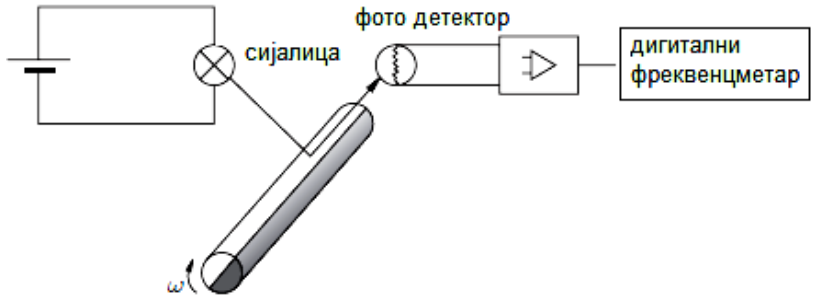
Када ротор мирује, наизменични магнетни флукс $\Phi_{\text{pob}}$ нормалан је на излазни намотај, па је у њему електромоторна сила једнака нули. Када ротор почне да се окреће, у кратко спојеном роторском навоју индукује се обртна електромоторна сила, која ствара флукс Φг у смеру излазног навоја. Деловањем флукса $\Phi$г, у излазном намотају настаје наизменична електромоторна сила исте фреквенце као и побудни напон и са амплитудом која је пропорционална брзини окретања ротора. То значи да је излазни сигнал амплитудски модулисан. У зависности од смера окретања излазни сигнал може да буде у фази са побудним сигналом или је фаза померана за $\pi$ уколико се промени смер (слика 7.18в).

Предност тахогенератора је једноставна конструкција и висока тачност (± 0, 05% у опсегу 0 до 4000 обртаја/min). Недостатак је директна веза између ротирајуће осовине и осовине тахогенератора, јер због хабања и нетачног центрирања може да дође до пуцања везе.

У системима аутоматског управљања примењују се тахометарски мостови којима се једноставније управља, а статичко и динамичко оптерећење на мотор су мањи него код класичних једносмерних и наизменичних тахогенератора.

### 7.2.3 ОПТОЕЛЕКТРОНСКИ ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ

Главне предности оптоелектронских претварача у односу на електродинамичке је што дају излазни сигнал велике амплитуде, која не зависи од угаоне брзине и што не оптерећују осовину. Код претварача на слици 7.20 осовина је издељена на два сегмента: рефлектор и апсорбер светлости.

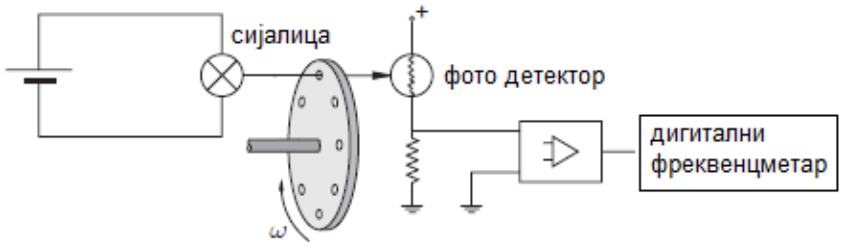



Слика 7.20. Оптоелектронски претварач са сегментима

Сијалица и фотодетектор су постављени тако да у једном положају рефлектована светлост активира фотодетектор, док у другом положају детектор не даје излазни сигнал. На тај начин се добија један импулс при сваком обртају осовине, па угаона учестаност може да се мери уобичајеним дигиталним или аналогним методама. Ако је угаона брзина релативно ниска, осовина може да се подели на већи број рефлектујућих и тамних сегмената,

чиме може да се пропорционално повећа прецизност мерења.

На слици 7.21 је приказана друга варијанта оптоелектронског претварача која се често примењује у пракси. То је претварач са осовином на коју је причвршћен диск (чопер), који по обиму има провидне и непровидне сегменте. Непровидни сектори пресецају сноп светлости који из сијалице долази на фотоелектрични детектор. На тај начин је, слично као у претходном примеру, омогућено добијање низа импулса на основу којих се мерењем учестаности добија вредност угаоне брзине осовине.

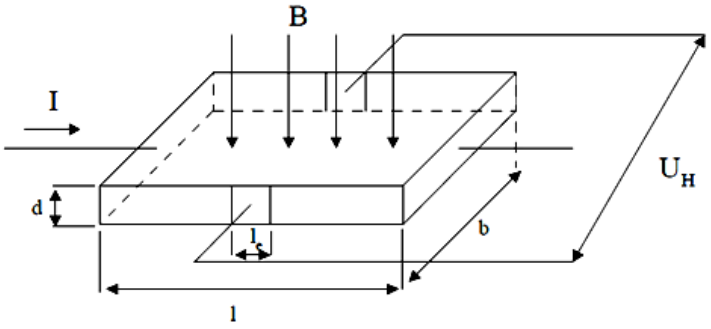



Слика 7.21. Оптоелектронски претварач са диском

Помоћу ових претварача могу да се мере велике угаоне брзине од око 300000 обртаја/min. Максимална радна учестаност је одређена горњом граничном учестаношћу фотоелектричног детектора.

## 7.2.4 ПРЕТВАРАЧИ ЗА МЕРЕЊЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ НА БАЗИ ХОЛОВОГ ЕФЕКТА

Код претварача на бази Холовог ефекта осетљиви елемент је плочица од полупроводника и то обично од силицијума (Si), индијум арсенида (InAs) или индијум арсенид фосфида (InAsP), кроз коју се пропушта константна струја $I$ (слика 7.22).



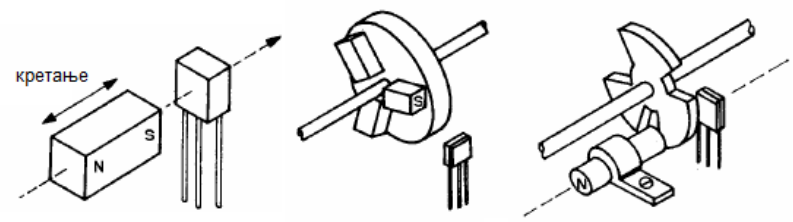

Слика 7.22. Принцип рада Холовог сензора

Ако се плочица налази у фиксираном положају вертикално у односу на хомогено магнетно поље индукције $B$, на бочним крајевима плочице, у смеру попречно на ток струје индукује се Холов излазни напон $U_{\text{H}}$ реда mV:

$$U_H = K_H \frac{I \cdot B}{d} \qquad (7.16)$$

где је $d$ дебљина плочице, а $K_{\mathrm{H}}$ Холова константа која зависи од полупроводничког материјала

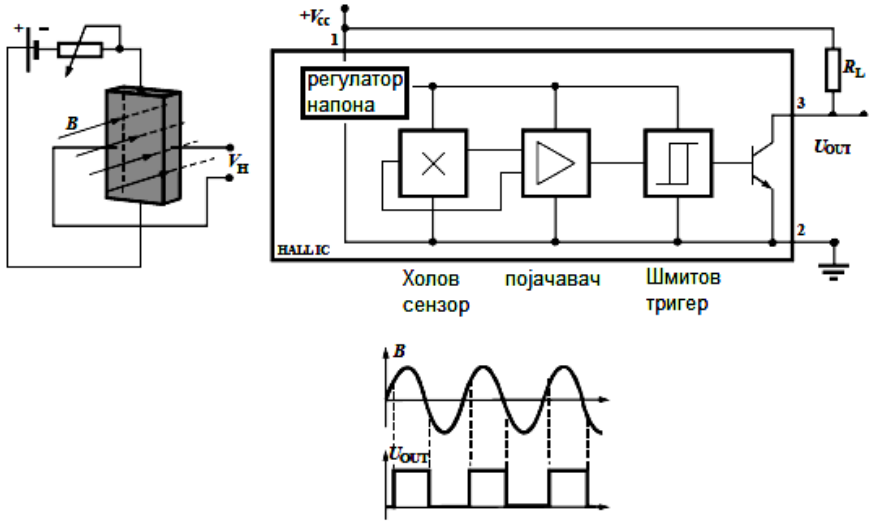
Иако је основна примена Холовог претварача мерење магнетне индукције $B$, овим претварачима се мере и неке механичке величине, као што су транслаторно померање (слика 7.23а) или угаоно померање (слика 7.23б и 7.23в), када ове величине могу да се региструју преко промене магнетне индукције. Холов претварач је тако постављен да приликом ротације долази до периодичних промена индукције $B$, чиме се генеришу напонски импулси. Учестаност ових импулса је директно сразмерна угаоној брзини, док је амплитуда импулса константна и не зависи од угаоне брзине. То је уједно и основна предност Холовог претварача у односу на електродинамички.




а) б) в)

Слика 7.23. Примена Холовог сензора за мерење транслаторног помераја и угаоне брзине

Претварач угаоне брзине се једноставно реализује помоћу чипа са интегрисаним Холовим сензором и одговарајућег сталног магнета. Интегрисани Холов сензор садржи Холову плочицу и електронска кола за појачање и прилагођење излазног сигнала (слика 7.24).




Слика 7.24. Принцип рада интегрисаног Холовог сензора

# 7.3 АКЦЕЛЕРОМЕТРИ

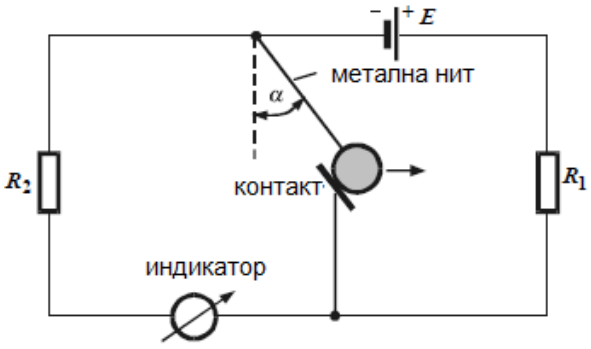
Постоје различите методе за мерење убрзања и различите реализације акцелерометара. У циљу успешног мерења убрзања, тип акцелерометра треба да буде добро прилагођен мерном окружењу.

## 7.3.1 КОНТАКТНИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ

Контактни акцелерометри су најједноставнији. Њихов рад се заснива на мерењу силе инерције:

$$F_{in} = ma_{\max} \tag{7.17}$$

при чему је $m$ позната маса, а $a_{max}$ максимално дозвољено убрзање. Ови акцелерометри заправо само сигнализирају да ли је тренутна вредност убрзања већа од $a_{max}$. На слици 7.25 приказан је контактни акцелерометар код кога метална куглица масе $m$ належе на контакт и затвара струјно коло преко отпорника $R_1$ све док је $a \leq a_{\max.}$ Када се акцелерометар креће са линеарним убрзањем $a > a_{\max}$, куглица је одвојена од контакта и струјни круг се затвара кроз отпорнике $R_1$ и $R_2$. Тада уређај сигнализира прекорачење.




Слика 7.25. Контактни акцелерометар

## 7.3.2 ИНДУКЦОНИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ

Принцип рада **индукционих акцелерометара** заснива се на појави да мерена механичка величина ствара индуковани напон $U$ који је према Фарадејевом закону електромагнетне индукције сразмеран промени магнетног флукса $\Phi$:

$$U = \frac{d\phi}{dt} \tag{7.18}$$

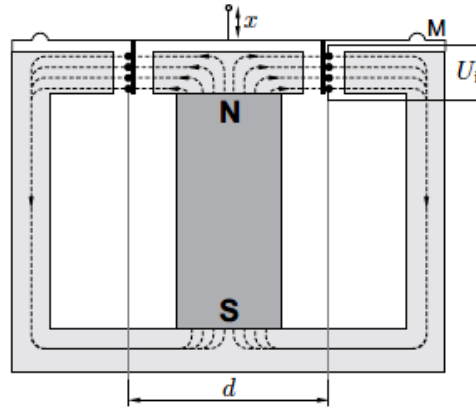
услед померања калема у магнетном пољу под утицајем механичке величине. У прстенастом ваздушном процепу настаје цилиндрично симетрично поље индукције $B$. У овом процепу се налази калем са $N$ навојака пречника $d$ који је причвршћен за мембрану М (слика 7.26). Под утицајем механичке силе мембрана и калем се померају, па се у калему индукује напон:

$$U_i = BLv \tag{7.19}$$

где је $L$ дужина проводника који се креће брзином $v$ у магнетном пољу индукције $B$. Када се овај закон примени на калем пречника $d$ са $N$ навојака који се налази у ваздушном процепу, где је магнетна индукција $B$, добија се напон:

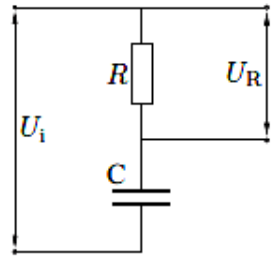
$$U_i = B\pi dN\frac{dx}{dt} \tag{7.20}$$

где је $dx$ померање калема у односу на непокретни магнет за време $dt$.




Слика 7.26. Индукциони претварач са покретним калемом

Да би индукциони претварач могао да се користи за мерење убрзања, мерни ланац мора да садржи електричне елементе који ће извршити диференцирање напона претварача (слика 7.27). Напон $U_i$ из претварача доводи се на крајеве серијски везаног RC елемента.




Слика 7.27. Коло за диференцирање

Ако је $U_C \gg U_R$ излазни напон је приближно једнак напону на кондензатору, одакле следи да је:

$$dU_i = \frac{1}{C}Idt \tag{7.21}$$

$$I = C\frac{dU_i}{dt} \tag{7.22}$$

$$U_R = IR = RC\frac{dU_i}{dt} = \pi BNdRC\frac{d^2x}{dt^2} = k\frac{d^2x}{dt^2} \tag{7.23}$$

На основу добијеног израза следи да је напон на отпору *R* пропорционалан убрзању.

## 7.3.3 ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ

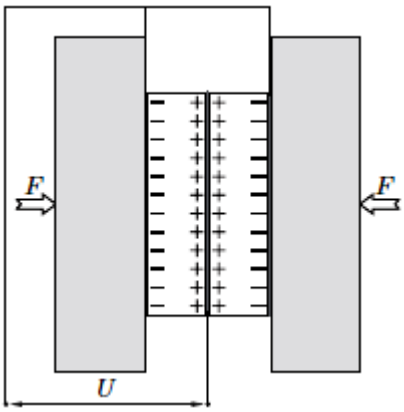
Пиезоелектрични акцелерометри садрже пиезоелектричне претвараче, који се најчешће реализују од силицијума, чије су пиезоелектричне особине независне од температуре до $500^0$C. Наелектрисање на површинама на које делује сила настаје тренутно са дејством силе и пропорционално је сили:

$$Q = kF \tag{7.24}$$

а такође и нестаје тренутно са престанком дејства силе. Наелектрисање $Q$ мери се преко напона $U$ на кондензатору капацитета $C$:

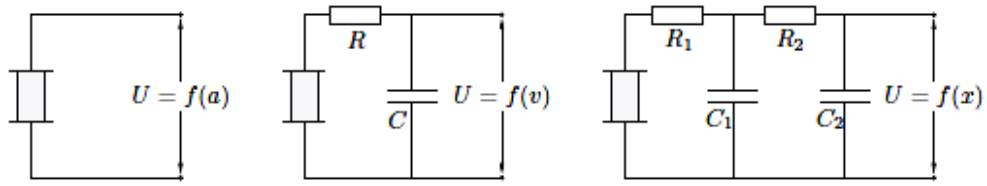
$$U = \frac{Q}{C} = F\frac{k}{C} \tag{7.25}$$

где је $\frac{k}{C}$ стрмина претварача и уколико је већа, утолико је капацитет $C$ мањи. Ради добијања већих напона, обично се два кристала механички везују на ред (слика 7.28).




Слика 7.28. Шема везе пиезоелектричног претварача

Пошто је сила $F$ једнака производу масе $m$ и убрзања $a$, напон претварачаје такође пропорционалан убрзању, односно $U = f(a)$. Шема везе кола са пиезоелектричним претварачем за мерење убрзања приказана је на слици 7.29а. Исти претварач може да се уз додатак једног кола интегратора који интеграли убрзање по времену употреби за мерење брзине (слика 7.29б), односно додатком још једног интегратора који интеграли брзину по времену (слика 7.29в) употреби за мерење помераја.



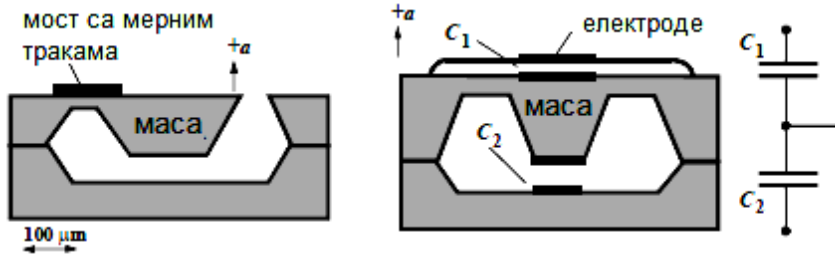

а) б) в)

Слика 7.29. Шема везивања кола са пиезоелектричним претварачем за мерење а) убрзања, б) брзине и в) помераја

### 7.3.4 ПОЛУПРОВОДНИЧКИ АКЦЕЛЕРОМЕТРИ

**Полупроводнички акцелерометар** прави се као интегрисана структура у којој је сеизмичка маса закачена на профилисану силицијумску конзолу која трпи деформације услед убрзања. Деформација може да се детектује мостом са мерним тракама (слика 7.30а) или применом капацитивног диференцијалног сензора (слика 7.30б) код кога средњи слој има улогу сеизмичке масе. Са капацитивним диференцијалним сензором се постиже већа осетљивост.

Полупроводнички акцелерометри су малих димензија и налазе широку комерцијалну примену. Комбиновањем са електронским колима добијени су интегрисани дигитални сензори у једном чипу.




а) б)

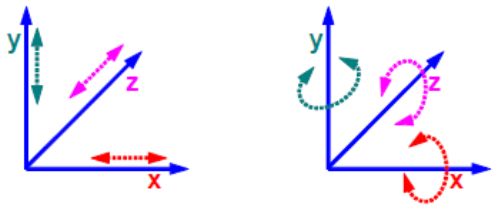
Слика 7.30. Полупроводнички акцелерометар

а) сеизмичка маса на еластичној конзоли, б) маса на покретној електроди диференцијалног капацитивног сензора

## 7.4 МЕРЕЊЕ ВИБРАЦИЈА

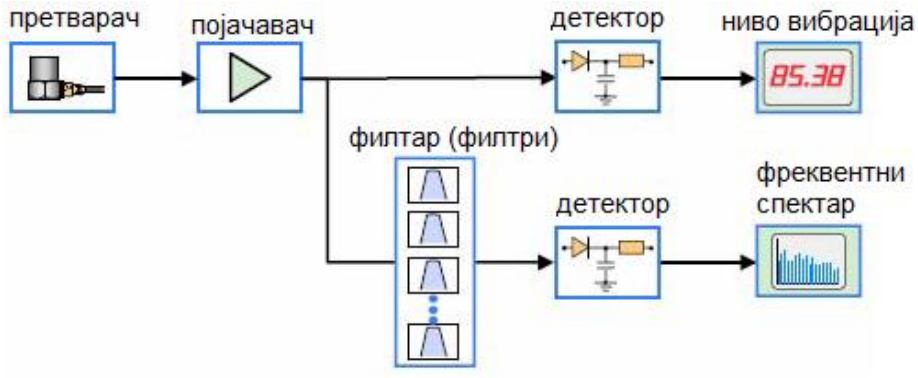
У току рада постројења, машина и механизама често настају механичке осцилације као последица великих убрзања код периодичног кретања маса, ударних деловања оптерећења, ротационог кретања осовина са неправилним лежиштима и слично. Такве осцилације су штетне за рад уређаја. Оне представљају бескорисну потрошњу енергије, смањују коефицијент корисног деловања; због њих се повећавају димензије појединих делова уређаја, а могу да доведу до ломова и хаварија. Вибрација са великом амплитудом и малим временом трајања означава се као ударна или шок-вибрација. Вибрације се дешавају како приликом линеарног тако и приликом ротационог

кретања, па је за њихово праћење потребно шест сензора за транслацију у три ортогоналне пројекције на x, y и z осе и ротацију око x, y, и z осе (слика 7.31) или један сензор осетљив на свих шест компоненти убрзања.




Слика 7.31. Дефинисање степена слободе кретања

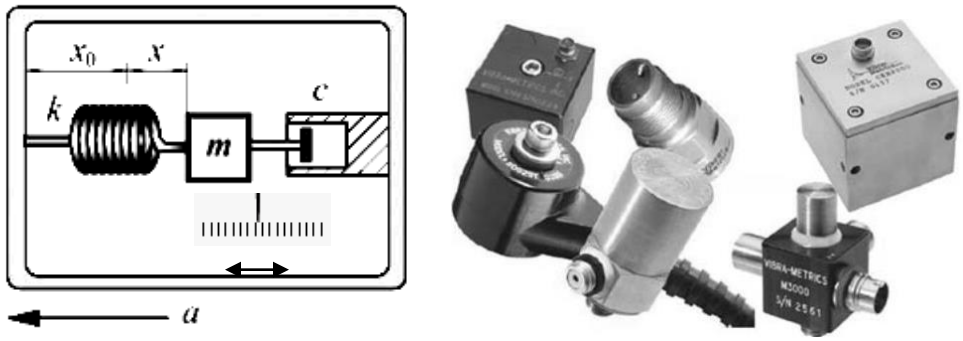
Вибрације у свом најједноставнијем облику могу да се сматрају осцилацијама или кретањем објекта. које се понавља око неког равнотежног положаја. Равнотежни положај је положај у којем објекат остаје ван утицаја спољних сила. Вибрацију објекта обично изазива сила побуде (ексцитације). која може да буде спољна сила или је сила која настаје у самом објекту Основне величине које се користе за мерење и описивање вибрација су: фреквенца основне осцилације (првог хармоника), фреквенца виших хармоника, померај, брзина и убрзање. Сви ови параметри могу да се мере одговарајућим претварачима. Сензор је увек саставни део сложеног мерног система који се састоји од претварача, елемената за обраду сигнала и уређаја који омогућавају приказ нивоа вибрације или фреквентног спектра Претварач је уређај који региструје и препознаје физичку величину која одговара вибрацији и врши њено претварање у електрични излазни сигнал који је сразмеран мереној променљивој величини (слика 7.32). У неким применама је довољно само испитивање укупног нивоа вибрација, док је некада неопходан цео фреквентни спектар.




Слика 7.32. Структура уређаја за мерење вибрација

Најширу примену имају **сензори са сеизмичким системом** у коме се кретање масе $m$ закачене на опругу крутости $k$ претвара у одговарајући електрични сигнал применом потенциометарског, капацитивног, индуктивног, пиезоелектричног или магнетострикционог сензора померања (слика 7.33).

Пригушивач ($c$) се користи за проширење фреквентног опсега акцелерометра и смањење амплитуде резонанце.




а) б)

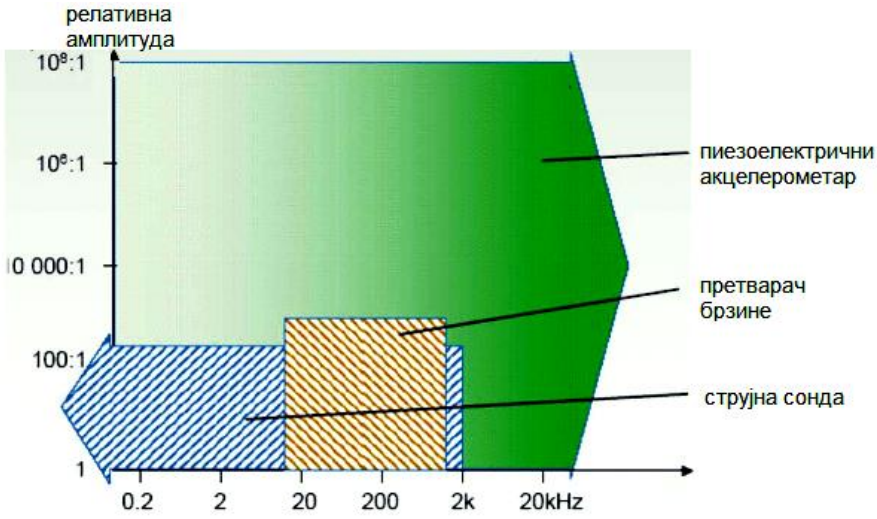
Слика 7.33. Сеизмички сензор
а) принцип рада и б) пиезоелектрични сензори вибрација

Вибрације могу да се детектују преко помераја, брзине и убрзања који су пропорционални вибрацијама. Претварачи помераја региструју релативно кретање између мерне тачке и посматране површине, док претварачи брзине и акцелерометри врше мерење апсолутног кретања структуре на којој су причвршћени. Пошто је побуда периодична, излазни померај као параметар вибрације мери се као вредност између максималног позитивног и максималног негативног помераја. Опсег помераја је од $10^{-13}$ m до 10 m.

Мерење брзине вибрације објекта најбоље се остварује ако је крутост опруге мала и ако је пригушење велико. Тада се сила која делује на сеизмички елемент преноси само преко вискозног трења. Брзина као параметар вибрација се мери у опсегу$10^{-8}$ m/s до $10^{3}$ m/s.

Да би помак тела био пропорционалан величини убрзања, потребно је да опруга има велики коефицијент крутости, а пригушење треба да буде што мање, јер сеизмички елемент треба да прати осцилације кућишта и да се помера у односу на свој равнотежни положај само у тренутку када се кућиште креће са убрзањем. Сеизмички сензор који задовољава наведена ограничења ради као акцелерометар. Убрзање као параметар вибрација се мери у опсегу $10^{-8}g$ до $10^{3}g$ ($g\approx 9.81\frac{m}{s^2}$).

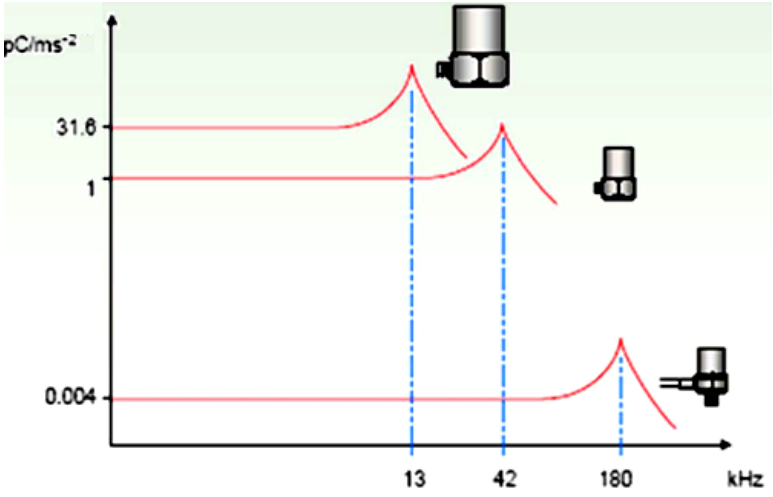
У зависности од параметра вибрација који се мери, користе се разни типове претварача који имају различите радне опсеге. При мерењу треба изабрати параметар који има најравнији одзив у посматраном фреквентном опсегу. Фреквентни и динамички радни опсези појединих врста претварача се значајно разликују и то су карактеристике које утичу на избор претварача приликом мерења вибрација (слика 7.34).




Слика 7.34. Фреквентни опсези и релативне амплитуде типичних претварача

**Пиезоелектрични акцелерометар** је најчешће коришћени претварач за мерење вибрација. Акцелерометри имају линеаран одзив у широком фреквентном опсегу 0.5 Hz do 20 kHz, а неки типови акцелерометара и преко 50kHz (слика 7.35). Линеаран одзив подразумева непроменљиву вредност осетљивости (s) акцелерометра која зависи од наелектрисања $Q$ и убрзања $a$:

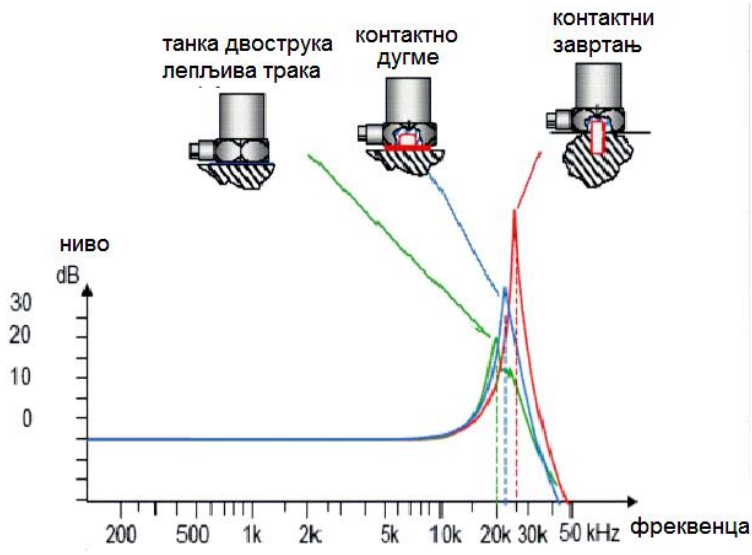
$$s = \frac{Q}{a}\left[\frac{pC}{\frac{m}{s^2}}\right] \tag{7.26}$$




Слика 7.35. Фреквентна карактеристика акцелерометра

При избору акцелерометара треба водити рачуна да маса акцелерометра буде најмање 10 пута мања од масе објекта чије се вибрације мере, а фреквентни опсег извора треба да се поклапа са фреквентним одзивом акцелерометра и не сме да се поклопи са резонантним подручјем. Такође, динамички опсег акцелерометра треба да буде усаглашен са праћеном појавом вибрација. Температура контактне површине на машини чије се вибрације мере мора да се налази у оквиру прописаног радног опсега температуре акцелерометра, јер прегревање пиезоелектричног материјала доводи до деполаризације, а самим тим и до губитка осетљивости.

Правилно учвршћивање акцелерометара на објекат који вибрира има одлучујући утицај на резултат мерења. Пиезоелектрични акцелерометар има највећу осетљивост у правцу који је нормалан на његову површину. Повезивање акцелерометра са објектом који врши вибрације може да се оствари на различите начине, а неки од њих су приказани на слици 7.36.




7.36. Начини учвршћивања акцелерометра

## 7.5 МЕРЕЊЕ СИЛЕ И МОМЕНТА

Сила је једна од основних величина у механици. Мерење силе је заступљено у многим областима: роботици, грађевинарству, медицини, процесној индустрији, у електричним машинама и разним другим областима. Мерење силе може да буде:

- континуално (потребно је одредити тачну вредност силе) или
- дискретно (детектује се да ли је вредност силе већа од задате вредности).

У складу са другим Њутновим законом, сила $F$ се дефинише као производ масе $m$ и убрзања $a$:

$$F = ma \tag{7.27}$$

Јединица за силу је N=$\frac{kgm}{s^2}$. Ако је маса позната, сила се одређује мерењем убрзања. Сензори који се примењују су у ствари акцелерометри. Мерење силе помоћу **убрзања** (**акцелерације**) $\boldsymbol{a}$ познате масе $\boldsymbol{m}$ ретко се примењује, мада постоји велики избор акцелерометара. Разлог је што сила обично делује на неко тело које није слободно, и не може да се креће, па нема ни убрзања.

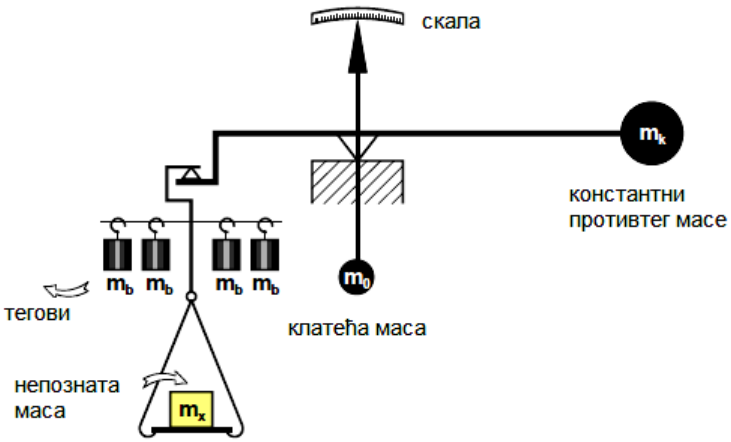
Сила Земљине теже $G$ која настаје деловањем убрзања силе земљине теже $g$ ($g \approx 9.81 \frac{m}{s^2}$) и увек је усмерена према центру масе Земље:

$$G = mg \tag{7.28}$$

може да се одреди мерењем масе. У том случају су одговарајући сензори силе, ваге. Методе мерења силе применом гравитационог закона називају се методе баланса. Директно мерење силе остварује се специјалним уређајима који се зову **динамометри**. Динамометри према принципу рада могу да буду: механички, електрични, хидраулични и пнеуматски. Основни захтеви које свака конструкција динамометра мора да задовољи су:

- висока осетљивост у целом опсегу мерења,односно брзо реаговаање на промену силе,
- мала инерција,
- практичност и економичност у раду.

Код **механичких динамометара** постоје два основна приступа у мерењу силе и то директно поређење и индиректно поређење помоћу калибрисаних претварача. Директно поређење је техника баланса односно нулта метода. Баланс се код механичких вага успоставља путем једнакости момената. Најстарије ваге су направљене да раде на овом принципу. Метод једнакости момената зове се и метод симетрије. Сила и њено деловање на краку се изједначују са неком другом силом која делује на другом краку. На овај начин се врши вагање односно директно одређивање силе на другом познатом краку (слика 7.37).




Слика 7.37. Принцип рада ваге

Електрични динамометри се чешће користе, јер имају мању инерцију, већу тачност и осетљивост у односу на механичке и хидрауличке.

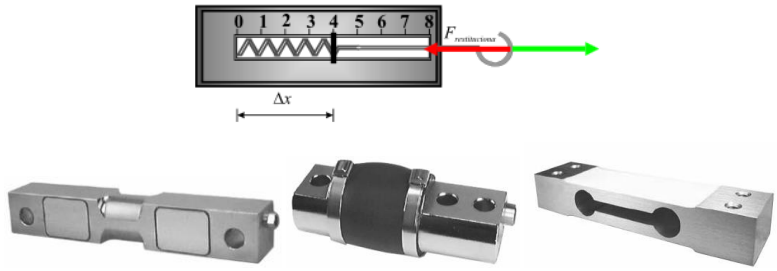
Деловањем силе долази до деформације. Мерењем деформације може индиректним поступком да се израчуна сила у опрузи или еластичном штапу. **Еластични сензори** имају механички еластични елемент чија је деформација, односно промена дужине, пропорционална сили која на њега делује. Деформација елемента описује се диференцијалном једначином другог реда:

$$F = a \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c \cdot x \tag{7.29}$$

где је $x$ деформација тела, која се у **стационарном** стању своди на линеарну једначину (Хуковом закон):

$$F = cx \tag{7.30}$$

при чему се крутост тела $c$ третира као коефицијент пропорционалности. Најједноставнији деформациони елемент за мерење силе је опруга, а осим опруге употребљавају се још елементи у облику прстена, рама, цилиндра, конзоле и други (слика 7.38). Помоћу еластичних сензора може да се мери сила у опсегу 0-$10^{-7}$ N, а тачност и опсег инструмента зависе од еластичног елемента и сензора који детектују насталу деформацију.



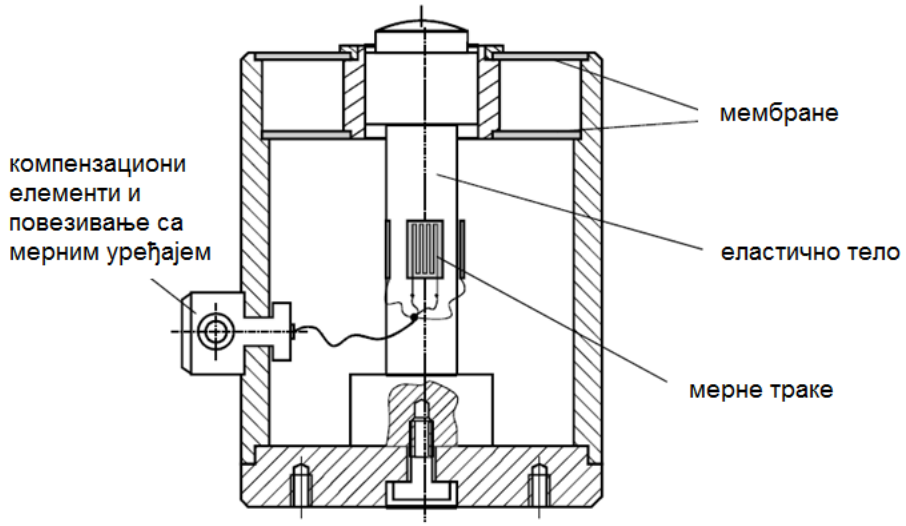

Слика 7.38. Примери еластичних елемената за мерење силе

Сензори силе су често веома комплексни. Њихова конструкција одређена је физичким принципом конверзије силе у излазни сигнал, као и технолошким и економским могућностима. У оквиру ових ограничења могуће је направити велики број различитих сензора. За сваку конкретну шему конструкције постоје горња и доња граница номиналних вредности силе. Није пожељно да се пређе дефинисани опсег, јер се тиме повећавају грешке мерења и може да дође до трајног оштећења сензора. Уколико је потребан сензор за већу или мању номиналну силу, обично се мења његова конструкција или се конструише сензор са другим принципом претварања.

## 7.5.1 ЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ СИЛЕ

Широка примена електричних метода за мерење силе и напрезања започела је крајем тридесетих година прошлог века са развојем првих мерних трака чији је принцип рада описан у поглављу 6). Мерење сила електричним динамометрима се своди на мерење деформација мерним тракама на штапу или прстену оптерећеном силама истезања или притиска. Као еластични елемент за мерење средњих и великих сила често се примењује вертикално

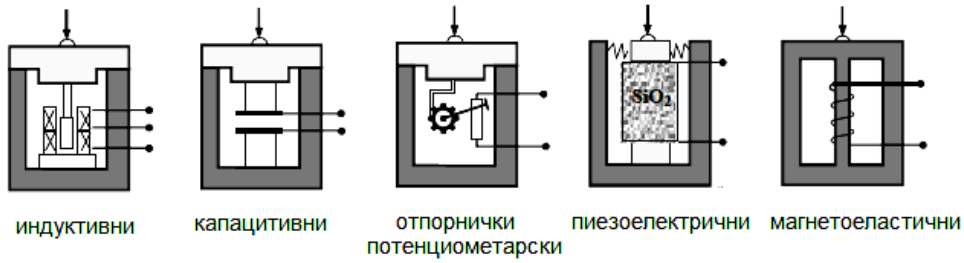
постављен носач направљен од квалитетног челика (слика 7.39). Врх је заобљен, тако да вертикална сила која се мери делује дуж осе. На носачу су залепљене четири идентичне мерне траке, а сам носач са мерним тракама је заштићен кућиштем од спољашњих утицаја, као што су влага и нечистоћа. Број мерних трака зависно од типа, конструкције и врсте мерног моста такође може да буде различит. Код практичних динамометара лепи се осам и више мерних трака постављених усправно или хоризонтално распоређених по обиму носача. На тај начин се компензује утицај евентуалног кривљења због неаксијалног деловања силе, као и због индивидуалних разлика у карактеристици трака.




Слика 7.39. Мерна ћелија у електричном динамометру са мембраном

Мерни опсег претварача са слике 7.39 је од 100 N до 10 kN. Да би се повећала осетљивост при мерењу малих вредности сила, динамометар се израђује у облику прстена, а мерне траке се повезују у мост. Нелинеарност мерења силе квалитетних претварача може да износи 0.05% са хистерезисом 0.02%. Ако је отпорност мерних трака $R = 300\ \Omega$, и коефицијент осетљивости $k = 2$, максималан излазни напон моста износи од 20 до 30 mV.

Поред мерних трака, за мерење силе се такође успешно користе отпорни, капацитивни, индуктивни, пиезоелектрични, и магнетоеластични претварачи (слика 7.41).




Слика 7.40. Примери еластичних сензора са електричним излазом

Развој ових претварача, заједно са мерним тракама довео је до готово потпуног потискивања механичких уређаја од стране електронских у многим областима примене мерача силе.

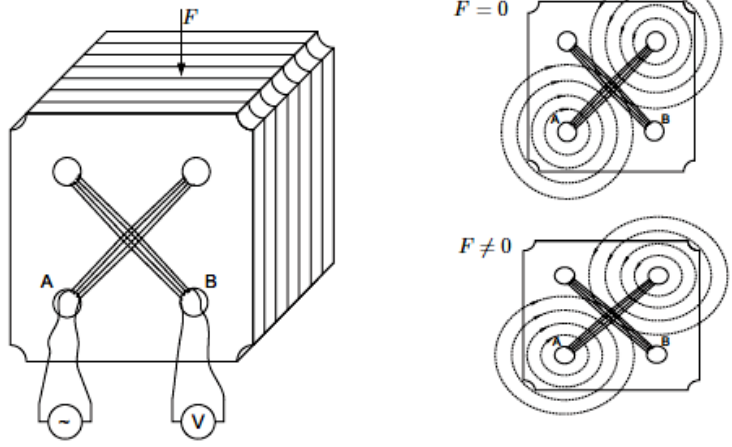
За мерење великих сила користе се претварачи на бази инверзног магнетострикционог ефекта, који се састоји у промени магнетних особина материјала подвргнутог механичким напрезањима. Долази до повећања губитака услед хистерезиса и до ефективног смањења магнетне пермеабилности материјала (слика 7.41а). Претварач се састоји од феромагнетног језгра са намотајем чија се индуктивност L мери (слика 7.41б). У неоптерећеном стању језгро има максималну пермеабилност као и индуктивност. При деловању силе $F$ долази до пропорционалног смањења $L$, односно релативне отпорности калема,·што може да се региструје помоћу мостова и износи од 30% до 40%. У зависности од димензија ови претварачи се користе за мерење силе од $10^3$ N до $10^6$ N.




а) б

Слика 7.41. Примена магнетострикционог ефекта за мерење силе
а) хистерезисне петље материјала без напрезања и са напрезањем и
б) претварач на бази магнетострикционог ефекта

У практичним применама, мерење се изводи помоћу два намотаја која су постављена под углом од $90^0$ (слика 7.42).



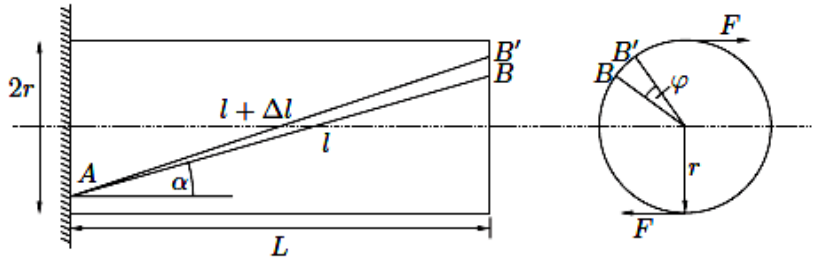

Слика 7.42. Реализација претварача на бази магнетострикционог ефекта

За $F$ = 0, облик магнетних линија је такав да је флукс кроз секундар једнак

нули, па је и излазни напон једнак нули. За $F \neq 0$ смањује се магнетна пермеабилност и то више у правцу деловања силе. То деформише магнетне линије силе и резултантни флукс секундара постаје различит од нуле, тако да се јавља излазни напон који је пропорционалан сили. Овај тип давача се напаја стабилисаним наизменичним напоном.

## 7.5.2 МЕРЕЊЕ НАПРЕЗАЊА УСЛЕД ТОРИЗИЈЕ

Напрезање материјала услед торзије је специјалан случај напрезања под дејством силе, који се јавља у машинству (мотори, дизалице, итд.). Ова могућност може да се илуструје помоћу вратила које је учвршћено једним крајем, док на други крај делује спрег сила које га обрћу (слика 7.43). Услед увртања, тачка *B* се помера у *B′*. Ово померање у функцији угла увртања вратила $\varphi$ је $BB' = r\varphi$.




Слика 7.43. Модел вратила изложеног увртању

С друге стране, прелазак у нови положај доводи до повећања дужи *AB* чија је дужина $l$ за дужину $\Delta l$, тако да је дужина дужи $AB' = l + \Delta l$. На основу ознака са слике важи:

$$(AB')^2 = (l + \Delta l)^2 = L^2 + (r\rho + l\sin\alpha)^2 \tag{7.31}$$

$$\frac{L}{l} = \cos\alpha \tag{7.32}$$

$$2\frac{\Delta l}{l} = \frac{2r\rho}{l}\sin\alpha \tag{7.33}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{r\rho}{l}\sin\alpha = \frac{r\rho}{L}\sin\alpha\cos\alpha \tag{7.34}$$

Из теорије еластичности угао увртања је дат изразом:

$$\rho = \frac{2ML}{\pi E_S r^4} \tag{7.35}$$

где је $M$ моменат спреге који врши увртање, а $E_S$ је модуо смицања, односно торзије. Заменом у претходни израз и сређивањем добија се да је деформација дужи на површини вратила која уједно одговара деформацији

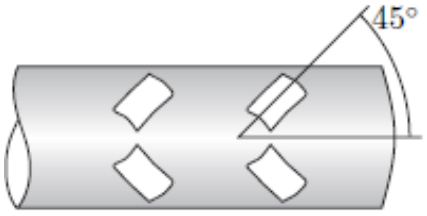
мерне траке залепљене на површину вратила:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{M}{\pi E_S r^3} \sin \alpha \tag{7.36}$$

Промена отпорности мерне траке је на основу тога:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{M}{\pi E_S r^3} \sin 2\alpha \tag{7.37}$$

одакле се види да је промена отпорности пропорционална моменту спреге *M.* За мерење момента применом мерних трака као еластичан елемент се користи цилиндар са залепљеним тракама. На основу претходног израза следи да моменат има максималну вредност када се траке лепе под углом $\pm 45^0$ (слика 7.44). За мерење торзије често се мерне траке користе самостално, али могу да буду и саставни делови неког уређаја у лабораторији или у индустрији.




Слика 7.44. Претварачи за мерење торзије услед деформације

## 7.6 МЕРЕЊЕ ПРИТИСКА

Притисак је заједно са температуром једна од најчешће мерених неелектричних величина у техници и индустрији. Притисак $p$ одређује се по дефиницији као однос нормалне силе $F$[N] и површине $S$[m$^2$]:

$$p = \frac{F}{S} \tag{7.38}$$

Поред претходне дефиниције која произилази из механике, постоје и друге дефиниције. Према теорији флуида, притисак је локално својство флуида и зависи од висине стуба $h$[m] флуида изнад дате локације и густине флуида $\rho$[kg/m$^3$]:

$$p = \rho g h \tag{7.39}$$

Притисак такође може да се дефинише и преко кинетичке теорије гасова, као и преко другог закона термодинамике.

Без обзира на то како се дефинише притисак, јединица за притисак у SI систему је **Paskal** (Pa) и дефинише се као сила од 1 N која равномерно делује на површину од 1 m$^2$. Међутим, како је ова јединица веома мала, у

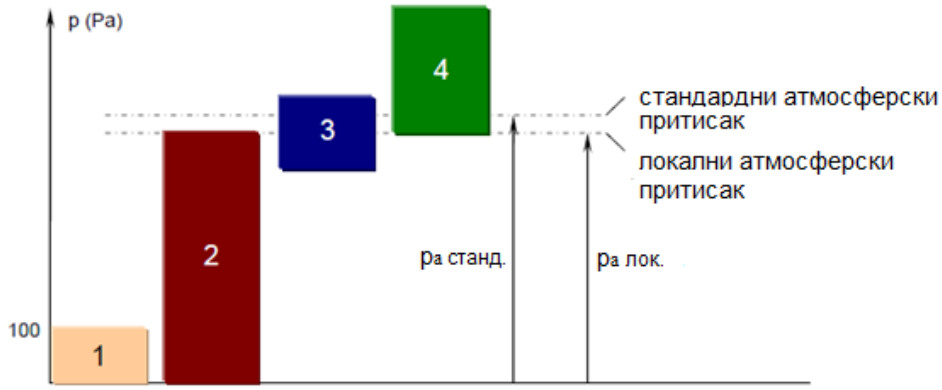
употреби је најчешће јединица **bar**, која је дозвољена из практичних разлога, иако се не налази у SI систему, и износи $\mathbf{10^5}$ **Pa**.

Уобичајени термини повезани са мерењем притиска су:

- **вакуум**: стање у коме је притисак нула, а исти назив се користи за мерење ниских притисака мањих од 100 Pa.
- **апсолутни притисак**: притисак који се измери у односу на притисак једнак нули.
- **релативни притисак**: притисак мерен с обзиром на притисак околине
- **надпритисак**: притисак који је виши од притиска околине
- **подпритисак**: притисак који је нижи од притиска околине.

Притисци се мере у распону од високих притисака изнад $10^{10}$ Pa, па до ултравакуума реда величине $10^{-10}$ Pa**.** У техничкој пракси, притисак се најчешће мери у четири области (слика 7.45). То су:

- област ниског апсолутног притиска (техничког вакуума) од $10^{-10}$ Pa до 100 Pa
- област барометарског притиска
- област малих диференцијалних притисака у односу на атмосферски, потпритиска $p - p_a < 0$ и натпритиска $p - p_a > 0$ у опсегу од 0 Pa до 2500 Pa
- област високог релативног притиска (натпритиска) 0 Pa до $10^{10}$ Pa




Слика 7.45. Области техничког мерења притиска

Разликују се три категорије мерења притиска:

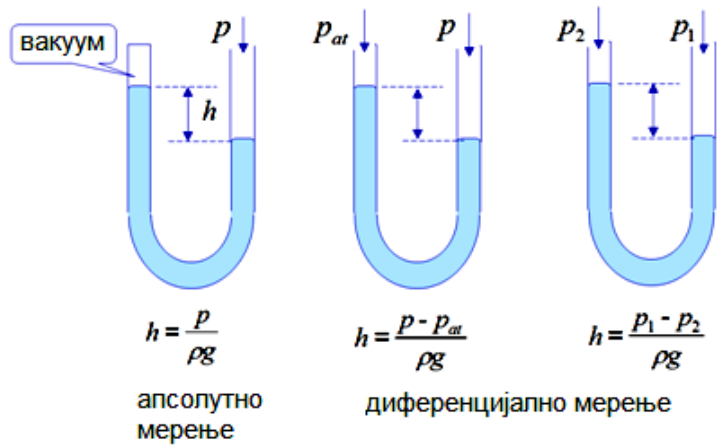
- мерење апсолутног притиска као разлике притисака у одређеној тачки флуида и притиска апсолутне нуле, који има вакуум
- мерење атмосферског (барометарског) притиска
- мерење диференцијалног притиска као разлике притисака у различитим тачкама флуида

Инструменти за мерење притиска су **манометри**. Због широког опсега вредности притиска, користи се већи број мерних метода и типова претварача Према принципу рада манометри могу да се поделе на: хидростатичке, механичке и електронске. У области средњих и виших притисака, од апсолутних. инструмената користе се манометри са течностима, клипне ваге

и манометри са уроњеним звоном. За веома високе притиске реда $10^9$ Pa као еталон се примењује инструмент са жичаним отпорним претварачима.

## 7.6.1 МАНОМЕТРИ СА ТЕЧНОСТИМА

Примарну важност имају апсолутна мерења где се притисак *p* одређује по својој дефиницији. Манометри са течностима се користе углавном за апсолутна мерења статичких притисака у лабораторијским условима, и то углавном као еталони за потребе калибрације. Најједноставнији манометар овог типа је манометар са "U" цеви, чији је принцип рада приказан на слици 7.46.




Слика 7.46. Принцип рада манометра са "U" цеви

Манометри са "U" цеви показују разлику притисака изнад површине течности у крацима цеви, која се очитава као разлика у висини течности у тим крацима. У стационарном стању, разлика притисака је једнака хидростатичком притиску течности:

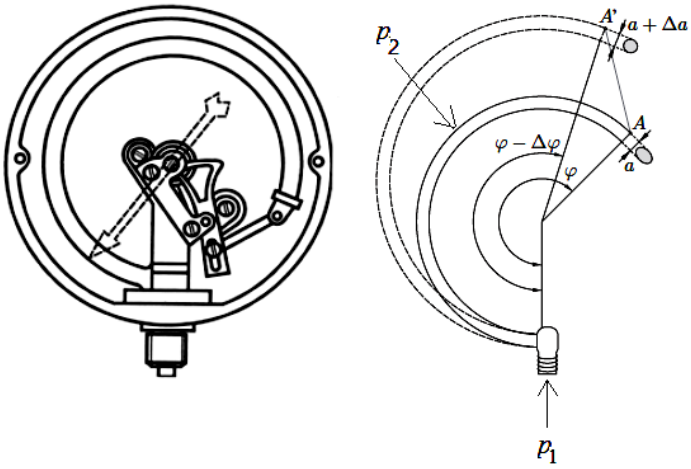
$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h \tag{7.40}$$

Уобичајене течности су жива, вода и алкохол. У пракси се као референтни притисак $p_2$ користи атмосферски притисак. Доња граница притисака који могу да се мере оваквим типом манометра је до 10 Pa.

## 7.6.2 ЕЛАСТИЧНИ ПРЕТВАРАЧИ

За практична мерења притиска, како у статичким, тако и у динамичким условима,најчешће се користе претварачи на принципу еластичних деформација танких металних елемената. Еластични елемент може да покреће механизам са казаљком, којом се очитава притисак. Најраспрострањенији еластични претварачи су Бурдонове цеви, мембране, и шупљи танки цилиндри. Ови претварачи могу да се користе за мерење како малих, тако и врло великих притисака који достижу $7x10^8$ Pa а. Еластични претварачи оптерећени изнад дозвољених граница трајно мењају своје карактеристике о чему се мора водити рачуна при коришћењу.

**Бурдонова цев**, патентирана 1849. године, представља најстарији и вероватно још увек најчешће коришћени еластични претварач за мерење притиска. Основна реализација Бурдонове цеви и принцип рада приказани су на слици 7.47. Попречни пресек цеви је спљоштеног или елипсастог облика. Под дејством разлике унутрашњег и спољашњег притиска пресек цеви тежи да добије облик близак кружном. Анализа деформација Бурдонове цеви је врло компликована и обично се даје само у апроксимативном облику.




Слика 7.47. Принцип рада Бурдонове цеви

Показује се да краћа оса $a$ елипсастог попречног пресека и угао цеви $\varphi$ имају релативне деформације линеарно сразмерне разлици унутрашњег и спољашњег притиска:

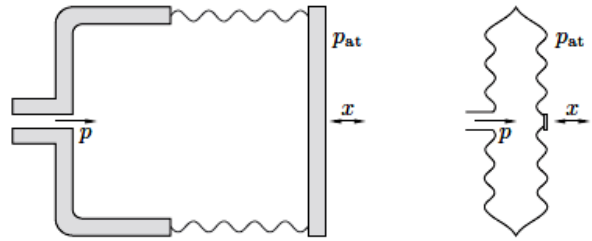
$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = const. \cdot \Delta p \tag{7.41}$$

Као излазна величина Бурдонове цеви користи се померање слободног краја које је такође сразмерно разлици притисака $\Delta p$.

$$\Delta l = \overline{AA'} \tag{7.42}$$

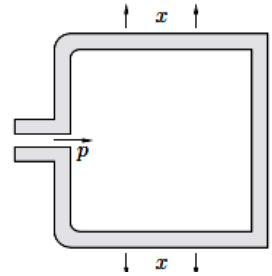
Мерни опсег Бурдонових манометара је врло велики: од малог мерног опсега (0 $kPa$ до 1$kPa$) па до врло великих мерних опсега (0 до $10^7$ Pa).

Претварачи **на бази мембрана** користе се у широком опсегу притисака, почев од нижег вакуума, па до преко $10^8$ Pa (1000 bara). Сила услед разлике притисака са обе стране мембране изједначава се са еластичним силама мембране, изазивајући деформацију сразмерну разлици притисака. У општем случају деформација представља нелинеарну функцију притиска. Међутим, претварачи се користе у ограниченом опсегу где је та карактеристика приближно линеарна, тј. где нелинеарност не прелази границе од 1 % до 5%. Наборана мембрана даје веће излазно померање од равних мембрана. Један од најчешће коришћених претварача са набораним мембранама је анероид (слика 7.48).




Слика 7.48. Претварачи са набраном мембраном

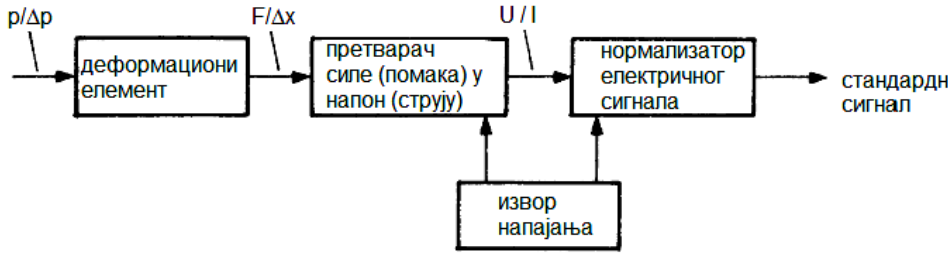
За мерење високих притисака користе се претварачи облика шупљег цилиндра од танког челичног лима, чији се пречник повећава са притиском (слика 7.49).




Слика 7.49. Претварачи за мерење високог притиска

## 7.6.3 МАНОМЕТРИ СА ЕЛЕКТРИЧНИМ ИЗЛАЗОМ

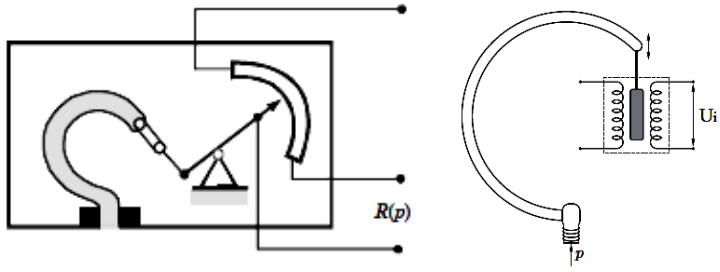
Еластичне деформације манометара могу да се претворе у електрични сигнал великим бројем претварача померања као што су потенциометри, индуктивни и капацитивни претварачи, мерне траке, пиезоелектрични, оптоелектронски као и други претварачи померања. Структура мерача притиска са стандардним електричним излазним сигналом приказана је на слици 7.50.




Слика 7.50. Структура мерача притиска са електричним сигналом

Потенциометри се једноставно комбинују са еластичним манометрима спајањем клизача са покретним крајем манометра, као што је приказано на слици 7.51а. Овакви претварачи могу да буду са **жичаним или слојним**

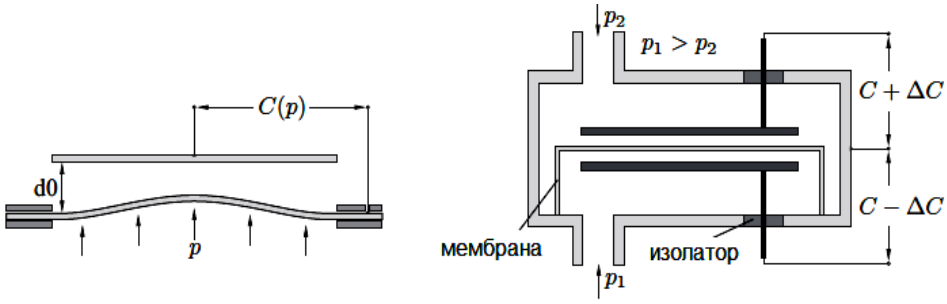
**потенциометрима**. Њихова основна предност је једноставност претварача и велики излазни сигнал који може директно да се води на индикаторе. Међутим, трење клизача уноси губитке и смањује прецизност коју би имао сам еластичан елемент. Код Бурдонових цеви може да се примени и индуктивни претварач са линеарним померањем (слика 7.51б). У поређењу са потенциометарским манометрима, манометри са индуктивним претварачима имају бољу прецизност и дужи век трајања, али захтевају нешто сложенију реализацију.




а) б)

Слика 7.51. Бурдонова цев са електричним излазом
а) са потенциометром и б) индуктивним претварачем

**Капацитивни претварач** за мерење притиска састоји се од мембране као покретне плоче и од фиксне плоче постављене на растојању $d_0$ од мембране, која је учвршћена по обиму (слика 7.52а). У пракси се примењује диференцијални капацитивни претварач са две стационарне плоче и мембраном као средњом покретном плочом (слика 7.52б).



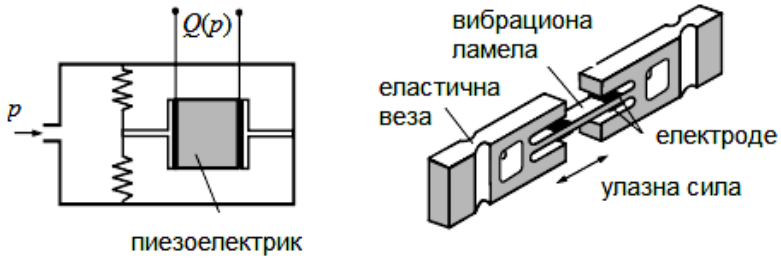

а) б)

Слика 7.52. Манометри са: а) мембраном и б) капацитивним претварачем

За мерење притиска примењују се и пиезоелектрични претварачи, Принцип рада **пиезоелектричних претварача** за мерење притиска заснован је на примени пиезоелектричног ефекта, односно појави наелектрисања дуж одређених површина кристала као што је кварц ($SiO_2$) када се изложи деформацији под дејством механичког напрезања, као што је објашњено у шестом поглављу. При дејству притиска на пиезоелектричну плочицу добија се количина наелектрисања која је сразмерна притиску

$$Q = k \cdot p \cdot S \qquad (7.43)$$

Постоје два типа пиезоелектричних претварача. Код првог типа, сила преко деформационог елемента делује на пиезоелектрик, на коме се јавља електрични напон (слика 7.53а.). Помоћу појачавача напона добија се излазни сигнал, пропорционалан мереном притиску. При директној примени пиезоелектричног ефекта, сигнал је присутан само у кратком временском интервалу након успостављања побуде. Иако овакви претварачи могу да се примењују за споропроменљиве силе, углавном се користи за мерење сила при ударима или експлозијама. Сложеније конструкције имају пиезоелектрични материјал у форми механичког осцилатора, чија се резонантна фреквенца мења у складу са мереним притиском. Један од могућих облика резонатора приказан је на слици 7.53б.



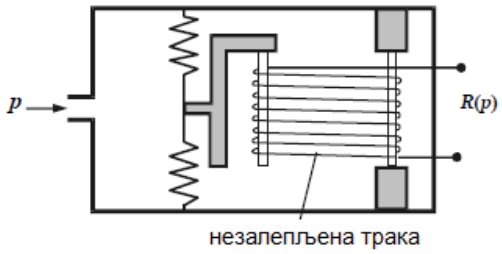

а) б)

Слика 7.53. Пиезоелектрични сензори притиска
а) са еластичном мембраном и б) са резонатором

Битан захтев код пиезоелектричниних сензора са осцилатором је да осцилујућа гредица буде направљена од јединственог комада пиезоелектрика, и да изолационом масом буде одвојена од кућишта. Побуђивање гредица на осциловање с резонантном фреквенцијом остварује се помоћу посебног осцилатора.

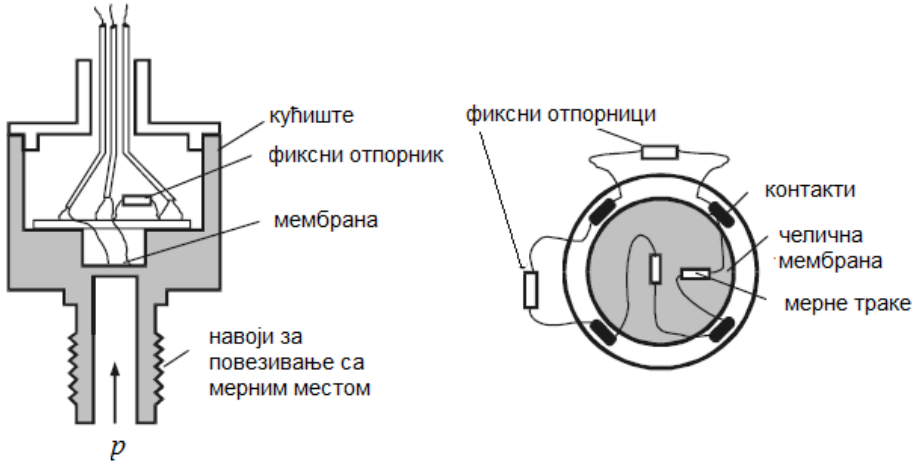
Мерачи са пиезоелектричним сензорима могу да буду веома малих димензија и могу да се прилагоде најразличитијим условима монтаже, због чега су најчешће заступљени у практичној примени (обухватају око 80% тржишта). Поред малих димензија и велике прилагодљивости, предности овог типа мерача су ниска цена и веома висока тачност (грешка најчешће мања од 0.1%). Мане су осетљивост на температурне промене због чега је неопходна термичка компензација, коју обављају електронски склопови интегрисани у мераче. Мерни опсег мерача са пиезоелектричним сензорима креће се између 10 kPa и 70 MPa.

Првобитне реализације сензора притиска чији је рад базиране на промени отпорности са притиском биле су **са слободном (незалепљеном) жицом** (слика 7.54). За реализацију оваквих сензора примењује се жица од константана дебљине од 0.025 mm до 0.02mm и дужине од 2 cm до 4cm. Са померањем покретног дела носача између којих је развучена жица долази до истезања или сабијања жице. То доводи до пропорционалне промене отпора жице, који се мери Витстоновим мостом.




Слика 7.54. Сензор притиска са слободном жицом

Сензори притиска са **мерним тракама** најчешће се праве са мембраном као деформационим елементом (слика 7.55а) и две или четири мерне траке које чине полумост или пун мост (слика 7.55б).




а) b)

Слика 7.54. Сензор притиска са мерним тракама
а) пресек сензора, б) мембрана са мерним тракама и фиксним отпорницама

За полумосну спрегу потребна су два додатна фиксна отпорника за комплетирања моста. Мембрана са мерним тракама и компензационим отпорницима смештена је у цилиндричном кућишту, које штити сензор од температурних, хемијских, механичких и других утицаја околине (слика 7.54б). Излазни напон мосне шеме пропорционалан је напону напајања $U$ и мереном притиску $p$. Одступања од линеарности највећим делом настају због несавршености мембране и механичких преносника силе, због деловања температуре, неправилно одабраних места на којима су залепљене мерне траке итд. Разликују се конструкције за мерење апсолутног притиска, диференцијалног притиска и релативног притиска. У кућишту се, поред тога, налази појачавач, а код специјалних реализација и напонско-фреквентни претварач или напонско-струјни претварач. Примери индустријских сензора за мерење притиска са мерним тракама приказани су на слици 7.55.




Слика 7.55. Пример индустријских сензора за мерење притиска

## 7.7 МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ

Око 50% свих мерења у индустрији чине мерења температуре и протока. У неким гранама индустрије као што су електране, топлане, хемијска постројења и сл. ова мерења чине и до 80% свих мерења. Температура је физичка величина која представља степен загрејаности тела и повезана је са термодинамичким стањем тела и његовом унутрашњом енергијом. При узајамном деловању два тела са различитим температурама долази до преласка топлоте са тела са вишом температуром на тело са нижом. Промена топлотног стања тела праћена је пропратним ефектима као што су промена запремине тела, појава термоелектрицитета, промена отпорности, зрачење,... Температуру тела могуће је измерити само посредно преко величина које се још називају термометарским и које су у функционалној вези са температуром а подложне су директном мерењу

Област мерења температуре се назива **термометрија** и непрекидно се развија око 5 векова. Сматра се да је први термометар конструисао Галилеј 1597. године и састојао се од сталене посуде са цевчицом у којој је био алкохол. Такав термометар је служио само за индикацију промене температуре пошто није имао скалу. У осамнаестом веку предложене су све значајне температурне скале. Фаренхајт је 1711. уместо алкохола употребио живу и дефинисао температурну скалу. За најнижу температуру је узео смесу леда и соли и означио је са 32 степена, а за највишу тачку је узео температуру кључања воде и означио је са 212 степени. Реомир је 1790. конструисао сличан термометар са алкохолом са истим крајњим тачкама али је тај опсег поделио на 80 подеока. Целзијус је 1742. исти опсег, са истим крајњим тачкама поделио на 100 подеока и доњу тачку означио са 100° а горњу са 0°. Један степен дефинише се као стоти део разлике температура мржњења и кључања воде. Вредности Целзијусове скале су обрнуте 1845. и тако је настала скала какву данас познајемо, а од 1948. она се и званично зове Целзијусова скала.

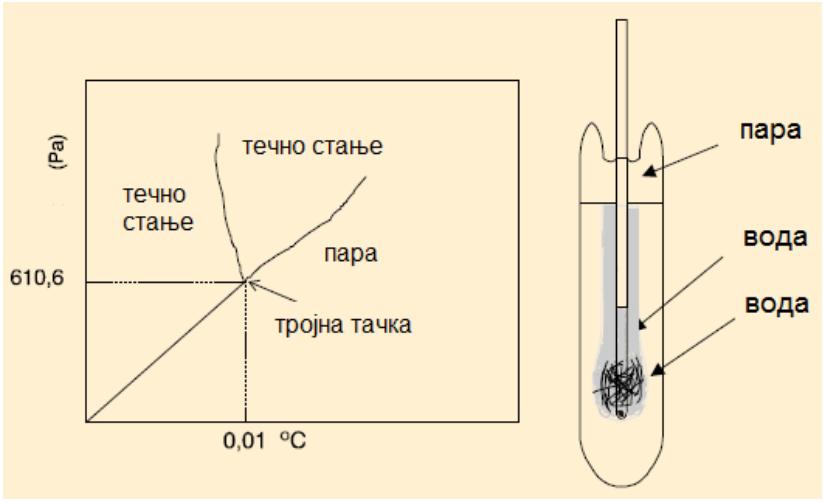
Температурну скалу која дефинише температуру *T* као фундаменталну физичку величину увео је први пут Томсон (Лорд Келвин) 1848. године. Ова температурна скала назива се термодинамичком или Келвиновом скалом.

Њена основна одлика је да је дефинисана независно од својства материјала који се користи као термометријско тело. Температура се према овој скали мери апсолутним методама на бази мерења других величина, као што су притисак, запремина итд. Келвин је своја разматрања базирао на другом закону термодинамике, и анализама идеалне топлотне машине, која ради на основу Карноовог циклуса. Познато је да температуре топлог и хладног резервоара $T_t$ и $T_h$ топлотне машине која ради према Карноовом циклусу стоје у односу:

$$T_t = \frac{Q_t}{Q_h} T_h \tag{7.44}$$

где су $Q_t$ и $Q_h$ количине топлоте коју машина узима од топлог, односно враћа хладном резервоару. Према овој релацији температура се може мерити на основу мерења енергије, односно количина топлоте $Q_t$ и $Q_h$. Температурна скала се због линеарне зависности у горњој релацији може дефинисати помоћу само две дефиницијске температуре, односно референтне тачке.

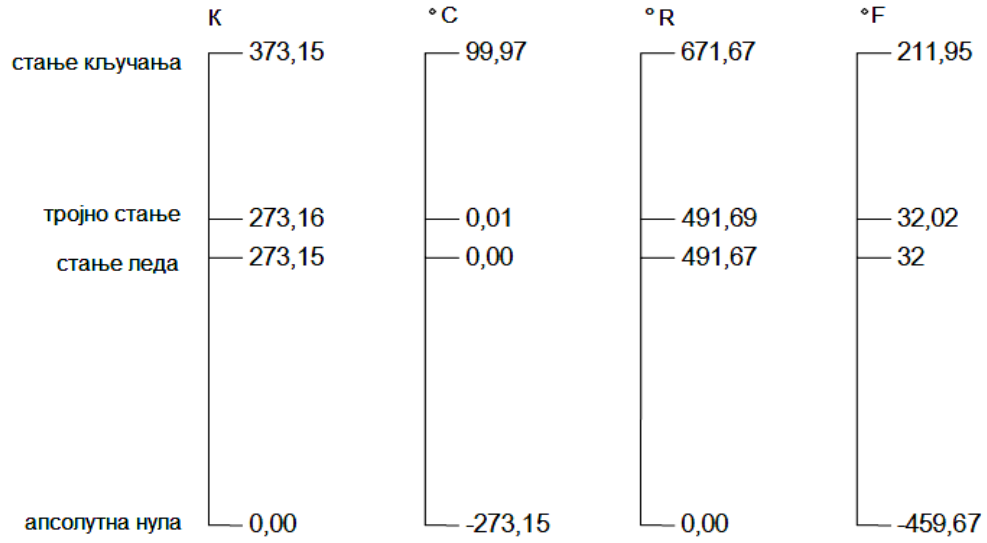
Референтне тачке су карактеристичне физичке појаве, које имају стабилну температуру све време док траје та физичка појава. Вредности тих температура су поновљиве. Најпознатије референтне тачке настају приликом промене агрегатног стања материје. Тројна тачка воде представља основну референтну температуру на температурној скали (слика 7.56).




Слика 7.56. Тројна тачка воде

Јединица за термодинамичку температуру **Келвин** (K) дефинисана је преко тројне тачке воде. Један **Келвин** одговара 1/273,16 делу температуре тројне тачке воде. Температура тројне тачке воде представља фиксну тачку која се може остварити са најбољом поновљивошћу у природи. Температура мржњења воде има слабију поновљивост од тројне тачке, јер у извесој мери зависи од спољних фактора (притисак, влажност), а такође и од нечистоћа воде и сл. Међународни комитет за мерење препоручио је у SI-систему две скале: Келвинову апсолутну термодинамичку температурну скалу и практичну

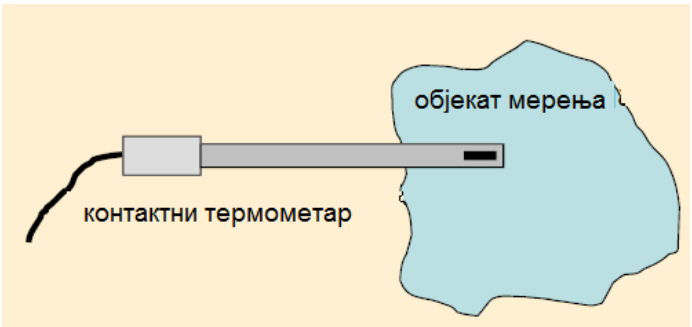
Целзијусову скалу од сто степени. Мерење температуре у обе скале може се да се врши у келвинима [K] или у целзијусима [°C] у зависности од прихваћеног положаја нуле на мерној скали. Упоредни графички приказ температурних скала у односу на стање воде приказан је на слици 7.57




Слика 7.57. Поређење температурних скала

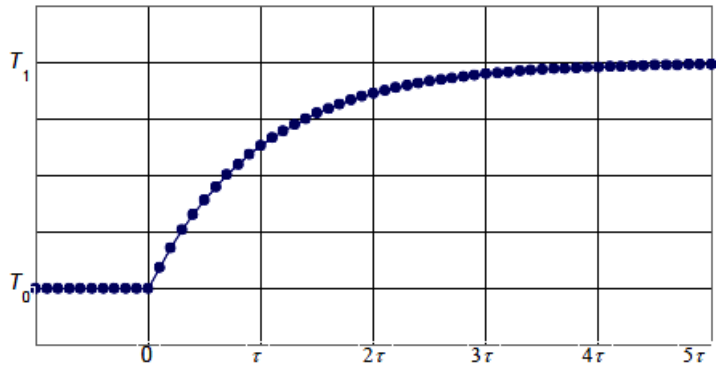
Да би неки термометар могао да се сматра термодинамичким, мора да буде задовољен услов да физичка појава на којој се заснива рад термометра може, са великом тачношћу, да се опише математичком релацијом. У тој релацији, поред термодинамичке температуре $T$ треба да буду само оне физичке величине које се могу измерити неком апсолутном методом, као и физичке константе које су познате са великом тачношћу (брзина светлости $c$, Болсманова константа $k$, Планкова константа $h$ и друге).

Према начину мерења термометри могу да се поделе на **контактне** и **бесконтактне**. Контактни термометри су термометри код којих је сензор температуре у непосредном топлотном контакту са објектом мерења, као што је приказано на слици 7.58.




Слика 7.58. Контактно мерење температуре

**Контактни термометри** раде на принципу промене одређене физичке карактеристике сензора у зависности од температуре, као што су: растезање предмета, промене отпорности, производња термоелектричног напона, механичка деформација, промена густине итд. Контактни термометар увек мери своју властиту температуру, која није увек једнака температури објекта мерења. Измерена температура је једнака температури објекта мерења једино ако је између контактног термометра и објекта мерења постигнута термичка равнотежа, у складу са законима термодинамике. Топлотна капацитивност отпорног термометра представља количину топлоте, која је потребна да се температура термометра промени за 1 °C. Термометар се греје на рачун топлоте која долази из објекта мерања и обрнуто. Топлотна капацитивност термометра зависи од његових материјалних и геометријских особина. Температура термометра постаје стабилна тек после одређеног времена, које зависи од вредности временске константе термометра $\tau$. Зависност протеклог времена од температуре је уобичајено експоненцијалног облика (слика 7.59).




$$T = T_0(T_1 - T_0)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Слика 7.59. Временска константа

Температура је величина која је условљена врло сложеним кретањем атома и молекула неке материје. Због тога не може да се мери директно, већ увек посредством неке особине тела која се назива **температурски параметар.** Код живиног термометра се као температурски параметар користи ширење живе при загревању, код електричног отпорног термометра користи се промена електричног отпора при промени температуре, електромоторна сила термоелемента је зависна од температуре, док код радијационих термометара користи интензитет или боја зрачења усијаног тела ради мерења температуре...Према сигналу мерења разликују се две групе сензора.

- **Неелектрични сензори**, код којих се промена температуре манифестује променом физичких димензија сензора. Овој групи припадају:
    - експанзиони термометри
    - дилатациони термометри

- манометарски термометри
- биметални сензори

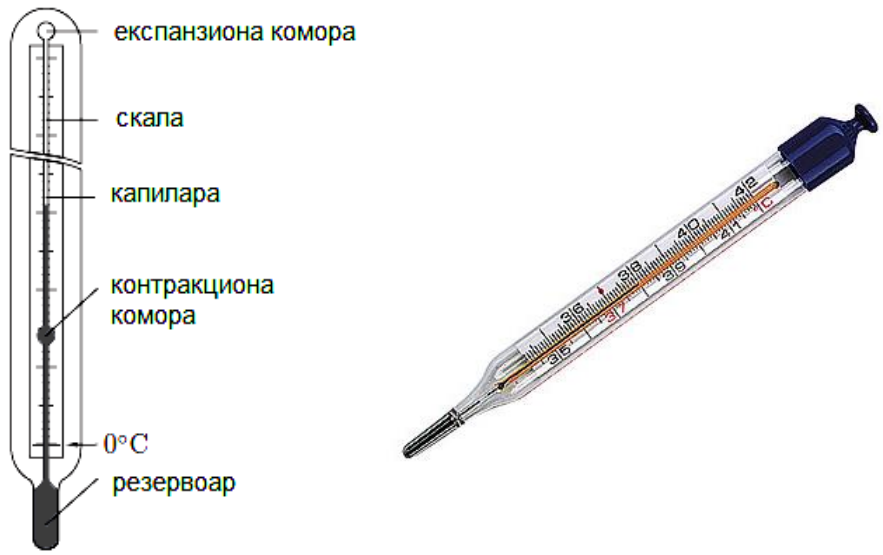
- **Електрични сензори** код којих се са променом температуре мења неки електрични параметар сензора. Овој групи припадају:
  - термоелементи
  - отпорни термометри
  - полупроводнички термометри
  - термометри на бази PN споја

## 7.7.1 НЕЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ ТЕМПЕРАТУРЕ

### 7.7.1.1 Експанзиони термометри

Рад експанзионих термометара базиран је на појави да се тело шири са порастом температуре, а скупља са падом температуре. Стаклени термометри, пре свега са живом представљу најзаступљеније сензоре за визуелно очитавање термпературе. Жива се користи, јер не ствара танак слој на стакленој цеви при кретању. При нормалним условима, тачка мржњења живе је –38.87 °C, а тачка кључања 356.58 °C. Због тога се ови термометри користе у опсегу –30 °C до 280 °C. При повишеним притисцима жива може да се користи до 750 °C, с тим што је горња граница условљена топљењем стакленог омотача.

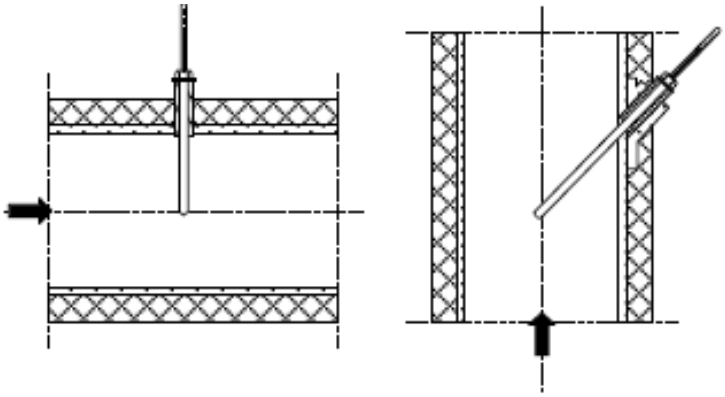
Стандардни термометар са живом (слика 7.60), састоји се од резервоара са живом, капиларне цеви и скале са означеним подеоцима у јединицама температуре.




Слика 7.60. Живин термометар

Запремина капиларне цеви је знатно мања од резервоара. Може да се покаже да је осетљивост термометра већа уколико је већа запремина резервоара и уколико је мањи пресек капиларе. Термометар може да има и експанзиону комору у којој се сакупља жива у случају да се пређе максимална предвиђена температура термометра. У данашње време термометри са живом излазе из употребе, јер је жива отровна, па се све се више користе стаклени термометри са другим течностима, који поседују велики коефицијент линеарног ширења, лако се уочавају, али нису токсични. У зависности од флуида, експанзиони термометри могу да се користе за опсеге од –170 °C до 530 °C, при чему сваки флуид покрива само део наведеног опсега. Ако се користи алкохол, опсег температуре је -80 °C до 80 °C, а ако се користи керозин 0 °C до 80 °C. Осим тога, могу да се користе: гас (азот) и лако испарљиве течности метал-хлорид, ацетон, фреон итд.

Стаклени термометри имају добру осетљивост и велику линеарност. Највећа мана ових термометра је што су ломљиви и не дају електрични сигнал. Тачност показивања живиног стакленог термометра не зависи само од његове тачности, него и од начина уградње, што је у тесној вези са прелазом топлоте између мерене средине, термометра и околних зидова чија је температура различита од температуре мерене средине. Постоје генерално два начина уградње термометара и то: у заштитној чаури (слика 7.61) и директна уградња у флуид, чија се температура мери. Први начин је несумњиво највише распрострањен у индустрији, зато што штити термометар од оштећења, обезбеђује добру заптивеност и дозвољава велику разлику притисака између мереног флуида и околине, што је код термоенергетских постројења готово редовна потреба.

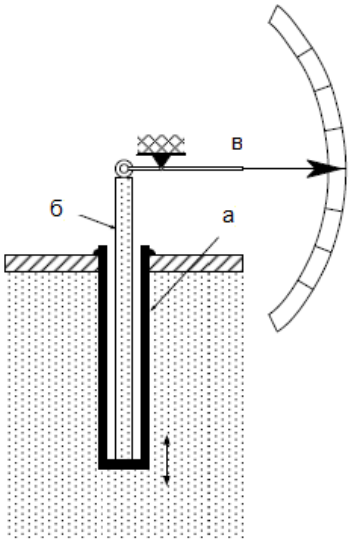


Слика 7.61. Термометар у заштитној чаури за мерење температуре флуида у цеви

### 7.7.1.2 Дилатациони термометри

Принцип рада дилатационих термометара заснива се на повећању димензије (дужине, односно запремине) чврстих тела са порастом температуре, где је зависност димензије од температуре у одређеном опсегу линеарна. Праве се од бакра (опсег 0 °C до 150 °C), месинга (опсег 0 °C до 400 °C) и легуре гвожђа и никла (0 °C од 200 °C). Користе се за израду термостата и имају релативно ниску цену. На слици 7.62. приказан је пример

механичког дилатационог термометра код кога се при промени температуре објекта (а) мења релативна дужина цевчице (б), што доводи до померања осовинице и казаљке (в) која је повезана са њом, чиме се омогућава очитавање температуре на скали термометра.




Слика 7.62. Примери реализација механичких дилатационих термометара

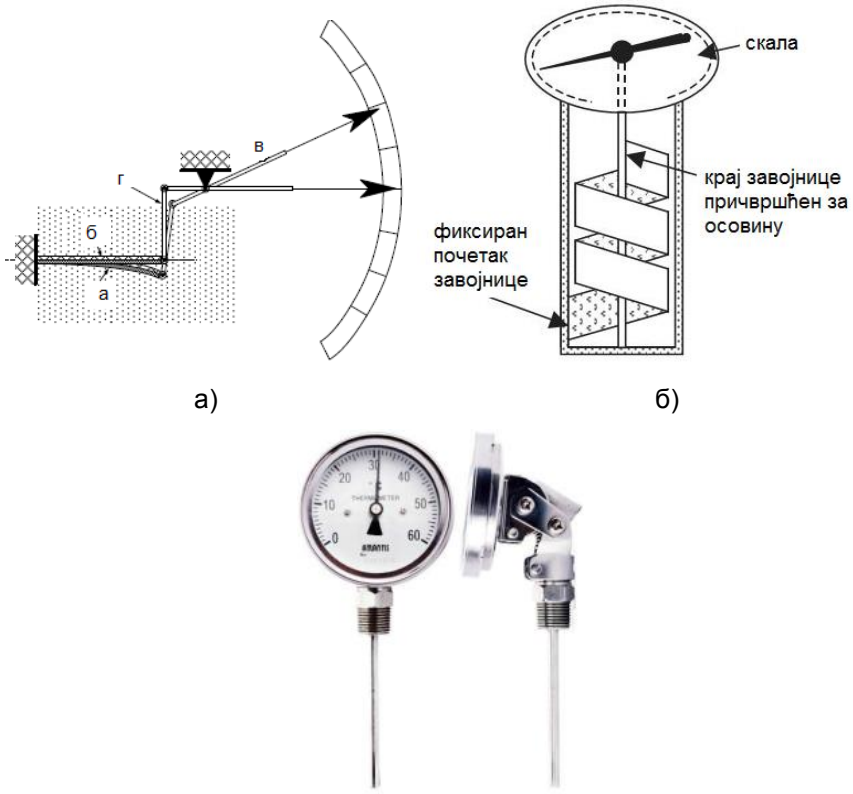
### 7.7.1.3 Биметални термометри

Посебан тип дилатационог термометра је биметални термометар. Праве се у облику трака од два слоја материјала са различитим коефицијентом линеарног ширења где се трака, приликом пораста температуре, савија у страну материјала са мањим коефицијентом линеарног ширења. Трака (а) на слици 7.63а има висок коефицијент, линеарног ширења, док је коефицијент линеарног ширења друге траке (б) минималан. При промени температуре биметалног елемента долази до његове деформације, услед чега долази до померања казаљке (в), везане са биметалним елементом преко полуге (г).

У практичним реализацијама биметалних термометара, метали су често спојени међусобно у облик спирале или хеликоидалне завојнице (слика 7.63б). Хеликоидална завојница се примењује када је потребно аналогно очитавање. Материјал са већим коефицијентом ширења налази се са спољашње стране кривине. При порасту температуре, услед различитог ширења долази до смањења полупречника кривине и повећања угла намотавања. То изазива ротацију казаљке не слободном крају спирале, односно хеликоидалне завојнице. Осетљивост термометра пропорционална је броју намотаја. Изглед биметалног термометра који се примењује у пракси је приказан на слици 7.63в.

Скала биметалних термометара је линеарна, а калибрација се врши емпиријски. Биметални уређаји су непрецизни, робусни, имају спор одзив и поседују хистерезис. Међутим због ниске цене налазе честу примену као

термостати који раде у опсегу -30 °C до 300 °C, као и када је потребно локално аналогно очитавање без слања на даљину.




Слика 7.63. Примери реализација биметалних термометара

а) принцип рада, б) реализација са завојницом и в) биметални термометар

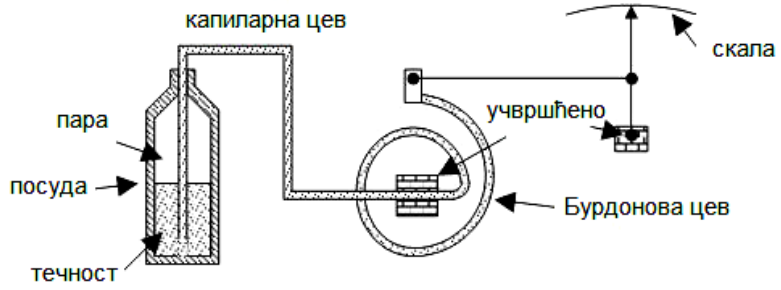
### 7.7.1.4. Манометарски термометри

Мерење температуре помоћу манометарских термометара засновано је на принципу промене притиска течности, гаса или паре у затвореном систему константне запремине. **Гасни термометар** или **термометар на бази паре** је најстарији и данас најзначајнији термодинамички термометар. Овај тип термометра се углавном примењује када је потребно да се сигнал који одговара температури пренесе на даљину, без употребе електричног сигнала, мада постоје варијанте са електричним излазним сигналом.

Ако се у једној затвореној посуди успостави термодинамичка равнотежа течне и гасовите фазе неког гаса, онда притисак у гасу представља функцију температуре облика:

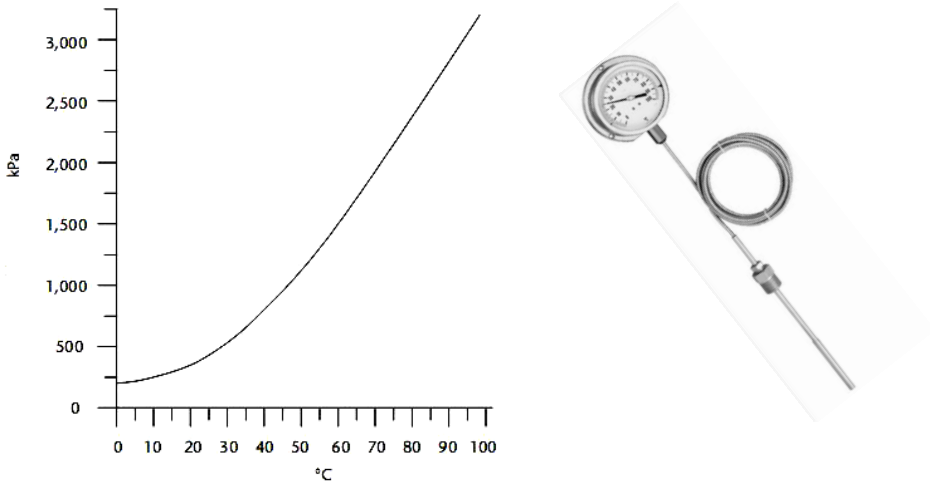
$$\ln p = A - \frac{B}{T} + C \ln T \qquad (7.45)$$

где су *A*, *B* и *C* константе. На слици 7.64 приказана је упрошћена шема гасног термометра са Бурдоновом цеви. Термометар се састоји се од металног суда и металне цеви са малим коефицијентом термичког ширења. За термометре врхунских перформанси користе се посуде од легуре платине, родијума и иридијума. Суд је делимично напуњен течношћу. Као посуда са течношћу се налази у пећи или термостату чија се температура одређује. Притисак на течност ствара гас, пара или ређе течност која се не меша са доњом течношћу. Притисак паре је у потпуности одређен температуром у посуди. При повећању температуре један део течаности прелази у пару, што је праћено порастом притиска. При хлађењу се одговарајући део течности поново кондензује, а притисак у посуди се смањује. Овај притисак се преко доње течности капиларном цеви, чија запремина треба да буде што мања, преноси до Бурдонове цеви. За мерење притиска такође могу да се употребе и мерачи са мембраном или мехом. Скала Бурдонове цеви је калибрисана тако да представља температуру, а ако се на покретни крај Бурдонове цеви стави потенциометар, може да се добије и електрични сигнал сразмеран мереној температури.




Слика 7.64. Гасни термометар

Зависност притиска паре у суду од температуре и изглед индустријског гасног термометра приказани су на слици 7.65.



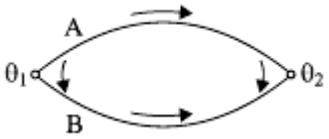

Слика 7.65. Карактеристика и изглед индустријског гасног термометра

Гасни термометри се примењују за мерење високе температуре од око 550 $^0$C, имају тачност 0.5%, а сигнал може да се пренесе на растојање до 100 m. Време одзива система је реда 20 s. У већем опсегу, притисак је директно сразмеран температури гаса у суду.

## 7.7.2 ЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ ТЕМПЕРАТУРЕ

### 7.7.2.1 Термоелементи (термопарови)

Физичар Зебек је 1821. године открио да постоји електрична струја у колу састављеном од два различита метала када се њихови крајеви налазе на различитим температурама (слика 7.66). Пелтије је 1834. године открио инверзан Зебеков ефекат. Приметио је да се топлота апсорбује и спој хлади 33када струја тече кроз два различита метала у једном смеру, а да се спој греје када струја промени смер, чиме је доказао да је Зебеков ефекат реверзибилан.

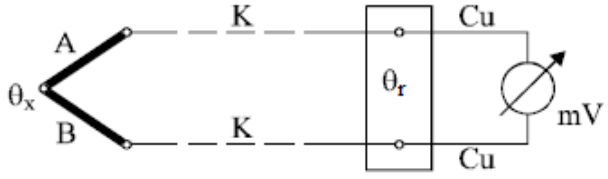



Слика 7.66. Илустрација Зебековог ефекта

Томсон је 1854.године експериментално показао да у једном проводнику од хомогеног материјала постоји градијент електричног потенцијала, ако дуж тог проводника постоји температурни градијент, где је $\sigma$ (V/$^0$C)Томсоново коефицијент који зависи од врсте материјала и може а буде позитиван или негативан, а бредност Томсонове електромоторна силе ($E_T$) је:

$$E_T = \int_{\theta_2}^{\theta_1} \sigma \cdot d\theta \tag{7.46}$$

Томсонов ефекат је такође реверзибилан. У колу приказаном на слици 7.67 постоји термоелектромоторна сила ако је $\theta_1 \neq \theta_2$. Такође је доказано да се термоелектромоторна сила у овом колу не мења ако се у коло између метала A и B убаци метал C под претпоставком да се крајеви метала C држе на истој температури. Овај ефекат даје могућност за реализацију термометра приказаног на слици 7.67.




Слика 7.67. Мерење температуре применом термоелемента

Ако се температура референтног споја $\theta_r$ одржава константном, тада ће скретање миливолтметра бити сразмерно температури радног споја $\theta_x$.

**Термопар** је спој два различита материјала, при чему је тачка споја (топли крај или мерни крај) у контакту са објектом чија се температура одређује, док се термално генерисани напон одређује на другом крају (хладни или референтни спој). Термопарови су активни сензори, код којих генерисана електромоторна сила зависи од температурне разлике између два краја, а не од апсолутних температура на којима се налазе крајеви. За тачно одређивање температуре објекта треба мерити температуру хладног краја.

Термопарови су се прво користили за мерење високих температура од 0 °C до 1000 °C, али је касније њихова употреба проширена и на врло ниске температуре чак до 1K. За израду термопарова у принципу могу да се употребе било која два чиста метала или легуре али је у пракси ограничен број комбинација јер се од термопара захтева: стабилност и поновљивост термоелектричног својства, што линеарнија зависност термоелектричног напона од температуре, што хомогенији састав материјала (како се не би услед различите структуре стварале дуж проводника паразитне електромоторне силе), висока осетљивост, могућност механичке обраде и приступачна цена.

Избор материјала за термопарове зависи од температурног опсега у коме треба да ради термометар. Назив термоелемента састоји се од назива два метала, при чему прво име припада металу који представља позитиван, а друго име металу који представља негативан прикључак. Најчешће примењивани термоелементи су:

Тip E (10% никл + хром) (+) – (константан) (-)

Тip J (гвожђе) (+) – (константан) (-)

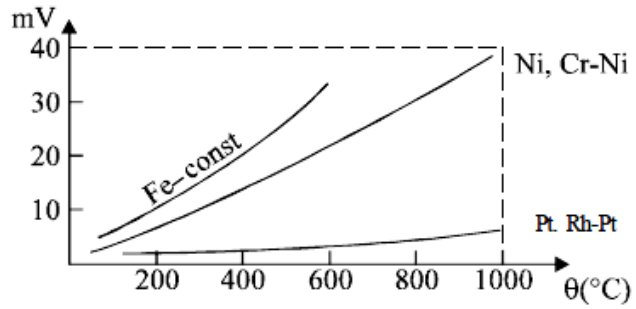
Тip K (10% никл + хром) (+) – (5% никл + алуминијум) (-)

Тip R (13% платина + родијум) (+) – (платина) (-)

Тip S (10% платина + родијум) (+) – (платина) (-)

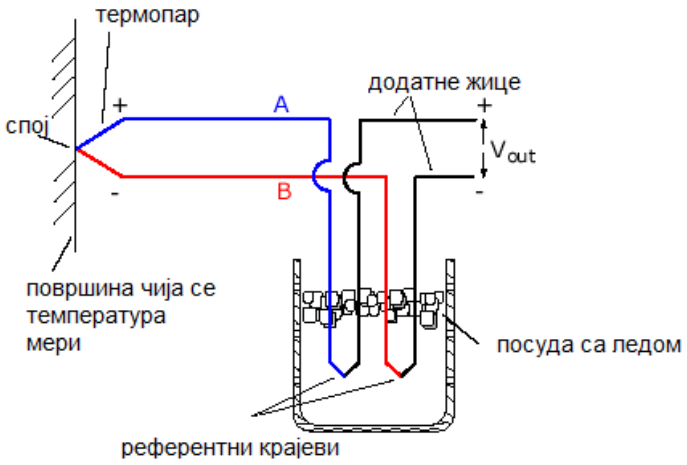
Тip T (бакар) (+) – (константан) (-)

Вредности термоелектромоторних сила одређених термопарова дају се у литератури у виду дијаграма или табела. Пример дијаграма је приказан на слици 7.68.




Слика 7.68. Термоелектромоторна сила неких термопарова у зависности од температуре

Ако се референтни спој не налази на сталној температури за коју је инструмент баждарен, долази до грешке мерења. За одржавање $\theta_r$ константно, у лабораторијским условима се обично користи посуда са ледом који се топи ($0^0$C), као што је приказано на слици 7.69. Међутим, хладни крај може да буде на било којој температури све док је његова температура позната, при чему за мерење температуре може да се користи неки други термометар, тако да није неопходна компензација референтног споја.




Слика 7.69. Одржавање референтне температуре

Када се компензација температуре врши микропроцесором, на електромоторну силу термопара се прво дода електромоторна сила која одговара референтној температури, а затим се из табеле одређује температура која одговара добијеној суми.

Цео термопар се састоји од жица које формирају спој у једној тачки, заштитног омотача, кућишта и контакта, најчешће у облику завртња на који се повезују продужни каблови (слика 7.70).



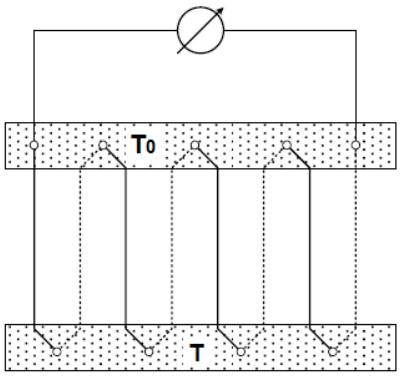
а) б)

Слика 7.70. Термоелектрични термометар
а) спољашњи изглед и б) термопар

Жице термопара треба да се електрично изолују, јер у супротном може да дође до грешке. Да би се спречио утицај влаге, заштитни омотач мора да буде неосетљив на влагу, као на пример тефлон или PVC. Приликом инсталације термопара неопходно је обезбедити добар термички контакт између сензора и објекта. Због тога се реализују и танки теремопарови, постављањем жица на фолију. Њихово време одзива је веома брзо (око 10ms), а постиже се и одлично приањање на објекат.

Једна од основних предности термопарова је што не захтевају спољашњи извор енергије, имају једноставни и компактну конструкцију, као и широк температурни опсег (од -270 °C до 4000 °C). Имају високу тачност (±0.25% до 0.75% мерног опсега за стандардну израду, односно ±0.1% до 0.4% мерног опсега за специјалну израду). Међутим, имају мали ниво излазног сигнала (до 100mV), нелинеарну статичку карактеристику, малу осетљивост (од 10 mV/°C до 70 mV/°C), што отежава мерење малих температурних промена и осетљиви су на хемијско деловање радне околине.

Спајање термоелемената може да се обави на различите начине, у зависности од сврхе мерења. Један од начина је да се повежу у **термобатерију**, која се примењује при тачним мерењима нижих темепература. Ова веза представља низ серијски везаних термоелемената са топлим и хладним крајевима који се налазе у зонама константних температура (слика 7.71). Предност термобатерије је што термоелектромоторна сила расте пропорционално са бројем укључених термоелемената, што повећава тачност очитавања температуре.




Слика 7.71. Термобатерија

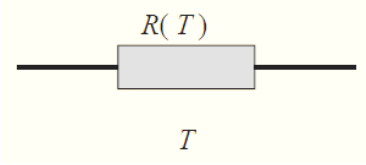
### 7.7.2.2 Отпорни термометри

Принцип рада отпорних термометара заснива се на особини метала и легура да при промени температуре мењају електрични отпор због температурне зависности специфичне отпорности материјала. Према томе, ако је позната зависност између температуре и електричног отпора, мерећи електрични отпор проводника може да се одреди његова температура, а тиме и температура средине у којој се он налази. У принципу, сваки проводник може да се употреби као отпорни термометар. Постоје проводници са позитивним и негативним температурним коефицијентом отпора. Предности

отпорних сензора температуре (слика 7.72) су једноставна електрична кола и дуготрајна стабилност. Сви ови сензори могу да се поделе у три групе:

- отпорни температурни детектори (RTD)
- отпорни термометри од силицијума
- термистори

Отпорни термометри дају релативно велики излазни сигнал, па не захтевају примену сложених кола за његово мерење или пренос на даљину.




Слика 7.72. Симбол отпорног сензора температуре

Отпорни температурни детектори се обично производе од метала у облику жице или танког филма. Њихов рад се базира се на чињеници да се електрични отпор чистих метала и легура повећава са повећањем температуре. Такви материјали имају позитиван температурни коефицијент. Ако се узме у обзир да се многа мерења температуре обављају у ужем интервалу промене температуре, може да се сматра да је зависност промене отпорности са температуром приближно линеарна:

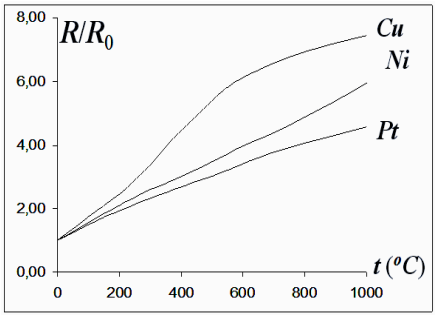
$$R_t = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] = R_0(1 + \alpha\Delta T) \tag{7.47}$$

где су $R_t$ и $R_0$ отпори на температурама $T$ и $T_0$ респективно, док је α температурни коефицијент. Код металних отпорника температурни коефицијент α зависи од чистоће метала. У случају платине, ако је отпорност $R_0$ = 100Ω при температури $T_0$ = 0°C, температурни коефицијент α се одређује из израза:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^\circ C R_0}\left[\frac{\Omega}{\Omega^\circ C} = C^{-1}\right] \tag{7.48}$$

Чисти метали као што су: платина, бакар и никл су најпогоднији за израду RTD:

Температурни коефицијент сензора од платине α има вредност у опсегу од 3,85 x $10^{-3}$ °$C^{-1}$ до 3,92 x$10^{-3}$ °$C^{-1}$ и имају добру линеарност у широком опсегу температуре (од -200 °C до +850 °C). Сензори од бакра имају температурни коефицијент α чија је типична вредност 4,27 x$10^{-3}$ °$C^{-1}$, што је приближно као код платинских, али је нелинеарност карактеристике значајно већа, а такође имају и ужи мерни опсег (-200 °C до +260 °C). Никл има температурни коефицијента α чија је вредност у опсегу од 6,17 x $10^{-3}$ °$C^{-1}$ до 6,75 x $10^{-3}C^{-1}$. Иако је осетљивост сензора са никлом много већа од платинских, имају знатно ужи мерни опсег (од -60 °C до +250 °C). Поређење карактеристика промене отпорности са температуром за сензора од платине, бакра и никла приказани су на слици 7.73.




Слика 7.73. Промена отпорности са температуром за металне сензоре

**Платински RTD** се најчешће употребљава због предвидљивог одзива, дуготрајне стабилности и издржљивости, а одликује се високом тачношћу и прецизношћу. Са мерном несигурношћу од ±0.1 °C спадају у најпрецизније термометре. Платина може лако да се добије у чистом стању и хемијски је инертна у оксидационој средини. Осим што поседује висок температурни коефицијент, она има и висок специфични електрични отпор (ρ=0.11 Ωmm²/m) као и високу тачку топљења (1769 $^0$C). Прве примене платине за мерење температуре датирају од 1871. године, када је Сименс конструисао платински отпорни термометар за мерење високих температура. Данас, због широког опсега радних температура и одличне стабилности, платински отпорни сензори температуре имају широку примену у индустријским и лабораторијским мерењима.

Отпорност платинског отпорника може да се представи следећим изразом:

$$R_t = R_0\left[1 + AT + BT^2 + CT^3(T-100)\right] \tag{7.49}$$

$$R_t = R_0\left\{1+\alpha\left[1-\delta\left(\frac{T}{100}\right)\left(\frac{T}{100}-1\right)-\beta\left(\frac{T}{100}\right)^3\left(\frac{T}{100}-1\right)\right]\right\} \tag{7.50}$$

где је *T* температура у °C, док су *A*, *B* и *C* константе за које важи:

$$A = \alpha\left(1+\frac{\delta}{100}\right), \tag{7.51}$$

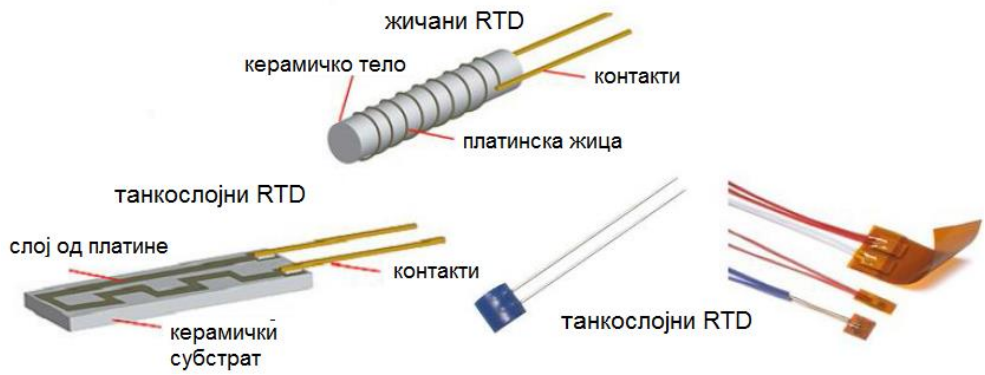
$$B = \alpha\delta\times 10^{-4} \tag{7.52}$$

и

$$C = \alpha\beta\times 10^{-8} \tag{7.53}$$

Вредност δ се одређује калибрацијом на високим, а β на негативним температурама, док је вредност коефицијента $\alpha = 3{,}92\ \text{x}10^{-3}\ °\text{C}^{-1}$

Типичне реализације RTD сензора температуре приказане су на слици 7.74. Жичани RTD се реализују намотавањем жице од платине на керамичко тело које се налази унутар стаклене, керамичке или металне тубе. Пошто је платина скупа, за израду сензора чија је отпорност 100Ω, примењује се жица дебљине 7÷50 μм, која се мота бифиларно. Због танке жице, отпорни елемент од платине је осетљив на прекид. Оваква реализације се употребљава у индустрији или у истраживачке сврхе. Танкослојни RTD имају филм од платине који се наноси на субтрат, најчешће силицијум.




Слика 7.74. Типичне реализације RTD сензора температуре

Постоје различите врсте платинских термометара, као што су стандардни са дугом цеви (за температуре -189 $^0$C до 660 $^0$C) или индустријски (-200 $^0$C до 850 $^0$C). Стандардни платински термометри су због посебне конструкције веома осетљиви на механичка оптерећења, па се због тога углавном употребљавају као еталони за калибрацију у лабораторијама. С друге стране, индустријски платински термометри (слика 7.75) имају конструкцију која је много отпорнија на механичка оптерећења.



Слика 7.75. Примери индустријских платинских термометара

Платински отпорни термометри се означавају помоћу номиналне отпорности при температури 0 $^0$C: Pt-25, Pt-50, Pt-100, Pt-200, Pt-500 Pt-1000 или Pt-2000. На пример, ознака Pt-25 значи да термометар у тројној тачки воде има отпорност приближно 25 Ω. У индустријској употреби често се користи реазализација са 3 жице, док је за прецизна лабораторијиска мерења четворожилно мерење је неопходно.

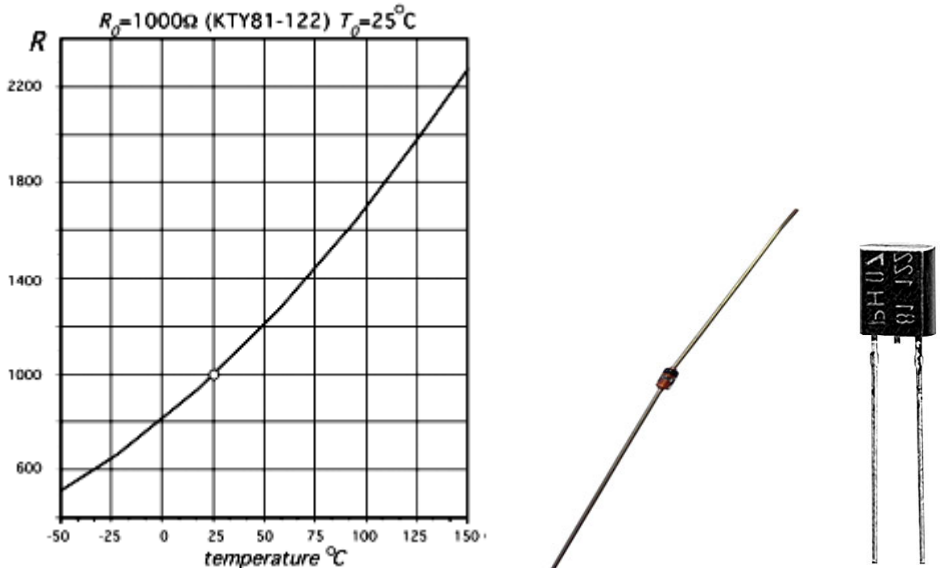
Основне предности металних отпорних сензора су: висока тачност, стабилна и репродуктивна карактеристика и приступачна цена. Осим тога, за разлику од термопарова, омогућавају мерење апсолутне температуре, имају већу линеарности и бржи одзив. С друге стране, то су пасивни сензори, па је потребан спољашњи извор енергије, тако да је присутна и појава самозагревања.

**Отпорни силицијумски сензори** температуре реализује се од силицијума (Si) коме су додате примесе донора, тако да у одређеном температурном опсегу има позитиван температурни коефицијент (PTC). Један од најзаступљенијих сензора овог типа је KTY који производи *Philips.* Овај сензор поседује добру линеарност, која може да се побољша коришћењем једноставног електричног кола и добру дуготрајну стабилност. Користи се за температуре до 200 °C. На температурама изнад 200 °C расте број термално генерисаних носилаца и долазе до изражаја NTC (негативан температурни коефицијент) карактеристика силицијума. Осетљивост KTY је реда 0.7%/°C.

KTY може бити осетљив на смер струје, што се решава конструкцијом дуалног сензора, односно спајањем два сензора којима су поларитети супротно повезани. KTY је веома заступљен у аутомобилској индустрији. Типична преносна карактеристика и изглед KTY сензора и приказани су на слици 7.76. Функција преноса овог сензора може да се апроксимира полиномом другог реда:

$$R_T = R_0\left[1 + A\left(T - T_0\right) + B\left(T - T_0\right)^2\right] \tag{7.54}$$

где су $R_0$ [Ω] и $T_0$ [K] отпорност и температура на референтној тачки. Сензор KTY-81, на пример, има температурни опсег -55 °C до 150 °C, при чему су вредности коефицијената: $A$=0.007847 K$^{-1}$ и $B$=1.874x10-5 K$^{-2}$.




Слика 7.76. Температурна карактеристика и изглед KTY сензора

Другу значајну групу отпорних термометара чине **полупроводнички претварачи, термистори**. Реч термистор потиче од скраћенице енглеског назива "*thermally sensitive resistor*" што значи отпорник осетљив на температуру. Термистори имају већу отпорност у односу на отпорност метала за исте температуре. За већину термистора отпор опада са порастом температуре, што значи да је температурни коефицијент отпора негативан.

Такви термистори се називају **NTC** (***Negative Temperature Coefficient***). Фарадеј је још 1833. године открио смањење отпора сулфида сребра при порасту температуре. Међутим, до шире примене термистора, пре свега **термистора са негативним температурним коефицијентом**, дошло је после 1950. године, захваљујући развоју полупроводничке технологије. Главна предност NTC у односу на друге температурне претвараче је велика осетљивост, једноставна конструкција и поузданост. Због оваквих карактеристика расте улога термистора у индустрији, али и у неким другим областима као што је на пример медицина. Симбол термистора приказан је на слици 7.77.



Слика 7.77. Симбол термистора

Савремени NTC термистори производе се од оксида метала и гвожђа, хрома, мангана, кобалта никла итд. Смеса оксида у праху се синтетизује на температурама изнад 1000 $^0$C. Пре синтетизовања смеси се додају примесе у циљу добијања полупроводничког материјала N и P типа. Максималне радне температуре оксидних термистора у новије време износе 700 $^0$C до 1000 $^0$C, што значи да су врло блиске температурама платинског отпорног термометра. У области ниских температура термистори се примењују до неколико десетина K. У зависности од процеса производње могу да се добију термистори који се производе од зрна одређеног материјала затопљеног у стакло или метал, термистори у чипу или термистори који се реализују наношењем полупроводничког материјала на одговарајући субстрат као што је стакло, алуминијум и други. Најбржи одзив имају термистори са зрнастом структуром (слика 7.78).



Слика 7.78. Термистори са зрнастом структуром

Отпорност NTC термистора је нелинеарна функција температуре, која при занемарљивој дисипацији може да се апроксимира експоненцијалном једначином:

$$R = R_0 e^{-B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} \tag{7.55}$$

Осетљивост термистора је:

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{dT} = \frac{1}{Ae^{-\frac{B}{T}}} Ae^{-\frac{B}{T}}\left(-\frac{B}{T^2}\right) = -\frac{B}{T^2} \tag{7.56}$$

где је $T$ апсолутна температура, $A$ је отпор на $T = \infty$ и $B$ је константа која зависи од врсте материјала. Одавде следи да температурни коефицијент

отпора термистора јако зависи од температуре и негативна је величина, односно смањује се са повећањем температуре.

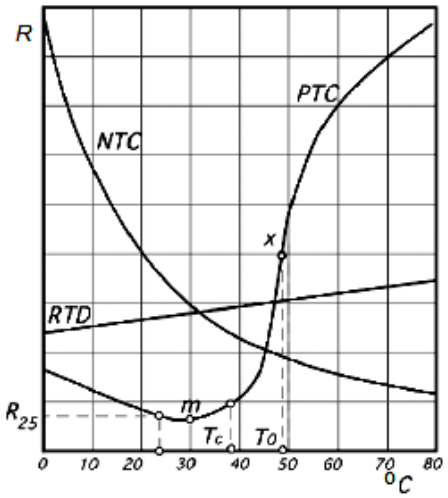
Термистори са **позитивним температурним коефицијентом** (**PTC, *Positive Temperature Coefficient***), користе се првенствено као сензори који при некој температури дају одговарајући дискретан сигнал, а ређе се користе за мерење температуре. Због тога су нашли примену као елементи за температурну регулацију и заштиту. Мерни опсег PTC термистора је узак, али им је осетљивост око десет пута већа од NTC термистора. PTC термистори се производе од баријум-титаната ($BaTiO_3$) који спада у фероелектрике. Чист баријум-титанат је изолатор, али се допирањем донорским примесама смањује отпор, чиме почиње да се понаша као полупроводник. У опсегу температура изнад Киријеве, која за чист баријум износи $T_C$=123 $^0$C, фероелектрична својства се нагло мењају и отпорност PTC термистора нагло расте по закону:

$$R(T) = Ae^{B(T-T_C)} \tag{7.57}$$

где су *A* и B карактеристике датог термистора. Осетљивост се дефинише у стандардном облику:

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{\Delta R}{\Delta T} \tag{7.58}$$

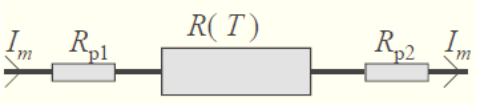
може да буде и до 2/°C. Осим осетљивости, као карактеристика PTC термистори наводе се: отпорност на температури од 25 $^0$C, $R_{25}$, минимална отпорност $R_m$ до које отпорност термистора благо опада, Киријева темепература на којој отпорност почиње нагло да расте (–30 $^0$C до 160 $^0$C), термална константа која дефинише брзину одзива, као и максималан напон $E_{max}$ на који термистор може да се повеже без обзира на температуру. дијаграм на коме могу да се уоче специфичности промене отпорности са температуром PTC, NTC и RTD сензора приказани су на слици 7.79.




Слика 7.79. Промена отпорних сензора са температуром

Услед самозагревање, отпорност термистора расте, па се он може искористити за заштиту од прегревања. PTC термистор може да се користи као заштита електричног кола, серијском везом са потрошачем, како би се спречило његово прегревање. Могу да служи и као термоста, јер је на основу напона напајања и спољне термпературе температура термистора тачно одређена. Термистор може да ради као елемент за кашњење, јер је потребно време од тренутка укључења до уласка термистора у равнотежу. Нашао је примену и као детектор нивоа, јер након урањања у течност долази до нагле промене температуре.

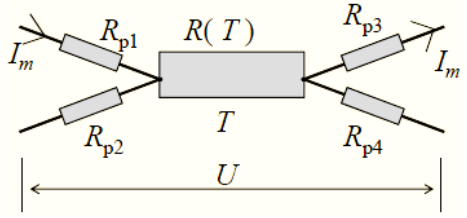
За мерење температуре отпорним термометрима неопходно је тачно мерење отпорности. Код платинских термометара 1% грешке у мерењу отпорности приближно представља 2,5 $^0$C грешке у вредности температуре. Мерење класичним омметрима омогућава достизање мерне несигурности од неколико стотина mK. Прикључивањем омметра помоћу две жице, сензор отпорног термометра је непосредно повезан са конекторима омметра (слика 7.80). Повезивање је веома једноставно, али измерена отпорност укључује и отпорност прикључених жица.




$$R_{izm}=R(T)+R_{P1}+R_{P2}$$

Слика 7.80. Прикључивање омметра помоћу две жице

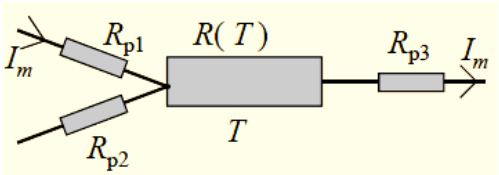
Прикључивањем омметра помоћу четири жице (слика 7.81), грана кроз коју тече мерна струја је одвојена од гране која се употребљава за мерење пада напона. На тај начин у потпуности може да се елиминише утицај отпорности прикључених жица.




$$R_{izm}=\frac{U}{I_m}=R(T)$$

Слика 7.81. Прикључивање омметра помоћу четири жице

Прикључивање помоћу три жице представља компромис између прикључивања помоћу две и четири жице, јер омогућава мерење збира отпорности жица 1 и 2 (слика 7.82), које накнадно могу да се коригују. Ова метода је успешна под условом да је отпорност свих прикључних жица приближно једнака.

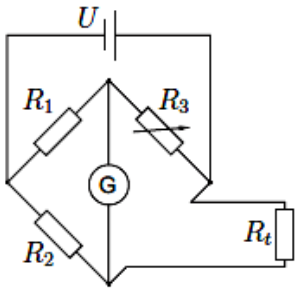



$$R_{izm}=R(T)+R_{P3}-\frac{R_{P2}+R_{p2}}{2}$$

Слика 7.82. Прикључивање омметра помоћу три жице

У случају да је захтевана мерна несигурност мања од 1mK, употребљавају се једносмерни или наизменични мерни мостови. За мерење отпора, најчешће се користи Витстонов мост (слика 7.83). Две гране моста садрже константне отпорнике $R_1$ и $R_2$. У трећој грани се налази променљиви отпорник $R_3$, док је у четвртој грани отпорност отпорног термометра $R_t$. Када је мост у равнотежи, може да се одреди вредност отпорности термометра:

$$R_t = R_3 \frac{R_2}{R_1} \tag{7.59}$$




Слика 7.83. Мерење отпорности применом Витстоновог моста

Појава самозагревања сензора (*self-heating*) је непосредно повезана са начином мерења отпорности. Пошто је у питању пасиван сензор, да би се добио напон, чија је вредност пропорционална мереној температури, кроз отпорни елемент тече струја, а то директно доводи до Џулових губитака, односно до самозагревања. Због тога отпорни термометар мери нешто вишу температуру од стварне. Вредност температуре самозагревања зависи од употребљене струје, конструкције термометра и карактеристике медијума. Код мерења са највећим степеном тачности, самозагревање се коригује мерењем са две различите струје. Код индустријских мерења, самозагревање је део мерне несигурности мерења.

### 7.7.2.3 Сензори температуре на бази PN споја

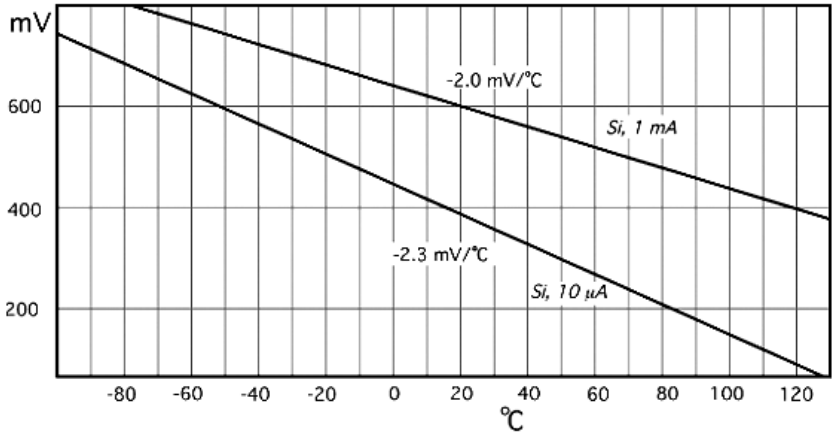
Познато је да напон директно поларисаног PN споја зависи од температуреПостоје реализације термометара у којима се као сензори температуре користе **транзистори** или **диоде**.

Напон на PN споју може да се представи релацијом:

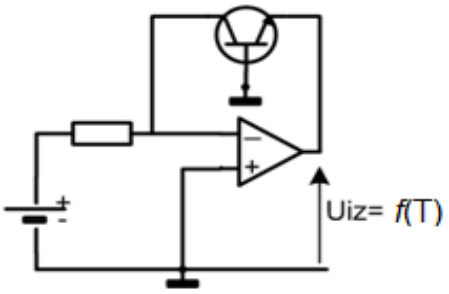
$$V = \frac{E_q}{q} - \frac{2kT}{q}\left(\ln C - \ln I\right) \tag{7.60}$$

где је $E_q$ напон енергетског процепа на 0К, $q$ је елементарно наелектрисање, $k$ је Болцманова константа, $T$ је апсолутна температура, $I$ је струја кроз PN спој, а $C$ константаната која не зависи од температуре. Осетљивост зависи од струје кроз PN спој и мења се линеарно са осетљивошћу од -2,3 mV/°C за струју од 10 mA. Са порастом струје осетљивост опада и за струју од 1mA износи -2 mV/°C (слика 7.84а).

Када се као сензор температуре користи **транзистор**, пораст температуре утиче на промену инверзне струје $I_{CB0}$ кроз инверзно поларисани спој колектор-база. Типичне вредности ових струја су 1mA за силицијумске транзисторе и 100 mA за германијумске транзисторе на температури 20 °C. Са порастом температуре за 10°C ова се струја удвостручава али је и даље тешко да се измери тако мале струје. Пример реализације транзисторског сензора температуре са операционим појачавачем приказан је на слици 7.84б.




а)

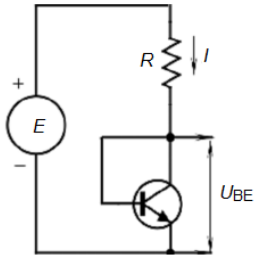



б)

Слика 7.84. Транзисторски сензор температуре
а) температурна осетљивост и б) реализација

Међутим, већу практичну примену има промена напона база-емитор $U_{BE}$, која је генерално нелинеарна, али се у опсегу -270°C ÷ 200°C може апроксимирати линеарном функцијом, јер је при константној колекторској струји логаритамски члан у једначини за напон на PN споју приближно константан. На слици 7.85. приказан је пример реализације сензора температуре у виду **транзисторске диоде** која настаје спајањем колектора и базе транзистора. Препоручује се да струја буде око 100mA, а при напону од 5V треба користити отпорник од:

$$R = (E - U_{BE})/I = 44\text{k}\Omega,\ U_{BE} \approx 0.6\text{V} \tag{7.61}$$




Слика 7.85. Транзисторска диода као сензор температуре

**Диода** као сензор температуре је једноставнија у односу на транзистор, мањи су јој губици и има бржи одзив. За практичну примену се користе и директна и инверзна поларизација диоде с тим што је, при директној поларизацији, опсег температура већи.

Транзистори и диоде се најчешће користе за израду температурних релеа минијатурних димензија тако да могу да се угради директно у електронске уређаје и чипове где укључују заштиту од прегревања. Такође, PN спој као сензор температуре често се интегрише у друге сензоре, код који је потребно извршити температурну компензацију.

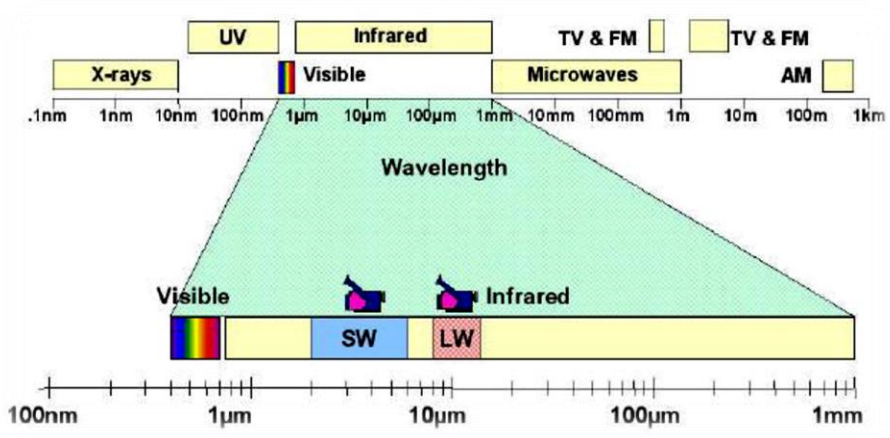
Најпознатији интегрисани сензори температуре су LM35 фирме *National Semiconductors* (са напонским излазом) и AD590 чије је произвођач *Analog Devices* (са струјним излазом).

## 7.7.3 БЕСКОНТАКТНО МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ

Методе бесконтактног мерења температуре су првобитно биле намењене за примену на местима на којима је мерење температуре класичним, контактним методама немогуће или веома отежано. Међутим због низа предности, бесконтактно мерење температуре је нашло ширу примену. Њихов принцип рада заснован је на термичкој радијацији или термичком зрачењу.

Средња кинетичка енергија честица (атома и молекула) које се крећу у некој материји пропорционална је апсолутној температури те материје. Кретање тих честица узрокује електромагнетне таласе који излазе изван те материје и крећу се брзином светлости. Појава се зове термичка радијација или термичко зрачење. Термичка радијација одређена је интезитетом и таласном дужином електромагнтних таласа који зависе од температуре тела које зрачи. Веома топли предмети зраче електромагнетном енергијом у

видљивом делу спектра, тј.са таласном дужином од 0.4μm (плава боја) до 0.7 μm (црвена боја). Топли и хладни предмети зраче у делу спектра са таласном дужином од 1μm или већом, па нису видљиви људским оком (слика 7.86).



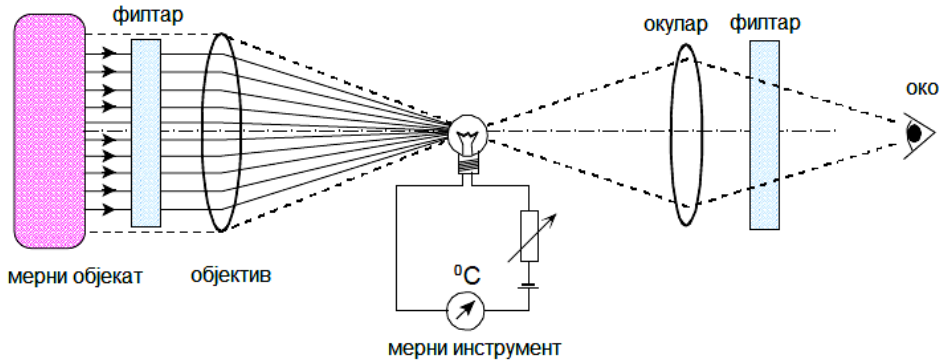

Слика 7.86. Опсези зрачења

Мерењем интезитета зрачења или његове спектралне карактеристике може се одредити температура тела које зрачи. Мерни уређаји који мере температуру на овом принципу зову се **пирометри** (за веће температуре) или **инфрацрвени (IC) термометри** (за мање температуре).

Пирометри могу да буду:

- оптички пирометри - упоређују видљиво светло које зрачи врућe тело са светлом стандардног извора познате температуре.
- радијациони пирометри - мере енергију коју зрачи врућe тело

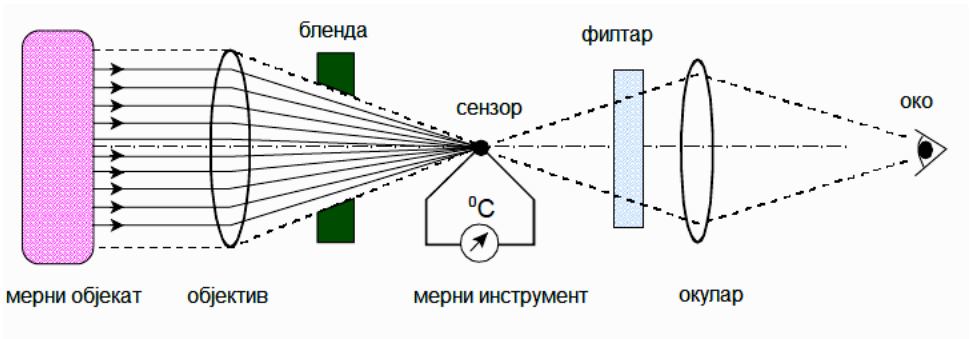
**Оптички пирометри** (слика 7.87) раде на принципу поређења интезитета светлости врућег тела са светлошћу познатог извора који је обично сијалица са ужареном нити. Врућe тело емитује електромагнетне таласе који пролазе кроз монохроматкии филтар и помоћу објектива се фокусирају на ужарену нит сијалице.




Слика 7.87. Принцип рада оптичког пирометра

Посматрањем сијалице кроз окулар, позадина јој је боја вруђег тела коме се мери температура. Помоћу потенциометра се мења струја и температура ужарене нити. Када су температуре ужарене нити и објекта мерења исте, слика ужарене нити се не види, а температура објекта се очитава на мерном инструменту. Пирометри овог типа могу да се користе за мерење температура у опсегу од 600 до 3000 °C. Тачност мерења је 1-3%. Основни недостатак је што не могу да се користе за пренос сигнала на даљину и аутоматско управљање.

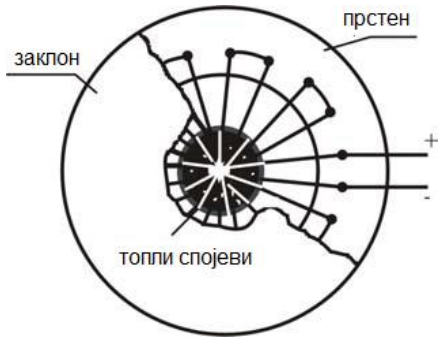
**Радијациони пирометри** могу да буду пирометри укупног зрачења, који мере укупну емитовану енергију и пирометри парцијалног зрачења који реагују само на зрачење унутар одређеног опсега таласних дужин најчешће око 650 nm (слика 7.88).




Слика 7.88. Принцип рада радијационог пирометра

Енергија зрачења тела се помоћу оптике фокусира на пријемник (сензор), што већег коефицијента апсорпције. На тај начин се укупно зрачење претвара у топлоту и даље у електричну енергију, односно у мерни сигнал који се води у мерни инструмент или управљачки уређај.

Као пријемници зрачења и претварачи топлотног флукса у електричну енергију најчешће се користе вишеструки термоелементи са површином која је прекривена колоидном платином, као што је илустровано на слици 7.89.




Слика 7.89. Пријемник топлотног зрачења са вишеструким термопаровима

Опсег мерења температура за ове инструменте износи од 0 до 4000 °C, са грешком која је реда величине ±0.5 до 1% од пуне скале. Могу да се користе за мерење температура које се брзо мењају, као и за мерење

температуре покретних или неприступачних објеката. Ови инструменти су погодни за пренос сигнала, регистрацију и аутоматско управљање.

Грешке мерења могу да настану и због неповољне геометрије тела које зрачи, присуства пламена, гасова који апсорбују топлотно зрачење ($CO_2$) и дима или прашине. Такође могу да се јаве грешке због загревања самог инструмента.

Преносиви IC термометар детектује енергију у инфрацрвеном делу спектра емитовану од стране објекта. Инструмент фокусира енергију кроз своје сочиво мењајући температуру специјалног материјала који ствара електрични сигнал. Микрокопроцесор претвара тај сигнал и показује резултат на LCD-у термометра (слика 7.90). Ласер који се налази у оквиру уређаја употребљава се само за тачније одређивање позиције мерне тачке и нема других ефеката у мерењу температуре. Неки уређаји имају степен емисије који може да се подешава у зависности од врсте материјала и двоструке ласерске тачке којима се јасно обележава величина мерног подручја. Ови уређаји омогућавају брзо и тачно бесконтактно мерење температуре, као и мерење температуре покретних објеката, објеката под напоном и тешко доступних места.

Ако треба да се мери температура глатко полиране металне површине, као нпр. цилиндричне површине, ови уређаји могу да се користе само за надгледање промене температуре. Мерење апсолутне температуре оваквих површина помоћу инфрацрвених термометара није могуће. Уређај приказан на слици 7.81 може да мери температуру у опсегу -35 °C до +800 °C. Он такође може да памти минималну и максималну мерену вредност. Има и уграђен аларм, којим даје звучну сигнализацију када је мерење на граници премашења мерног опсега.




Слика 7.90. Преносни инфрацрвени термометар

**Инфрацрвена термографија** представља најсавременију бесконтактну методу за мерење температуре и њене расподеле на површини тела (објекта). Заснива се на мерењу интензитета инфрацрвеног зрачења посматране површине и даје увид само у температуру површине посматраног тела (објекта). Резултат термографског мерења је *термограм*. Према начину мерења и обради података IC термографија се дели на квалитативну и квантитативну, као и на пасивну и активну.

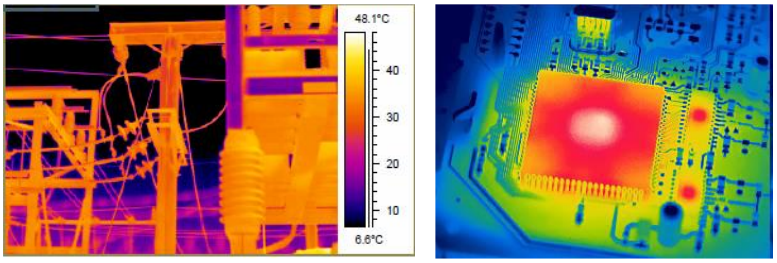
Код квалитативне IC термографије посматра се температурна слика, термограм, само у смислу поређења температурних нивоа. Квантитативна IC термографија даје као резултат стварну температуру на површини посматраног објекта. Пасивна термографија посматра објекте у стационарном стању на температурама различитим од температуре околине. Активна термографија заснива се на посматрању динамичког понашања површине објекта изложеног топлотној побуди. Термографија има изузетан значај у области технике дијагностике и концепта превентивног одржавања техничких система.

Термографски систем (слика 7.91) састоји се од термографске камере и јединице за обраду термограма (персонални рачунар). У самој камери је интегрисана IC оптика, сензор IC зрачења, систем за претварање електричног у видео сигнал, монитор и картица за чување података. На рачунару се налази софтвер који служи за обраду термограма, а такође у рачунар се учитавају подаци са картице која се налази у камери. Оптика у IC уређајима идентична је по облику оптици код фотографских уређаја, с тим што се у овом случају користе материјали за израду сочива који пропуштају IC зрачење



Слика 7.91. Савремени термографски уређај

IC термографија обезбеђује мерење у реалном времену без ремећења топлотне равнотеже. Примењује се за откривање механичких оштећења, грешака на електричним водовима, откривању топлотних губитака зграда, производних процеса, за откривање места квара на топловодовима, инсталацијама санитарне воде, аутоиндустрији итд. Пример термограма штампане плоче и далековода приказани су на слици 7.92.




Слика 7.92. Примери термограма

## 7.8 МЕРЕЊЕ ПРОТОКА

Проблеми мерења протока флуида јављају се у многим гранама технике, као што је процесна индустрија, снадбевање водом или одвођење отпадних вода, као и у многим другим областима. Флуиди, чији се проток или брзина мери, могу да буду гасови, течности или течности помешане са чврстим састојцима. У индустрији, претварачи и инструменти за мерење протока представљају најчешће саставне делове регулатора процеса или припадају системима за аутоматско управљање помоћу рачунара. Посебно су значајна обрачунска мерење, јер се цена гасова и течности одређује на основу протока кроз цеви. Због тога се од мерача протока захтева врло велика тачност и поузданост.

Проток је количина флуида, која протекне кроз посматрани попречни пресек у јединици времена. Према томе да ли се количина флуида изражава преко запремине или масе разликујемо:

- **Запремински проток**

$$Q_V = \frac{dV}{dt}\left[\frac{m^3}{s}\right] \tag{7.62}$$

где је $Q_V$ запремински проток, а $V$ запремина протеклог флуида у времену $t$.

- **Масени проток**

$$Q_m = \frac{dm}{dt}\left[\frac{kg}{s}\right] \tag{7.63}$$

где је $Q_m$ масени проток, а $m$ маса протеклог флуида у времену $t$.

**Количина флуида** која је протекла кроз мерач протока (протокомер) у временском интервалу $[t_1,t_2]$, добија се интеграцијом израза за запремински односно масени проток ($Q_V$, $Q_m$ респективно):

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_V dt \quad , \tag{7.64}$$

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \tag{7.65}$$

Масени и запремински проток су повезани релацијом:

$$Q_m = \rho Q_V = \rho \frac{dV}{dt} \tag{7.66}$$

где је са $\rho$ обележена густина (специфична маса) флуида.

Мерење протока гасова зависи од њихове температуре и притиска. Зато се проток гасова изражава у односу на нормално стање, које је дефинисано притиском $p_n=101325$Pa и температуром, $T=293,15K$, при релативној влажности $\varphi=0\ \%$ тако да је:

$$Q_m = \rho Q_V = \rho_n \frac{pT_n}{p_n Tk} Q_V \tag{7.67}$$

где се коефицијентом $k$ коригује неидеалност гасова при великим притисцима, а $T$ је температура мереног гаса.

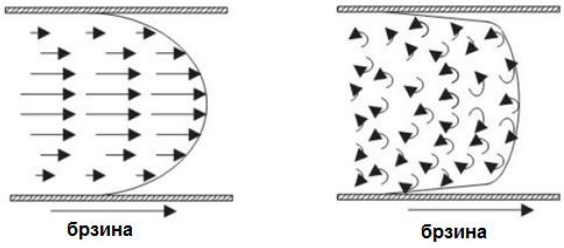
Однос протока и брзине изражен је једначином континуитета, по којој су запремински $Q_V$ и масени проток $Q_m$ дати релацијама:

$$Q_V = Av = const. \tag{7.68}$$

$$Q_m = \rho Av = const. \tag{7.69}$$

где је $v$ средња брзина у посматраном попречном пресеку површине $A$.

При малим брзинама, флуиди се крећу ламинарно. Са порастом протока, флуиди се крећу турбулентно. Брзина течности није иста дуж попречног пресека флуида, на средини цеви је највећа, док је у додира са зидом цеви приближно нула. Међутим, за брзину флуида узима се средња вредност флуида дуж попречног пресека (слика 7.93а). Када је кретање ламинарно, честице се крећу глатко у оквиру слоја. При турбулентном кретању, честице се више не крећу у слојевима, а профил брзине више није параболичан већ приближно раван (слика 7.93б).




а) б)

Слика 7.93. Примери: а) ламинарног и б) турбулентног кретања флуида

## 7.8.1 МЕРЕЊЕ ПРОТОКА ПОМОЋУ ЦЕВИ СА СУЖЕЊЕМ

Код мерача протока који у примарном делу имају цев са сужењем проток се одређује на основу разлике притисака до које долази услед препреке (сужења). Због тога је овај тип мерача познат и под нзивом **пригушнице.** У зависности од тога како је реализовано сужење, разликују се:

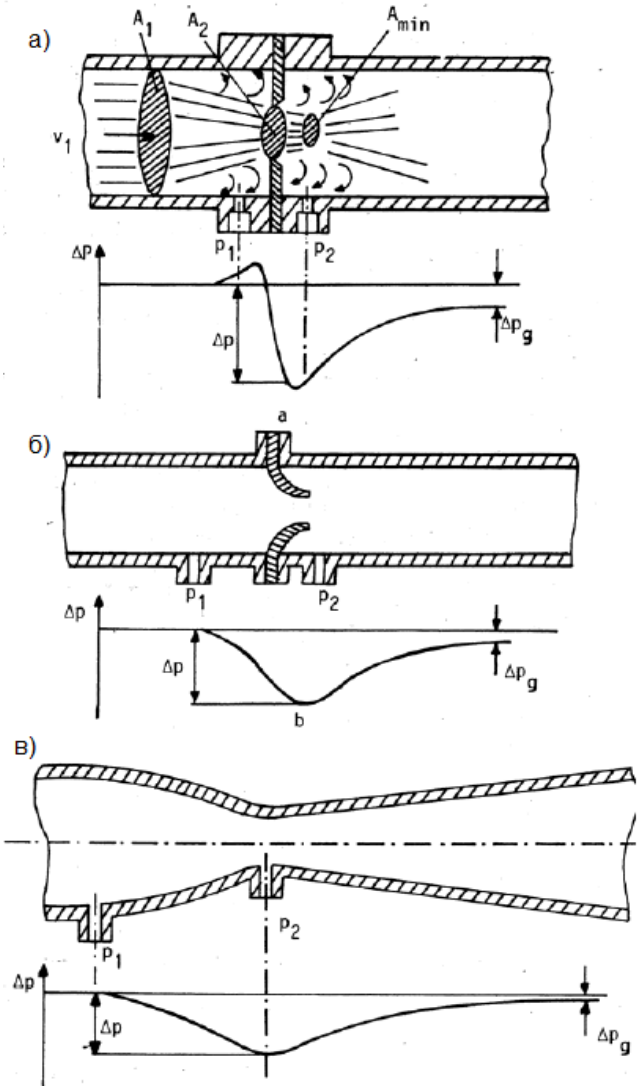
- пригушнице са блендом (пригушном плочом)
- пригушнице са млазницом
- Вентуријева цев

Изглед наведених типова пригушница заједно са дијаграмима пада притиска у зависности од пречника цеви приказани су на слици 7.94. Њихов принцип рада се заснива на примени Бернулијеве једначине, која у случају идеалног флуида има облик:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = const. \tag{7.70}$$

Као што може да се види из дијаграма пада притиска (слика 7.94), непосредно испред препреке (сужења) долази до мањег пораста притиска, који затим брзо опада и на одређеној удаљености од препрекеке (сужења)

достиже минималну вредност.




Слика 7.94. Мерачи протока на бази диференцијалног притиска
а) пригушна плоча (бленда), б) млазница (сисак) и в) Вентруијева цев

Ако је $p_1$ притисак испред сужења, када је попречни пресек цеви $A_1$, кроз који флуид протиче брзином $v_1$, а $p_2$ минимална вредност притиска, при чему је пречник најужег дела цеви $A_2$, кроз који флуид протиче брзином $v_1$, према Бернулијевој једначини, под претпоставком да су сви делови цеви на истој висини ($h_1 = h_2$) важи:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad (7.71)$$

$$v_2^2 = \frac{2}{\rho}(p_1 - p_2) + v_1^2 \tag{7.72}$$

Према закону о одржању масе (једначини континуитета) следи:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{7.73}$$

Комбинацијом претходних израза може да се добије израз за брзину на најужем делу цевовода, а тиме и зависност протока флуида од разлике притисака:

$$Q_S = A_2 v_2 = k\sqrt{(p_1 - p_2)} \tag{7.74}$$

Међутим, пошто је пресек млаза на месту мерења притиска $p_2$ различит од површине отвора сужења у пригушници $A_2$, неопходна је корекција увођењем коефицијента контракције ($C_D$), који се одређује експериментално за различите пречнике цеви и облике отвора сужења. Он зависи од односа пречника сужења и пречника цеви, густине флуида, брзине струјања и коефицијента вискозности, тако да је стварни проток:

$$Q_S = C_D Q \tag{7.75}$$

Мерач протока са **блендом** (слика 7.94а) има највећи диференцијални притисак $\Delta p$, што значи да ови мерачи имају велику осетљивост. Због појаве турбуленције испред и иза отвора настају повећани губици енергије, а то доводи до знатног губитка притиска $\Delta p_g$. Тај губитак мора да се надокнади помоћу пумпи, што у случају великих протока није увек исплативо.

Губици код мерача протока са **млазницом** (слика 7.94б) су мањи, јер турбуленција настаје само иза отвора, па су $\Delta p$ и $\Delta p_g$ мањи.

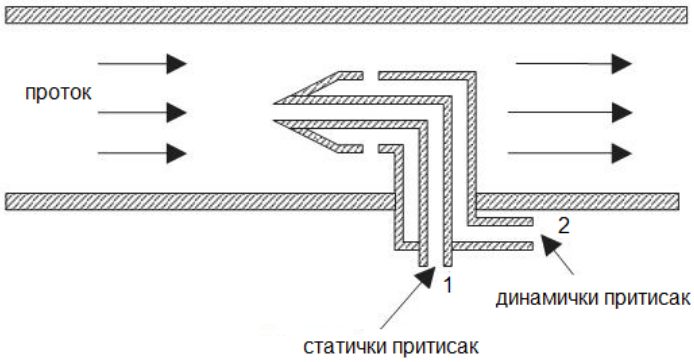
**Вентуријева цев** за задати однос сужења и пречника цеви има најмањи $\Delta p$ и $\Delta p_g$ (слика 7.94в). Међутим, за уградњу Вентуријеве цеви је потребно више места од осталих пригушница, а имају и већу цену. Због тога се углавном примењују за мерење веома великих протока, где је битна уштеда енергије.

Заједничке карактеристике мерача са суженом цеви су да имају нелинеарну карактеристику, малу динамику (однос минималног и максималног протока флуида је 1.3), тачност 0.5 до 2% и нису погодни за мерења у системима у којима постоји брза промена струјања флуида.

**Питоова цев** је нашла примену за мерење брзине флуида, посебно гасова. Цев има два отвора (слика 7.95). Помоћу једног отвора се мери статички притисак, јер се флуид заустављања на врху давача. Помоћу другог отвора се добија динамички притисак, пошто је ту брзина струјања једнака стварној брзини флуида. Применом Бернулијеве једначине за разлику притисака добија се:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho v^2}{2} \tag{7.76}$$

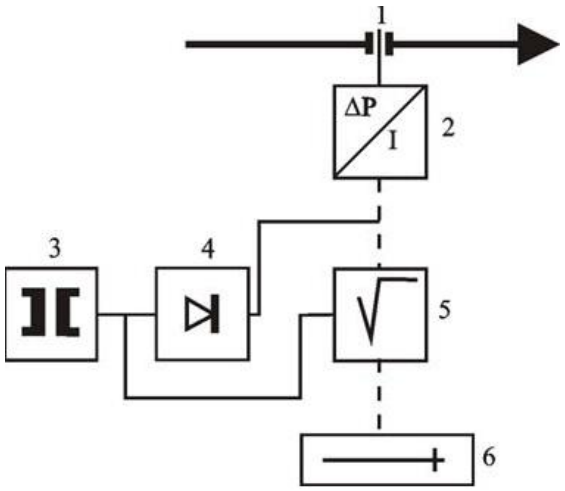
Разлика динамичког и статичког притиска се одређује мерачем диференцијалног притиска, који даје сигнал пропорционалан квадрату брзине, слично као код претварача са суженом цеви.




Слика 7.95. Питоова цев

Посебно конструисана кратка Питоова цев која се поставља са спољашње стране авиона омогућава мерење брзине авиона.

Пошто је веза између протока (односно брзине) флуида и разлике притисака која се мери нелинеарна (измерени сигнал је једнак квадрату протока), мора да се изврши линеаризација. То може да се постигне коришћењем претварача диференцијалног притиска који има има карактеристику облика квадртног корена или додавањем посебног рачунског дела, коренатора, којим се врши линеаризација ситнала из претварача диференцијалног притиска, као што је приказано на слици 7.96. Елементи приказаног система за мерење су: пригушна плоча (1), претварач диференцијалног притиска (2), трансформатор који даје наизменични напон напајања (3), исправљач који даје једносмеран напон напајања (4), коренатор (5) и показивач (6).




Слика 7.96. Основни елементи у систему са стандардним електричним сигналом за мераче протока са пригушницом

## 7.8.2 РОТАМЕТРИ

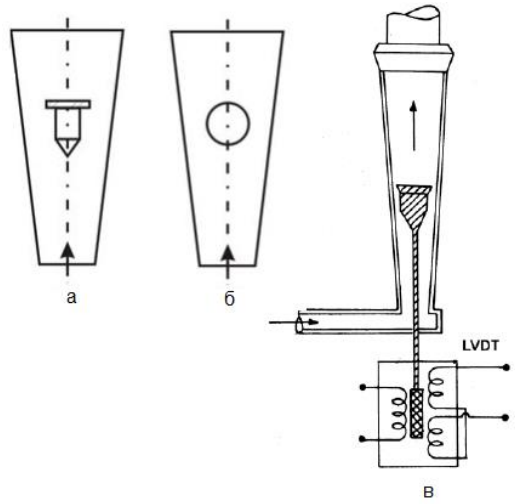
Основни делови ротаметра су вертикална конусна цев и пловак кружног поптречног пресека, који се креће у зависности од брзине, односно протока флуида (слика 7.97). Специфична тежина пловка је већа од специфичне тежине флуида, па се при нултој брзини флуида пловак налази на дну цеви. Услед кретања флуида пловак се пење до висине пропорционалне протоку. Принцип рада ротаметара се заснива на мерењу силе која делује на пловак које се налази у центру цевовода, настале услед отпора кретању флуида. Пловак се подиже навише са порастом брзине флуида. На тело које се налази у струји флуида делује сила:

$$F_w = \frac{C_w \rho_f v^2 A_p}{2} \tag{7.77}$$

где је $v$ брзина флуида, $\rho_f$ густина флуида, $A_\text{p}$ површина попречног пресека пловка и $C_w$ коефицијент отпора. Ова сила се уравнотежава са тежином потопљеног тела умањеном за силу потиска. Да би оваква равнотежа могла да се успоставља при променљивом протоку, цев у којој се потопљено тело креће мора да буде конусног облика. У том случају се добија следећа корелација између протока флуида ($Q$) и вертикалног померања потопљеног тела ($Y$):

$$Q = K_k Y \sqrt{\frac{2gV_t(\rho_t - \rho_f)}{C_w A_p \rho_f}} = CY \tag{7.78}$$

где је $K_k$ нагиб конуса, а $V_t$ и $\rho_t$ запремина и густина материјала потопљеног тела од кога је направљен пловак. На слици 7.96. су приказана три основна типа ротаметара.




Слика 7.97. Ротаметри
а) са чигром, б) са куглом и в) са пловком на вођици

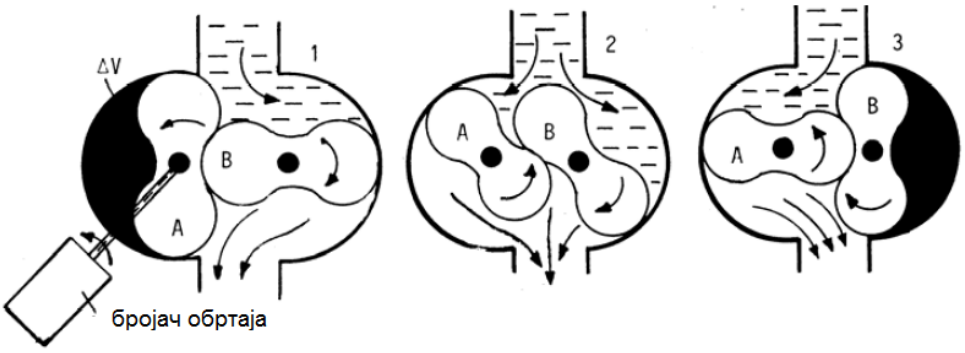
Конусна цев је најчешће стаклена или пластична, а положај тела у цеви, односно вредност протока се најчешће очитава визуелно. Облици тела су прилагођени величинама протока и вискозности флуида. Ротаметар са **чигром** (слика 7.97а) се користи за мерење протока мало вискозних и провидних течности и гасова. Ротаметар са **куглом** (слика 7.97б) погодан је за мерење малих протока, као и за мерење протока корозивних течности и гасова. У случају када је немогуће визуелно очитавање, користи се **пловак** на вођици (слика 7.97в), чији слободан крај представља језгро диференцијалног трансформатора. Уколико су тела у ротаметрима направљена од магнетних материјала, њихов положај може да се детектује помоћу Холовог сензора.

Ротаметри су предвиђени за вертикалну уградњу. Имају линеарну карактеристику и мали пад притиска који не зависи од величине протока. Имају динамику 10:1, при чему је опсег протока који може да се мери ротаметром 0.04 l/h до 150 $m^3$/h. Тачност им је ±2%.

## 7.8.3 ВОЛУМЕТРИЈСКИ МЕРАЧИ

Волуметријски претварачи за мерење протока гасова и течности заснивају рад на мерењу запремине протеклог флуида. Флуид који долази на улаз претварача дели се на елементарне запремине које у том виду пролазе кроз претварач. Број елементарних запремина које прођу кроз претварач је једнозначно повезан са бројем обртаја неког ротирајућег елемента, а то се региструје погодним индикатором броја обртаја. Тренутни проток је сразмеран угаоној брзини ротора, док је укупна протекла количина течности у неком временском интрвалу сразмерна избројаном броју обртаја ротора.

Један од најчешће коришћених је претварач са два овална ротора који се обрћу под дејством момента силе услед разлике притисака на улазном и излазном крају (слика 7.98). У сваком положају ротори се међусобно додирују онемогућавајући пролазак течности између додирних површина. Зазори између ротора и кућишта као и међусобни зазори између ротора морају бити врло мали (0.03 до 0.1 mm). Кроз те зазоре ипак протиче одређена количина течности и то проузрокује грешку мјерења. Грешка је посебно велика код малих протока, а зависи од вискозности течности, механичкомг трења ротора и геометријских параметара.




Слика 7.98. Мерачи са овалним роторима

Код овог типа мерача је пристутан велики пад притиска при проласку течности кроз претварач. ($5 \cdot 10^4$ Pa) при максималном протоку, што представља знатан губитак енергије који мора да се надокнади помоћу пумпе. Такође, овај тип мерача не може да се примени код течности које садрже веће чврсте честице. Тачност мерења је типично 1%, а може да буде до 0.1%.

### 7.8.4 ТУРБИНСКИ МЕРАЧИ

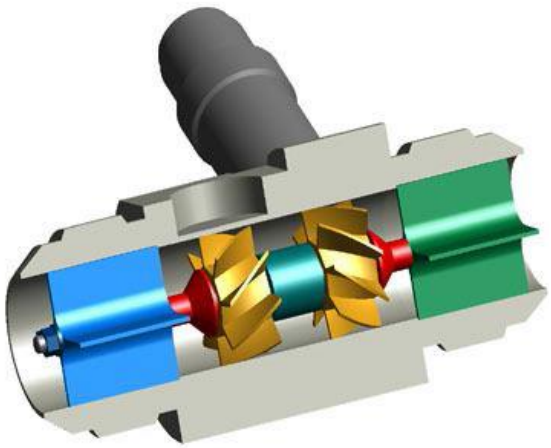
Турбински мерач се састоји од ротора (турбине) са две или више лопатица. Турбина се се поставља у центар цеви, обично прави од метала, а угаона брзина се мери или близинским или Холовим сензором (слика 7.99). У неким реализацијама турбинских мерача, када лопатице од феромагнетног материјала пролазе испод перманентног магнета, у намотају статора индукује се напон чија је фреквенца:

$$f = nm \tag{7.79}$$

где је $n$ број обртаја турбине, а $m$ број лопатица. Без обзира на реализацију турбине, проток флуида $Q$ је увек линеарно пропорционалан угаоној брзини ротора односно фреквенци:

$$Q = Kf \tag{7.80}$$

где је $K$ константа коју специфицира произвођач.



Слика 7.99. Турбински мерач протока

Основни недостатак турбинских мерача је што уносе стални губитак притиска који може да износи и преко 30kPa. Такође, проток флуида мора да створи довољан моменат да би окретао турбину. Међутим, ови мерачи имају веома добру линеарност и тачност 0.05% до 0.1% максималног протока, тако да се често користе као секундарни еталони за калибрацију других мерача протока. У зависности од пречника и конструкције могу да раде у широком распону протока, од 0.1 $dm^3/s$ до преко 1000 $dm^3/s$ и имају динамику 10:1.

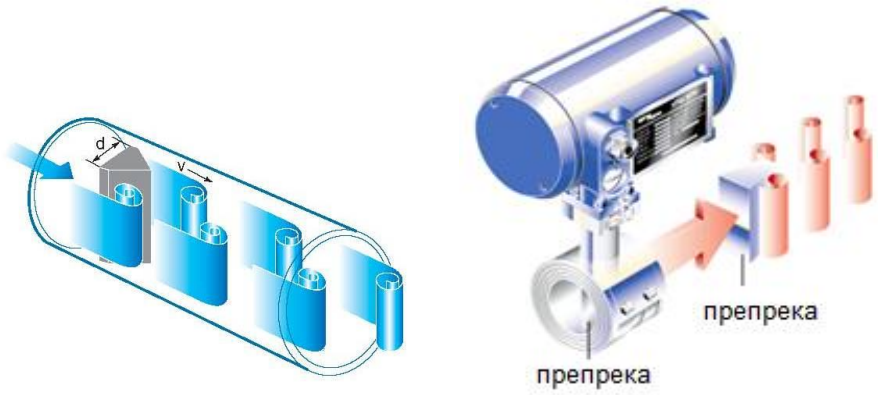
## 7.8.5 ВРТЛОЖНИ МЕРАЧИ

Мерачи протока на бази мерење фреквенце турбуленције *(vortex)* користе се за мерење већих брзина струјања флуида. У цев се уноси препрека, иза које се ствара турбулентно кретање (слика 7.100), при чему је фреквенца вртлога директно пропорционална брзини флуида:

$$f = S_t \frac{v}{d} \tag{7.81}$$

где је $S_t$ константа (*Strouhal*-ова константа), $v$ је брзина струјања флуида, а $d$ ширина препреке. На основу измерене фреквенце може да се израчуна и проток $Q$, који је директно пропорционалан фреквенци:

$$Q = Kf \tag{7.82}$$




а) б)

Слика 7.100. Вртложни мерач протока
а) принцип рада и б) изглед мерача

У подручје вртложења се поставља претварач који може да прати фреквенцу вртложења. Најчешће се мери фреквенца промене притиска услед вртложења, а могу да се користе термистори, ултразвучна метода, индуктивна метода, и друге.

Осим линеарне карактеристике, предност вртложних мерача је и велика динамика 1:100, као и тачност боља од 1%. Међутим, за мале брзине струјања,мерење постаје нестабилно, јер се фреквенца вртлога драстично смањује, а из сличних разлога не могу да се користе за мерење протока веома вискозних течности.

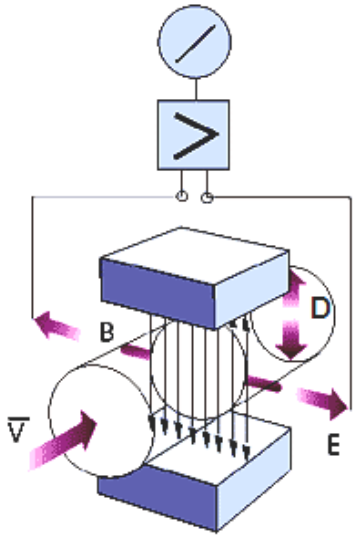
## 7.8.6 ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ МЕРАЧИ

Принцип рада електромагнетних мерача протока заснива се на Фарадејевом закону електромагнетне индукције, па се зато често називају и индуктивни. По том закону се у проводнику, ако се креће у магнетном пољу, индукује електромоторна сила са амплитудом која зависи од јачине магнетног поља, брзине кретања и дужине проводника, тако да је:

$$E = B \cdot l \cdot v \tag{7.83}$$

где је $E$ електромоторна сила, $B$ магнетни флукс, $l$ дужина проводника и $v$ брзина кретања проводника у магнетном пољу. Правац електромоторне слие у зависности од кретања проводника и магнетног поља дефинисан је познатим правилом десне руке.

Ако је магнетно поље управно на изоловану цев кроз коју тече вода (која је проводник) или нека друга проводна течност, може да се мери максимална разлика потенцијала између две електроде постављене на зид цеви тако да је пречник који их спаја управан на магнетно поље. Разлика потенцијала је пропорционална јачини магнетног поља, средњој брзини и растојању између електрода. Тако се могу одредити средња брзина и проток течности у цеви. Овај принцип је илустрован на слици 7.100.




Слика 7.100. Електромагнетни мерач протока

Овај тип мерача усредњава брзину по пресеку у коме се налазе електроде. Пошто су интензитет електромагнетног поља ($B$) и пречник цеви ($D$) познати, следи да мерењем индуковане електромоторне силе може да се одреди средња вредност брзине протока

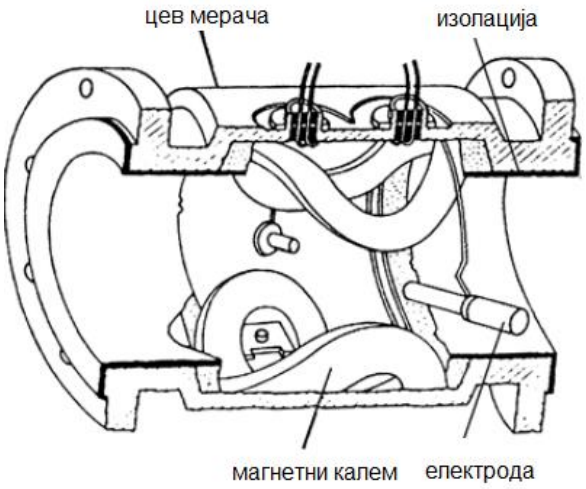
$$v = \frac{E}{BD} \tag{7.84}$$

а самим тим, постоји и линеарна зависност протока $Q$ и индукованог напона $E$:

$$Q = Av = \frac{D^2\pi}{4}\frac{E}{BD} = \frac{D\pi}{4B}E \Rightarrow Q = KE \tag{7.85}$$

Линеарна зависност излазног сигнала ($E$) од протока ($Q$) је велика предност у односу на нелинеарне претвараче, као што је на пример цев са суженим попречним пресеком. Такође изведене формуле за средњу брзину и проток важе како за ламинарно, тако и за турбулентно кретање

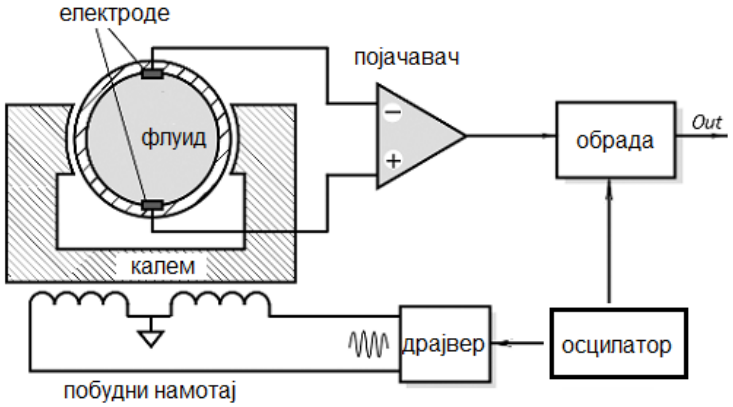
Електромагнетни мерач протока се састоји од примарног уређаја, у који спадају цев кроз коју пролази флуид, мерне електроде и магнетни намотаји, и секундарног уређаја, који обезбеђује побуду магнетног намотаја, појачава излазни сигнал из примарног уређаја, конвертује га у облик погодан за приказивање, пренос и интеграљење. Примарни уређај (слика 7.101) је, у ствари део цевовода, изолован погодним материјалом да би се избегао кратак спој електрода, које су у цев уграђене кроз сам изолациони слој. Калемови електромагнета, постављени су по спољашњем ободу цеви и често су од влаге и потапања заштићени премазом од "епокси" смоле.




Слика 7.101. Примарни део електромагнетног мерача

Секундарни део електромагнетног мерача (слика 7.102) се обично назива претварач, а служи да:

- обезбеди напајање калема електромагнета на цеви примарног дела
- појача и обради излазне сигнале који се генеришу на електродама,
- елиминише нежељене сигнале (сигнале сметњи).




Слика 7.102. Секундарни део електромагнетног мерача

За остваривање одговарајућег магнетног поља око цеви, неопходно је да се на калем електромагнета доведе нека побудна струја. То није могуће постићи обичном једносмерном струјом јер се тако на електродама јавља поларизација и електрохемијске реакције, па се користе неки облици наизменичне побуде. Излазна струја је такође наизменична и капацитивно се повезује са секундарном електроником, да би се избегли утицаји једносмерних напона. Овакви системи имају и неке мане. Наизменична побуда при трансформацији ствара непожељне напоне, који су последица лутајућих струја у сигналним кабловима, где се јавља променљиво магнетно поље. Такође, имају велику потрошњу енергије и офсет, као последицу паразитних напона и запрљаности електрода. Зато је неопходно ручно подешавање мерне нуле. Ови проблеми се данас лако превазилазе коришћењем импулсне синусне или несинусне побуде. Промена густине флукса се може тако подесити да у једном делу циклуса побуде буде једнака нули ($\mathrm{d}B/\mathrm{d}t = 0$), тако да у том периоду неће бити нежељених ефекта трансформисања. Сигнал који дефинише проток се посматра у том периоду и тада је без утицаја паразитних напона. Многи произвођачи користе правоугаону или трапезну побуду са ниским фреквенцама (2 - 7 Hz). Тиме се користе погодности мале потрошње енергије (на пример само 20% од енергије у односу на сличне системе на 50 Hz), аутоматске компензације непожељних напона, аутоматског подешавања нуле и мале осетљивости на таложење материјала на електродама. Примери различитих типова индустријских мерача протока приказани су на слици 7.103.



Слика 7.103. Примери електромагнетних мерача у процесној индустрији

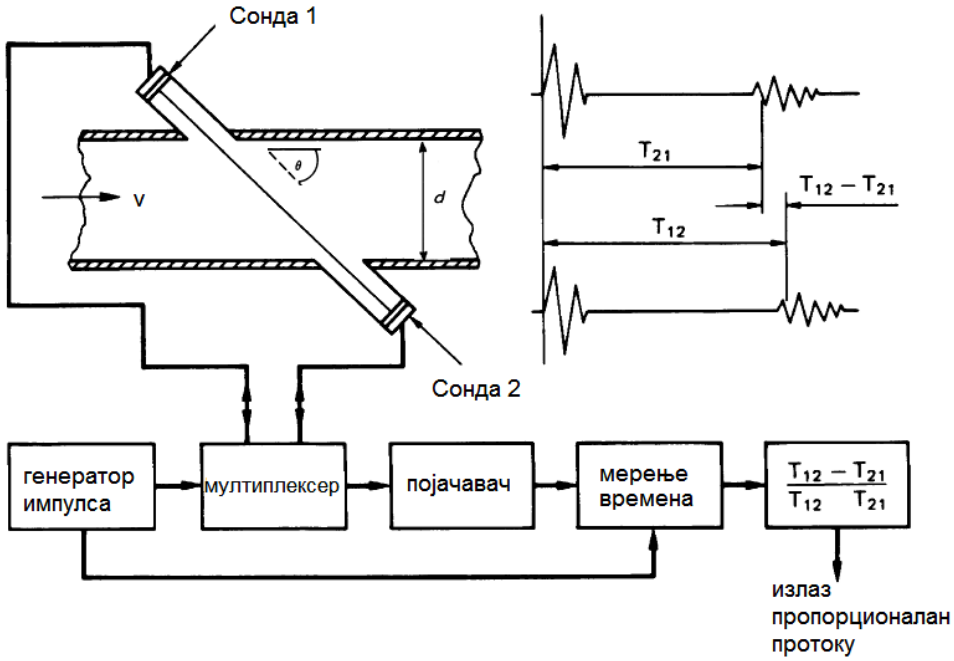
Електромагнетним мерачем може да се мери проток свих течности које се понашају као проводници, као што су: чиста вода, отпадна вода разни водени раствори, киселине, жива и друге, а не може да се примени у случају нафте, бензина, уља и других течности које представљају добре диелектрике. Минимална проводност течности мора да буде већа од *5* $\mu S/cm^2$. Електромагнетни мерач не ремети ток и мери проток у оба смера струјања и

уноси занемарљив ток притиска. Тачност је типично ±1% од пуног опсега, мада може да буде и ±0.5% Мерни опсег је 10:1 (или бољи, уз смањену тачност). Имају велики распон пречника (од 2.5 mm до 2500 mm).

## 7.8.7 УЛТРАЗВУЧНИ МЕРАЧИ

Ултразвучни мерачи протока мере проток кроз цев преко праћења узајамне зависности протока течног флуида и таласа ултразвука који се емитује у цевовод кроз који протиче течност. Најчешће се примењују две методе: **емисиона** и **Доплерова**.

Принцип рада **емисионих** мерача протока најчешће се заснива на емитовању ултразвучног таласа између две тачке, прво у смеру тока течности, а затим у супротоном смеру и мерењу времена мерењу времена путовања ултразвучног таласа кроз цевовод. У оба случаја брзина тока ће утицати на време путовања ултразвучног таласа, а разлика је директно пропорционална брзини течности. Звучни талас се упућује под неким углом $\theta$ у односу на смер кретања течности. Принцип рада ултразвучног мерача протока са временском разликом приказан је на слици 7.104.




Слика 7.104. Ултразвучни мерач протока са временском разликом

Време путовања таласа низводно према слици 7.104. може да се одреди из израза:

$$T_{12} = \frac{D}{\sin\theta \cdot (c - v \cdot \cos\theta)} \tag{7.86}$$

док је време путовања таласа узводно:

$$T_{21} = \frac{D}{\sin\theta \cdot (c + v \cdot \cos\theta)} \tag{7.87}$$

где је *v* средња брзина течења воде под углом *θ* у односу на правац простирања ултразвучног зрака, *D* је пречник цеви и *c* је брзина звука у води. Пошто је *c >> v cos θ* разлика у времену *ΔT* ће бити:

$$\Delta T = T_{12} - T_{21} = \frac{2 \cdot d \cdot \cos\theta \cdot v}{c^2} \tag{7.88}$$

Разлика у времену путовања је пропорционална средњој брзини *v* а обрнуто пропорционална квадрату брзине звука *c,* па је за пречнике мерача који се користе у водоводним системима обично врло мала. У практичним реализацијама, примењује се секвенцијално или симултано мерење времена путовања ултразвука. На слици 7.104 приказан је принцип рада уређаја са секвенцијалним мерењем времена. Мултиплексер пребацује предајнике наизменично на емитовање и примање. Мерење времена се обавља електронским методама. Брзина звука се добија преко средњег времена путовања импулса узводно и низводно. Иначе, ова метода се примењује код највећег броја преносивих уређаја, који се привремено причвршћују на цевовод. Примери преносивог мерача и мерача који се уграђује на цевовод приказани су на слици 7.105.




а) б)

Слика 7.105. Практичне реализације ултразвучних мерача протока са временском разликом
а) преносни мерач, б) мерач који се уграђује на цевовод

Основни услов за ефикасну примену емисионог ултразвучног мерача је примена у цевима које су испуњене водом, а до грешака долази уколико на мерном месту дође до поремећаја профила брзина. Једна од основних предности ових мерача је што обезбеђују мерење протока у оба смера, без губитка притиска са мерним опсегом 10:1, при чему цена не зависи од пречника.

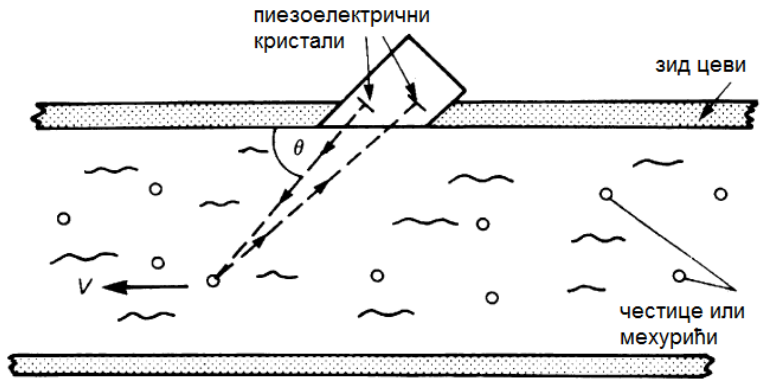
Код Ултразвучних мерача протока са **Доплеровим ефектом** примењен је добро познат ефекат да је величина промене фреквенце показатељ брзине кретања извора звука, односно препреке од које се звук одбија. Доплерова метода мерења протока је годинама имала широку примену за мерење протока воде у којој има чврстих честица, мехурића гаса или других облика нечистоћа о које су могли да се одбију ултразвучни таласи. Доплеров мерач протока практично се сатоји од кућишта у које су уграђена два пиезоелектрична кристала, од којих је један предајник, а други пријемник (слика 7.106). Предајник емитује ултразвучни талас са фреквенцом $f_1$ и под углом $\theta_1$ према оси цеви. Један део енергије се одбија према пријемнику од честица или гасова у води. Ако вода путује брзином $v$, а $c$ је брзина ултразвука у води, фреквенца $f_2$ одбијеног звука, који се добија на пријемнику износиће:

$$f_2 = f_1 \pm 2 \cdot v \cdot \cos\theta \cdot \frac{f_1}{c} \tag{7.89}$$

одакле следи да је брзина $v$

$$v = \frac{c \cdot (f_1 - f_2)}{2 f_1 \cos\theta} = \frac{f_d \cdot c}{2 f_1 \cos\theta} \tag{7.90}$$

где је $f_d$ Доплерово одступање фреквенце.

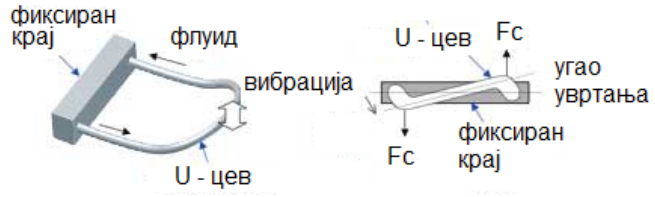



Слика 7.106. Принцип рада мерача протока са Доплеровим ефектом

Међутим, тачност и поновљивост мерача протока са Доплеровим ефектом није могуће гарантовати, јер његов рад зависи од распореда брзина по пресеку цеви, као и од величине и концентрације честица у води. Што је вода чистија или што има мање рефлектујућих честица, звучна енергија путује даље од мерног места, па се повећава могућност одбијања од зидова цеви и других препрека. Тако се формира Доплерова фреквенца која нема једноставну везу са брзином воде. Основни недостатак је управо непозната зона у којој се мери брзина, лоша тачност и поновљивост. Под идеалним условима и калибрацијом на лицу места може да се постигне тачност од ±10%. Са друге стране, мерачи са Доплеровим ефектом имају занемарљиве губитке притиска, добар мерни опсег 25:, при чему може да се користи и за отворене токове.

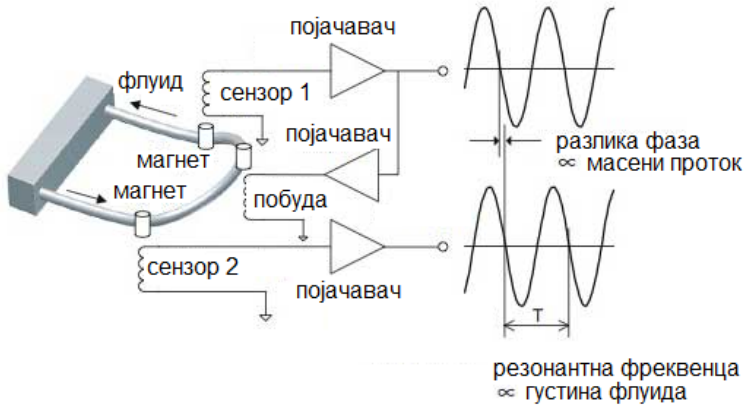
## 7.8.8 КОРИОЛИСОВИ МЕРАЧИ

Кориолисови мерачи се користе за мерење запреминског и масеног протока, при чему може да се мери и густина тачности. Користе се конфигурације са једном или две цеви. У оба случаја цев принудно осцилује нормално на правац кретања течности (слика 7.107), а услед деловања Кориолисове силе ($Fc$) долази до увртања цеви, које је директно пропорционално масеном протоку. Вибрирање цеви се остварује спољашњим електромеханичким системом. Цев је од нерђајућег челика. Тање цеви се користе за мерење протока гасова, док се дебље користе за течности.



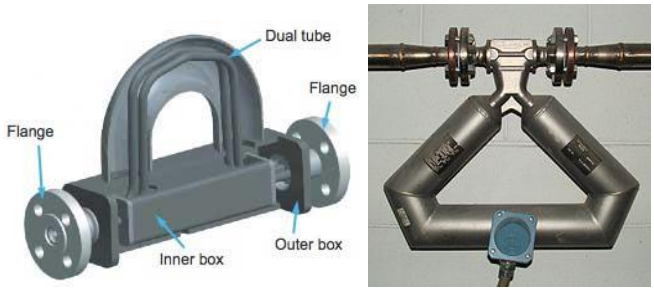

Слика 7.107. Принцип рада Кориолисовог мерача протока

Када постоји проток, јавља се фазна разлика између улазног и излазног краја цеви која је директно пропорционална масеном протоку, док се густина одређује мерењем резонантне фреквенце цеви (слика 7.108). За исправан рад је неопходно и мерење температуре флуида, јер са променом температуре долази до промене еластичноих својстава цеви), па мора да се врши компензација применом микропроцесора.




Слика 7.108. Структура Кориолисовог мерача протока

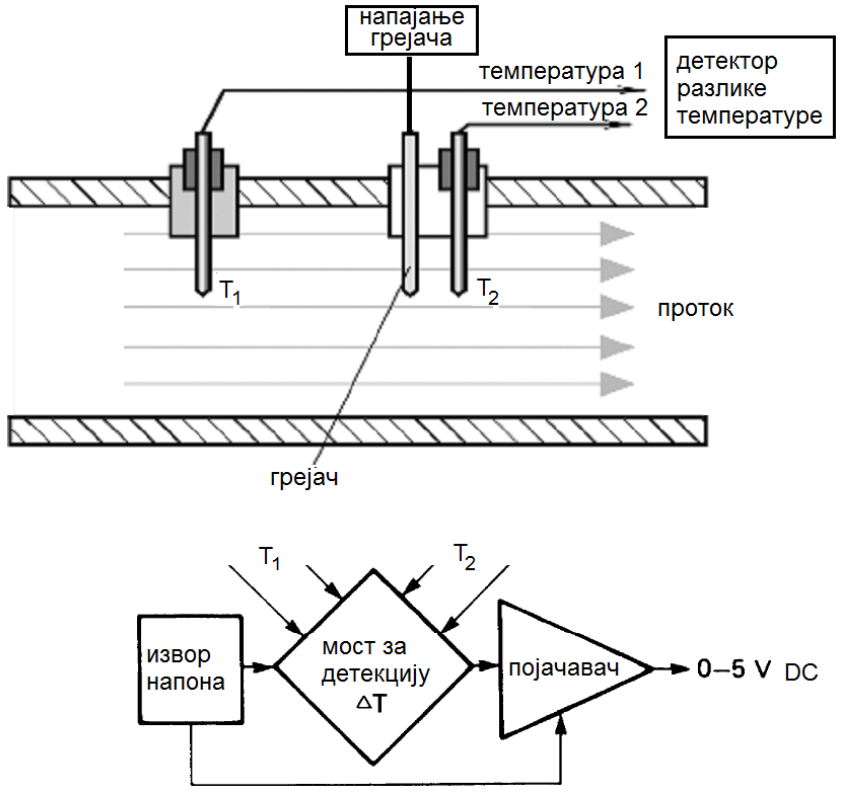
Најчешћи опсег мерења је од 0.9 kg/h до 18000 kg/h. Мерач је потпуно линеаран у целом опсегу мерења, при чему је мерни опсег 100:1. Пошто нема покретне делове, његово одржавање је једноставно. Међутим ови мерачи спадају у ранг скупљих. Може да мери проток у оба смера и може да се користи у корозивним срединама. Посебно су погодни за обрачунска мерења, пре свега у нафтној индустрији. Такође се користе и у фармацеутској и прехрамбеној индустрији. Типичне реализација Кориолисовог мерача протока приказане су на слици 7.109.




Слика 7.109. Примери типичних Кориолисових мерача протока

## 7.8.9 ТЕРМИЧКИ МЕРАЧИ

Термички мерачи протока налазе примену за мерење протока масе. Они се састоји од цеви кроз коју тече флуид, узводног и низводног температурног сензора и извора топлоте као на слици 7.110. Сензори температуре, који су најчешће RTD су инсталирани на једнаком растојању од извора топлоте. Када нема протока, они примају примају исту количину топлоте. Међутим, са повећањем протока низводни сензор прима све више топлоте од узводног, што доводи до повећања разлике температуре ($\Delta T$), која је пропорционална протоку масе.




Слика 7.110. Принцип рада термичког мерача протока

Уколико је снага грејача ($P$) константна, масени проток ($Q_m$) може да се одреди на основу израза:

$$P = \frac{mc\Delta T}{t} = Q_m c\Delta T \tag{7.91}$$

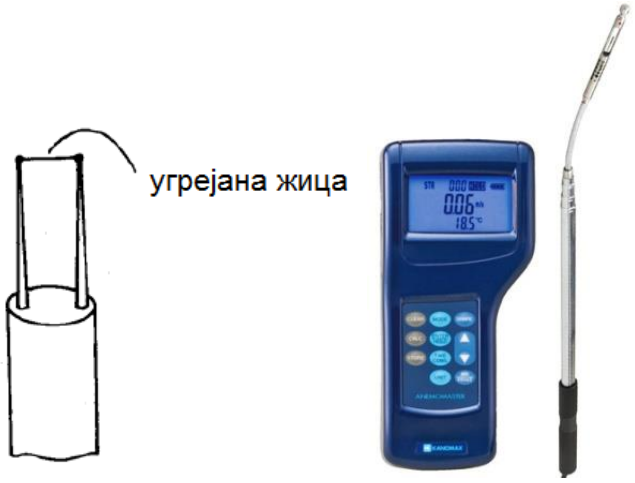
$$Q_m = \frac{c\Delta T}{P} \tag{7.92}$$

при чему је $c$ специфични топлотни капацитет.

Највећа предност термичких мерача температуре је што немају покретне делове и што могу да се користе за мерење протока при малим брзинама флуида. Са порастом брзине флуида осетљивост опада, тако да ови мерачи не могу да се користе изнад неке граничне брзине, која зависи од типа флуида (за ваздух, при атмосферском притиску $v_{\max} = 60\ \mathrm{m/s}$ ).

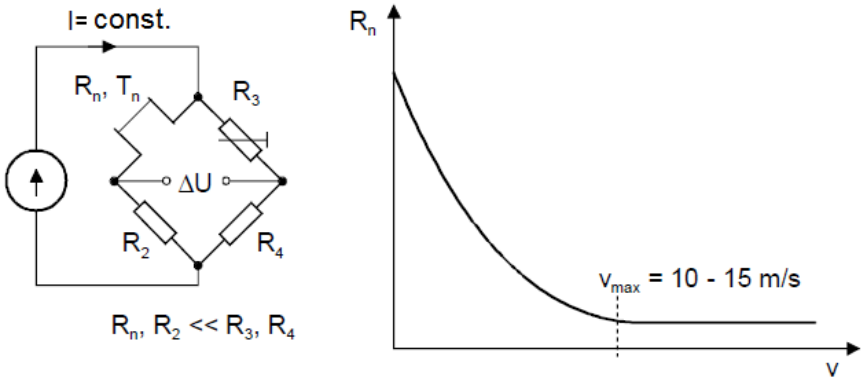
## 7.8.10 АНЕМОМЕТРИ СА УГРЕЈАНОМ ЖИЦОМ

Анемометри са угрејаном жицом (слика 7.111) користе се за мерење брзине флуида и то за динамичка мерења, када се очекује велика брзина одзива. Рад анемометра се заснива на смањењу температуре угрејане жице због протицања флуида, која се детектује као промена отпорности жице. Жице су углавном од платине, волфрама и никла, дужине око 5mm и дебљине od 5 μm до 10 μm.



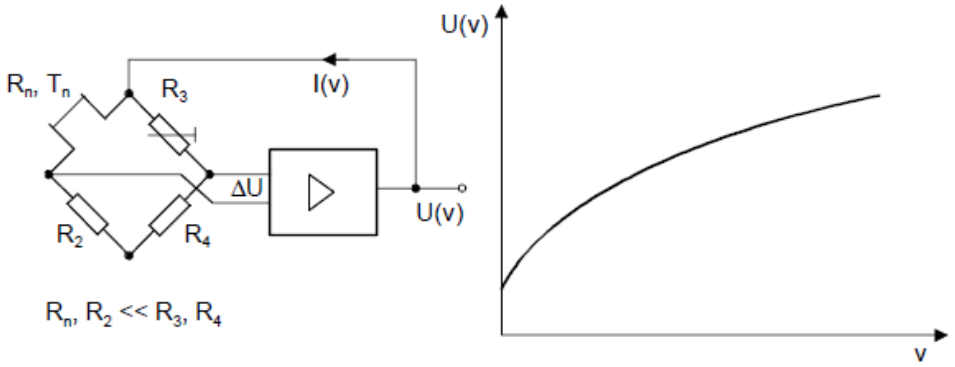

Слика 7.111. Анемометар са угрејаном жицом

Постоје реализације анемометара са константном струјом и константном температуром. У првом случају, кроз жицу се пропушта константна струја, која доводи до загревања жице на 200 $^0$C (слика 7.112). Осетљивост при малим брзинама је велика и опада са порастом брзине, па. метода константне струје не може да се примени за мерење већих брзина.




Слика 7.112. Анемометар са угрејаном жицом

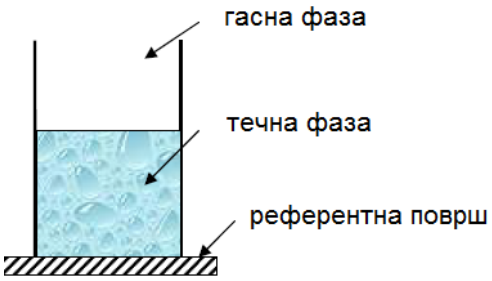
Код анемометара са константном температуром, температура угрејане жице се одржава константном при различитим брзинама струјања флуида. Пошто се температура загрејане жице смањује услед кретања флуида, смањује се и њена отпорност, а то доводи до неравнотеже у отпорном мосту (слика 7.113). Настали напон $U$, који зависи од брзине струјања флуида $v$ користи се за промену струје напајања моста, тако да се температура жице одржава константном, чиме се мост доводи у равнотежу. Основна предност методе са константном температуром је широки мерни опсег, при чему карактеристика нема засићење у области већих брзина. Тачност анемометра је $\pm 1\%$, за опсег брзина $v$ = (0.1 до 500) m/s




Слика 7.113. Принцип рада анемометра са константном температуром

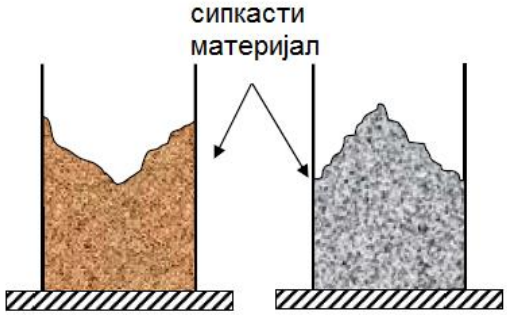
## 7.9 МЕРЕЊЕ НИВОА

Ниво представља граничну површину између две средине различите густине у односу на неку хоризонталну површину узету као референтну, при чему је гранична површина најчешће између течне и гасовите фазе (слика 7.114). Сензори за мерење нивоа називају се **нивометрима**. Из дефиниције нивоа произилази да је мерење нивоа заправо одређивање растојања, односно дебљине, тако да се проток изражава у јдиницама дужине.




Слика 7.114. Дефиниција нивоа течности

Мерење нивоа сипкастог (уситњеног) материјала као што су: угаљ, брашно, жито, цемент и друго, значајно се разликују од мерења нивоа течности, јер ниво таквих материјала најчешће није хоризонталан (слика 7.115). За тачно мерење неопходно је познавање начина кретања материјала, величине и облика зрна, начина пуњења и пражњења, као и облика резервоара.




Слика 7.115. Примери нивоа прашкастог матријала

Мерење количине (запремине) течног и уситњеног материјала у резервоару врши се на основу информације о нивоу и познатог попречног пресека.

## 7.9.1 ДЕТЕКТОРИ НИВОА

Улога детектора нивоа је да дају индикацију критичних вредности нивоа, као што су минимална и максимална вредност, као и да на основу индикације активирају аларм.

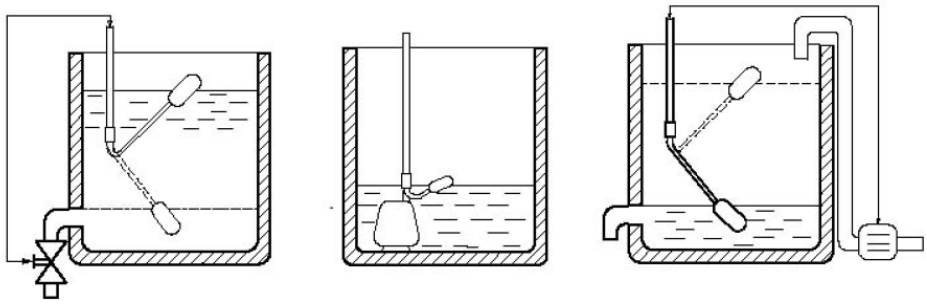
### 7.9.1.1 Пловак

Пловак или пловна крушка је лоптастог облика, пречника 80 mm до 120 mm и плута на површини течности чији се ниво мери (слика 7.116). Различит положај пловка утиче на кретање магнетне куглице у пловку, чије граничне положаје региструје *read* реле.




Слика 7.116. Изглед пловне крушке

На слици 7.117 приказане су примене пловка за детекцију нивоа у циљу заштите пумпе од рада "на суво", као и контрола рада пумпе при процесу пуњења и пражњења резервоара. Применом пловка могу да се директно контролишу пумпе до снаге .1 KW. Када пловак региструје опадање нивоа течности испод критичне вредности, искључује вентил пражњења или пумпу. Пловак искључује пумпу и у случају када се региструје максималан ниво течности.

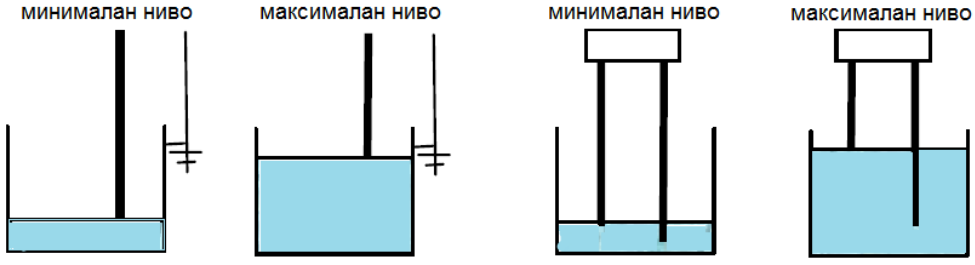


а) б) в)

Слика 7.117. Примена пловка за детекцију нивоа у циљу: а) контроле пражњења, б) заштите пумпе и в) контроле пуњења

### 7.9.1.2 Кондуктивни детектори нивоа

Принцип рада кондуктивног детектора нивоа заснива се на детекцији проводности између два или више проводника зароњена у течност. Услов за примену је да течност има минималну проводност од $2x10^{-5}$ S/cm. При уградњи ових детектора треба водити рачуна о проводности зида резервоара у коме се мери ниво. Уколико је зид резервоара проводан, једна сонда се кратко спаја са зидом, док се код резервоара са непроводним зидовима обе сонде зарањају у течност чији се ниво детектује (слика 7.118)



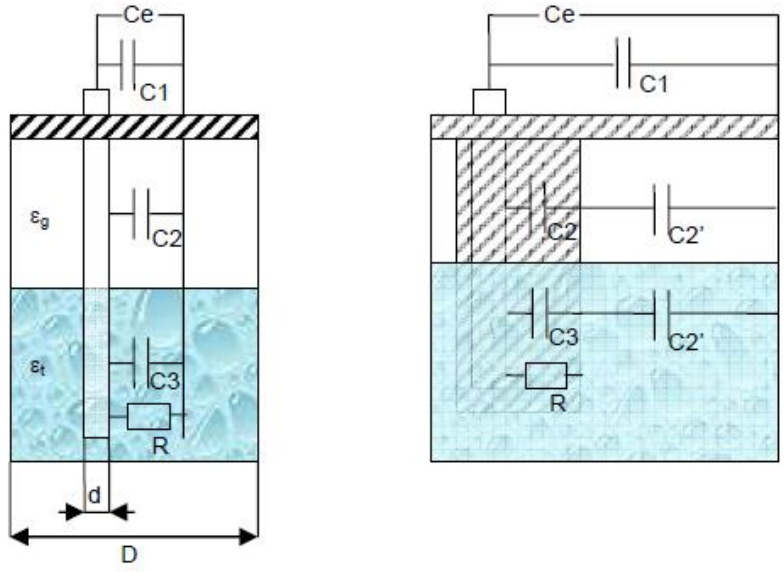

Слика 7.118. Примена кондуктивог детектора нивоа

## 7.9.2 МЕТОДЕ ЗА КОНТИНУАЛНО ПРАЋЕЊЕ НИВОА

Избор континуалне методе за праћење нивоа зависи од врсте супстанце у резервоару, као и од тога да ли је резервоар отворен или затворен. Развијен је велики број метода за мерење нивоа, од којих ће бити описане оне које су нашле широку практичну примену.

### 7.9.2.1 Капацитивни сензори нивоа

Капацитивни сензора нивоа праве се као плочасти или цилиндрични кондензатори, између којих се налази течност чији се ниво мери, при чему течност може да буде проводна или непроводна. Начин монтирања капацитивних сензора нивоа приказан је на слици 7.119. Металне електроде капацитивне сонде фиксиране су помоћу заптивача од изолационог материјала и потопљене у течност до висине *h*, док је остатак простора између електрода *H - h* испуњен гасном фазом. Сонда је најчешће цилиндрична (коаксијална), с тим што као спољашња електрода може да послужи и зид резервоара.




а) б)

Слика 7.119. Капацитивни сензори нивоа
а) за непроводне течности и б) за проводне течности

За непроводне течности, као што су нафта и њени деривати, отпор између електрода је бесконачан, па је еквивалентан капацитет:

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 \tag{7.93}$$

$$C_e = C_1 + \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_t h}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} + \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_t (H-h)}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} = k_1 + k_2 h \tag{7.94}$$

при чему је $C_1$ капацитет између електрода на сегменту где се између њих налази изолатор, $C_3$ капацитет између електрода у течној фази и $C_2$ капацитет у гасној фази (слика 7.118а). Из претходног разматрања следи да је еквивалентна капацитивност линеарно пропорционална са мереним нивоом течности $h$.

Уколико треба да се обезбеди мерење мерење нивоа проводних течности, унутрашња електрода је пресвучена слојем чврстог изолационог материјала (најчешће пластиком или тефлоном). Према слици 7.118б следи да је еквивалентна капацитивност:

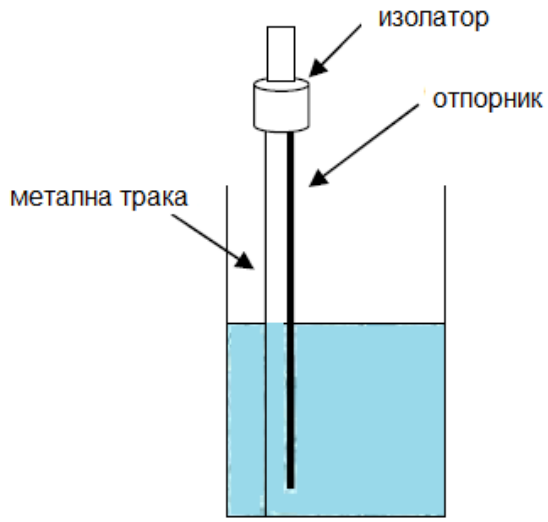
$$C_e = C_1 + \frac{C_2 C_2'}{C_2 + C_2'} + \frac{C_3 C_3'}{C_3 + C_3'} = k_3 + k_4 h \tag{7.95}$$

као и у случају мерења нивоа непроводних течности линеарно пропорционална са мереним нивоом течности $h$.

Тачност капацитивних сензора је од ±0.5% до 2.5%, опсег им је од (0 - 0.4) m до (0 - 20) m, могу да се примењују у радним медијумима на температури до 300 $^0$C и притиску до 10 kPa. Добре особине капацитивних сензора су: једноставност конструкције, што нема покретних делова и отпорност на корозију, док је лоша особина зависност тачности од промена које утичу на диелектричну константу материјала и појаву проводне облоге на сонди.

### 7.9.2.2 Отпорни сензори нивоа

Отпорни сензори нивоа раде на принципу промене отпорности проводника са променом његових димензија. Састоје се од затегнуте металне траке и отпорне жице (слика 7.120). Испод површине проводне течности или сипкастог материјала, трака и жица су у кратком споју.




Слика 7.120. Отпорни сензор нивоа

Отпор у петљи изнад површине, за отпорник специфичне отпорности $\rho$ и попречног пресека $A$ пропорционалан је мереном нивоу $h$:

$$R = \frac{\rho}{a}(H - h) \tag{7.96}$$

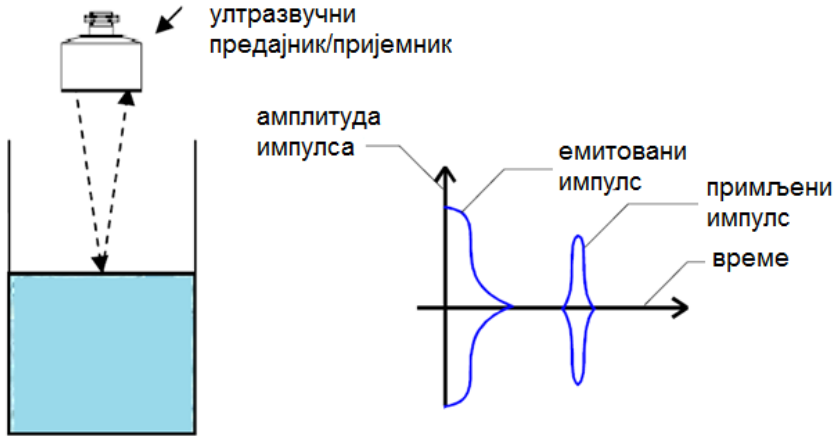
Отпорнички сензори примењују се за нивое до 60 m. Њихова тачност је ±(20 -100) mm. То су једноставни и релативно јефтини сензори. Најбољи резултати мерења се постижу у континуалном мерењу нивоа сувих грануластих материјала у силосима.

### 7.9.2.3 Ултразвучни сензори нивоа

Код ултразвучних сензора нивоа (слика 7.121а), време (T) одбијања импулса од разделне површине медија чији се ниво ($h$:) мери пропорционалан је растојању разделне површине од сензора (слика 7.121б):

$$T = \frac{2h}{v} \tag{7.97}$$

где је $v$ брзина ултразвучног таласа у мерном медијуму. Као извор ултразвука узима се кварцни или керамички пиезоелемент, који се побуђује електричним импулсима фреквенце око 30 kHz.




а) б)

Слика 7.121. Ултразвучни сензор нивоа:
а) монтажа ултразвучног предајника/пријемника б) принцип рада

Ултразвучни сензори нивоа имају типичан опсег мерења од 0.6 m до 70 m, тачност ±0.1% и могућност рада у опсегу температура -30 $^0$C до +75 $^0$C. Сензор треба да регистгрује ниво најмирнијег дела површине течности или ситнозрнастих материјала. За правилан рад ултразвучног сензора неопходна је да се при уградњи обезбеди правилно усмеравање ултразвучног снопа, као и да се елиминише утицај лажних рефлекса са бочних зидова резервоара..

# 7.10 МЕРЕЊЕ ВЛАЖНОСТИ

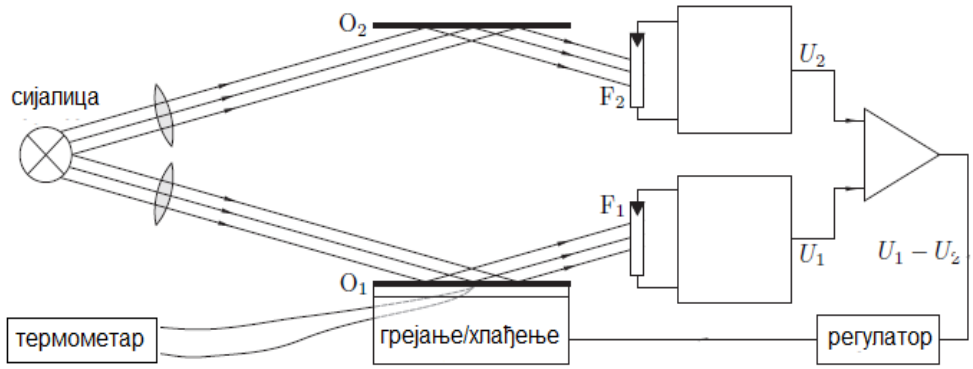
Влажност представља присуство воде у ваздуху. Велика количина водене паре може да утиче на производне процесе у индустрији. Присуство водене паре такође утиче на различите физичке, хемијске и биолошке процесе. Ваздух који није засићен паром прима влагу из околних објеката испаравањем изазивајући њихово сушење. Неки материјали имају такву особину да апсорбују влагу из ваздуха ·што може да доведе до промене њихових особина, односно квалитета.

Детекција влажности је веома важна, посебно у системима контроле индустријских процеса.На пример, у производњи електронских компоненти у интегрисаној технологији неопходна је веома сува атмосфера. И у многим другим областима, као·што су дрвна, прехрамбена и фармацеутска индустрија, мерење и регулација влажности су од великог значаја за процесе производње. У пољопривреди, мерење влажности је важно за заштиту плантажа (спречавање росе), праћење влажности земљишта итд.

Сензори влажности служе за индикацију нивоа влажности у окружењу. За описивање нивоа влажности користе се различити термини. Мерење влажности одређује количину водене паре присутне у гасу, било да се ради о смеши попут ваздуха, или о чистом гасу, попут азота или аргона. Свакој температури одговара максимална могућа количина паре коју ваздух може да садржи. При максималној влажности, за ваздух се каже да је засићен воденом паром. Количина водене паре у ваздуху на датој температури се назива апсолутном влажношћу. Однос апсолутне и максималне влажности је релативна влажност ваздуха.

## 7.10.1 МЕРЕЊЕ РЕЛАТИВНЕ ВЛАЖНОСТИ ВАЗДУХА ПОМОЋУ ТАЧКЕ РОСЕ

Тачка росе је температура $T_{\mathrm{R}}$ на којој апсолутна влажност на температури $T$ ($T > T_{\mathrm{R}}$) постаје максимална влажност. На површини предмета чија температура износи $T_{\mathrm{R}}$ влага се кондензује у виду слоја магле или капљица. Принцип рада једног аутоматског уређаја за мерење релативне влажности ваздуха помоћу тачке росе приказан је на слици 7.122.




Слика 7.122. Шема уређаја за мерење влажности ваздуха помоћу тачке росе

Светлост из сијалице се дели на два једнака крака, који се после одбијања од огледала $O_1$ и $O_2$ усмеравају на два једнака фотоелектрична детектора помоћу којих се добијају напони пропорционални интензитету светлости. Ова два напона се воде на диференцијални појачавач који даје сигнал сразмеран разлици интензитета светлости која долази на фотоћелије. Температура огледала $O_1$ подешава се помоћу уређаја за расхлађивање и грејање, а мери се малим сензором смештеним непосредно испод рефлектујуће површине. Када је температура огледала виша од тачке росе, напони фотоћелија су једнаки, па је напон на улазу регулатора једнак нули. Тада се активира расхлађивач који хлади површину огледала до тачке росе $T_{\mathrm{R}}$ и површина огледала $O_1$ се замагли, што доводи до смањења интензитета светлости на фотоћелији $F_1$. Регулатор тада даје сигнал који активира грејач, па температура огледала порсте изнад $T_{\mathrm{R}}$ . Слој влаге испари, па се напони фотоћелија изједначавају и опет почиње хлађење. На тај начин, температура огледала осцилује око тачке росе и очитава се помоћу термометра.

## 7.10.2 ЕЛЕКТРИЧНИ ПРЕТВАРАЧИ ВЛАЖНОСТИ

Принцип рада електричних претварача заснива се на чињеници да неки порозни материјали имају особину да одају или апсорбују влагу из ваздуха до успостављања равнотежног стања, при чему њихове карактеристике, као што су проводност или диелектрична константа, представљају функцију валжности. На овом принципу раде отпорни и капацитивни претварачи.

### 7.10.2.1 Капацитивни претварачи влажности

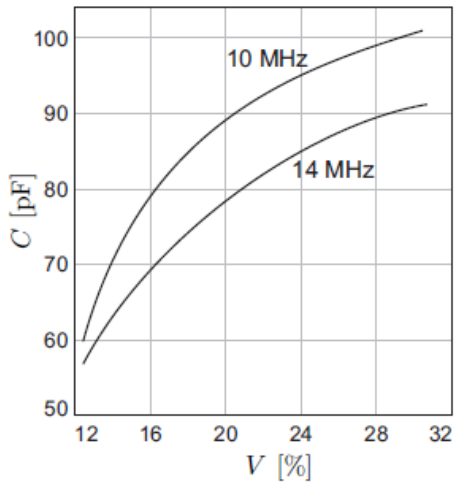
Капацитивним сензорима влажности детектује се промена капацитивности сензора, која зависи од влажности изолационог материјала између електрода. Могу да се користе за мерење влажности ваздуха, као и за мерење влажности чврстих и зрнастих материјала. На пример, код мерења влажности зрнастих материјала, диелектрик кондензатора су влажна зрна и ваздушни простор између њих. Радна фреквенца се бира тако да импеданса капацитивне компоненте буде доминантна, односно да отпорност материјала, која се такође мења са влагом има занемарујући утицај. Пример зависности капацитета ($C$) претварача од влажности ($V$) за различите учестаности побуде, као и примери сензора влаге приказани су на слици 7.123а и 7.123б.

### 7.10.2.2 Отпорни претварачи влажности

Принцип рада отпорних сензора влажности заснива се на одређивању проводности хигроскопног материјала између две паралелне електроде, на константном растојању (слика 7.124а). Електроде могу да буду коаксијалне, плочасте, за случај када се мери влага зрнастог материјала или зашиљене на крају у случају када се убадају у материјал који се испитује, као што је на пример бала вуне или памука (у том случају број електрода може да буде и већи од две).

Отпорност претварача са зрнастим материјалом опада са влажношћу према приближном изразу:

$$R(V) = Ae^{-kV} \tag{7.98}$$

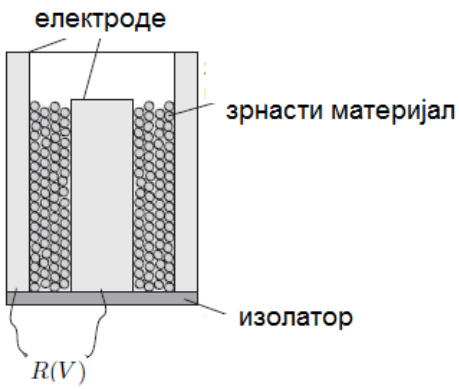


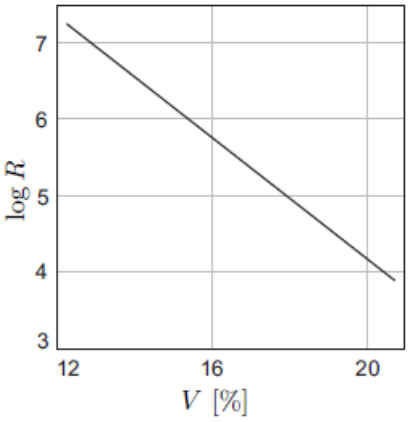



а) б)

Слика 7.122. Капацитивни сензори влажности:
а) зависност капацитета од влажности и б) примери сензора

где су $A$ и $k$ позитивне константе (слика 7.124б). По структури, отпорни мерачи влажности су омметри са наизменичним напајањем. Једносмерно напајање се ретко користи, јер може да дође до поларизације воде у матееријају чија се влажност мери. Осим отпорне $R(\mathrm{V})$, има и капацитивну компоненту. Да би се мерила само отпорна компонента проводници се повезују на мост напајан наизменичном струјом ниских учестаности, почев од мрежне, до неколико стотина херца. Отпорни претварачи се користе ређе од капацитивних.




а) б)

Слика 7.124. Отпорни претварач влажности:
а) начин примене и б) зависност опторности од влажности

# ЛИТЕРАТУРА


1. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and asotiated terms (VIM), 2007, 3.7, http://www1.bipm.org/en/publications/guide/vim.html*.
2. Mitrović, S. Končar-Đurđević, *Merni instrumenti i elementi regulacije*, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1978.
3. D. Stanković, *Fizičko-tehnička merenja*, Naučna knjiga, 1991.
4. B. G. Liptak: *Priocess measurement and analisys*, CRC Press, 2003.
5. A. S Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, Butterworth Press, 2001.
6. K. Lal Kishore, *Electronic measurement and instrumentation*, Pearson education, India, 2009.
7. *Basic instrumentation measuring devices and basic PID control*, CNSC Tech. Training Group, 2003.
8. *Instrumentation for process control*, Mc Master University, 2013. *http://www.pc-education.mcmaster.ca/Instrumentation/go_inst.htm*
9. A. D. Helfrick, W.D. Cooper, *Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques*, PHI, 5th Edition, 2002.
10. A. S. Morris, *Measurement and instrumentation principles*, Elsevier, 2001.
11. T. R. Kuphaldt, Lessons in industrial instrumentation, ver. 1.30, 2012. http://www.ibiblio.org/kuphaldt/socratic/sinst/book/liii_1v30.pdf
12. N. Zaimović - Uzunović, S. Lameš, D. Denjo i A. Softić, *Proizvodna mjerenja,* Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici, 2009.
13. R. B. Northrop, *Introduction to Instrumentation and Measurements*, Book News, Inc., 1999.
14. T. Pfeifer, *Production Metrology*, RWTH Aachen, 2002.
15. W. Nawrocki, *Measurement systems and sensors*, Artech House, 2005.
16. D. S.Nyce: *Linear position sensor - Theory and application*, Wiley-Interscience, New York, 2004.
17. T. Beckwith, R.D. Marangoni, *Mechanical Measurements*, Adison-Wesley, 2006.
18. B. Mitraković *Ispitivanje električnih mašina*, Naučna knjiga, Beograd 1991.
19. G. D. White, *Introduction to Machine Vibration*, DLI Eng. Corp., Bainbridge Island, WA, 1995.
20. Digital accelerometer *TB1010*, Silicon Design Inc (manual), *www.silicondesigns.com*
21. *Pressure and strain measurement handbook and encyclopedia,* Omega Eng., Inc, USA, 2002.
22. *www.baumer.com/us-en/products/process-instrumentation/pressure-measurement/*
23. P. R. Dale, R. Steven, *Pneumatic Instrumentation*, Delmar Publishers, Inc, Albany, NY, 1993.
24. П. Бошњаковић, *Умеће мерења*, Висока школа електротехнике и рачунарства струковних студија, Београд, 2011.
25. Thermocouple introduction and theory, *www.omega.com/temperature/z/pdf/z021-032.pdf*
26. RTD measurement and theory, *www.omega.com/ temperature/z/pdf/z033-035.pdf*
27. The thermistor, *www.omega.com/ temperature/z/pdf/z036-040.pdf*
28. H.L. Trietley, *Applying thermistors to process measurements and control*, Control Engineering, 1989, p. 175–179.
29. R.M. Stitt, D. Kuns, *Diode-based temperature measurement*, Burr-Brown Application Bulletin, *www.datasheetarchive.com*
30. *Could junction compensated K-thermocouple to digital converter*, Maxim Integrated Products, 2002
31. B. C. Baker, *Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits*, AN687, Microchip Tech. Inc, 2003.
32. *Complete Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopedia*, Omega Engineering,Inc, Stamford, USA,1986.
33. R. W. Miller, *Flow Measurement* Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, 1989.
34. M. Cvjetković, *Merenje protoka u vodovodnim sistemima*, Poslovno udruženje vodovoda i kanalizacije Jugoslavije, 2000.
35. F. Čorlukić: *Mjerenje protoka fluida*, ATM, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
36. Magnetic flowmeters, *http://www.omega.com/green/pdf/mag_flow_ref.pdf*
37. D. Prokin, M. Krtenić *Industrijski prototip termičkog merača protoka mase*, XLI ETRAN, 1997.
38. Variable area flowmeters, *http://www.omega.com/section/variable-area-flowmeters-rotameters.html*
39. Electronic mass flowmeters, *http://www.omega.com/green/pdf/mass_flow_ref.pdf*

40. Ultrasonic,Doppler flowmeters, *http://www.omega.com/green/pdf/ultrasonic_flow_ref.pdf*
41. Level measurement systems, *http://www.omega.com/green/pdf/level_sensor_ref.pdf*
42. *www.baumer.com/us-en/products/process-instrumentation/level-measurement/*

# 8.
# ВИШЕФУНКЦИЈСКИ ДИГИТАЛНИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ

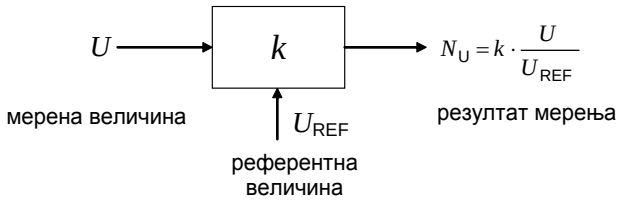
Развој инструмената намењених за мерење више различитих физичких величина (*multi-function instrument*) започео је (подстакнут развојем електронике) од мерила електричног напона - волтметара. Њихова основна функција је, на неки начин, елементарна: поређење улазног напона $U$ са сопственим референтним напоном $U_{\mathrm{REF}}$ као материјализованом мером[1] у односу на коју се вредност мерене величине одређује. Независно од начина на који се ово поређење остварује, статичка карактеристика савршеног волтметра има облик:

$$N_{\mathrm{U}} = k \cdot \frac{U}{U_{\mathrm{REF}}}, \tag{8.1}$$

где је $k$ бездимензиона величина, одређена вредношћу неких пасивних елемената у мерном колу, чија је вредност подешена тако да резултат мерења, број $N_{\mathrm{U}}$, представља вредност величине $U$ изражену изабраном јединицом мере[2]:

$$U = N_{\mathrm{U}} \cdot U_{\mathrm{u}}. \tag{8.2}$$

где је $U_{\mathrm{u}}$ јединична величина, која може да буде у опсегу од 1 nV до 1 kV.




Слика 8.1. Блок шема дигиталног волтметра

Активни електронски елементи (електронске цеви и транзистори) омогућиле су да се поређење напона оствари са великом тачношћу, као и да се мерење других електричних величина (електричне струје, отпорности, капацитивности, индуктивности ...) сведе на мерење напона. У спрези са одговарајућим сензорима, кондиционерима односно мерним претварачима, остварује се и мерење неелектричних величина. Аутоматском електронском обрадом резултата низа узастопних мерења (оствареном помоћу микропроцесора који је уграђен у сам инструмент) одређују се статистички

---

[1] Материјализована мера (*material measure*) репродукује или даје једну или више познатих вредности одређене физичке величине.

[2] Измерити физичку величину значи наћи њен однос према усвојеној јединици мере.

показатељи: највећа, најмања и просечна вредност, као и стандардно одступање (девијација).

Захваљујући микропроцесорима, бројачки уређаји су такође трансформисани у вишенаменске мерне инструменте (*universal counter-time*r). Основне функције које ова врста инструмената извршава су откривање настанка изабране класе догађаја (успостављања одређеног логичког стања, који представљају појаву односно нестанак импулса на једном или више улаза) и одређивање укупног броја догађаја током временског интервала чији почетак и крај означавају одабрани догађаји. На основу њих остварује се непосредно дигитално мерење трајања временског интервала односно вредности учестаности, а одговарајућом комбинацијом основних функција врши се мерење разлике фаза или односа (количника) периода односно учестаности два сигнала. Бројачки уређаји се користе и за посредно мерење као интегришућа мерила (*integrating measuring instruments*) чији је принцип рада заснован на сабирању елементарних прираштаја мерене величине (топлотне или електричне енергије, пређеног пута, запремине протеклог флуида или масе).

Универзалност у смислу броја мерних функција није обележје само мерних система намењених за примену у метролошким и испитним лабораторијама, него и мерила која се користе ван контролисаних лабораторијских услова, у индустрији и трговини. Једним уређајем мере се разнородне физичке величине, при чему је дигиталном обрадом омогућен приказ посредно мерених величина у одговарајућим мерним јединицама, као и аутоматска поправка резултата мерења због унапред познате систематске грешке сензора[3] или познатог деловања утицајних величина на вредност информационог параметра мерног сигнала[4]. Осим записа вредности одређене физичке величине, дигитални мерни инструменти који се примењују у сврхе обрачуна омогућују приказ новчаног износа, као и приказ укупне вредности (количине) измерене у одређеним условима (у одређеном периоду или у одређеном радном режиму)[5].

У овом поглављу систематизоване су и сажето приказане основне функције савремених мерних инструмената. Представљена је архитектура микропроцесорских мерних уређаја. Описане су основне и помоћне мерне функције, математичка обрада, чување података и комуникационе функције дигиталних инструмената

## 8.1 ФУНКЦИЈЕ ДИГИТАЛНИХ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА

Мерење је процес добијања информација, који се састоји од поређења мерених (непознатих) са референтним (познатим) величинама, извршавања

[3] На пример, мерних трансформатора (при мерењу електричне енергије), или волуметра (при мерењу топлотне енергије и запремине флуида).

[4] Узимајући у обзир стишљивост флуида, микрорачунарски коректори одређују вредност запремине која одговара стандардном или нормалном стању гаса на основу мерења протекле запремине, притиска и температуре гаса у стварним условима мерења.

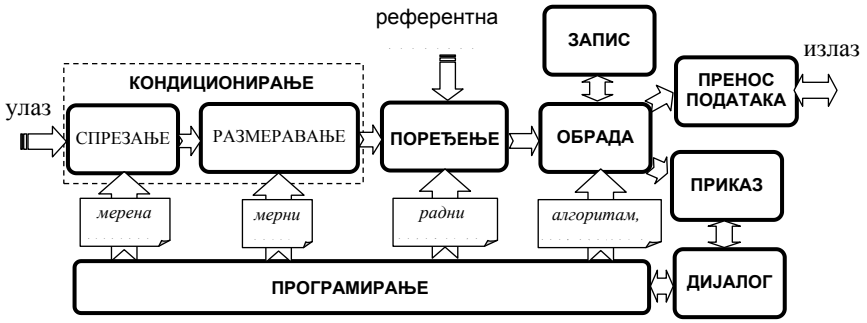
[5] На пример, електричне енергије испоручене у доба више односно ниже тарифе, или запремине горива издатог у току једне смене.

неопходних операција и представљања резултата у одговарајућем облику. У дигиталним вишенаменским мерним инструментима, осим одређивања вредности информационих параметра једног или више мерног сигнала, извршавају се разноврсни алгоритми којима се остварује математичка обрада мерних података са циљем смањивања утицаја случајних грешака путем вишеструких мерења, израчунавања вредности мерене величине на основу нелинеарних математичких модела сензора, изражавања резултата у логаритамским јединицама и слично. Заједничко обележје савремених мерних уређаја је самоподешавање мерног опсега, као и самоиспитивање са циљем провере функција (откривања и одређивања врсте квара). Радни параметри (мерни опсег, константа инструмента[6], трајање мерења) подешавају се преко командне плоче инструмента или даљински, посредством одговарајуће спреге.

Основне активности које се обављају у дигиталном мерном систему су:

- кондиционирање (прилагођење) мерене величине,
- поређење величина исте врсте,
- обрада мерних података,
- запис,
- приказ,
- пренос података,
- програмирање,
- дијалог са корисником.

Општи блок-дијаграм, на којем су приказане ове активности, као и везе између њих, дат је на слици 8.2.




Слика 8.2. Информациони процеси у дигиталном мерном инструменту

Кондиционирање омогућује спрезање мерног система са извором мерне информације, као и одговарајуће размеравање (скалирање), тако да се опсег вредности мерене величина преслика на оптимални мерни опсег оног дела уређаја којим се остварује поређење непознате и референтне величине. По правилу, кондиционирање сигнала који садрже информацију о стању неког система (процеса) подразумева и примену фреквенцијски-селективних кола. Њихов задатак је да “пропуштају” само сигнале у одређеном фреквенцијском опсегу, а “слабе” (пригушују) сигнале свих других учестаности. Када извор

[6] Број којим се множи директно показивање инструмента да би се добила вредност мерене величине у одговарајућим јединицама.

мерне информације представљају пасивни сензори, одговарајући кондиционер мора да обезбеди и помоћни извор енергије помоћу којег се остварује побуда (екситација) сензора. Дакле, подсистем за кондиционирање представља улазни део мерног система, а захтеви које он треба да испуни су:

- што мањи утицај на систем (процес) чије се стање посматра,
- заштита од нежељених дејстава испитиваног система на мерило,
- што тачније представљање информације у облику погодном за остваривање мерења.

Основну активност дигиталног мерног система представља мерење у ужем смислу: поређење (*comparison*) мерене величине, чија вредност није позната, са референтном величином исте врсте, чија је вредност позната. Референтна величина је материјализована мера, остварена у самом инструменту или са којом је инструмент повезан. Као резултат овог поређења добија се нумеричка вредност (број) који представља податак о односу вредности ових величина. Основни захтеви за остваривање операције поређења су прецизност, тачност, брзина којом се остварује, као и стабилност, односно поновљивост резултата мерења.

Обрада мерних података (*data processing*) подразумева извршавање математичких и логичких операција у складу са дефинисаним (изабраним) моделом мерења. Захтеви који се у том погледу постављају пред процесорску јединицу инструмента односе се на брзину и тачност са којом се извршавају одређени алгоритми. Додатни захтев се односи на универзалност, која омогућује да се програм обраде резултата мерења може прилагодити специфичним захтевима разноврсних корисника.

Могућност меморисања низа података, односно програма обраде, представља карактеристично обележје дигиталне технике. Запис (*recording*) резултата мерења може бити остварен аутоматски, у складу са претходно изабраним (унетим) програмом реализације мерног експеримента, или на основу добијене команде, која се издаје ручно (притиском на тастер) односно преко посебног улаза инструмента. Запис може бити остварен и на преносивом меморијском медијуму (оптички диск, *FLASH*). Меморијски капацитет, брзина приступа, поузданост записа и преносивост су основни захтеви који се у том погледу постављају, сходно потребама које проистичу из задатка мерења.

Показивање резултата мерења подразумева представљање информације у облику погодном за приказ (*display*) кориснику, односно прослеђивање другом уређају. Основни захтеви који се постављају односе се на резолуцију, тачност и заштиту од нежељених дејстава.

Пренос информација у дигиталном облику (*data transmission*) омогућује прослеђивање резултата мерења са циљем њиховог складиштења, штампања или даље обраде. Подаци се преносе у бит-серијском или бајт-серијском/бит-паралелном облику. Комуникација се остварује посредством одговарајућег интерфејса (*RS232, USB, GPIB*). Када мерила представљају периферије географски дистрибуираних мерних система, основни захтеви

који се у том погледу постављају су: брзина, поузданост, и расположивост. Интерфејс за спрегу треба да буде у складу са неким од коришћених међународно прихваћених стандарда.

Интерна меморија омогућује да се жељени програм (низ командних кодова и бројевних података који дефинишу конфигурацију инструмента и секвенце мерног процеса) унесе, преко командне плоче инструмента, или посредством даљинске комуникације, у меморију инструмента и касније аутоматски извршава, аутономно или на основу само једне наредбе послате од стране уређаја који контролише рад система. Притом постоји могућност програмирања посредством рачунара опште намене (*PC*), применом стандардних програмских језика.

Дијалог корисника (оператера) са мерним системом (*human-machine interface, HMI*) остварује се помоћу командне плоче инструмента. Програмирање флексибилних вишенаменских уређаја захтева познавање одговарајућег језика који је често врло специфичан и разликује се од инструмента до инструмента, чак и када је реч о уређајима истог произвођача. Да би се унеколико олакшао овај проблем, користи се интерактивни поступак програмирања при којем инструмент, кроз дијалог који се остварује преко показног уређаја, "помаже" кориснику.

У начелу, функције које дигитални мерни инструменти обављају могу да се групишу у четири категорије:

- основне функције;
- помоћне (мерне) функције,
- рачунарске функције,
- комуникационе функције.

Основне функције су мерне функције у ужем смислу које дефинишу намену инструмента. Њима се остварује мерење одређене физичке величине (електричног напона, струје, времена, учестаности, температуре итд).

Помоћне мерне функције одређују неке параметре мерног процеса у складу са конкретним условима мерења (мерни опсег, трајање мерења, начин његовог иницирања...).

Рачунарске функције обухватају нумеричку обраду резултата мерења, као и рад са подацима са циљем њиховог складиштења, припреме за пренос или приказ. На пример, као коначни резултат мерења, број $N$, може да буде приказана вредност која се добија линеарном трансформацијом вредности $N(x)$, добијене мерењем величине $x$, према изразу:

$$N = \frac{N(x) - N_0}{N_1} \cdot N \,, \tag{8.3}$$

где су $N_0$, $N_1$ и $N_2$ бројевне вредности, задате од стране корисника, уписане у одговарајуће меморијске регистре инструмента.

Комуникационе функције омогућују размену података са другим уређајима, као и дијалог са корисником. Радни параметри (мерни опсег, константа инструмента, трајање мерења) подешавају се преко командне плоче инструмента или даљински, посредством одговарајуће спреге.

> Комуникација у најширем смислу представља преношење порука између људи, уређаја или једних и других. Поруку представља или низ дискретних елемената, симбола одабраних из коначног скупа различитих симбола (алфабет), или нека функција одређених аргумената. Несумњиво је да је у питању врло значајан процес, који се проучава не само са техничког (како и са којом тачношћу се могу бити пренети симболи од којих је порука сачињена), него и семантичког (колико прецизно пренесени симболи носе жељено значење или смисао поруке), као и делотворног аспекта (са каквим успехом пренесена порука кроз своје значење усмерава на неку жељену активност онога коме је била намењена). У начелу, комуникација подразумева одређена додатна средства, интерфејс посредством којег се пренос мерних информација омогућује, олакшава или поуспешује.

## 8.2 АРХИТЕКТУРА МИКРОПРОЦЕСОРСКИХ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА

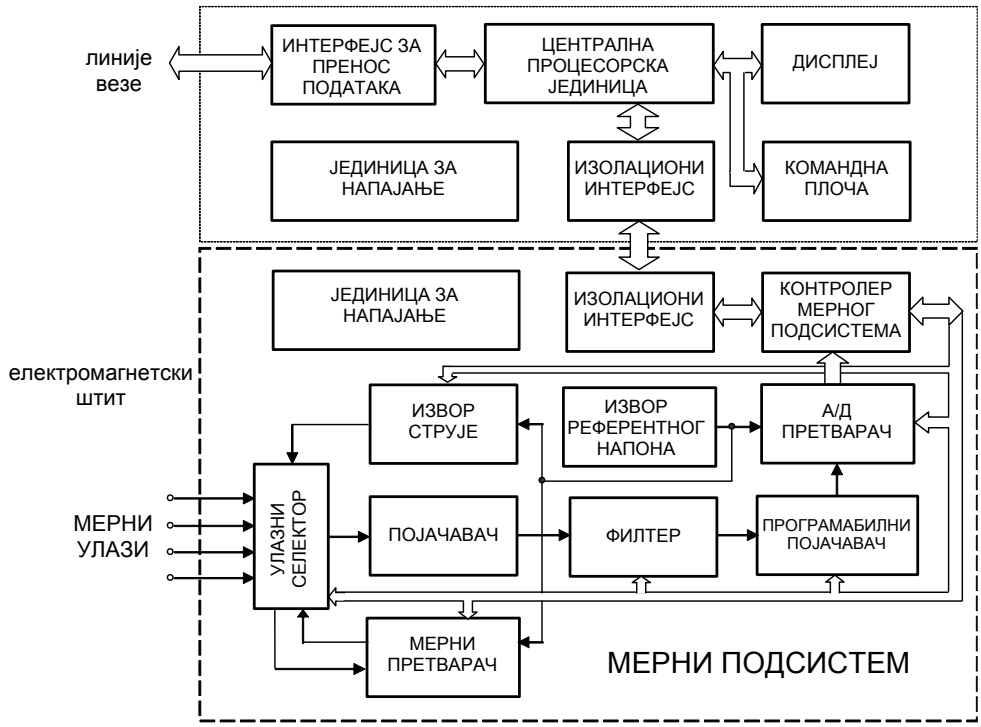
Комплексна, микропроцесорски заснована управљачка јединица дигиталних инструмената омогућује реконфигурисање мерног система са циљем образовања структуре, коју захтева одређени принцип мерења изабране величине, и остваривање помоћних операција којима се постижу побољшана функционалност, као и боље мерне карактеристике. Специфичност микропроцесорских мерних уређаја огледа се управо у "потчињености" њиховог хардвера својству програмабилности. Функција коју инструмент остварује одређена је не толико његовом структуром, колико низом наредби које се очитавају из програмске меморије. Начин на који су елементи мерног рачунарског система логички организовани дефинише његову архитектуру[7] којом су одређени поступак обраћања елементима структуре, облик представљања и формати[8] података, као и операције које поједини елементи извршавају.

Дигитални мерни систем се састоји из две основне целине које су у инструментима високе тачности међусобно галвански раздвојене (изоловане) (слика 8.3). Мерни подсистем је физички издвојен заштитним оклопом (*guard*) са циљем стабилизације температуре, или заштићен екраном (*shield*) са циљем смањивања нивоа електромагнетске интерференције која може да утиче на резултат мерења. Садржи само онај део управљачке логике који је непосредно повезан са остваривањем мерних функција. На пример, посебан процесор, који се одликује малом потрошњом, служи као контролер који непосредно управља мерним колима, док се веза између мерног и

[7] Под архитектуром се у рачунарској техници подразумева апстрактно представљање рачунских машина помоћу функционалних блокова, програмских језика и структуре података. Архитектура одражава логичку структуру уређаја, његове функционалне карактеристике и међусобан однос хардверских и софтверских компонети система.

[8] Под називом "форматирање података" (*data formating*) у рачунарској обради података подразумева се организација информација у складу са предефинисаним спецификацијама. У том смислу, формат представља скуп правила, којима је уређена структура података у пакету, који дефинише величину и садржај различитих поља која чине пакет.

централног рачунарског дела остварује преко другог процесора, специјалне изведбе, и оптичке спреге.



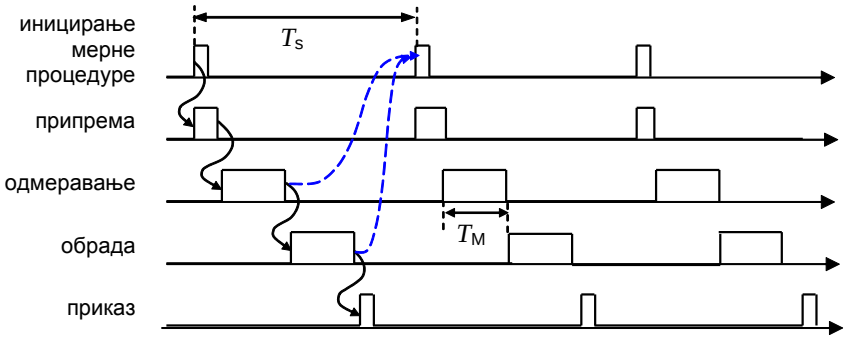

Слика 8.3. Блок шема вишефункцијског мерног инструмента

Другу целину представља подсистем који управља радом појединих функционалних блокова инструмента, извршавајући алгоритам којим се остварују изабране функције (односно иницира њихово обављање, када се оне извршавају у посебним деловима система), обрађује резултате мерења, форматира их и приказује или преноси другом уређају. Он обухвата централну процесорску јединицу (*central processing unit*, *CPU*) и функционалне делове преко којих се остварују комуникационе функције. Командна плоча и показни уређај (дисплеј) омогућују спрегу са корисником, а комуникациони интерфејс размену података са другим уређајима. Програмабилни параметри алгоритма задају се локално, преко командне плоче или даљински, одговарајућим порукама које се шаљу преко надређеног рачунара. У целини посматрано, вишефункцијски мерни уређај представља сложену, али и компактну целину која омогућује не само представљање нумеричких резултата са различитом резолуцијом и ознаком мерне јединице, него и кодираних и/или текстуалних порука којим се остварује дијалог са корисником.

Повезивање са другим уређајима са циљем размене података остварује се преко посебног подпроцесора (који може бити и саставу микрорачунара централне процесорске јединице) и одговарајућих елемената

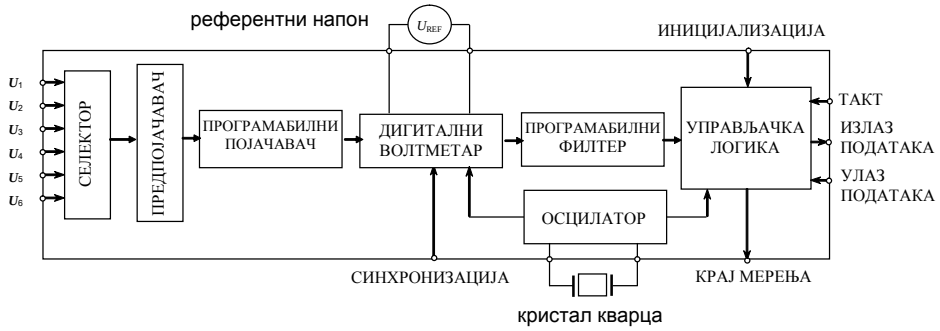
за спрегу са линијама за пренос који омогућују размену података у складу са стандардизованим правилима комуникације.

Редослед обављања активности које се извршавају у дигиталном мерном инструменту може да се представи уопштеним временским дијаграмом приказаним на слици 8.4. У начелу, једноставнија обрада и припрема података за издавање (приказ) могу да се обаве током одмеравања следеће вредности, чиме се добија на брзини очитавања.




Слика 8.4. Дијаграм активности дигиталног мерног инструмента

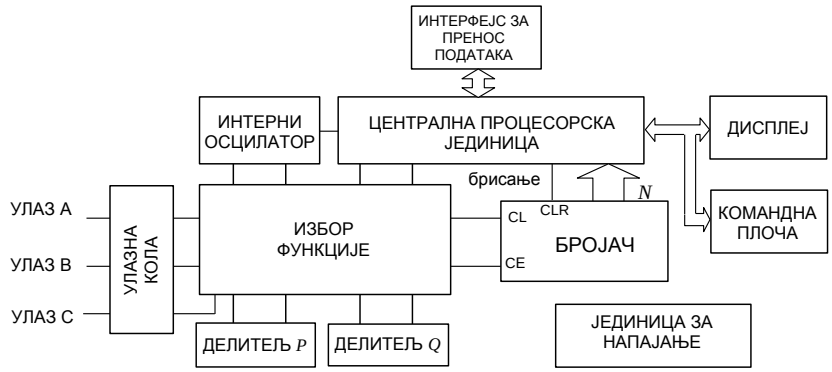
Специјализовани микрорачунарски системи омогућују примену сложених алгоритама за обраду сигнала, који се не могу економично остварити помоћу средстава аналогне технике. Целокупно мерно језгро, које поред дигиталног волтметра садржи и улазни селектор, програмабилни филтер и програмабилни појачавач, може да буде смештено у једно интегрисано коло (слика 8.5). Пренос података преко синхроне серијске везе омогућује једноставно повезивање мерног подсистема са централном јединицом посредством оптоелектронске спреге.




Слика 8.5. Интегрисани мерни подсистем

Бројачки уређаји имају у основи сличну структуру (слика 8.6). Учестаност (период) осциловања интерног осцилатора дефинише основну јединицу мере времена односно учестаности. Улазна кола остварују уобличавање улазних сигнала. Помоћу одговарајуће логичке мреже остварује

се улога улазног селектора и програмабилног делитеља као "предпојачавача". Бројач остварује улогу А/Д претварача.

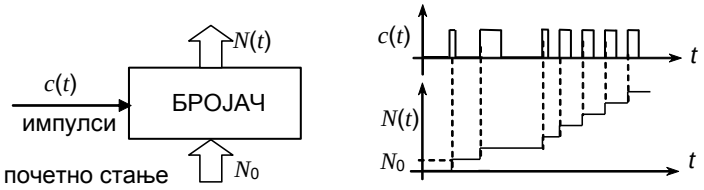



Слика 8.6. Универзални бројачки систем

# 8.3 ОСНОВНЕ МЕРНЕ ФУНКЦИЈЕ ДИГИТАЛНИХ ИНСТРУМЕНАТА

## 8.3.1 БРОЈАЊЕ

У најопштијем смислу, бројач је регистар[9] чији се садржај, који представља број $N$ (слика 8.7), мења, тако што се повећава[10] или смањује[11], за јединичну вредност, детекцијом догађаја који представља одређена промена вредности бинарне променљиве на улазу бројача (прелазак из логичког стања "0" у логичко стање "1", или обрнуто).




Слика 8.7. Бројање импулса

Ако се одбројавање увек врши у истом смеру, промена садржаја бројача, броја $N$, од почетног тренутка $t_0$ до тренутка посматрања $t$, једнака је броју догађаја $\Delta N$ насталих у временском интервалу ($t_0$, $t$):

$$\Delta N[t_0, t] = \left| N(t) - N(t_0) \right| , \tag{8.4}$$

[9] Регистар, у најоштијем смислу, представља скуп који садржи $n$ меморијских елемената чија су стања описана логичким променљивим $Q_0$ до $Q_{n-1}$ (назив потиче од лат. *registrum,* уређен списак, попис, преглед). Низ од $Q_{n-1}Q_{n-2}\ldots\ Q_1\ Q_0$ чини јединствену информациону целину (садржај регистра) који може да се посматра као $n$-битни бинарни број $N$.

[10] Бројање унапред (*count up*).

[11] Бројање уназад (*count down*).

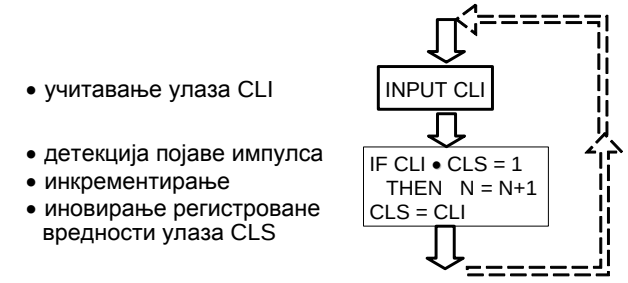
где је $N(t_0)$ садржај бројача у почетном тренутку $t_0$, а $N(t)$ његов садржај у тренутку $t$.

Бројањем се мере интегралне величине (као што су пређени пут, маса, запремина протеклог флуида, енергија), када се интеграција може заменити збиром елементарних количина:

$$M[t_0, t] = C_{\text{I}}\, \Delta N[t_0, t], \tag{8.5}$$

где је $C_{\text{I}}$ константа импулса. Она представља прираштај мерене величине $M$, у одговарајућим јединицама, који одговара једном импулсу мерене величине (на пример: 0.5 Wh/имп.).

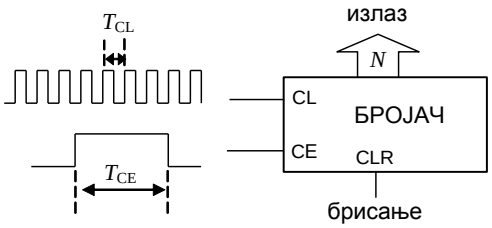
У начелу, бројање у мерном уређају може бити остварено хардверски (електромеханички или електронски бројач импулса) или програмски (софтверски бројач). Принципски дијаграм тока софтверског бројача приказан је на слици 8.8.




Слика 8.8. Софтверско бројање импулса

## 8.3.2 МЕРЕЊЕ ВРЕМЕНА И УЧЕСТАНОСТИ

Дигитално мерење времена и учестаности заснива се на структури мерног система у чијој основи се налази бројач који омогућује одбројавање импулса доведених на бројачки улаз (*clock, CL*) када је логичка вредност сигнала доведеног на управљачки улаз (*count enable, CE*) једнака јединици (слика 8.9).




Слика 8.9. Принцип дигиталног мерења времена и учестаности

Ако је пре почетка мерења бројач доведен у почетно стање ($N = 0$), његов садржај по истеку временског интервала $T_{\text{CE}}$, у току којег се врши одбројавање импулса доведених на бројачки улаз *CL*, једнак је:

$$N = \frac{T_{\mathrm{CE}}}{T_{\mathrm{CL}}}, \tag{8.6}$$

где је $T_{\mathrm{CL}}$ период појављивања импулса који се одбројавају.

Дигитално мерење трајања временског интервала остварује се бројањем импулса референтне учестаности $f_{\mathrm{REF}}$ ($T_{\mathrm{CL}} = 1/f_{\mathrm{REF}}$) током мереног временског интервала $T$ ($T_{\mathrm{CE}} = T$):

$$N = \frac{T}{T_{\mathrm{REF}}} = f_{\mathrm{REF}} T . \tag{8.7}$$

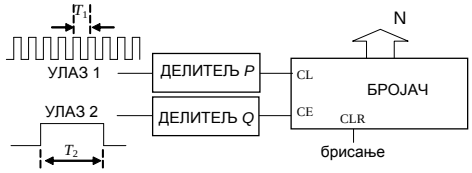
Дигитално мерење учестаности остварује се бројањем импулса периодичног сигнала чија се учестаност $f$ мери, доведеног на бројачки улаз *CL* ($T_{\mathrm{CL}} = 1/f$), током референтног временског интервала познатог трајања $T_{\mathrm{L}} = T_{\mathrm{REF}}$:

$$N = \frac{T_{\mathrm{REF}}}{T} = T_{\mathrm{REF}} f . \tag{8.8}$$

У општем случају, када се учестаност мерног сигнала мења, резултат мерења сразмеран је средњој вредности учестаности $f$ током временског интервала $T_{\mathrm{REF}}$:

$$N = \int_{t_0}^{t_0+T_{REF}} f(t)dt = T_{REF}\ \overline{f(t)} \tag{8.9}$$

Исти мерни систем омогућује мерење односа учестаности или односа периода два улазна сигнала. То се остварује бројањем импулса једног од улазних сигнала током временског интервала који представља умножак периода другог улазног сигнала. У општем случају, оба улазна сигнала могу да буду пропуштена кроз делитељ учестаности (*frequency devider*). Принцип мерења је приказан на слици 8.10.




Слика 8.10. Мерење односа учестаности

Резултат мерења одређен је изразом[12]:

$$N = \frac{T_{\mathrm{CE}}}{T_{\mathrm{CL}}} = \frac{Q}{P}\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q}{P}\frac{f_1}{f_2} . \tag{8.10}$$

[12] Бројач са "*CL*" и "*CE*" улазима је делитељ две величине дефинисане у временском домену.

## 8.3.3 МЕРЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ НАПОНА

Основни део дигиталног мултиметра је претварач којим се остварује промена облика представљања информације, садржане у напонском сигналу, из аналогног у дигитални. Независно од начина на који се ово поређење врши, статичка карактеристика савршеног волтметра може се, када се занемари грешка квантовања[13], представити изразом:

$$N = k \cdot \frac{U}{U_{\mathrm{REF}}}, \tag{8.11}$$

где је $k$ бездимензиона величина[14], одређена параметрима мерног кола, чија је вредност подешена тако да резултат мерења, број $N$, представља вредност величине $U$ изражену изабраном јединицом мере $U_{\mathrm{u}}$:

$$U = N \cdot U_{\mathrm{u}}. \tag{8.12}$$

Са становишта примене у вишенаменским мерним уређајима највећи значај имају интеграциони поступци[15] код којих је резултат квантовања одређен интегралом улазног напона током предефинисаног мерног интервала $T_{\mathrm{M}}$:

$$N = k \frac{\int_{t_0}^{t_0+T_{\mathrm{M}}} u(t)dt}{U_{\mathrm{REF}}}, \tag{8.13}$$

односно:

$$N = k \frac{T_{\mathrm{M}}}{U_{\mathrm{REF}}} \overline{u(t)}. \tag{8.14}$$

Независно од начина на који се процес аналогно/дигиталног претварања остварује, статичка карактеристика преноса савршеног линеарног дигиталног волтметра, може да се представи формулом:

$$N = \left[ \frac{U}{U_{\mathrm{n}}} \cdot N_{\mathrm{n}} + \frac{1}{2} \right], \tag{8.15}$$

$N$ је цео број[16], резултат мерења изражен у мерним јединицама $U_{\mathrm{u}}$:

$$U_{\mathrm{u}} = \frac{U_{\mathrm{n}}}{N_{\mathrm{n}}}, \tag{8.16}$$

$U_{\mathrm{n}}$ је вредност еквивалентног референтног напона, са којим се напон $U$ пореди, једнака називној вредности мерног опсега, а $N_{\mathrm{n}}$ је цео број који одговара приказу називног напона $U_{\mathrm{n}}$ (слика 8.11).

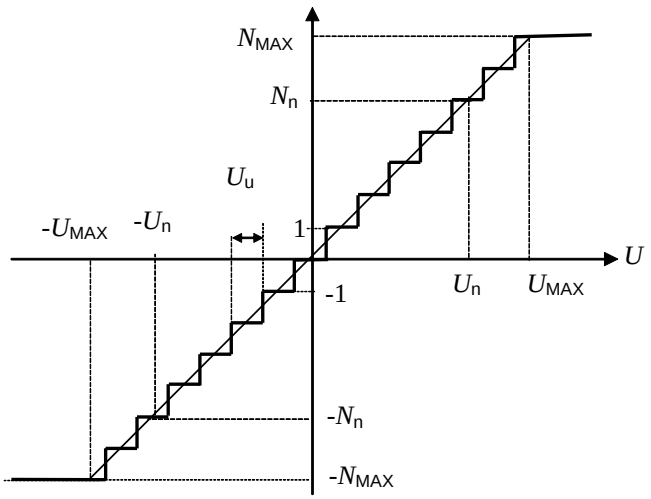
---

13 Грешка која неизбежно настаје при замени аналогне величине дигиталном.
14 Константа $k$ зависи од односа величина исте физичке природе.
15 Поступци квантовања напона обрађени су у књизи “Умеће мерења”.
16 Број $N$ може да буде позитиван, негативан или једнак нули.

Типично, напон $U_n$ је једнак $10^r$, где је $r$ цео позитиван или негативан број који одговара мерном опсегу, а $N_n$ је цео позитиван број облика $10^d$, где је $d$ цео позитиван број који одговара резолуцији приказа резултата. На пример, $r$ = 0, што одговара опсегу од 1 V, а $d$ = 5, што одговара приказу са пет декадних цифара. Резолуција приказа је 10 μV. Уколико је мерни опсег симетричан око нуле, еквивалентни број квантних нивоа $J$ једнак је:

$$J = 2N_{max} + 1, \tag{8.17}$$

где је $N_{max}$ највећа вредност броја $N$.




Слика 8.11. Статичка карактеристика дигиталног волтметра

У начелу, најбоља тачност остварује се при мерењу једносмерног напона у опсегу 1 V или 10 V. Произвођачи инструмената високих перформанси гарантују мерну несигурност мању од милионитог дела називне вредности мерног опсега, у периоду од 24 h након калибрације, а при референтним условима у погледу температуре околине (23 °C ± 1 °C). Температурски сачинилац код таквих инструмената је обично мањи од 2 ppm/°C, а дуговремена нестабилност мања од 8 ppm/год.

У начелу, улога референтне величине $U/N$ претварача, $U_{REF}$, може да се додели неком другом улазном сигналу, тако да се применом истог мерног система врши непосредно одређивање односа напона $U$ и $U_{REF}$. Овакав поступак назива се "логометарско" мерење[17]. Као резултат мерења приказује се број $N$ који представља количник вредности ова два напона.

[17] Назив потиче од грчке речи (*lógos*) која, између осталог, означава и "однос". У употреби је и назив који потиче из латинског, "квоцијентно" мерење (*quotiens*, колико пута) [14]. Квоцијент је број који показује колико се пута један број садржи у другом броју. У литератури на енглеском језику користи се и назив "рациометарско мерење" (енг. *ratio*, однос, размера, количник)

# 8.4 ПОМОЋНЕ (МЕРНЕ) ФУНКЦИЈЕ

Строго посматрано, помоћне мерне функције представљају део јединственог процеса мерења који утиче на својства мерила односно тачност резултата. Ипак, ради прегледности, разматране су посебно.

## 8.4.1 МЕРНИ ОПСЕГ

Савремени мерни инструменти се, по правилу, одликују веома широким опсегом вредности мерене величине. Поједини мултиметри, на пример, омогућују мерење једносмерних напона са резолуцијом милионитог дела називне вредности и то у седам опсега, што представља "динамику мерења" од $10^{11}$ (10 nV према 1000 V). Још шири опсег се постиже при мерењу електричне отпорности и временских интервала. Универзални бројачки инструменти омогућују очитавање резултата са 12 цифара, мерење кратких временских интервала са резолуцијом бољом од једне наносекунде, као и одмеравање ширине импулса до $10^5$ s. Заправо, једино технолошко ограничење горње границе опсега мерења временских интервала је време безотказног рада инструмента.

Аутоматско прилагођивање мерног опсега (*auto-range*) је уобичајена опција дигиталних инструмената која значајно поједностављује руковање инструментом. С обзиром да захтева додатно време за одређивање и задавање мерног опсега, омогућено је да се функција искључи, када се жели да постигне већа брзина мерења.

## 8.4.2 ИНИЦИРАЊЕ МЕРЕЊА

Извршавање задате мерне функције започиње након догађаја који представља успостављање одређеног стања. Најчешће се користе три основна начина за иницирање мерења (*triggering mode*):

- аутоматски, периодично, у изабраним временским размацима (интерно);
- спољашним електричним сигналом доведеним на посебан улаз инструмента (екстерно);
- притиском на тастер на командној плочи инструмента (ручно);

Период аутоматског понављања мерног поступка, $T_S$, може да се задаје у широким границама (на пример, у опсегу од 0 до 999.999 s, у корацима од 1 ms).

У односу на сигнал којим се врши иницирање мерне процедуре, почетак мерења може да буде померен (закашњен) за изабрани временски интервал у предефинисаном опсегу (нпр. од 1 ms до 1000 ms). Тачност одмеравања интервала кашњења је око 1%.

Даљинским путем (одговарајућом наредбом) може се дозволити (односно забранити) прихватање сигнала за окидање (*trigger*) одређене врсте.

Неки инструменти омогућују задавање броја мерења која се извршавају након појаве сваког сигнала за окидање (*number of ridings per trigger*).

## 8.4.3 ТРАЈАЊЕ МЕРЕЊА

Трајање временског интервала $T_{\text{М}}$, у току којег се (кроз процес интеграције) остварује одмеравање улазне величине (слика 8.4), непосредно утиче на брзину одзива мерног инструмента (*riding rate*). Скраћивањем времена $T_{\text{М}}$, са циљем повећања брзине којом се приказују (очитавају) резултати узастопних мерења, повећава се утицај сопственог шума инструмента и шума који ствара енергетска мрежа, а тиме смањује тачност. У начелу, већа статичка тачност (што подразумева и најбољу осетљивост мерења) захтева и више времена. Због тога лабораторијски мерни инструменти високе тачности пружају могућност да се, сходно потребама и условима при којим се врши мерење, вредност $T_{\text{М}}$ задаје у широким границама (најчешће изабором из скупа који садржи неколико предефинисаних вредности). При прецизним мерењима, код којих је неопходна велика резолуција приказа резултата, трајање мерног интервала продужава се и преко десет секунди.

Остваривање дуговремене интеграције (са циљем одређивања средње вредности) скопчано је са бројним ограничењима у аналогној техници, па се жељени ефект постиже усредњавањем резултата одређеног броја узастопних мерења. При резолуцији која одговара приказу са осам цифара декадног система бројева, на пример, очитавање резултата се врши приближно једном у минуту. Исти иструмент, при резолуцији која одговара приказу са четири цифре постиже брзину од више хиљада мерења у секунди.

При веома прецизним мерењима напона, односно величина чије се мерење своди на мерење напона, мерни интервал $T_{\text{М}}$ (у току којег се врши интеграција улазне величине) представља умножак периоде $T$ наизменичног напона енергетске мреже из које се мерни инструмент напаја (*power line cycle*):

$$T_{\text{М}} = N_{\text{М}} \cdot T \ . \tag{8.18}$$

На овај начин се постиже слабљење утицаја најзначајнијег извора сметњи при мерењу у уобичајеним радним условима. Број $N_{\text{М}}$ (*number of power line cycles*) се бира у складу са захтевима у погледу потребне тачности и брзине мерења.

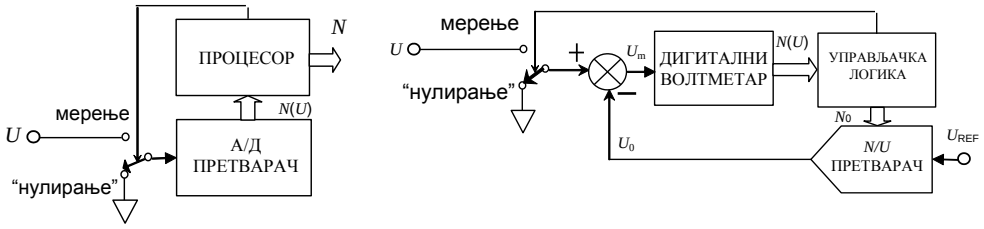
## 8.4.4 САМОПОДЕШАВАЊЕ

Поништавање деловања еквивалентног напона помераја нуле улазних кола мерног система остварује се аутоматски (*auto zero*), поправком резултата мерења за вредност која одговара мерењу при кратком споју са масом (референтним потенцијалом) на улазу појачавача. Поправка може да се оствари дигитално, корекцијом резултата мерења одузимањем (слика 8.12.а):

$$N = N(U) - N(0)\,, \tag{8.19}$$

или аналогно, поларизацијом улаза (слика 8.12.б). Одређивање корекционе вредности пре сваког мерења смањује брзину очитавања, па често представља опцију која се по жељи може да укључи, уколико је то погодно, са циљем повећања тачности мерења.

Поједини мултиметри омогућују аутоматско извршавање процедура калибрације које не захтевају спољне изворе референтних величина (*autocalibration*). На тај начин се остварује провера исправности и постиже побољшање тачности додатних мерних функција, као што су мерење наизменичних величина и мерење отпорности. Осим тога, скраћује се време потребно за калибрацију инструмента спољним уређајима.




а) б)

Слика 8.12. Самоподешавање нуле дигиталног волтметра

## 8.4.5 ВИШЕКАНАЛНО МЕРЕЊЕ

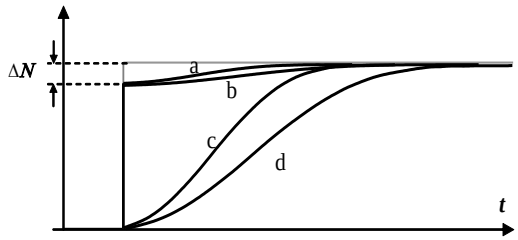
Усаглашавање структуре улазног кола мерног подсистема вишефункцијског мерног инструмента у складу за изабраном мерном функцијом остварује се помоћу електромеханичког (релејног) или електронског селектора (*electronic switch*). Прилагођавање инструмента тако да може да оствари мерење електричног напона, струје или отпорности врши се бирањем одговарајућег мерног канала. Електронски селектор омогућује да инструмент са једним аналогно-дигиталним претварачем, аутоматски, редом обрађује неколико мерних сигнала.

## 8.4.6 ФИЛТРИРАЊЕ

Са циљем смањивања утицаја високофреквентних компоненти спектра улазног сигнала на резултат мерења (када оне потичу од електромагнетских сметњи), мерни сигнал се пропушта кроз нископропусни филтер. Уобичајена је примена активних аналогних филтара којима се постиже слабљење веће од хиљаду пута на учестаности од 50 Hz. Тиме се, међутим, смањује брзина одзива мерног инструмента, па се даље смањење утицаја шума постиже дигиталним усредњавањем резултата низа узастопних мерења применом уграђених статистичких функција.

Дигитално филтрирање пружа више погодности при усклађивању динамичких карактеристика мерног инструмента и својстава мерног сигнала.

Микропроцесор аутоматски искључује филтер када се улазни напон нагло знатно мења, да би се омогућило брзо обнављање приказа. Споре (мале) промене измерене вредности се пригушују (*damping*) а велике прихватају[18], при чему постоји и могућност подешавања константе дигиталног филтра којим се ограничава фреквенцијски опсег инструмента. Комбинацином пропусног опсега филтра и начина рада могуће је прилагођавање одзива инструмента у циљу остваривања компромиса између опречних захтева у погледу брзине одзива и неосетљивости на сметње. Код инструмента, чија је карактеристика одзива на скоковиту промену улаза дата на слици 8.13, корисник има могућност да задавањем два параметра изабере један од четири приказана облика одзива.




| крива | пригушење | филтер |
|---|---|---|
| a | 0 | 0 |
| b | 0 | 1 |
| c | 1 | 0 |
| d | 1 | 1 |

Слика 8.13. Одзив инструмента са са комбинованим, аналогним и дигиталним филтрирањем

## 8.5 МАТЕМАТИЧКА ОБРАДА

Присуство процесорске јединице у структури мерног уређаја омогућује да се разноврсна рачунска обрада, која је некада представљала, често мукотрпну, обавезу експериментатора, обавља потпуно аутоматски. Комбинацијом појединих математичких операција, на пример, постиже се приказ бројне вредност мерене температуре у изабраним јединицама (Целзијусове или Фаренхајтове скале). Поједини инструменти омогућују извршавање преко двадесет програма обраде мерних резултата. Иако математичка обрада представља уобичајено обележје микропроцесорских уређаја, скуп расположивих функција које се аутоматски извршавају у дигиталним мерним инструментима разликује се од уређаја до уређаја. Временски интервал потребан за извршавање појединих математичких обрада зависи од карактеристика процесора и сложености израчунавања, а може да траје од десетак милисекунди до неколико десетих делова секунде.

### 8.5.1 ОДСТУПАЊЕ

Број $N$ који се приказује као коначни резултат мерења, представља одступање (*offset*) вредности добијене мерењем величине $x$, $N(x)$, од унапред задате (меморисане) вредности $N_0$:

[18] Микропроцесор аутоматски искључује филтер када се улазни напон знатно мења да би се омогућило брзо иновирање приказа.

$$N = N(x) - N_0\,, \tag{8.20}$$

или разлику текуће измерене вредности у низу мерења, $N(x)$, и меморисаног почетног очитавања[19] $N(x_0)$:

$$N = N(x) - N(x_0)\,. \tag{8.21}$$

Ово је уобичајен поступак за аутоматско отклањање грешке услед нежељене поларизације (помераја нуле) улазних кола мерног система. Резултат мерења се "поправља" за вредност која се добија када је величина која се мери једнака нули[20]. На овај начин може да се одстрани утицај адитивне компоненте мерног сигнала која не садржи информацију о мереној величини (на пример: термоелектрични ефекат у проводницима, при мерењу напона, или отпорност мерних водова, при мерењу отпорности). Током трајања мерног експеримента, са циљем повећања брзине мерења, иновирање корекционе вредности може бити онемогућено.

## 8.5.2 РАЗМЕРАВАЊЕ

Константа инструмента може да буде модификована дељењем резултата мерења $N(x)$ задатом константом $N_1$:

$$N = \frac{N(x)}{N_1}\,, \tag{8.22}$$

или множењем, константом $N_2$:

$$N = N_2 \cdot N\big(x\big)\,, \tag{8.23}$$

где су $N_1$ и $N_2$ бројне вредности, задате од стране корисника, уписане у одговарајуће меморијске регистре. Као коначни резултат мерења $N$ може да буде приказана вредност која се добија линеарном трансформацијом вредности $N(x)$, добијене мерењем, према изразу:

$$N = \frac{N(x) - N_0}{N_1} \cdot N_2\,. \tag{8.24}$$

Тиме је, на пример, омогућен приказ релативног одступања ($\varepsilon$) резултата мерења $N(x)$ од задате називне (очекиване) вредности $N_\text{n}$:

$$\varepsilon = \frac{N(x) - N_n}{N_n}\,. \tag{8.25}$$

Ово одступање може бити изражено у процентима задате вредности $N_\text{n}$:

$$\varepsilon\textbf{(\%)} = \frac{N(x) - N_n}{N_n} \cdot 100\,. \tag{8.26}$$

---

[19] На овај начин врши се аутоматско подешавање нуле (нулирање, *zeroing*, *zero balancing, Nullabgleich*), за које се у вагању користи израз "тарирање". Назив "тара" (итал. *tara*) потиче од арапског назива *tarh* за одбитак тежине амбалаже (сандука, бурета) од укупне тежине.

[20] При мерењу напона, на пример, улазни прикључци се краткоспајају.

Трансформација 8.24 омогућује да различите електричне и неелектричне величине, мерене посредством мерних претварача са линеарном карактеристиком, буду приказане у одговарајућим јединицама. Ако је карактеристика одзива мерног претварача дефинисана линеарном једначином:

$$x = k \cdot a + X_0 , \tag{8.27}$$

којом се вредности мерене физичке величине $a$, које припадају задатом мерном опсегу ($A_{\min}$, $A_{\max}$), једнозначно пресликавају у вредности електричне величине $x$ у опсегу од $X_{\min}$ до $X_{\max}$, тада се применом формуле 8.24 и задавањем вредности коефицијената према једначинама:

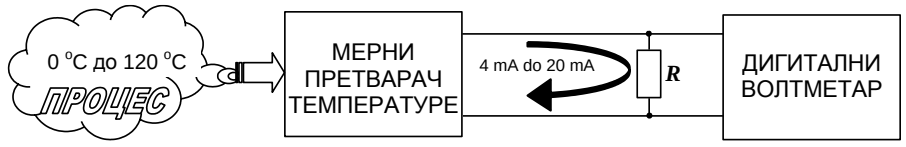
$$N_0 = N\left(\frac{X_{\min} \cdot A_{\max} - X_{\max} \cdot A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}\right), \tag{8.28}$$

$$N_1 = N(X_{\max}) - N(X_{\min}), \text{и} \tag{8.29}$$

$$N_2 = A_{\max} - A_{\min} , \tag{8.30}$$

постиже да резултат који се приказује на основу мерења величине $x$, представља управо вредност величине $a$ изражене у одговарајућим јединицама.

На пример, да би се помоћу мерног претварача који за вредности температуре у опсегу од 0 °C до 120 °C даје на свом излазу нормализовани струјни сигнал у опсегу од 4 mA до 20 mA, омогућило очитавање температуре према скали Целзијуса, мерењем пада напона који на отпорнику познате отпорности $R$ = 100 Ω ствара излазна струја мерног претварача (слика 8.14), потребно је у регистре који садрже коефицијенате $N_0$ , $N_1$ и $N_2$ унети следеће вредности[21]: $N_0$ = 0.4, $N_1$ = 1.6 и $N_2$ = 120.




Слика 8.14. Директно очитавање вредности мерене величине помоћу мерног претварача са нормализованим струјним излазом

## 8.5.3 КОНТРОЛА ГРАНИЧНИХ ВРЕДНОСТИ

Мерни уређај може да врши аутоматску проверу вредности мерене величине у односу на задате граничне вредности: *U*(*upper limit*) и *L*(*lower limit*). На дисплеју се приказују само оне вредности мерене величине које се налазе унутар постављених граница (*Go/No-Go* тест). У случају прекорачења приказује се само одговарајућа порука (на пример: "*HI*" ако је $x > U$, односно "*LO*" ако је $x < L$). Ова функција омогућује селекцију елемената (на пример отпорника) и према сложенијем алгоритму, са више граничних вредности, при

[21] Напон на отпорнику $R$ мери се на опсегу 1 V.

чему границе могу бити задате у процентима називне вредности. Неки инструменти имају изведен посебан релејни излаз који омогућује остваривање потпуно аутоматизованог процеса сортирања производа.

## 8.5.4 НЕЛИНЕАРНЕ ФУНКЦИЈЕ

Микропроцесорски инструменти омогућују израчунавање нелинеарних функција од којих су неке "типичне" наведене у табели 8.1. Коефицијенти $N_a$, $N_b$, $N_c$ и $N_d$ се, преко командне плоче инструмента или даљински, посредством комуникационе спреге, уписују у одговарајуће меморијске регистре.

Квадратна функција, на пример, омогућује одређивање електричне снаге $P$ која се развија на отпорнику познате вредности $R$, мерењем напона на његовим крајевима:

$$P = \frac{U^2}{R} . \tag{8.31}$$

| | |
|---|---|
| обрнута пропорционалност | $\frac{N_a}{N(x)}$ |
| квадратна функција | $\frac{N^2(x)}{N_a}$ |
| полином | $N_a + N_b \cdot N(x) + N_c \cdot N^2(x) + N_d \cdot N^3(x)$ |
| квадратни корен | $N_a \sqrt{\frac{N(x)}{N_b}}$ |
| логаритамска функција | $N_a \, \boldsymbol{log} \frac{N(x)}{N_b}$ |
| тангенс | $N_a \, \boldsymbol{tan} \frac{N(x)}{N_b}$ |
| аркустангенс | $N_a \, \boldsymbol{arctan} \frac{N(x)}{N_b}$ |

Табела 8.1. Основне математичке функције

Израчунавањем логаритамске функције:

$$dB = 20 \, \boldsymbol{log} \frac{X}{Y} , \tag{8.32}$$

омогућено је одређивање логаритамске амплитудске фреквенцијске карактеристике исказане у децибелима (*dB*) у односу на вредност измерену при референтној учестаности, а комбинацијом израчунавања могуће је одредити ниво сигнала исказан апсолутно у односу на референтну снагу 1 mW:

$$dB_m = 10\,\boldsymbol{log}\frac{P}{1mW}\,, \tag{8.33}$$

односно:

$$dB_m = 10\,\boldsymbol{log}\frac{\frac{U^2}{R}}{1mW}\,, \tag{8.34}$$

где је $R$ отпорност оптерећења коју корисник дефинише.

У ову категорију обраде могу да се сврстају и програми којима се остварује линеаризација карактеристике сензора. Мерење температуре помоћу термопара засновано је на одговарајућој математичкој обради сигнала (напона) добијеног помоћу спољашњег сензора одређеног типа, при чему резултат који се приказује одговара изабраној температурској скали (Целзијусова или Фаренхајтова). Прецизна мерења температуре остварују се мерењем отпорности платинског температурског сензора (*RTD*).

## 8.5.5 СТАТИСТИЧКА ОБРАДА

Средња вредност $N$ резултата добијених низом од $M$ узастопних мерења дефинисана је као аритметичка средина (*mean value*):

$$N_a = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} N_i\ . \tag{8.35}$$

Израчунавањем према формули:

$$N_{am} = N_1 + \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{m}(N_k - N_1)\boldsymbol{;}\, m = 1, 2, \ldots M\,, \tag{8.36}$$

која је погоднија за реализацију помоћу микропроцесора, омогућен је приказ "текућег" резултата $N_{\mathrm{am}}$ након сваког појединачног мерења (пливајућа средња вредност). Након завршеног комплетног циклуса биће приказана средња вредност $M$ мерења ($N_{a\mathrm{M}} = N_a$).

Расипање резултата у низу од $M$ мерења приказује се величином која се назива варијанса:

$$N_V = \frac{\sum_{i=1}^{M}\left(N_i - N\right)^2}{M-1}\ . \tag{8.37}$$

При статистичкој анализи резултата мерења као показатељ расипања користи се стандардно одступање (*standard deviation*) које је дефинисано као квадратни корен средње вредности квадрата одступања (*root-mean-square deviation*)[22]:

[22] У статистици се величина $\sigma^2$ назива варијанса (*variance*) или дисперзија.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} d^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n}} . \qquad (8.38)$$

Израз 8.38 није најбољи показатељ расипања резултата мерења када је извршен коначан број мерења. Анализа овог проблема показује да је најпогоднije да се као процена стандардног одступања користи величина $s$ која је дата обрасцем [1], [2]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} , \qquad (8.39)$$

где је $x_i$ резултат i-тог мерења, а $x$ аритметичка средина $n$ разматраних резултата мерења исте мерене величине. Ова величина се назива експериментално стандардно одступање (*experimental standard deviation*). На њему се заснива формула 8.37.

Примена формуле:

$$N_{Vm} = \frac{\sum_{k=1}^{m} (N_k - N_1)^2 - \frac{1}{M}\left[\sum_{k=1}^{m} (N_k - N_1)\right]^2}{M-1} . \qquad (8.40)$$

омогућује приказ вредности $N_{Vm}$ током извршавања мерног поступка након сваког појединачног мерења ($N_{VM} = N_V$).

## 8.6 ЧУВАЊЕ ПОДАТАКА

Микропроцесорски мерни инструменти поседују интерну меморију у коју се смештају резултати низа мерења. Низ резултата сукцесивних мерења, извршених према унапред одређеном "рецепту", може да буде уписан и касније очитан локално или даљински. Погодним избором трајања мерног интервала и кашњења могуће је извршити аутоматско снимање низа узастопних вредности променљиве величине током временског интервала од неколико дана.

Поједини инструменти омогућују смештање података у меморији чији садржај остаје сачуван и после искључења напајања уређаја. Такође постоји могућност смештаја података на преносиви меморијски медијум (меморијска картица, диск, *FLASH*-меморија).




Слика 8.15. Меморијска картица са бесконтактним уписивањем и очитавањем података и *FLASH*-меморија са *USB* прикључком

Интерна меморија омогућује да се жељени програм (низ командних кодова и бројних података који дефинишу конфигурацију инструмента и секвенце мерног процеса) примљен посредством даљинске комуникације унесе у меморију (*program memory*) и касније аутоматски извршава на основу само једне наредбе послате од стране уређаја који контролише рад система. У том случају, резултати мерења уписују се у преостали део меморијског простора (*reading stor*e) и очитавају након извршавања програма.

# 8.7 КОМУНИКАЦИОНЕ ФУНКЦИЈЕ

Комуникација корисника (оператера) са мерним системом остварује се помоћу командне плоче инструмента. Комуникација са другим уређајима остварује се посредством одговарајућег интерфејса.

## 8.7.1 HMI-ДИЈАЛОГ

Задавање радног режима врши се помоћу функционалних тастера на командној плочи инструмента. Нумерички подаци који дефинишу радни режим, односно представљају коефицијенте функција приликом математичке обраде[23] смештају се (акцијом оператера преко тастера на конзоли или даљинском наредбом) у одговарајуће регистре. Резултати статистичке обраде аутоматски се уписују у посебне регистре које корисник може само да очита.

Програмабилност, која несумњиво доприноси квалитету мерног уређаја, омогућујући флексибилност и универзалност примене, уноси проблем сложене употребе уређаја. У поређењу са конвенционалним инструментима, програмабилност подразумева сасвим другачији концепт руковања. Практично, програмирање флексибилних вишенаменских уређаја захтева познавање одговарајућег језика који је, нажалост најчешће врло специфичан и разликује се од инструмента до инструмента, чак и када је реч о уређајима истог произвођача. Да би се унеколико олакшао овај проблем, користи се интерактивни поступак програмирања при којем инструмент, кроз дијалог који се остварује преко показног уређаја, "помаже" кориснику. У табели 8.2 приказан је пример процедуре програмирања вишефункцијског инструмента за остваривање функције селекције отпорника (интерни програм уређаја, означен бројем 6).

[23] Програмске константе као што су: број мерења након сваког окидања (*triger*), број цифара приказа, трајање интеграције, кашњење након тригера, горња гранична вредност, доња гранична вредност, константе $N_0$ , $N_1$ и $N_2$ за израчунавање одступања односно остваривање скалирања.

| ТАСТЕР | ФУНКЦИЈА | ДИСПЛЕЈ |
|---|---|---|
| **kΩ** | Мерна функција = мерење отпорности | |
| **2** | Опсег мерења = 2 kΩ | |
| **PRGM** | Позивање интерних програма | |
| | Инструмент "тражи" број програма | **Pro ?** |
| **6** | Изабран је програм бр. 6 | **Pro 6** |
| | | кашњење 0.5 s |
| | Инструмент "тражи" доњу границу | **Lo = ?** |
| | | кашњење 0.5 s |
| | Приказ последње задате вредности | **0.00000** |
| **1, 4, 8, 5, 0, 0** | Уношење доње границе | **1.48500** |
| **ENTER** | | |
| | Инструмент "тражи" горњу границу | **Hi = ?** |
| | | кашњење 0.5 s |
| | Приказ последње задате вредности | **0.00000** |
| **1, 5, 1, 5, 0, 0** | Уношење горње границе | **1.51500** |
| **ENTER** | Почетак мерења | |
| | ако је 1.485 kΩ $< R_x <$ 1.515 kΩ | **PASS** |
| | МЕРЕЊЕ ако је $R_x <$ 1.485 kΩ | **LO** |
| | ако је $R_x >$ 1.515 kΩ | **HI** |

Табела 8.2. Програмирање функције селекције отпорника

У начелу, инструмент може да има више нумеричких, алфанумеричких или графичких показних уређаја који приказују исту или различите величине. Када један дисплеј приказује различите величине, у сваком тренутку мора да буде јасно означено која се величина показује.




Слика 8.16. Вишенаменски мерни инструмент намењен за уградњу у контролну таблу

## 8.7.2 ПРЕНОС ПОДАТАКА

Прослеђивање резултата мерења, мерних и статусних података са циљем њиховог складиштења, штампања или даље обраде остварује се паралелним или серијским преносом информација у дигиталном облику. У најједноставнијем случају, инструмент само предаје резултате мерења. Двосмерна комуникација са инструментом, међутим, омогућује поузданији пренос, као и да се мерне функције и функције математичке обраде могу да програмирају даљински, слањем порука које садрже кодове команди и програмске константе. Посебним наредбама врши се уписивање примљеног низа података (команди и параметара који представљају задати програм) у програмску меморију, односно иницира њихово извршавање. Ефикасно даљинско управљање (*remote mode*) разноврсним инструментима подразумева њихову способност за спрезање са другим уређајима применом стандардизованих поступака (интерфејса и протокола).

# ЛИТЕРАТУРА

1 *GUM, Evaluation of measurement data, Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM* 101:2008
2 D. *Stanković, Fizičko-tehnička merenja, Naučna knjiga*, 1991.

# 9.
# ПРОГРАМАБИЛНА МЕРНА СРЕДСТВА

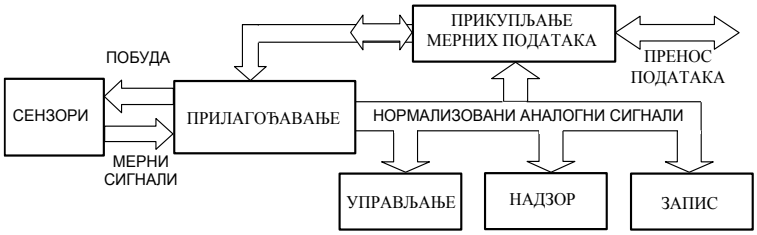
Појава програмабилних мерних уређаја отворила је ново поглавље у историји мерне технике. Она се може означити као “продор у нову димензију” окарактерисану битно новим својствима која обележавају "интелигентне" мерне системе. Програмабилност, у ужем смислу, подразумева могућност задавања радних параметара (као што су мерни опсег, трајање мерног интервала и резолуција приказа резултата), дефинисања и аутоматског извршавања одређене мерне процедуре, односно регистровања (меморисања) одабраних резултата низа мерења. У ширем смислу, програмабилност подразумева способност локалне обраде резултата мерења, према изабраном алгоритму, као и комуникацију са надређеним уређајем, са циљем размене података и управљачких порука. Локална обрада омогућује приказ мерних података у облику најпогоднијем за корисника, као и реализацију мање или више аутоматизованих посредних мерења. Пренос података омогућује формирање комплексних мерних и управљачких система високих перформанси, функционално и информационо усаглашених са карактеристикама процеса и конкретним потребама корисника. На овај начин се ефикасно решавају многи, доскора озбиљни проблеми мерне технике.

Нове функције, међутим, стварају и нове тешкоће. Не ради се само о економичности техничке реализацији мерних уређаја и система, већ и о законодавству. Појавило се питање гаранције метролошких својстава мерила чија се мерна функција и параметри карактеристике могу програмски мењати током употребе, интервенцијом на месту мерења или даљинском наредбом. Значај овог проблема огледа се у низу докумената, којима се настоји да се регулишу његови поједини аспекти.

У овом поглављу, полазећи од основних појмова дефинисаних у Међународном речнику метрологије [1], разматрају се основна обележја програмабилних мерних средстава. У начелу, захваљујући усавршеној технологији интегрисаних електронских кола, ово својство може да буде придодато свим облицима мерних средстава: од оних најсложенијих мерних система и постројења до основних, као што су материјализоване мере (програмабилни извор референтног напона, програмабилни генератор сигнала), кондиционери мерних сигнала, мерни претварачи и сензори.

# 9.1 ПРОГРАМАБИЛНИ КОНДИЦИОНЕРИ И МЕРНИ ПРЕТВАРАЧИ

Савремени мерни ланац[1], осим у неким специфичним елементарним облицима, неизбежно завршава се на улазу рачунара. Опрема за кондиционирање, која омогућује припрему аналогних мерних сигнала пре њиховог трансформисања у дигитални облик, представља, међутим, и даље његову неизбежну карику (слика 9.1).




Слика 9.1. Мерни ланац опште намене

У класичним мерно-рачунарским системима постоји јасна граница између оног дела у којем се врши кондиционирање аналогних мерних сигнала и делова у којима се врши прикупљање мерних података, њихова обрада и приказ добијених резултата. У системима надзора и управљања процесима, параметри кондиционера (односно мерних претварача) прецизирају се, по правилу, у току пројектовања постројења и, након евентуалних модификација у току пуштања система у рад, остају непромењиви у току низа година експлоатације. Због тога су њихове карактеристике стандардизоване у највећој могућој мери и често само фабрички подесиве.

У системима за испитивање сложених процеса (као што је, на пример, симулација лета авиона или пројектила, у природној или смањеној величини, у аеродинамичком тунелу) такав приступ није прихватљив. Од мерне опреме се захтева не само прикупљање великог броја података (праћење великог броја разноврсних сигнала у релативно кратком временском интервалу), него и, с обзиром на специфични режим рада, могућност прилагођења мерног ланца радним условима и циљевима појединих фаза испитивања.

Спрезање мерних уређаја подразумева усаглашеност њихових улазних и излазних карактеристика. У *SCADA*-системима уобичајено је да улазне сигнале подсистема за прикупљање аналогних мерених величина представљају нормализовани електрични сигнали у предетерминисаном опсегу (на пример, од 0 до 10 V, од 0 до 20 mA и слично) [2], [3]. Да би се остварило усаглашавање сигнала добијених од различитих типова сензора, коефицијенти који дефинишу улазно/излазну карактеристику кондиционера се морају усагласити са мерним опсегом улазне величине, који у општем случају зависи од стања у којем се посматрани процес налази.

---

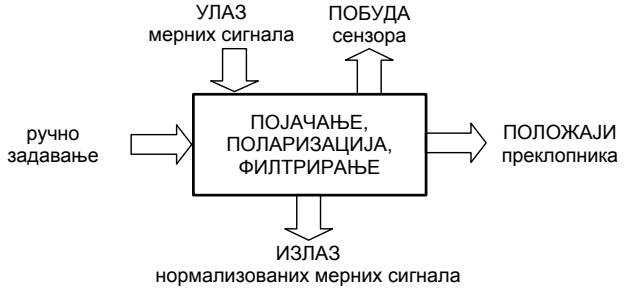
[1] Низ елемената који одређују путању мерног сигнала од улаза до излаза мерила или мерног система (*measuring chain*), [1].

Класична решења подесивих кондиционера заснована су на примени електромеханичких елемената (преклопника, тастера, подесивих отпорника и кондезатора). Постављање жељених вредности параметара подразумева непосредну интервенцију сервисера при њиховој промени. У аутоматизованим системима за испитивање сложених процеса у истраживачким лабораторијама неопходно је да се подсистем за кондиционирање мерних сигнала истовремено одликује високим перформансама у мерном погледу, флексибилношћу и рачунарском компатибилношћу.

Флексибилност подразумева известан степен самосталности кондиционера сваког од улаза мерног система, а такође и програмабилност његових параметара, односно могућност једноставног избора и задавања вредности побуде сензора, као и дефинисања улазно/излазне карактеристике кондиционера. Другим речима, карактеристични параметри мерног ланца, као што су мерни опсег улазне величине, пропусни опсег и референтна вредност екситације сензора, морају бити лако и брзо прилагодљиви захтевима експериментатора.

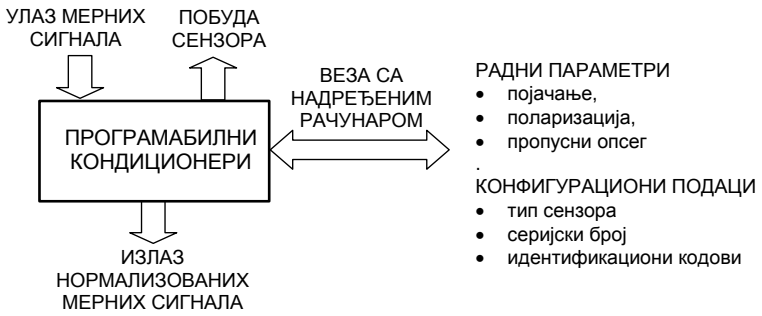
Класичан приступ (слика 9.2) не даје задовољавајуће резултате због два основна разлога:

- подешавање се *a priori* заснива на ручном деловању непосредно на месту уградње кондиционера,
- прикупљање задатих вредности параметара представља технички проблем чије решавање, у општем случају, значајно нарушава компактност структуре кондиционера.




Слика 9.2. Кондиционирање аналогних сигнала - класичан приступ

Савремена концепција кондиционера заснива се на решењима која омогућују аутоматско обављање низа потребних процедура, као и успостављање одговарајуће спреге преко које се остварује комуникација са надређеним рачунаром (или специјализованим контролним уређајем) са циљем преношења података којима су дефинисане вредности радних параметара у режиму мање или више аутоматизованог процеса мерења (слика 9.3). Комуникација посредством стандардизоване спреге представља, у општем случају, најпогоднije решење али, зависно од специфичности намене, и друге варијанте могу бити оправдане. Најједноставнији начин за остваривање спреге са надређеним рачунаром је серијски пренос података. Микроконтролери, микрорачунари специјално развијени за примену у мерним и управљачким процесним уређајима, најчешће имају у себи подпроцесор за серијску комуникацију.




Слика 9.3. Кондиционирање аналогних сигнала - рачунарски приступ

Високе перформансе у мерном погледу захтевају не само коришћење достигнућа савремене технологије електронских компонената, него и примену техника аутоматске провере функционалности и тачности мерног ланца. Да би се постигла висока тачност која се, на пример, захтева при мерењу сила и момената при испитивању аеродинамичких карактеристика авиона, неопходно је, с обзиром на услове мерења, вишеструко преподешавање мерног ланца. Потпуна калибрација[2] која укључује и сензор мерене величине представља сложен и дуготрајан процес који се обавља непосредно пре експеримента. Током испитивања, између појединих његових фаза, врши се провера подсистема за прикупљање мерних података довођењем референтних величина на улаз кондиционера и, уколико је то потребно, преподешавање њихове улазно/излазне карактеристике сходно условима следећег мерења.




Слика 9.4. Програмабилни кондиционери аналогних сигнала

У целини посматрано, кондиционери у склопу комплексних мерно-рачунарских система треба да испуне, осим основних, и три додатна захтева:

- могућност конфигурисања и реконфигурисања система према конкретним потребама корисника (**прилагодљивост**);
- могућност аутоматског задавања жељених вредности параметара мерног ланца (**програмабилност**);
- могућност аутоматске провере и подешавања карактеристике преноса прикључивањем на улаз кондиционера извора

[2] Скуп поступака којима се успоставља однос између вредности величина које представљају одзив мерног инструмента (система) и одговарајућих вредности остварених помоћу еталона, еталонирање (*calibration*), [1].

референтних сигнала погодно изабраних вредности уместо сензора (**самоподесивост**).

Примена програмабилних кондиционера омогућује повећање осетљивости мерења, током самог испитивања, када се у одређеној фази експеримента мерена величина налази унутар уског опсега вредности. Аутокалибрација омогућује не само повећање тачности, него и поузданости мерног система, што је веома значајно при испитивању сложених процеса [4]. Програмабилност мерних претварача углавном се своди на програмабилност блока за кондиционирање [5]. Уградњом микропроцесора омогућује се извршавање математичких операција [6], [7], [8], реализација интелигентних (*smart*) сензора и мерних претварача. Савремани аналогно-дигитални претварачи представљају комплексне функционалне целине које такође садрже програмабилне мерне склопове, без којих је практично немогуће остварити врхунске перформансе интегрисаног кола као целине [9].




Слика 9.5. Програмабилни мерни претварач

## 9.1.1 ПРОГРАМАБИЛНИ СИСТЕМ ЗА КОНДИЦИОНИРАЊЕ АНАЛОГНИХ МЕРНИХ СИГНАЛА

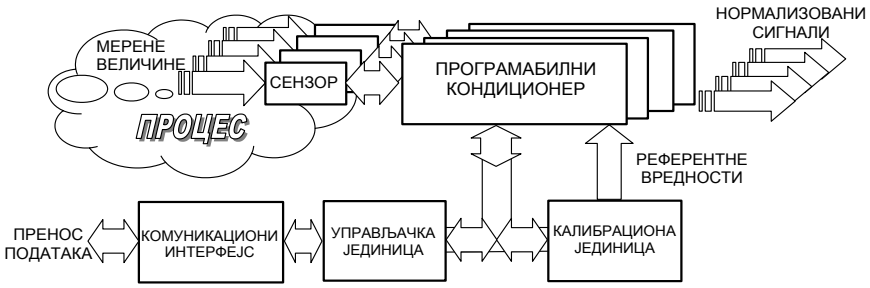
У флексибилним мерним инсталацијама кондиционирање аналогних мерних сигнала пре њихове обраде остварује рачунарски организован, мање или више аутономан, подсистем сложене структуре[3] чије су основне функционалне целине (слика 9.6):

- програмабилни кондиционери,
- извор референтних сигнала,
- управљачка јединица,
- комуникациони интерфејс.

Програмабилни кондиционери омогућују прилагођавање мерног ланца конкретним условима и циљевима мерења. Радни параметри сваког кондиционера у оваквом систему се постављају преко надређеног рачунара (*host computer*). У начелу, може бити омогућено и локално задавање помоћу

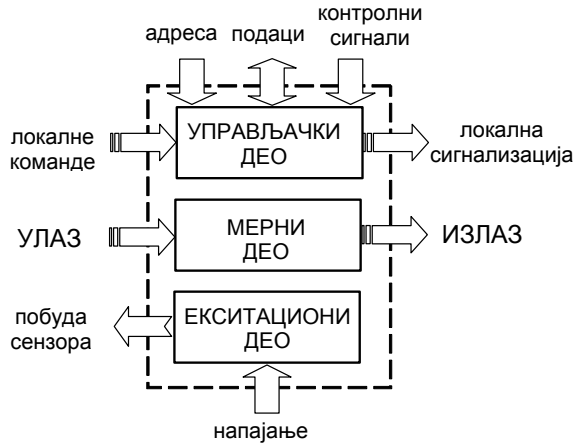
[3] Под структуром се подразумева скуп елемената који сачињавају систем и везе између њих.

наменске програмерске конзоле или помоћу тастера и преклопника на самом модулу. Тиме се омогућује, када је то потребно, аутономно функционисање подсистема за кондиционирање.




Слика 9.6. Програмабилни систем за кондиционирање аналогних мерних сигнала

При раду у склопу комплексног мерно-рачунарског система, ручно локално подешавање параметара кондиционера може да буде условљено дозволом коју оператер (координатор експеримента) даје преко централног рачунара.




Слика 9.7. Функционална блок шема програмабилног кондиционера

Програмабилни кондиционер је, као периферијска јединица рачунарски управљаног система, преко одговарајућих сигналних линија (слика 9.7) повезан са централном управљачком јединицом (*central processing unit - CPU*) која одређује начин његовог рада. Управљачка логика омогућује размену података између кондиционера и управљачке јединице у циљу уписивања вредности програмабилних параметара у одговарајуће меморијске регистре модула. Очитавањем статусних података омогућено је идентификовање типа кондиционера (код модула), добијање информација о стварној радној конфигурацији подсистема за кондиционирање (положај елемената за локално задавање начина рада), као и настанку нерегуларног стања (на пример, услед прекида веза са припадајућим сензором).

Калибрациона јединица представља извор референтних сигнала којима су дефинисане референтне величине потребне за проверу и подешавање различитих типова кондиционера. Тиме се постиже смањивање мерне несигурности појединих кондиционера, повећава аутономност система и олакшава његова примена.

Управљачка јединица је специјализовани микрорачунар који управља радом система, памти и чува конфигурацију, односно радне параметре који одређују функцију преноса сваког кондиционера, и поставља програмабилне параметре на основу налога добијених од главног рачунара. Вредности радних параметара су смештене у посебној меморији чији садржај остаје сачуван и после искључивања уређаја. На тај начин се елиминише потреба за понављањем (често веома сложене и дуготрајне) процедуре рекалибрације у случају прекида напајања мерне опреме током експеримента.

Управљачки програми микрорачунарских контролера могу да буду засновани на примени одговарајућих оперативних система, што омогућује лаку накнадну измену или дораду у циљу увођења нових функција, једноставном заменом постојећег дела програма (који се чува у меморији чији садржај не зависи од присуства напона напајања) новим кодом, пренетим посредством серијске везе.

Сврха управљачке јединице у склопу подсистема за кондиционирање је растерећивање главног рачунара који обавља основне функције система: прикупљање мерних података и њихову примарну обраду у циљу контроле стања процеса односно тока самог експеримента. У мање сложеним применама, односно у системима мањег капацитета, програмабилни кондиционери могу бити под непосредном контролом главног рачунара (посредством одговарајућег спрежног склопа који рачунару омогућује приступ појединим блоковима подсистема за кондиционирање). У начелу, доследним спровођењем концепције "дистрибуиране интелигенције" у мерним рачунарским системима, сваком се кондиционеру придружује посебна процесорска јединица са одговарајућим (наменским) програмом.

Блок шема приказана на слици 9.7 садржи основне функционалне целине програмабилног кондиционера аналогних мерних сигнала. Мерни и екситациони део остварују све операције процеса кондиционирања: спрезање са сензором, филтрирање, поларизацију и појачање мерног сигнала. Управљачка део остварује спрегу мерног дела са централном процесорском јединицом. Он омогућује размену података између модула кондиционера и централне процесорске јединице са циљем идентификације типа модула односно уписивања задатих вредности програмабилних параметара у одговарајуће меморијске регистре сваког кондиционера.

У општем случају, структурне целине мерног дела кондиционера представљају:

- улазни селектор,
- претпојачавач,
- програмабилни филтер,

- блок за поларизацију,
- програмабилни појачавач,
- коло за побуду сензора.

**Улазни селектор** је коло са више сигналних улаза и једним излазом које омогућује избор сигнала који ће се, након одговарајуће обраде, проследити на излаз кондиционера. Избор може, на пример, да обухвати улазну величину, или референтне вредности којима се испитује тачност мерног ланца.

**Претпојачавач** фиксног појачања обезбеђује спрезање са сензором односно колом у коме се сензор налази, тако да кондиционер што мање утиче на вредност величине која се мери. Улазни појачавач кондиционера је, најчешће, неинвертујући појачавач велике улазне отпорности (бафер) или инструментациони појачавач, зависно од намене односно типа сензора.

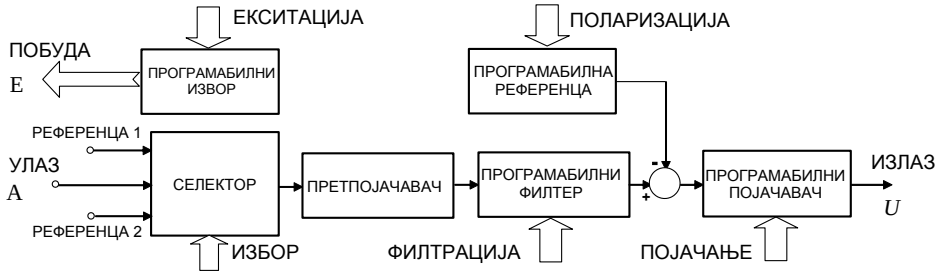
**Програмабилни филтер** омогућује усаглашавање фреквенцијске карактеристике мерног ланца са карактеристикама самог сензора, посматраног процеса и извора поремећаја који могу утицати на резултат мерења.

**Блок за поларизацију** састоји се од програмабилног извора напона и сабирача на чији се један улаз доводи напон сразмеран мерном сигналу, а на други улаз жељени напон поларизације.

**Програмабилни појачавач** омогућује дигитално контролисање (задавање) вредности појачања.

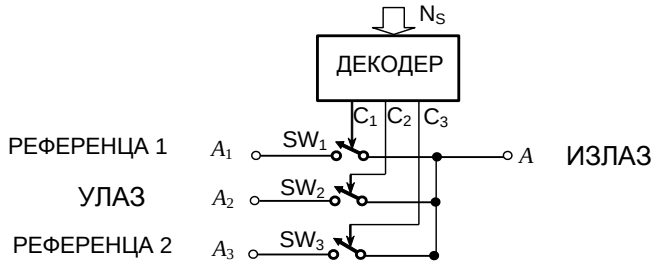
**Коло за побуду сензора** представља програмабилни извор сигнала којим се сензор екситује. Излазни степен екситационог блока обезбеђује генерисање побудне величине задатог интензитета и у жељеном облику (напонски или струјни сигнал, сталне вредности или предефинисаног таласног облика).

Општа структурна блок шема мерног дела програмабилног кондиционера приказана је на слици 9.8. Блок за екситацију, селектор и претпојачавач омогућују спрезање са извором мерног сигнала који може да представља процесну или референтну величину. Филтер, блок за поларизацију и појачавач остварују потребно скалирање (размеравање). У редовном режиму рада (МЕРЕЊЕ) на улаз претпојачавача прослеђује се сигнал са улазних прикључака кондиционера (УЛАЗ). Приликом калибрације на улаз претпојачавача се доводе референтне величине (РЕФЕРЕНЦА 1 односно РЕФЕРЕНЦА 2), на основу којих се за задате вредности поларизације и појачања одређује одступање стварне од жељене карактеристике кондиционера, односно, кориговане вредности које треба да се задају да би се постигла компензација ефеката помераја нуле и промене појачања услед промена температуре или старења.




Слика 9.8. Мерни део програмабилног кондиционера

Селектор (бирач) у аналогној техници је прекидачко коло које остварује функцију преклопника (комутатора) омогућујући аутоматско укрштање сигналних линија (скенер, мултиплексер). Улазни селектор програмабилног кондиционера састоји се од декодера (слика 9.9), који кодовани податак, број $N_S$, којим је одређен радни режим кондиционера (мерење односно калибрација) трансформише у скуп бинарних сигнала $\{C_i\}$. Њима се управља стањем аналогних прекидача $\{SW_i\}$ преко којих се на излаз селектора прослеђује изабрани аналогни сигнал $A_i$ (УЛАЗ, РЕФЕРЕНЦА 1 или РЕФЕРЕНЦА 2). У случају диференцијалне спреге са сензором, сваком улазу $A_i$ одговара пар аналогних прекидача који се контролишу истим бинарним сигналом $C_i$.

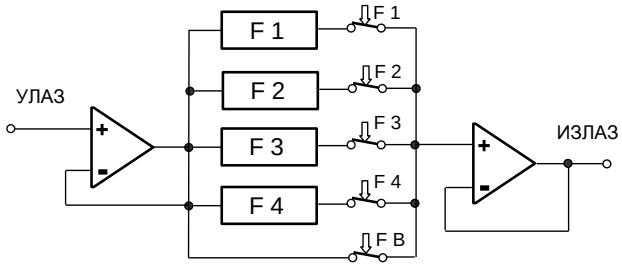



Слика 9.9. Улазни селектор кондиционера

У начелу, прекидачи могу бити електромеханички (релејни) или електронски. Први имају мању унутрашњу отпорност, робуснији су али спорији и знатно скупљи. Због тога, осим у случајевима када се захтева висока тачност, аналогни електронски прекидачи, који се производе као комерцијална интегрисана кола, преовлађују у савременој мерној техници. С обзиром на функцију коју обављају у склопу кондиционера, за мерне перформансе система значајне су првенствено њихове статичке карактеристике (унутрашња отпорност отвореног односно затвореног прекидача, напонски офсет и струје цурења).

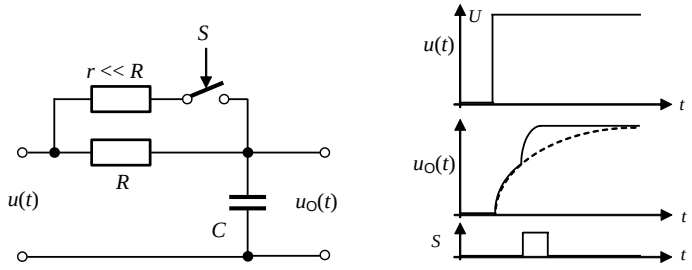
Програмабилни филтер, који пропушта без слабљења сигнале у изабраном опсегу учестаности представља неизбежни део мерног система. За испитивање модела авиона у аеродинамичком тунелу, на пример, примењују се филтри типа Батеворт. Програмабилност блока за филтрирање може да се оствари помоћу прекидачке мреже преко које се пасивни

елементи (отпорници односно кондензатори одговарајућих вредности) прикључују у филтерско коло, али овакво решење у општем случају је непогодно због статичких и динамичких несавршености аналогних прекидача[4] које у том случају непосредно утичу на параметре филтра. Боље карактеристике остварују се применом посебних филтерских ћелија, при чему се помоћу селектора бира која ће ћелија бити укључена у мерни ланац (слика 9.10)




Слика 9.10. Програмабилни филтер

Посебан проблем представљају филтри са ниским граничним учестаностима (што подразумева употребу отпорника и кондензатора веома великих вредности, као и мале радне струје). Осим тога, у склопу филтра врло ниске граничне учестаности потребно је да се предузму додатне мере да би се скратило трајање прелазних појава након промене режима рада до успостављања стационарног стања. При еталонирању, статичка тачност мерног ланца се проверава прикључивањем његовог улаза на нулу (РЕФЕРЕНЦА 1), а потом на референтни напон (РЕФЕРЕНЦА 2). Ако је, на пример, гранична учестаност филтра првог реда 0,1 Hz, да би се након скоковите промене улазног напона (од нуле на референтну вредност) на излазу кола успоставила нова вредност напона са грешком мањом од 1%, потребно је да протекне више од 46 секунди. Принцип убрзане "иницијализације" приказан је на слици 9.11. на примеру филтра првог реда.




Слика 9.11. Убрзање одзива нископропусног филтра при промени режима рада кондиционера

[4] Као што су струја цурења, коначна отпорност отвореног прекидача и паразитне капацитивности.

У нормалном режиму рада аналогни прекидач S је отворен, гранична учестаност филтра одређена је временском константом $\tau = RC$. Затварањем прекидача S, временска константа кола се вишеструко смањује, тако да се процес пуњења кондензатора $C$ знатно убрзава. Након завршетка прелазног режима прекидач S се отвара и коло функционише као филтер одговарајуће граничне учестаности.

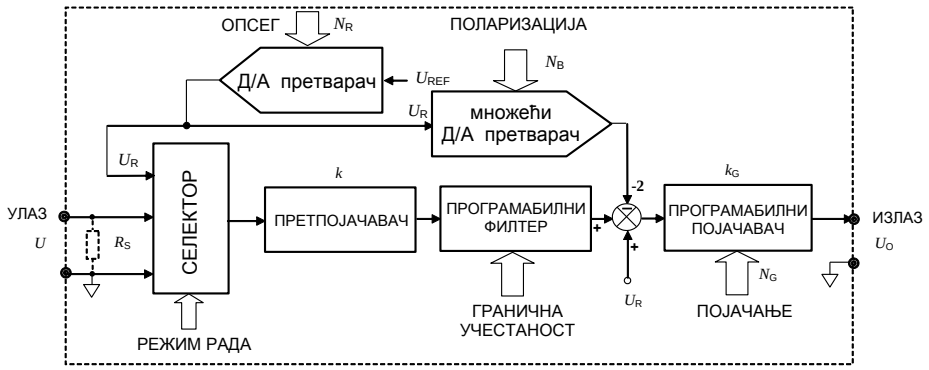
## 9.1.2 ОСНОВНИ ТИПОВИ ПРОГРАМАБИЛНИХ КОНДИЦИОНЕРА

Разлике које постоје између појединих типова програмабилних кондиционера своде се, у суштини, на разлике у делу којим је остварена спрега са извором информације (сензором). У том погледу могу се дефинисати четири основна типа [10]:

- кондиционер опште намене,
- кондиционер потенциометарског типа,
- кондиционер типа мерни мост и
- кондиционер типа термопар.

### 9.1.2.1 КОНДИЦИОНЕР ОПШТЕ НАМЕНЕ

Овај тип кондиционера представља, заправо, универзални појачавач који остварује скалирање и филтрацију улазног сигнала, а не садржи блок за побуду сензора (слика 9.12). Улазни сигнал је напон реферисан према нултом потенцијалу (маси) кондиционера. У начелу, улазни селектор, који омогућује проверу и аутоматску калибрацију модула може да има већи број спољашњих улаза (канала), од којих се само један прослеђује на излаз кондиционера у датом тренутку.




Слика 9.12. Кондиционер опште намене

Претпојачавач обезбеђује велику улазну отпорност и обично има јединично појачање. У случају када струјни сигнал делује на улазу кондиционера, у његовом улазном колу налази се отпорник као сензор струје.

Потискивање нежељених компоненти у спектру улазног сигнала

остварује се филтрима пропусницима ниских или високих учестаности.

Статичка карактеристика кондиционера одређена је линеарном једначином:

$$U_{\mathrm{O}} = k_{\mathrm{G}}(N_{\mathrm{G}}) \cdot \left( kU + U_{\mathrm{B}} \right), \tag{9.1}$$

где је $k_{\mathrm{G}}$ је програмабилно појачање (*gain*):

$$k_{\mathrm{G}} = \frac{N_{\mathrm{MAXG}}}{N_{\mathrm{G}}}, \tag{9.2}$$

k је појачање претпојачавача, а $U_{\mathrm{B}}$ еквивалентни напон поларизације (bias):

$$U_{\mathrm{B}} = U_{\mathrm{R}} \left(1 - \frac{2N_{\mathrm{B}}}{N_{\mathrm{MAXB}}}\right). \tag{9.3}$$

Напон $U_{\mathrm{R}}$ у овој једначини одређује мерни опсег (*range*). Представљен је изразом:

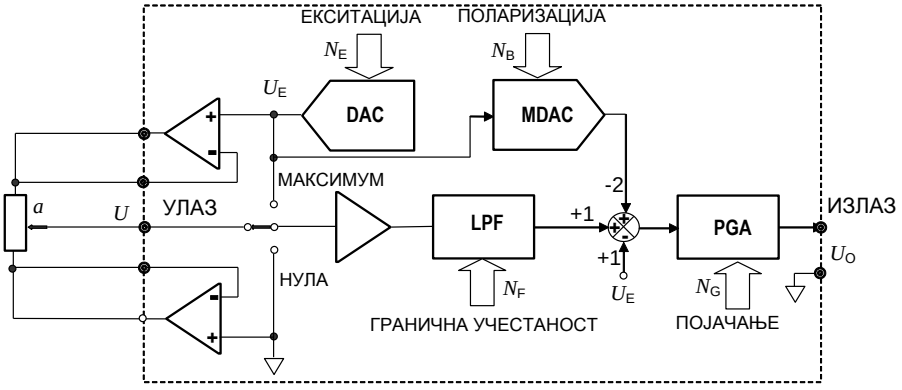
$$U_{\mathrm{R}} = \frac{N_{\mathrm{R}}}{N_{\mathrm{MAXR}}} U_{\mathrm{REF}}, \tag{9.4}$$

где је $U_{\mathrm{REF}}$ референтни напон. У овим једначинама $N_{\mathrm{R}}$, $N_{\mathrm{B}}$ и $N_{\mathrm{G}}$ су програмабилне величине (параметри) кондиционера, целобројне вредности у опсегу од 0 до $N_{\mathrm{MAXR}}$, $N_{\mathrm{MAXB}}$, односно $N_{\mathrm{MAXG}}$.

Двозначна поларизација у опсегу од $-U_{\mathrm{R}}$ ($N_{\mathrm{B}}$ = 0) до $U_{\mathrm{R}}$ ($N_{\mathrm{B}} = N_{\mathrm{MAXB}}$) омогућује програмабилно скалирање и филтрирање напонског сигнала у пуном мерном опсегу улазног појачавача (на пример ±10 V).

### 9.1.2.2 КОНДИЦИОНЕР ТИПА ПОТЕНЦИОМЕТАР

Побуда потенциометарског сензора врши се напоном $U_{\mathbf{E}}$, четворожичном спрегом са сензором (слика 9.13) Улазни селектор за остваривање провере и аутокалибрације модула у овом случају представља троположајни електронски прекидач преко којег се на улаз претпојачавача јединичног појачања прикључује улазни сигнал (УЛАЗ), референтни напон којим се сензор напаја (МАКСИМУМ) или референтни потенцијал мерног система (НУЛА).




Слика 9.13. Кондиционер типа потенциометар

Статичка карактеристика овог кондиционера одређена је релацијом:

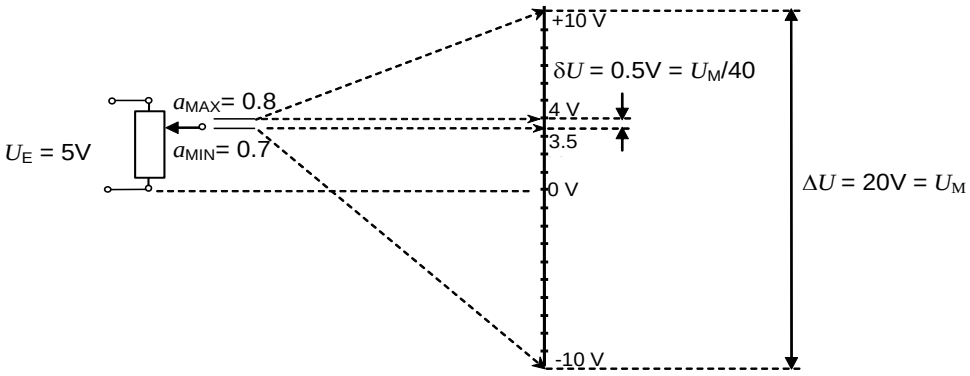
$$U_O = (a\frac{N_E}{N_{MAXE}} + 1 - 2\frac{N_B}{N_{MAXB}})\frac{N_{MAXG}}{N_G}U_{REF}, \tag{9.5}$$

у којој $a$ представља релативан положај клизача потенциометра. Програмабилни параметар $N_E$ је целобројна вредност у опсегу од 0 до $N_{MAXE}$, која одређује вредност напона на крајевима потенциометарског сензора. $N_B$ је целобројна вредност у опсегу од 0 до $N_{MAXB}$, која одређује вредност поларизације, а $N_G$ целобројна вредност у опсегу од 0 до $N_{MAXG}$, која одређује вредност појачања.

С обзиром на неизбежно одступање при изради механичких елемената којима се остварује спрега клизача потенциометра са телом чији се положај одређује, стварни опсег могућих вредности релативног положаја клизача $a$ је увек ужи од теоријског опсега ($a_{MIN} \geq 0$, $a_{MAX} \leq 1$). Због тога је потребно да се калибрација мерног ланца врши на основу стварних граничних вредности мерене величине. Када се, при одређеним условима одвијања процеса који се проучава, мерена величина мења унутар у релативно узаног дела мерног опсега, одговарајућом поларизацијом и појачањем постиже се значајно повећање осетљивости мерења. Наиме, осетљивост $\delta a$ мерења релативног положаја $a$ клизача потенциометра, изражена у процентима "текућег" мерног опсега $\Delta a$, одређена је формулом:

$$\delta a(\%) = \Delta \cdot \frac{U_M}{U_E} \cdot \Delta a, \tag{9.6}$$

где је $\Delta$ осетљивост А/Д претварача којим се мери напон на клизачу потенциометра, изражена у процентима мерног опсега $U_M$, а $U_E$ напон напајања потенциометра. То значи да се при мерењу положаја потенциометром који се напаја напоном $U_E$ = 5 V коришћењем А/Д претварача чији је мерни опсег ±10 V, у случају када се вредност величине $a$ налази у опсегу, на пример, од од 0,7 до 0,8; одговарајућом поларизацијом ($U_B$ = -13.5 V) и појачањем ($G$ = 40), осетљивост мерења може да се повећа 40 пута у поређењу са осетљивошћу при истим радним условима, када се исти А/Д претварач користи за директно мерење напона $U_a$.




Слика 9.14. Повећање осетљивости мерења размеравањем

У табели су, као пример, дате карактеристике кондиционера.

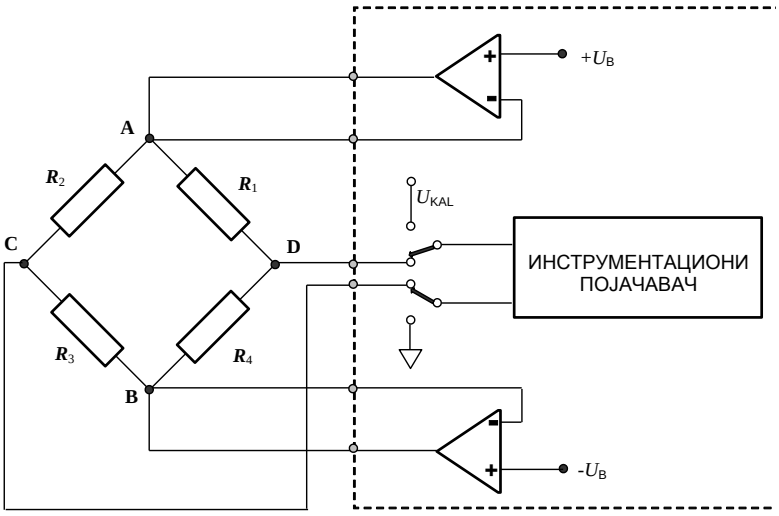
| | |
|---|---|
| ПОБУДА СЕНЗОРА | |
| Напон побуде $U_E$ | 1, 2 , 5 или 10 V |
| Највеће оптерећење | 75 mA |
| УЛАЗ | |
| Мерни опсег | од -10 V до +10 V |
| Улазна отпорност | већа од 10 MΩ |
| ИЗЛАЗ | |
| Излазни опсег | од -10 V до +10 V |
| Излазна отпорност | < 1 Ω |
| Струја оптерећења | највише 10 mA |
| КАРАКТЕРИСТИКА ПРЕНОСА | |
| Статичка карактеристика | $U_O = G\,(U - U_B)$ |
| Поларизација $U_B$ | $U_E$ (1-2$N_B$/16383); $N_B$ = 0...16383 |
| Појачање $G$ | 16383/ $N_G$; $N_G$ = 1...16383 |
| Тип филтра | *Butterworth* трећег реда |
| Гранична учестаност | 1, 2, 5 или 10 Hz |

### 9.1.2.3 КОНДИЦИОНЕР ТИПА МЕРНИ МОСТ

Улазни блок приказан је на слици 9.15. (Филтрирање и размеравање остварују се у начелу на исти начин код свих кондиционера). Симетричним напајањем мерног моста напонима $+U_B$ и $-U_B$ ($U_E = 2U_B$) елиминише се велика претполаризација улазног сигнала, а тиме олакшавају радни услови инструментационог појачавача. Заједнички унети напон $U_{CM}$ једнак је нули:

$$U_{CM} = \frac{U_A + U_B}{2} = 0\,. \tag{9.7}$$

Када је мост уравнотежен оба краја мерне дијагонале C-D налазе се на нултом потенцијалу.




Слика 9.15. Улазни блок кондиционера типа мерни мост

Улазни селектор у овом случају функционално представља двоструки преклопни прекидач који омогућује да се у режиму калибрације на улаз инструментационог појачавача прикључи напон који представља излаз програмабилног извора референтног напона $U_{KAL}$. Променом овог напона у границама мерног опсега појачавача може да се оствари потпуно испитивање мерног дела који сачињавају инструментациони појачавач, блок за поларизацију, програмабилни појачавач и излазни степен кондиционера.

### 9.1.2.4 КОНДИЦИОНЕР ТИПА ТЕРМОПАР

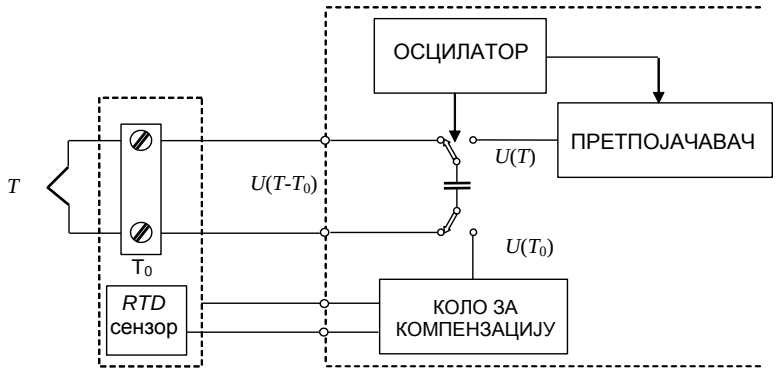
Термопар је термоелектрични[5] сензор који омогућује мерење температуре пресликавањем промена сопствене температуре на промене напона између његових крајева. Коло приказано на слици 9.16 омогућује диференцијално мерење улазног напона[6], као и поларизацију улазног мерног сигнала напоном који се генерише на основу мерење температуре хладног споја $T_0$ термопара:

$$U(T)=U(T-T_0)+U(T_0) \tag{9.8}$$

Помоћу "летећег кондензатора" (*floating capacitor*) остварена је галванска изолација кондиционера од сензора.

[5] Термин “термоелектрични” (*thermo-elecric*) означава међусобно дејство између термичке и електричне појаве (ЈУС Н.А0.121-02-52).

[6] Да би се смањио утицај пада напона који доводи до одступања референтног потенцијала (масе) на месту уградње сензора у односу на референтни потенцијал кондиционера, повезивање са сензором је двожично.




Слика 9.16. Улазни део кондиционера типа термопар

Овај тип кондиционера у основи представља програмабилни појачавач напона ниског нивоа (0,1 V). Помоћу отпорничког сензора температуре (*resistance temperature detector, RTD*) мери се температура референтног краја.

# 9.2 ПРОГРАМАБИЛНИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ

Увођење микрорачунара у мерне инструменте и помоћну опрему омогућило је суштинске измене у поступку провере њихових метролошких својстава. Читав низ операција испитивања мерног уређаја обавља се аутоматски, чиме се цео процес вишеструко убрзава, потреба за помоћним уређајима се битно редукује, а омогућује се да ове активности обавља корисник без посебне стручне обуке. С обзиром на могућност чувања и математичке обраде мерних података, калибрација уређаја са микропроцесором може бити остварена дигитално, а то значи и без његовог расклапања. Код класичних уређаја, кола која дефинишу улазно/излазну карактеристику мерила садрже у себи елементе чији се електрични параметри могу ручно подешавати. Тиме је постигнута елиминација одступања почетних вредности параметара од називних вредности, као и неутрализација последица њихових промена услед старења или услед промена услова околине. С обзиром да су ови елементи саставни делови мерних кола, неопходно је, посебно када се ради о прецизним вишефункцијским инструментима, у мањој или већој мери расклопити уређај да би се остварило подешавање. Дигитална калибрација, међутим, своди се на експериментално одређивање коефицијената карактеристике преноса израчунавањем на основу одговарајућег броја мерења. Ове вредности чувају се у меморији уређаја и узимају у обзир приликом сваког мерења. У начелу, конструктивно решење мерног уређаја може бити такво да су кола којима се генеришу референтне величине, које одређују константу инструмента, смештене на посебном модулу који се може једноставно заменити. Тиме се знатно поједностављују одржавање и верификација метролошких својстава. Интервенција на осталом делу уређаја (због квара) не утиче (или утиче у дозвољеним границама) на метролошке карактеристике мерила као целине.

Дигитална техника омогућује да се процес калибрације обави мање или више аутоматски. Тиме се постиже, не само једноставна елиминација ефекта старења, него и превентива од могућег отказивања инструмента током експеримента. Наиме, уколико се приликом калибрације покаже да су промене вредности коефицијената изван граница нормалних одступања, корисник се може упозорити на потенцијалну опасност од квара уређаја. У случају да су одступања већа од дозвољених граница, тако да се не могу аутоматски кориговати са задовољавајућом тачношћу, може се на одговарајући начин сигнализирати потреба за стручном интервенцијом (сервисирањем).

Развој вишенаменских мерних инструмената (мултиметара) представља карактеристичан пример процеса трансформације техничких средстава која се користе при мерењима. Од деликатних аналогних инструмената скромне тачности, ова врста уређаја прерасла је у богату фамилију дигиталних инструмената која на једном свом крају обухвата преносиве (ручне) уређаје, а на другом лабораторијске инструменте врхунских перформанси. Њихова је еволуција тесно испреплетана са развојем технологије електронских компонената. Након продора у област високе тачности, оствареног применом интегрисаних мерних склопова, уследио је развој у правцу освајања процесне моћи. Мерни уређаји преузимају низ операција постаквизиционе обраде мерних података. Меморисање резултата, одређивање средње вредности, елиминација систематских грешака, контрола граничних вредности и слична обрада постају функције инструмената заснованих на примени микропроцесора. У оба ова правца, међутим, практично су достигнуте границе ширења. Мерна несигурност са којом врхунски комерцијални инструменти мере једносмерни напон је свега неколико *ppm*[7], што је веома близу мерне несигурности са којом је, не тако давно, јединица електричног напона била дефинисана у неким националним лабораторијама. На другом крају, могућност аутоматског извршавања комплексне мерне процедуре и/или разноврсне обраде мерних резултата подразумева другачије руковање инструментом. На слици 9.17. приказан је изглед командне плоче једног вишенаменског програмабилног мерног инструмента.




Слика 9.17. Вишенаменски дигитални мерни систем[8]

[7] Од лат. *pars-per-milion, ppm* = $1 \cdot 10^{-6}$.
[8] *Copyright October 2011 Agillent Technologies Inc. Reproduced with permission*.

Упркос великом броју функционалних тастера чији називи указују, мање или више успешно, на функцију коју обављају, потпуније искоришћавање разноврсних могућности овог инструмента захтева добро познавање низа процедура које треба применити приликом дефинисања његове функције. На пример, да би се остварило прецизно мерење једносмерног напона са резолуцијом која одговара приказу са 6 цифара, а уз максимално слабљење утицаја индукованих сметњи, што се постиже усредњавањем (интеграцијом) улазне величине током 100 периода наизменичног напона којим се уређај напаја, потребно је да се преко тастатуре иструмента *hp*3456A зада секвенца наредби приказана у табели 9.1.

| ТАСТЕР | ФУНКЦИЈА | ДИСПЛЕЈ |
|---|---|---|
| **1** | Уношење прве цифре вредности интервала интеграције | **1** |
| **0** | Уношење друге цифре вредности интервала интеграције | **10** |
| **0** | Уношење треће цифре вредности интервала интеграције | **100** |
| **STORE** | Прелиминарна команда уписа унетог податка у регистар који ће бити изабран следећом акцијом | |
| **N CYC INT** | Унети податак (100) смешта се у регистар који дефинише интервал интеграције | |
| **6** | Уношење броја цифара приказа | **6** |
| **STORE** | Прелиминарна команда уписа унетог податка у регистар који ће бити изабран следећом акцијом | |
| **N DIG DISP** | Унети податак (6) смешта се у регистар који дефинише резолуцију приказа | |

Табела 9.1. Програмирање трајања мерног интервала и резолуције приказа

Резултат мерења може да буде приказан у децибелима (dB), релативно у односу на изабрани ниво, на пример 10 V. Да би се то остварило потребно је задати низ наредби приказаних у табели 9.2.

| ТАСТЕР | ФУНКЦИЈА | ДИСПЛЕЈ |
|---|---|---|
| **1** | Уношење прве цифре референтне вредности | **1** |
| **0** | Уношење друге цифре референтне вредности | **10** |
| **STORE** | Прелиминарна команда уписа унетог податка у регистар који ће бити изабран следећом акцијом | |
| **Y** | Податак "10" се смешта регистар Y | |
| **MATH** | Прелиминарна команда задавања математичке функције | |
| **20 LOG X/Y** | Израчунавање вредности измереног напона (величина X) у dB релативно у односу на задату референтну вредност Y | |

Табела 9.2. Програмирање мерне функције вишенаменског мерног инструмента

Избор меморијског регистара у који се смештају унети подаци врши се преко нумеричке тастатуре која, осим тога, служи и за задавање математичких операција. Тако се регистар *N CYC DISP* бира притиском на тастер "9", регистар *N CYC INT* - притиском на тастер *CHS*, који се нормално користи за промену предзнака броја уписаног преко тастатуре, а функција *20LOG X/Y* притиском на тастер "9" непосредно након притиска на тастер

*MATH*. У случају задавања погрешне команде на дисплеју се исписује порука *"E N"* где је *N* број од 1 до 6 који представља код откривене грешке, чије је значење дато у документацији коју произвођач испоручује уз уређај.

Очигледно је да програмабилност, која несумњиво доприноси квалитету мерног уређаја, омогућујући флексибилност и универзалност примене, имплицира проблем руковања таквим уређајем. Код мерних инструмената за вишеструку намену постоји потреба за веома богатим "дијалогом" корисник - мерни систем, који треба да омогући постављање разноврсних захтева од стране руковаоца. Ефикасан дијалог, међутим, подразумева и нужност "уградње" контролних функција, као што су синтаксна и семантичка анализа, чиме се проблем још више усложњава. Софистицирани дијалог превазилази могућности класичног решења са дисплејем и функционалном тастатуром на самом инструменту. У настојању да се реши проблем спреге између вишефункцијских програмабилних инструмената и корисника развијени су специјализовани уређаји (контролери) који омогућују програмирање фамилије мерних инструмената. Када функције контролног уређаја обавља рачунар опште намене, корисник може да, посредством одговарајуће спреге, на много погоднији начин остварује "дијалог" са разноврсним инструментима.

## 9.3 ПРОГРАМАБИЛНИ МЕРНИ СИСТЕМИ

Програмабилност је веома значајно својство уређаја опште намене. Примена електронике омогућила је трансформацију мерних средстава од специјализованих направа које се употребљавају за мерење одређене величине и у одређеним условима, у мање или више аутоматизоване системе који остварују задату процедуру добијања мерне информације. Функције као што су бирање одређеног поступка из (све већег) скупа могућих, као и задавање конкретних параметара сложеног система захтева софистицирана решења спреге између корисника и система (*human mashine interface, HMI*). Дистрибуцијом интелигенције унутар рачунарски вођеног система за аквизицију мерних података постижу се значајна побољшања перформанси система у целини и омогућује реализација функција које је тешко, или чак немогуће, остварити коришћењем конвенционалних техника.

Према алгоритму рада, мерна средства се могу сврстати у три групе:

- системи са непроменљивим (унапред задатим) алгоритмом функционисања,
- програмабилни мерни системи,
- адаптивни мерни системи.

У прву групу спадају системи помоћу којих се посматрају (прате) процеси који се одвијају у одређеном режиму. Код програмабилних мерних система алгоритам рада се мења у складу са раније задатим програмом, који се обликује у зависности од особености функционисања посматраног објекта. Адаптивни мерни системи омогућују да се и алгоритам рада и структура мерног система усаглашавају са променама мерених величина и услова рада посматраног објекта, што у истраживачким лабораторијама олакшава

испитивање разноврсних процеса који се разликују по својим карактеристикама.

По правилу, програми развијени за тачно одређену намену обављају постављени задатак максимално ефикасно, како у погледу функција тако и у погледу спреге са корисником (понуђени мени, на пример, не омогућује друге изборе осим предвиђених). Било каква накнадна промена, међутим, захтева интервенцију која заправо представља допуну развоја. Програмски пакети засновани на некој врсти програмског језика представљају много флексибилније окружење за развој које омогућује кориснику да сам одреди које активности се обављају у одређеним ситуацијама. Такав систем може да извршава тачно оно што корисник жели, и може се мењати у складу са новим захтевима.

Брзина којом се подаци обрађују представља један од најзначајнијих параметара перформанси. У основи, то је сложена величина чије су компоненте:

- брзина прикупљања (аквизиције) и складиштења (меморисања) података,
- брзина обраде (анализирања) података,
- брзина приказа података у графичком облику (постаквизиционо или током процеса мерења, у реалном времену),
- могућност и ефикасност обављања контролних функција.

"Спори" системи омогућују прикупљање података брзином од неколико стотина узорака у секунди. У општем случају, систем је утолико спорији уколико је боље заштићен од нерегуларних режима рада. Специјализовани програми, развијени за одређену примену, обично у погледу брзине превазилазе програмске пакете опште намене. У њима су избегнуте разне генерализације које успоравају рад, а могућности употребљеног хардвера су боље искоришћене.

У целини посматрано, може се рећи да се на једном крају мноштва савремених мерно-рачунарских система налазе једноставни за примену, крути и спори, а на другом крају компликовани, флексибилни и брзи системи. Уколико је систем лакши за коришћење, утолико је више крут и ради спорије, јер програм мора да обави велики број провера са циљем откривања грешака, како би се обезбедило да систем поуздано ради у мноштву варијација радних режима. Програмерски оријентисани софтверски алати, на другом крају спектра, омогућују да се избегну провере које немају оправдање у конкретном случају, програм прилагоди корисничком хардверу и примени било који контролни алгоритам.

Спрезање персоналних рачунара и мерних инструмената отвара практичан и економичан пут за програмирање и обављање разноврсних поступака испитивања, анализу и поређење података, чување (архивирање) резултата и издавање штампаних извештаја са измереним и израчунатим вредностима. Заједно са ефикасном софтверском подршком разноврсним

потребама корисника, савремени рачунари и програмабилни инструменти обезбеђују оптимално решење за велики број специфичних мерних и рачунарских задатака.

# ЛИТЕРАТУРА


1 *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and asotiated terms (VIM), 2007*.

2 Мерни претварачи и суматори, Здружена електропривреда, Техничка препорука ТП-17, 1984.

3 *IEC 870-3, Telecontrol equipment and systems, Part 3, Interfaces (electrical characteristics)* , 1989.

4 *P.Bošnjaković, B. Đokić, A high performance microcontroller-based analog signal conditioning system, Mini and microcomputers and their applications, ISMM, 1990, Proceedings, pp* 176-179.

5 П. Бошњаковић, М. Бибић, В. Вучуревић, Мерни претварачи у електропривреди Србије, CIGRE, 2007.

6 *M. Steyaert, W. Sansen, Low-Power Monolithic Signal-Conditioning System, IEEE J. Solid-State Circuits, ol. SC-25. no. 2, pp. 609-612, apr* 1990.

7 *A.W. Herwaarden, R.F.Wolffenbuttel, Introduction to sensors compatible with microprocessors, Microprocessora and Microsystems, Vol 14. No 2., March 1990, pp 74-82*.

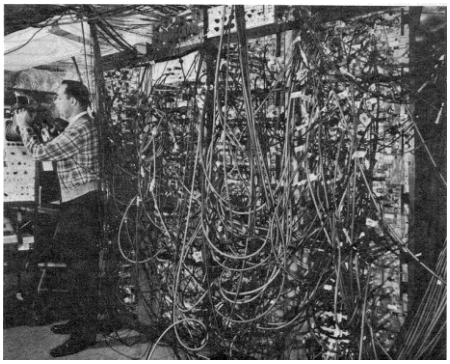
8 *Intelligent Differential Pressure Transmitter with Multiple Sensor Formed on a (110)-Oriented Circular Silicon Diaphragm, IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol 38. no 5.,1991, pp 379-384*.

9 *E.Nash, Using the AD771x Family of 24-Bit Sigma-Delta A/D Converters, Analog Devices Application Note, AN-406*.

10 *P.Bošnjaković, B. Đokić, S.Krainčanić, M.Dohčević,Programabilni kondicioneri analognih signala, JUREMA 35, 1990, Dvanaesto savjetovanje o merenju, Zbornik radova, 2. sveska, s. 1 - 4*.

# 10.
# ИНТЕРФЕЈСНИ СИСТЕМИ У МЕРНОЈ ТЕХНИЦИ

Традиционални приступ спрезању лабораторијских и индустријских мерних инструмената заснивао се на решавању проблема повезивања са становишта оптимизације конструкције, али и економичности производње самих уређаја. Спрега се заснивала на мањем или већем броју сигналних линија преко којих су преношене једноставне наредбе, мерни подаци или подаци који описују стање инструмента, карактеристични за сваки конкретни уређај. Иако је на тај начин поједностављен поступак повезивања појединачних уређаја, лавина проблема је настајала када је било потребно да више инструмената повезаних у систем саобраћа међусобно. Усаглашавање нивоа сигнала, логичких конвенција, кодова[1], формата података и правила комуницирања намеће потребу за разноврсним адаптерима, најчешће развијаним у складу са специфичним захтевима конфигурације. Ситуација је постала још сложенија са увођењем програмабилних инструмената који су захтевали далеко већи број сигналних линија (50 до 100) због чега је спрезање и малог броја инструмената постало компликовано, а при образовању вишеканалних мерних система у истраживачким лабораторијама стварало врло велике тешкоће.



Мерни систем у лабораторији за нуклеарну технику 1963. године

Карактеристично обележје инструментационих мерних система је велика разноврсност у погледу комуникационих захтева појединих уређаја. Врло често, за већи број инструмената у систему не постоји потреба међусобне комуникације. Док поједини уређаји дуго времена раде у непромењеном режиму, други захтевају релативно често репрограмирање. Несумњиво је да су захтеви који спрежни систем треба да испуни врло сложени, при чему решење мора бити и економично и погодно за примену у уређајима разноврсне намене.

Већ крајем 60-тих година двадесетог века, велики произвођачи разноврсне електронске опреме, асоцијације произвођача, националне и

---

[1] Правила која дефинишу једнозначну коресподенцију између информације и њеног приказа помоћу знакова, симбола или елемената сигнала. У ужем смислу, однос између две групе знакова.

међународне техничке институције започели су интензивно да се баве проблемом стандардизације. Започела је активност на типизацији функционалних блокова у погледу електричних, логичких и конструктивних параметара, која би омогућила њихово обједињавање у системе чије функционисање може бити аутоматизовано. Као резултат појавио се низ препорука које се односе на унификацију функционалних блокова у одређеној области. Ови документи прописују свеукупност услова који обезбеђују могућност повезивања компонената једног система у разноврсне структуре и садрже детаљне механичке, електричне и функционалне спецификације.

Развијен је велики број система, мање или више специфичне намене, за спрезање функционалних блокова и модула сложених уређаја и система. Након усвајања стандарда[2] за пренос података, чиме је омогућено повезивање разноврсних мерних, региструјућих и управљачких уређаја у системе за надзор и управљање сложеним процесима, уследио је, као неизбежна последица широког прихватања концепције модуларне структуре електронске опреме, процес стандардизације међувеза појединих функционалних модула. На тај начин стварали су се услови да сваки корисник има што је могуће већу слободу при интеграцији[3] одређеног система и дефинисању структуре која је максимално прилагођена конкретним условима, потребама и могућностима. У складу са том општом тенденцијом, настали су и међународни стандарди за интерфејс мерних модула и уређаја. Први такав документ у области мерне технике појавио се још 1969. године, као резултат настојања да се превазиђу проблеми реализације комплексних мерних система у области нуклеарне технике. Отприлике у исто време, проблеми међусобног повезивања програмабилних инструмената различитих произвођача наметнули су потребу за стандардизацијом инструментационе комуникације. Међународне организације *IEC*[4] и *IEEE*[5] покренуле су припрему стандарда за спрегу дигиталних програмабилних инструмената и њихових контролера. Као основа послужио је концепт који је крајем шездесетих година развила фирма *Hewlett-Packard* за повезивање инструмената из своје производне линије са рачунарима сопствене производње. Нимало једноставан задатак обједињавања широког спектра уређаја, од читача бушених картица до минирачунара, завршен је усвајањем *IEEE* стандарда за инструментациону комуникацију који садржи детаљне механичке, електричне и функционалне спецификације. Овај документ послужио је као основа за доношење других, у врло великој мери усаглашених стандарда *ANSI*[6], *IEC* и *ГОСТ*[7].

Прихватањем стандарда за спрезање мерних уређаја одстрањени су бројни проблеми повезивања неусаглашених улаза и излаза различитих

---

2 Стандард је јавни документ којим се утврђују правила, захтеви, карактеристике, упутства, препоруке или смернице за одређене активности или њихове резултате.

3 Под "интеграцијом" се овде подразумева спајање, организовање неких делова (елемената) у целину која повезано (складно) делује.

4 Међународна електротехничка комисија (*International Electrotechnical Commission, IEC*).

5 *IEEE = Institute of Electrical and Electronic Engineers*.

6 *ANSI = American National Standards Institute*.

7 *ГОСТ = Государственый стандарт*.

инструмената. Пре њиховог усвајања на међународном нивоу већина произвођача инструментационе опреме нудила је сопствена решења међувеза. То је стварало многобројне тешкоће при обједињавању рада више инструмената различитих произвођача, што је постајао све чешћи случај не само у истраживачким лабораторијама и научним центрима, него и у аутоматизованим системима за управљање процесима. Примена стандардизованог и међународно прихваћеног начина спрезања поједностављује проблем који представља реализација спреге разноврсних мерних инструмената, што кориснику омогућује да се максимално концентрише на конципирање и реализацију алгоритма аутоматизованог процеса мерења и обраде мерних података. Популарност стандарда настала је управо због тога што су у потпуности и прецизно специфицирани сви детаљи спреге: електрични, механички, начин преноса података и правила комуницирања. Ипак, стандардизацијом је, бар што се мерне технике тиче, само дефинисан оквир у којем сваки корисник “креира” своју слику конкретног система.

Дефинисањем активних и пасивних елемената спреге између процесорских модула, рачунара и периферијских јединица (терминала), стандарди за пренос података омогућују комбиновање различитих уређаја при реализацији система, а тиме брже, економичније и ефикасније решавање проблема надзора и управљања процесима. Стандарди се дефинишу у складу са могућностима технологије, усавршавају се и мењају у складу са њеним развојем, проширујући могућности нових генерација техничких система. У основној верзији стандарда за интерфејс програмабилних мерних инструмената, на пример, регулисане су пре свега електричне карактеристике спреге између контролног уређаја који управља радом система и прикључених инструмената. Следећи корак био је усмерен ка стандардизацији језика којим се програмира рад уређаја у систему.

Стандардизација не само да је олакшала корисницима повезивање уређаја, него и произвођачима опреме њихову реализацију - на тржишту постоје типизиране механичке компоненете (кућишта, конектори), као и читав низ интегрисаних електронских кола која омогућују генерисање и прихватање електричних сигнала у складу са захтевима појединих стандарда. Проблем обједињавања мерних модула и инструмената не може бити решен на задовољавајући начин без јасно дефинисаног концепта спрезања и рационалног прилагођавања тог концепта савременом техничком окружењу. То захтева мултидисциплинарни приступ решавању постављеног задатка.

У овом поглављу разматрају се основни појмови који се односе на стандардизацију спреге различитих уређаја. Приказана је класификација интерфејса, а у кратким цртама обрађени су поступци преноса података. Посебна пажња посвећена је спрезању програмабилних мерних инструмената.

# 10.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Под интерфејсом (*interface*) се подразумева граница, у смислу споја, спреге између система или делова система, преко које се информације

преносе. Светлосни индикатори, прекидачи и тастери командне табле, некад, а тастатура, миш и екран, данас, представљају примере спреге помоћу које се остварује размена информација између корисника и рачунарског система, односно интерфејс између људског бића и машине (*human mashine interface - HMI*). У *SCADA*-системима подаци о стању процеса добијају се посредством одговарајућег процесног интерфејса који може бити аналогни (сензори, кондиционери, мерни претварачи), дигитални (комбинациона и секвенцијална логичка кола, оптоелектронски елементи) или мешовити (селектори и аналогно-дигитални претварачи). Посредством командног интерфејса (електромеханички и полупроводнички прекидачи) остварује се управљање процесом (на пример енергетском мрежом и потрошачима који се из ње напајају). Комуникациони интерфејс обезбеђује даљински пренос података посредством расположивих линија везе које омогућују пренос информација.

Електрични и механички елементи потребни за остваривање међусобног спрезања унутар скупа уређаја образују **интерфејсни систем**. Уобичајено је, међутим, да се и целокупни спрежни систем, који обухвата не само каблове, конекторе, дигитална и аналогна улазна и излазна кола, него и спецификације сигналних линија, електричних и временских параметара, назива интерфејсом. У ширем смислу, под појмом интерфејс се подразумевају и програми којима се остварује одговарајући дијалог.

**Стандардни интерфејс** је свеукупност усаглашених и унифицираних хардверских, програмских и конструктивних средстава, неопходних за остваривање алгоритма узајамног деловања различитих функционалних блокова[8], модула и система за аутоматску обраду података различитог облика, при стандардом прописаним условима који обезбеђују информациону, електричну и конструктивну усаглашеност[9] ових блокова. У оквиру стандарда разматрају се сви облици међусобне спреге функционалних делова унутар система, односно између система као целина (слика 10.1). Стандардом се дефинишу:

- **информациона усаглашеност** (улаз и излаз информације);
- **енергетска усаглашеност** (спрега са извором за напајање),
- **конструктивна усаглашеност** (конструкција и распоред функционалних елемената и блокова).

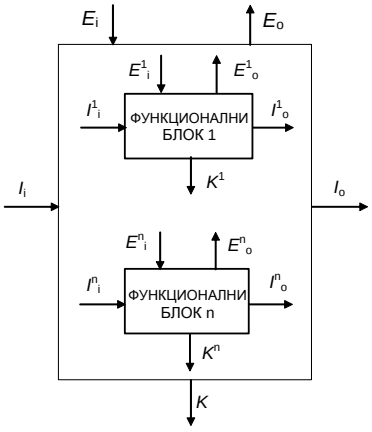
Електронски уређај може да се посматра и као уређај за аутоматску обраду информација. Стога информациона усаглашеност представља неопходан предуслов за образовање сложених система чији делови, у општем случају, могу бити спрегнути и без енергетског и конструктивног обједињавања. У начелу, две основне врсте сигнала су присутне у интерфејсу: дигитални и аналогни. Дигитални подаци могу проћи интерфејс у паралелном или серијском облику. Аналогне величине су приказане струјним

---

[8] Функционални блок је свеукупност компонената, електрично и конструктивно обједињених у целину помоћу које се у електронском систему може реализовати одређена функција. Функционални модул представља сложен функционални блок, образован од више простих функционалних блокова.

[9] Компатибилност (од лат. *compatibillitas*, сагласност).

или напонским сигналима чији карактеристични параметар (интензитет, амплитуда, учестаност, фаза, трајање) може имати било коју вредност унутар дефинисаног опсега.




i = улаз (*input*), *o* = излаз (*output*)

Слика 10.1. Информационе (*I*), енергетске (*E*) и конструктивне (*K*) међувезе функционалних блокова и система

У информационом погледу, функционални делови система (блокови) су међусобно повезани сигналима који се могу поделити на:

- информационе (у ужем смислу),
- управљачке,
- адресне,
- специјалне.

**Информациони сигнали** садрже информацију о објекту, односно о процесу, или намењену за пренос објекту. У *SCADA*-систему, то су, на пример, информације о мереној величини, односно подаци о резултату мерења (бројна вредност и мерна јединица), времену мерења и/или о резултату обраде измерене величине.

**Управљачки сигнали** обезбеђују припрему, започињање и остваривање операција у функционалном блоку, као и извештај о њиховом извршавању. Овде спадају и сигнали који утичу на функционално стање блока, односно програм његовог функционисања. На пример, дефинишу мерни опсег, граничне вредности и слично. Могу се поделити на улазне, командне сигнале који улазе у функционални блок, и излазне сигнале, које тај блок генерише.

**Адресни сигнали** омогућују успостављање комуникације између централног управљачког блока система и одређеног функционалног блока.

**Специјални сигнали** имају посебну улогу у раду система као целине. Овде спадају тактни сигнали који обезбеђују јединствену временску базу за извршавање појединих операција (синхронизациони ритмови), као и сигнали прекида (*interrupt*) којима се сигнализује да процесорска јединица треба да

прекине са извршавањем текућег програма и обави одређену активност вишег приоритета, на пример, из излазног регистра периферијског уређаја (јединице) очита податак (вредност променљиве величине). У рачунарској техници уобичајено је да се ови сигнали сврставају у групу управљачких сигнала.

Зависно од начина рада, поједини функционални блокови могу да обрађују само неке од наведених сигнала. Скуп сигналних линија које повезују поједине делове дигиталног система са циљем преноса електричних сигнала одређеног типа назива се **магистрала** или **сабирница** (*bus, highway*). Према намени могу се разликовати: магистрала података (*data bus*), адресна магистрала (*address bus*) и управљачка магистрала (*control bus*). Скуп правила за пренос података између било која два дела система се назива **протокол**.

Стандардом се прецизно дефинишу електрични и логички услови којима се обезбеђује информациона усаглашеност. Електрични услови за дигиталне сигнале одређују вредности логичких нивоа, оптеретни фактор[10] улазних и побудну способност[11] излазних кола, временске карактеристике (*timing*), као и допуштену дужину линија везе. Електрични услови за аналогне сигнале обухватају: опсег напона (струје), улазну и излазну отпорност (импендансу), време одзива, фреквенцијску карактеристику и слично. Логички услови обухватају врсту и број сигнала, начин кодовања, називе и дејство сигнала.

**Енергетска усаглашеност** омогућује напајање компонената система (функционалних блокова) енергијом. Поједини блокови могу узимати енергију потребну за рад из нисконапонске енергетске мреже, сопствене батерије или из централног блока за напајање у којем се, на основу електричне енергије добијене из мреже или батерије, генеришу радни напони неопходни за функционисање свих блокова система. Преко линија (водова) за напајање којима се напон напајања разводи до појединих блокова, сви делови система су повезани у једну целину, чак и онда када између њих не постоји информациона веза. Зависно од начина рада, поједини блокови могу користити само неке од расположивих напона. Стандардом се дефинишу начин напајања (из мреже, батерије, централизованог блока за напајање), вредности напона напајања, допуштене границе одступања, као и допуштено струјно оптерећење.

**Конструктивна усаглашеност** омогућује међусобно механичко спајање појединих делова у физичку целину (уређај). Прописују се димензије блокова и начин њиховог конструктивног обједињавања. Елементи за електрично повезивање, њихов распоред као и начин спајања блокова (вишежилни кабл, коаксијални кабл итд.) дефинишу се у склопу услова којима се прописује информациона односно енергетска усаглашеност.

---

[10] Фактор назívног оптерећења улаза (*fan-in*). ЈУС Л.Н4.013.
[11] Фактор назívног оптерећења излаза, пирамидални фактор (*fan-out*).

Број нормализованих параметара спрезања, степен образлагања информационих веза и јединство конструктивних решења одређују ниво стандардизације одређеног типа спреге, који се у великој мери одражава на техно-економски ефект примене и домен распрострањености. Висок степен стандардизације обезбеђује економичније увођење у примену, као и могућност једновременог коришћења разноврсних уређаја који припадају различитим технолошким и/или концепцијским генерацијама творевина мерно-информационе и рачунарске технике. Стандардима су обухваћени не само елементи и компоненте мерних (техничких) система и начин њиховог повезивања, него и критеријуми за оцену перформанси, као и методе испитивања.

## 10.2 КЛАСИФИКАЦИЈЕ ИНТЕРФЕЈСА

С обзиром на интердисциплинарни карактер области, постоји низ критеријума на којима класификација интерфејса може да буде заснована. Са становишта конфигурације мреже, коју образују делови сложеног система, могу се извојити три основне тополошке[12] форме (слика 10.2):

- каскадна,
- радијална и
- магистрална.

**Каскадна конфигурација**[13] се одликује минималним бројем линија везе у систему. Првобитно је представљала основни облик спрезања функционалних блокова у мерној и регулационој техници. Везе се остварују непосредно, од једног блока другом, па адресовање блокова није неопходно (слика 10.2.а). Овакав начин спреге омогућује лако надограђивање система додатним функционалним блоковима, али је неподесан за реализацију програмабилних система. Користи се за развођење напајања, али и аналогних и дигиталних сигнала.

**Радијална (звездаста) конфигурација**[14] омогућује бржи проток информација које се преносе непосредно између централне (контролне) јединице и одређеног функционалног блока (слика 10.2.б). Адресирање блокова није неопходно, али је непосредна размена информација између појединих блокова онемогућена. Сложеност интерфејса контролне јединице у систему са звездастом конфигурацијом расте сразмерно броју функционалних блокова обухваћених системом, па је оваква конфигурација ограничена у погледу капацитета система.

Развој микропроцесорске технологије је омогућио дистрибуцију "интелигенције" контролне јединице на поједине блокове система, па

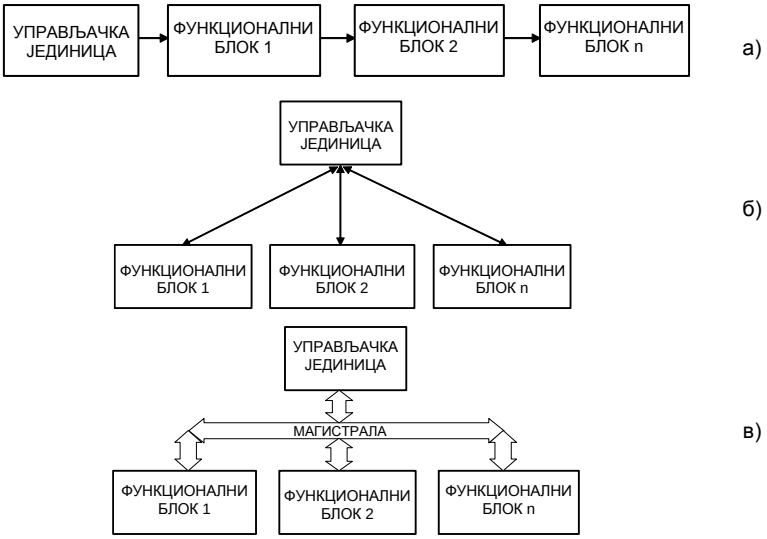
---

[12] Топологија је област математике која се бави својствима геометријских фигура, посматраних као скупова тачака, која се не мењају при еластичним деформацијама (од грч. *tópos* место, *logía наука*). Деформације не доводе до расецања нити слепљивања фигуре.

[13] Овакав облик везе назива се “*daisy chain*”. Затворена петља се не сматра да спада у ову везу.

[14] Овакав облик везе назива се "*multiple point-to-point*".

**магистрална конфигурација**[15] доминира у савременим уређајима. Посредством одговарајућих система сигналних линија (сабирница, магистрала) компоненте система повезане су са централном јединицом и међусобно (слика 10.2.в). Максимална брзина преноса се обезбеђује када се адресе, подаци и наредбе преносе паралелно, али је тада дужина сигналних линија ограничена. Магистрална конфигурација заснована на серијском преносу података примењује се у авиотехници и процесној индустрији, у случајевима када се подаци прикупљају са великог броја просторно раздвојених мерних места[16].




Слика 10.2. Основни тополошки облици спреге

Са становишта структуре самог система, разликују се три основне категорије:

- модулни интерфејс,
- инструментациони интерфејс и
- комуникациони интерфејс.

Модул је део система, јединица способна да изврши посебне функције у систему, коју је, посредством одговарајућег **модулног интерфејса**, могуће повезати или сложити са другим јединицама. За управљање производним процесима данас се примењују модуларни системи који се образују од специјализованих модула различите намене, предвиђених за уградњу у стандардизовано кућиште у којем се налази и извор за њихово напајање. Радом оваквог система управља одговарајућа централна процесорска јединица (*CPU*), односно надређени рачунар.

---

[15] Овакав облик везе назива се "*party-line*" или "*bus network*".

[16] Примењена је у ловачким авионима типа *F15* и бомбардерима *B1*, у системима за мерење температуре ускладиштених зрна житарица у силосима, као и у дистрибуираним управљачким системима у процесној индустрији.

**Инструментациони интерфејс** је развијен за потребе спрезања аутономних (мерних) инструмената и уређаја са циљем образовања сложених мерних система (инсталација). Због своје универзалне концепције, детаљно разрађене и међународно прихваћене спецификације, као и подршке произвођача интегрисаних електронских кола, најширу примену има стандардизовани интерфејс за спрегу програмабилних мерних инструмената заснован на магистралној структури везе[17] (*General Purpose Interface Bus - GPIB*). Интерактивна спрега омогућује пренос података брзином која одговара и најспоријем активном уређају који суделује у конкретном трансферу. Ова врста интерфејса се примењује у многим уређајима више стотина произвођача широм света, јер је постао типична опција инструмената свих већих произвођача мерне опреме. Првобитно намењен за међусобно спрезање аутономних дигиталних мерних инструмената, инструментациони интерфејс се, захваљујући флексибилној концепцији и сразмерно великој брзини преноса, показао погодним и за разне друге примене, као универзално средство посредством којег се повезују и конвенционалне периферијске јединице рачунарског система.

**Комуникациони интерфејс** у начелу, омогућује размену података између удаљених делова сложеног система. Управљање сложеним, географски дистрибуираним процесом, као што је, на пример, процес производње, преноса и дистрибуције електричне енергије, остварује се помоћу телеинформационог система тако што се управљачки центар система, преко расположивих линија везе[18] и одговарајућег интерфејса, повезује са периферијским јединицама[19]. Развој електронике омогућио је да се комуникациони интерфејс, саздан на основама технике даљинског преноса података, примењује и када растојања између предајника и пријемника нису велика, али постоје ограничења у погледу броја или карактеристика расположивих линија везе.

Описана подела интерфејса, иако тесно повезана са структуром система, односно расподелом његових функција на поједине делове које га сачињавају, само начелно одређује границе појединих типова, које у инжењерској пракси нису строго поштоване. На пример, поједини облици комуникационе спреге користе се и за повезивање рачунара, рачунарских периферија и мерних инструмената унутар једне просторије.

## 10.3 ПРЕНОС ПОДАТАКА

У дигиталним системима информације су приказане у бинарно-кодираном облику, у виду бројева коначне дужине. Спрега између појединих функционалних блокова остварује се линијама везе којима се прослеђују

---

[17] *IEC625/IEEE488*.

[18] Преносни пут (*link*) од периферијских уређаја до надзорног (управљачког) центра може да буде сопствена кабловска мрежа корисника, јавне телефонске линије, енергетска мрежа, радио-веза.

[19] У телеинформационим системима периферијске јединица се назива спољна, удаљена или крајња станица (*outstation, remote station*).

бинарни сигнали[20] који имају само два могућа стања. Пренос података (*data transfer*) између централне управљачке јединице и периферијских јединица дигиталног система може бити остварен серијски (бит по бит) или паралелно, у групама одређене дужине (бајт[21] по бајт).

**Серијски пренос података** се, по правилу, користи при комуникацији на великим растојањима, али и за повезивање рачунара са различитим периферијским уређајима (модем, миш, штампач,...), као и за међусобно повезивање рачунара. Синхрона серијска комуникација захтева посебан синхронизациони сигнал који одређује временску координату сваког бита који предајник (трансмитер) шаље. Она има предност у погледу брзине и поузданости преноса, али се због сложености користи првенствено за екстремно брзи серијски пренос података између рачунара. Асинхрона серијска комуникација подразумева предефинисано трајање појединих битова, одређено локалним генератором такта (*clock*).

Серијска комуникација представља основни облик размене информација када постоји ограничење у погледу броја расположивих линија везе. У мерној техници, серијска комуникација се користи у телеметријским системима за пренос мерних података из покретних, лебдећих или летећих објеката посредством радио-везе, као и за прикупљање мерних података у склопу система за даљински надзор и управљање сложеним, географски распрострањеним процесима у електропривреди, нафтној и хемијској индустрији, заснованих на жичној (кабловској) вези. Микропросецорска мерила која се користе у сврхе обрачуна (бројила електричне и топлотне енергије, мерила запремине протеклог флуида, ваге) такође омогућују локално и даљинско очитавање података посредством одговарајућег серијског интерфејса са електричном или оптичком спрегом.

**Паралелни пренос података** се остварује скупом линија везе (водова), које формирају магистралу (сабирницу), тако да је сваком појединачном биту податка који се преноси додељена посебна линија. Прави паралелни пренос се данас веома ретко користи. Најчешће се примењује комбиновани пренос: битови информације представљене у бинарном облику преносе се паралелно, а групе (речи) серијски (*byte-serial, bit-parallel*). Пренос сваке речи остварује се у току једног циклуса синхронизације.

При серијском преносу података користи се минималан број линија везе. Подаци су приказани у облику временског низа логичких јединица (*mark*) и логичких нула (*space*). На слици 10.3 дат је таласни облик сигнала којим се према међународном алфабету[22] знак (*character*) "*d*", приказује као бинарна

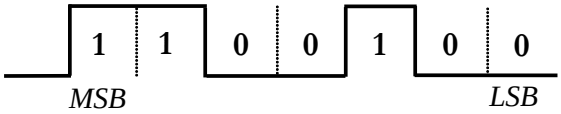
---

[20] Дискретизација сигнала који представљају континуалне поруке омогућује да се и оне могу преносити дискретним поступцима.

[21] Бајт (*byte*) је уређена група утврђеног броја битова која се образује као целина. Термин "бајт" без додатне спецификације користи се као синоним за скуп од осам битова, октет (*octet*).

[22] *ISO 7 bit code*, 7-битни бинарни код којим се, у складу међународним стандардима, приказују управљачки (контролни) и графички (слова, бројеви и неки специјални симболи) знаци при преносу података (*ISO/IEC* 646).

реч дужине 7 бита (септет). Ознака *MSB* представља бит највеће тежине (*Most Significant Bit*), а ознака *LSB* бит најмање тежине (*Least Significant Bit*).




Слика 10.3. Серијски приказ слова “*d*”

Узајамно усклађивање (координирање) рада уређаја који размењују податаке (*handshake*), омогућује поузданију размену информација. Координација може бити хардверска, заснована на додатним сигналним линијама, или програмска. Хардверска решења примењују се у случајевима када се предајник и пријемник података налазе у непосредној близини. Пренос података на велика растојања остварује се серијском комуникацијом са програмском контролом тока преноса у складу са усвојеним правилима комуникације. Скуп правила у складу са којима мора деловати комуникациони систем да би се комуникација остварила назива се протокол.

Брзина којом се подаци преносе представља средњи број битова, знакова или блокова који се преносе у јединици времена између одговарајућих уређаја у систему за пренос података. Специфицира се број бинарних симбола пренетих у једној секунди (*bit rate*). Стандардне вредности за мале брзине (*low rate*) су 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 14 400, 19 200, 32 000 и 56 000 bit/s.

У случајевима када постоји висок ниво сметњи које могу да утичу на поузданост комуникације или рад електронских кола, галванско раздвајање контролног, а посебно мерног блока, може бити неопходно[23]. У савременим уређајима овај проблем се решава применом компонената са оптоелектричном спрегом.

# 10.4 ИНТЕРФЕЈСИ ЗА СЕРИЈСКИ ПРЕНОС ПОДАТАКА

## 10.4.1 СТРУЈНА ПЕТЉА

Струјна петља (*current loop*) је комуникациони интерфејс у којем се као носилац сигнала користи електрична струја, а не напон. Првобитно намењен за директно побуђивање електромеханичког уређаја за даљинско штампање[24], овакав начин спрезања је, пре свега због своје једноставности и имуности на сметње, нашао примену за пренос података у разноврсним системима за надзор и управљање индустријским постројењима. У дигиталној струјној петљи, логичка вредност “1” (*mark*) представљена је одсуством

[23] У индустријским постројењима може постојати значајна разлика између потенцијала сигналних "маса" појединих уређаја.

[24] Телепринтер (*teletype*).

струје, док се логичка вредност “0” означава успостављањем струје у петљи (*space*).

Струјна петља се још увек користи у индустријским системима, када се не захтева велика брзина преноса, на растојањима до неколико километара[25], због значајно мање осетљивости на сметње, као и погодности за директну побуду елемената за оптичко спрезање (*opto coupler*). Више пријемника може да буде укључено у једну петљу. Примењује се и у аудио техници, као дигитални интерфејс за музичке системе (*musical instrument digital interface-MIDI*).



Најстарији типови електричних писаћих машина користили су струјни сигнал од 60 *mA*. Широка распрострањеност телепринтера *ASR33* фирме *Teletype Corporation*, у којем је примењен струјни сигнал од 20 *mA*, допринео је да у првим минирачунарима буде прихваћен овакав начин спрезања са периферијским уређајима. Прва генерација личних рачунара (*IBM XT*) садржала је, као стандардну опцију, интерфејсна кола за струјну петљу (*20 mA current loop interface*).

## 10.4.2 ИНТЕРФЕЈС RS-232

До скоро најраспрострањенији интерфејс за серијску комуникацију, увело је, пре више од пола века, америчко удружење произвођача електронске опреме *EIA*[26]. Овај стандард[27] за пренос података, усаглашен са *CCITT*[28] препоруком *V.24/V.28*, нашао је широку примену за непосредно повезивање разноврсних уређаја чија се међусобна комуникација може остварити серијским (синхроним или асинхроним) преносом бинарних података.

Након увођења, стандард *RS*-232 је претрпео више измена са циљем усаглашавања са потребама које су проистекле као последица унапређења перформанси дигиталних система (1969: *RS-232*-B, 1972: *RS-232-C* и 1986: *EIA-232-D*). Приликом ревизије 1990. године измењен је и префикс у ознаци, тако да садржи скраћенице назива организација *EIA* и *TIA*[29], које су га заједно установиле: *EIA/TIA-232-E*, односно *EIA/TIA-232-F*. Потреба за остваривањем већих брзина преноса, као и за компатибилношћу са електронским системима са напоном напајања од 3 V до 5 V, подстакла је развој посебног стандарда: *ANSI/EIA/TIA-562*.

Интерфејс *RS*-232 омогућује двосмерну комуникацију, при чему за сваки смер преноса података постоји посебна сигнална линија. Осим тога постоје и посебни сигнали који омогућују хардверску контролу тока преноса података (табела 10.1). Слика 10.4.а приказује начин повезивања терминалног уређаја

---

[25] Ограничење, с обзиром на вредност расположивог напона напајања петље, представља отпорност жичаних проводника којима се успоставља електрична веза са удаљеним уређајима.

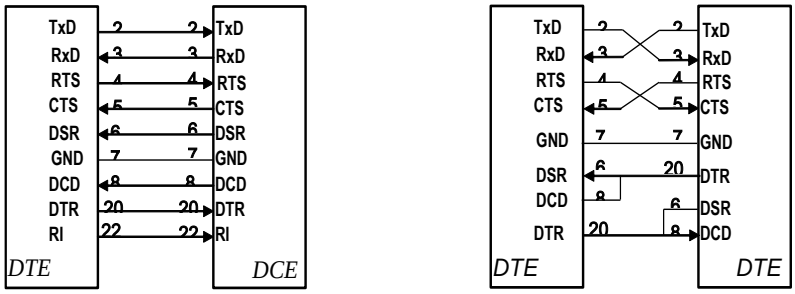
[26] *EIA = Electronic Industries Alliance*, основана 1924. године као *Radio Manufacturers Association*.

[27] *RS = Recommended Standard*.

[28] *CCITT = Comite Consultatif International Telephonique et Telegraphique*, међународни консултативни комитет за телефонију и телеграфију, основан 1954. године, спајањем комитета за телефонију (основан 1924) и телеграфију (основан 1925).

[29] *TIA = Telecommunications Industry Association* (основана 1988).

(*DTE*[30]), који представља део информационог система у оквиру којег се размењују подаци, и електричних кола односно склопова (*DCE*[31] ) преко којих се остварује повезивање са телекомуникационом мрежом. Слика 10.4.б приказује директно повезивање два уређаја која међусобно размењују поруке путем серијске везе.




Слика 10.4. Основни облици повезивања уређаја према стандарду *RS*-232

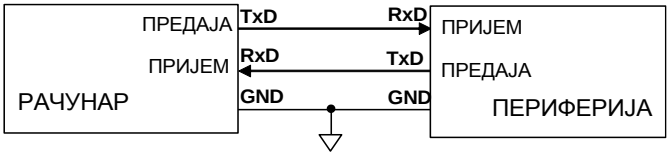
| сигнал | назив | значење |
|---|---|---|
| *RTS* | *Request To Send* | захтев за слањем података; сигнал којим уређај који треба да пошаље податке (предајник) означава да је спреман за предају |
| *CTS* | *Clear To Send* | одговор којим уређај који треба да прихвати или проследи податке означава да је спреман за преузимање података |
| *DTR* | *Data Terminal Ready* | сигнал којим предајни уређај (*DTE*) означава да је спреман за рад (прикључен на напон напајања) |
| *DSR* | *Data Set Ready* | сигнал којим уређај који треба да прихвати или проследи податке означава да је спреман за рад (прикључен на напон напајања) |
| *DCD* | *Data Carrier Detect* | сигнал којим блиски (локални) *DCE* уређај индицира да је успоставио везу са удаљеним *DCE* уређајем. |
| *TxD* | *Transmit Data* | подаци који се предају |
| *RxD* | *Receive Data* | подаци који се примају |

Табела 10.1. Сигнали интерфејса *RS*-232

У начелу, двосмерна серијска комуникација између централног уређаја (рачунара) и периферијског уређаја може бити остварена на најједноставнији начин са само две сигналне линије и линије за повезивање са масом (слика 10.5).

[30] *DTE = Data Terminal Equipment*, терминални (крајњи) уређај за податке, функционална јединица која служи као извор и пријемник података и обезбеђује да функције управљања преносом података буду извршене у складу са комуникационим протоколом.

[31] *DCE - Data Circuit-terminating Equipment; line coupler*, терминални уређај за пренос података који остварује спрегу *DTE* са колом за пренос података (*data circuit*) или комуникационим каналом између два или више *DTE* уређаја. У првобитном облику ова скраћеница је означавала *Data Communication Equipment*.

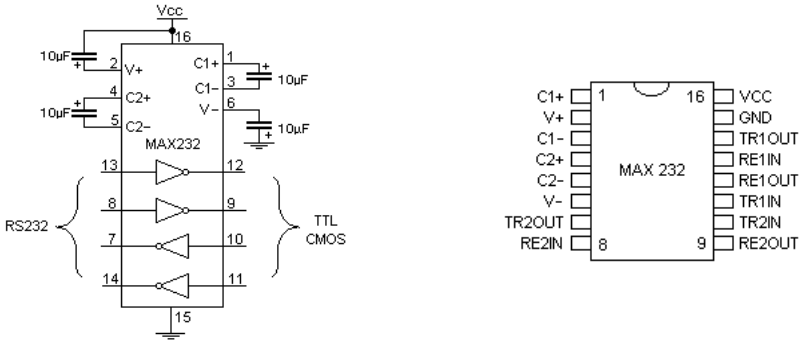



Слика 10.5. Најједноставнији облик двосмерне серијске комуникације

Настао у доба минирачунара, стандард *RS*-232 је заснован на биполарном напајању ±12 V, што омогућује сразмерно велику разлику потенцијала логичких нивоа, чиме се повећава имуност на сметње. Логичка јединица ("1") може бити представљена негативним напоном у опсегу од -3 V до -25 V, док је за логичку нулу ("0") могућ опсег напона од 3 V до 25 V (негативна логика). Међутим, микропроцесори и логичка кола која их окружују напајају се напоном +5 V или мањим, па се напајање улазно/излазних кола за серијску везу вршило преко енергетског претварача напона (*DC/DC* конвертора). У савременим професионалним уређајима примењују се специјализована интегрисана кола која обезбеђују сва потребна прилагођења. У почетку, стандардни конектор интерфејса је имао 25 прикључака, али се данас скоро искључиво користи конектор са девет прикључака.

Стандард *RS*-232 је иницијално ограничавао серијску комуникацију на растојања до 15 m и брзину преноса до 20 000 бита у секунди. У потоњим верзијама овог стандарда обухваћена су и нешто дужа растојања, уз услов да се користе каблови са малом подужном капацитивношћу. У пракси, на краћим растојањима могу да се користе и знатно веће брзине. Неки програми за пренос великог броја података између рачунара преко серијског порта[32] остварују брзине до 115 200 *bit/s*[33]. При малим брзинама, комуникација може успешно да се оствари и на већим растојањима (уз повећану вероватноћу настанка грешке при преносу).

За остваривање електричне спреге према *RS*-232 стандарду на располагању су интегрисана кола више произвођача која остварују спрегу између дигиталних кола за серијску комуникацију и линија везе за пренос података. На слици 10.6 приказано је коло *MAX232I*.




[32] Терминациони склоп преко којег сигнали улазе у уређај и/или излазе из уређаја (*port*).

[33] У телекомуникационој техници за исказивање брзине преноса података користи се јединица брзине модулације - бод (*baud*), која представља јединицу брзине преноса елемената константног трајања код дискретних или дигиталних сигнала. Број бода једнак је реципрочној вредности трајања (мереног у секундама) најкраћег сигналног елемента или јединичног интервала код таквог сигнала. У општем случају, један елемент (симбол) у поруци може у бинарној нотацији да буде представљен са више битова. При преносу података бинаром модулацијом важи: 1 *baud* = 1 *bit/s* (1 *bps*).

Слика 10.6. Интегрисани *RS*-232 интерфејс

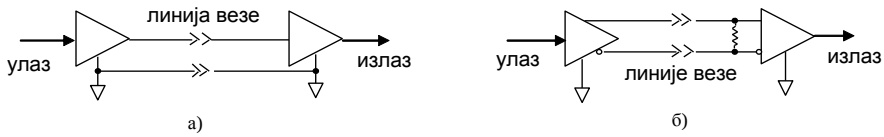
Коло садржи два линијска предајника (*line driver*), на чије излазе се прикључују линије везе за предају података, и два линијска пријемника (*line receiver*), на чије улазе се прикључују линије везе преко којих се примају подаци. Напаја се из једног извора једносмерног напона. Интерни *DC/DC* претварач омогућује добијање напона + *10 V* и – *10 V* за потребе дефинисање биполарних логичких нивоа према *RS*-232 стандарду. У табели 10.2. су приказане основне електричне карактеристике овог кола.

| Ознака | Опис | Јединица | *V*cc | min | типично | max |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_{OH}$ | Висок ниво напона на излазу | *V* | 5 | 5 | 7 | |
| $U_{OL}$ | Низак ниво напона на излазу | *V* | 5 | | -7 | -5 |
| $I_{OS}$ | Струја кратког споја на излазу | *mA* | 5,5 | | ±10 | |
| $r_I$ | Улазна отпорност пријемника | *kΩ* | 5 | 3 | 5 | 7 |
| $U_{IT+}$ | Улазни напон прага узлазне ивице | *V* | 5 | 1,7 | 2,4 | |
| $U_{IT-}$ | Улазни напон прага силазне ивице | *V* | 0,8 | 1,2 | | |
| $U_{CC}$ | Напон напајања | *V* | | | 5 | |
| $I_{CC}$ | Струја напајања | *mA* | 5,5 | | 8 | 10 |

Табела 10.2. Електричне карактеристике интегрисаног кола *MAX* 232

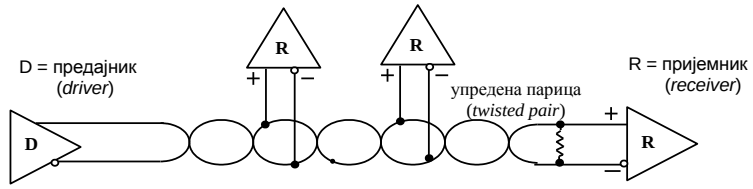
## 10.4.3 ИНТЕРФЕЈС RS-422

Сви сигнали *RS*-232 интерфејса дефинисани су у односу на заједнички потенцијал (сигналну "масу") пријемника и предајника (слика 10.7.а). Овакав несиметрични (*single-ended, unbalanced*) начин рада осетљив је на сметње, због чега су и наметнута ограничења у погледу растојања и брзине преноса података. Осетљивост на шум смањује се симетричном (балансираном) спрегом предајника и пријемника (*balanced, differential*). Сваки сигнал преноси се по две линије, као оригинал и комплемент (слика 10.7.б), а логичка вредност сигнала на пријемној страни одређује се на основу разлике потенцијала две линије. Сигнали сметњи које се једновремено индукују у водовима везе узајамно се поништавају.




Слика 10.7. Симетрични и несиметрични пренос података

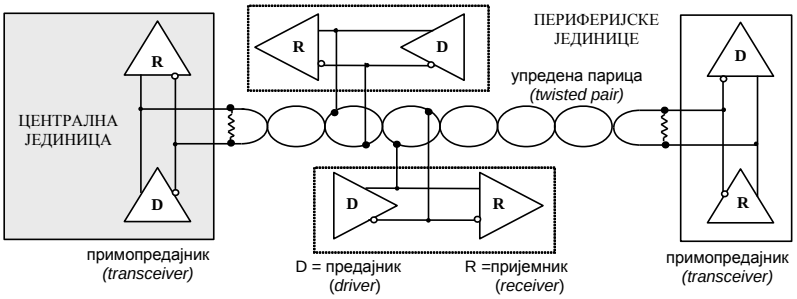
На овојом принципу заснован је *RS*-422 интерфејс, индустријска надградња *RS*-232 стандарда. Пројектован је тако да омогућује пренос података на растојања до 1200 m, брзином до 100 kbit/s. На растојањима до 10 m брзина преноса се може повећати до 10 Mbit/s. До 10 пријемника може бити истовремено прикључено на исту линију (слика 10.8).




Слика 10.8. Пренос података до више пријемника

## 10.4.4 ИНТЕРФЕЈС RS-485

Основни недостатак интерфејса *RS*-422 је немогућност једновременог прикључивања већег броја предајних јединица. Стандардом *EIA RS*-485 је дефинисан концепт који превазилази ово ограничење, тако да до 32 пара предајник-пријемник могу да буду прикључено на исту линију. Другим речима, већи број периферијских уређаја (као што су модем, штампач, терминал или спољна станица мерног информационог система) може да користи исти преносни пут (слика 10.9). Ревизијом *TIA/EIA-485-A* прецизирани су неки детаљи примене. Одговарајући еквивалент представља међународни стандард *ISO/IEC* 8482. Слично као и *RS*-422, стандард *RS*-485 омогућује пренос података на растојања до 1200 *m*, брзином до 100 *kbit/s*. На растојањима до 12 *m* брзина преноса се може повећати до 10 *Mbit/s*.




Слика 10.9. Магистрала *RS*-485

## 10.4.5 УНИВЕРЗАЛНА СЕРИЈСКА МАГИСТРАЛА USB

Универзална серијска магистрала (*universal serial bus - USB*) омогућује повезивање 127 периферијских јединица, откривање њиховог присуства на магистрали и аутоматску конфигурацију. Оперативни систем *Windows* подржава овај стандард који су прихватили многи произвођачи опреме. Због добрих особина, савремене концепције и велике пропусне моћи (12 *Mbit/*s, *USB* 1.1, односно 480 *Mbit/s*, *USB* 2.0) нашао је веома широку примену.

Комерцијално доступна интегрисана кола, као што је на пример *FT232BM* (*FTDI*), у себи садрже целокупну примопредајну јединицу у којој се обављају све функције потребне за асинхрону серијску комуникацију (*Universal asinchronous receiver transmitter-UART*). Тиме се процесор уређаја који шаље податке, или којем се подаци шаљу, растерећује од обављања функција као што су претварање из серијског у паралелни облик представљања података, додавање, односно провера бита парности итд.

## 10.4.6 МОДЕМ

У начелу, електрични сигнали се могу преносити на даљину и у свом изворном облику. Пренос у основном, природном, физичком опсегу учестаности технички је најједноставнији, али не и најефикаснији. Најчешће,

таласни облик носиоца информације по својој природи је неусаглашен са карактеристикама конкретне (расположиве) линије везе (канала). Да би се пренос информација кроз дати канал ефикасно остварио уводе се комплементарне операције: модулација и демодулација. Процес модулације је мењање неког параметра основног електромагнетског таласа, који се назива носећи талас (*carrier*), да би се добио (формирао) сигнал који се може ефикасно преносити. За даљински пренос информација обично се користе радиофреквенцијски сигнали, па је неопходно да се оригинална информација, процесом модулације[34], преслика у сигнал у вишем фреквенцијском опсегу.

Теоријски, избором одговарајућег модулационог метода, може се остварити максимална брзина преноса информација по јединици ширине пропусног опсега. Практично, карактеристике комуникационих система су у много ближој вези са развојем електронске технологије него са теоријским поставкама. Начелно, модулационе технике се могу груписати у аналогне методе, које користе синусни талас као носилац, и импулсне методе, које користе импулсни низ као носећи сигнал. Аналогне методе су, због своје једноставности, биле много коришћене у прошлости. У последње време, међутим, расту потребе за импулсним модулационим техникама и њихова се употреба све више шири.

Модулација је поступак којим се једном детерминистичком сигналу мењају неки од његових основних параметара у складу са карактеристичним величинама неког другог сигнала, тако да он постане носилац оригиналног, модулишућег сигнала, а самим тим и преношене поруке. Носилац модификован модулишућим сигналом назива се модулисани сигнал. Склоп који обавља модулацију, припрема информациони сигнал за пренос, назива се **модулатор**, а склоп којим се обавља демодулација (реконструкција) **демодулатор**. Модулатор и демодулатор, обједињени у целину, називају се заједничким именом: **модем**.

Код поступака у којима се добија континуални модулисани сигнал, као носилац се користи сигнал синусног таласног облика. У зависности од тога који се параметар мења сразмерно модулишућем сигналу разликују се: амплитудска (*amplitude modulation - AM*), фреквенцијска (*frequency modulation -FM*) и фазна модулација (phase modulation - PM). Код импулсне модулације

---

[34] Пренос порука радио-путем најбоље илуструје потребу за модулацијом (*modulation*). Предајник и пријемник нису повезани посебним физичким водом, већ се сигнал, као електромагнетни талас, преноси кроз средину која их окружује. Да би се пренос остварио околни простор мора бити побуђен одговарајућим зрачећим елементима, антенама, чије су физичке димензије одређене доњом граничном учестаношћу спектра сигнала који се преноси. За пренос сигнала ниских учестаности потребне су антене огромних димензија. Међутим, ако се сигналом који треба пренети модулише неки носилац чија је учестаност знатно виша, димензије антена постају технички и економски прихватљиве. Осим тога, модулацијом разних носилаца, тако да за сваки независни модулишући сигнал постоји посебан носилац, омогућује се истовремени пренос независних порука. Ово својство користи се и у везама које се остварују посредством физичких водова. Применом мултиплексних или вишеканалних модулационих система преноса са фреквенцијском и временском расподелом канала, постиже се знатна уштеда у водовима. Модулацијом се може постићи и боља заштита преношеног сигнала од утицаја сметњи у виду шумова.

као носилац се користи периодична поворка импулса. У зависности од тога који параметар импулса се мења сразмерно модулишућем сигналу разликују се импулсна амплитудска (*pulse amplitude modulation - PAM*), импулсна ширинска (*pulse duration modulation - PDM*) и импулсна положајна модулација. Посебан облик је импулсна кодна модулација (*pulse code modulation - PCM*) код које је податак приказан групом импулса у складу са усвојеним кодом.

У системима за пренос података се користи дигитална модулација синусног носиоца. **Фреквенцијска дигитална модулација** је облик фреквенцијске модулације код које модулишући сигнал мења излазну учестаност на унапред одређене вредности, а излазни таласни облик нема фазних дисконтинуитета. При малим брзинама преноса поступак фреквенцијског помераја представља најекономичније решење. **Фазна дискретна модулација** је угаона модулација код које је свако значајно стање дискретног модулишућег сигнала представљено помоћу специфициране фазе периодичног синусног сигнала[35].

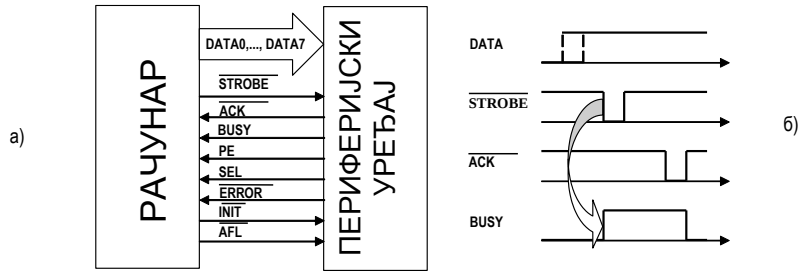
Савремени модемски уређаји представљају мање или више аутономне периферијске јединице којима се програмски управља. Производе се интегрисана кола која обављају све функције модема.

## 10.5 ИНТЕРФЕЈСИ ЗА ПАРАЛЕЛНИ ПРЕНОС ПОДАТАКА

Прави паралелни пренос података примењује се за спрезања модула у оквиру рачунарског уређаја као конструктивне целине, у случајевима када је брзина обраде од примарног значаја. При преносу података између рачунара и периферијских уређаја који представљају аутономне целине, потребан број линија везе се смањује тако што се подаци организују у групе битова који се преносе паралелно, док се поједине групе преносе серијски, на унапред утврђен начин. Првобитно намењена за спрезање штампача са рачунарима, оваква "паралелна" спрега широко се примењује за остваривање комуникације са различитим врстама периферијских уређаја. У мерној техници користи се за повезивање мерних инструмената са региструјућим уређајима.

Интерфејс који је фирма *Centronics* увела за повезивање рачунара и штампача постао је уобичајенини облик спреге рачунара са периферијским уређајима. Подаци се прослеђују преко 8 сигналних (*data*) линија (слика 10.10.а). Синхронизација преноса остварује се посебним сигналом *STROBE*, којим централна јединица (рачунар) иницира упис податка са магистрале података у пријемни регистар периферијског уређаја

[35] Најраспрострањенији облици дигиталне модулације су: двофреквенцијска модулација - фреквенцијски померај (*frequency shift keying - FSK*) и бинарна фазна модулација (*phase shift keying - PSK*).




Слика 10.10. Интерфејс *Centronics*

Узајамно усклађивање рада централне јединице и периферије остварује се преко два основна координациона (*handshake*) сигнала: *ACKNOWLEDGE*, којим периферијски уређај потврђује пријем податка, и *BUSY* којим периферијски уређај индицира да није спреман за прихватање новог податка. Осим тога, постоје и додатни сигнали који омогућују прослеђивање једноставних (једнолинијских) команди периферијском уређају у циљу иницијализовања (*INITIALIZE*) или непосредног командовања (на пример: аутоматско померање папира за један ред након враћања механизма за штампање у почетни положај - *AUTO FEED*), као и сигнали којима се приказује стање периферијског уређаја: присуство напона напајања електронских склопова (односно приправност за рад - *SELECT*), нерегуларно стање (недостатак папира за штампање - *PAPER OUT*) или детекција грешке (*ERROR*). Типичан, али не и стандардизован, изглед временских дијаграма основних сигнала паралелног интерфејса приказан је на слици 10.10.б.

Брзина преноса зависи пре свега од могућности периферијског уређаја, али и од карактеристика кабла којим се подаци преносе. Већина програма за пренос података између рачунара преко паралелног интерфејса омогућује пренос брзином од око 200 *kbit/s*. Сигнални нивои одговарају логичким нивоима интегрисаних кола у *TTL* технологији[36]. Прикључивање се на кућишту рачунара остварује помоћу 36-пинског *Centronics* конектора-утикача или 25-пинског конектора-утичнице.

Релативно једноставном доградњом омогућује се да преко паралелног порта рачунар прихвата и издаје бинарне податке, и тако реализује универзална дигитална улазно-излазна јединица (*DIO*) или конвертор за прелазак са неког другог интерфејса на *Centronics*.

Савремени двосмерни паралелни интерфејс заснива се на стандарду *IEEE-1284* који дефинише 5 начина преноса података, од којих два користе посебан хардвер у склопу интерфејса у циљу растерећивања рачунара и постизања бржег преноса. У основном режиму рада понаша се као *Centronics*-интерфејс.

[36] Логичка кола заснована на примени биполарних транзистора за остваривање логичких операција означавају се скраћено *TTL* (*Transistor -Transistor Logic*).

**Интерфејс *SCSI*** (*Small Computer System Interface*) је спрежни систем опште намене развијен за потребе брзе комуникације рачунара са периферијским уређајима као што су тврди (*hard*) дискови, штампачи, плотери, скенери, оптички дискови и други. Основна идеја при развоју овог стандарда била је да се "интелигенција" потребна за извршавање "периферијских операција" пренесе из централне процесорске јединице у сам периферијски уређај. Стандард *SCSI* управо специфицира механичке, електричне и функционалне захтеве, као и скуп команди за комуникацију са интелигентним перифериским уређајима. На овај начин се превазилази хардверска неусаглашеност уређаја различитих произвођача. Примена одговарајућих интегрисаних контролера који се имплементирају у оквиру драјверске јединице диска, омогућила је да технологија реализације хардвера постане транспарентна са становишта комуникације.

# 10.6 ИНТЕРФЕЈС ПРОГРАМАБИЛНИХ МЕРНИХ УРЕЂАЈА

Стандардима за пренос података је омогућено повезивање разноврсних мерних, региструјућих и управљачких уређаја у системе за надзор и управљање сложеним и географски распрострањеним процесима. Неизбежна последица широког прихватања концепције модуларне структуре индустријске опреме била је стандардизација спреге појединих функционалних модула. Тако су створени услови да при интеграцији одређеног система постоји што је могуће већа слобода при дефинисању структуре која је максимално прилагођена конкретним условима, потребама и могућностима. У настојању да се достигне оптимум односа цена/перформансе/универзалност, дефинисана је читава фамилија система рачунарских магистрала отворене архитектуре (*open arhitecture bus*), од којих су неки прихваћени на нивоу разних међународних организација. Стандардима су прецизирани димензије и начин спајања модула, дефиниције сигнала, ширина адресне магистрале и магистрале података (8, 16 или 32 бита), протокол преноса података, "механизми" прекида и приступа оперативној меморији, могућност и начин паралелног рада више процесорских јединица. Развој технологије микропроцесора допринео је њиховој широкој примени у разноврсним периферијским уређајима рачунарских система. Системи магистрала, преко којих се повезује централна процесорска јединица са периферијама рачунара, су усавршавани, а тим развојем су условљене нове концепције архитектуре рачунарских система. У складу са том општом тенденцијом примене модуларне структуре, настали су и стандарди посебно намењени за међувезе мерних модула, уређаја и инструмената. Са становишта прихваћености, најзначајнија су три стандарда:

- *CAMAC*, који је развијен, крајем 60-тих година, од стране међународног комитета *ESONE*[37] за потребе примене у области нуклеарне технике, а потом прихваћен од стране међународних институција *IEEE* и *IEC* [1], [2];

[37] *ESONE = European Standards Of Nuclear Electronics*.

- *IEC625/IEEE48*8, дигитални интерфејс за повезивање програмабилних мерних инструмената, који је еволуирао из интерфејсног система *HP-IB*[38], који је конципирала, развила и почела да примењује фирма *Hewlett Packard*, а потом, крајем 70-тих година, био прихваћен од стране међународних и неких националних институција [3], [4], [5], [6], [7], [8];
- *VXIbus*, развијен за програмабилне мерне уређаје реализоване у виду модула, на основу иницијативе која је потекла од америчких произвођача војне опреме.

Сва три стандарда заснована су на магистралној концепцији (бит-паралелни, бајт-серијски пренос података). Овакав пренос има несумњиву предност у односу на серијску комуникацију када се ради о спрезању уређаја на краћим растојањима, као што је то случај у лабораторијским условима, због тога што омогућује веће брзине преноса порука. Ови стандарди се успешно примењују и за потребе аутоматизовања сложених процеса у различитим областима технике.

***CAMAC*** (*Computer Automated Measurement and Control*) је модуларни дигитални мерни систем образован као одговарајућа комбинација специјализованих функционалних модула различите намене (појачавача, бројача, тајмера, аналогно-дигиталних и дигитално-аналогних претварача итд). Модули се смештају у стандардизовано кућиште у којем се налази и извор за њихово напајање. Основни "градивни елемент" система је улазно/излазни (*I/O*) модул који остварује спрегу између екстерног процеса и рачунарски организоване магистрале (*CAMAC dataway*) преко које су разноврсни *I/O* модули повезани са специјализованим модулом (контролером) који омогућује паралелну или серијску спрегу са надређеним рачунаром.

**VXI**[39] **стандард** се односи на програмабилне мерне инструменате реализоване у виду *IOC*-модула[40] који се постављају у крлетку у заједничком кућишту (*mainframe*). Дефинисани су конструктивни параметри и начин међусобног повезивања ове врсте мерних уређаја. Основни захтеви формулисани су са циљем омогућавања реализације специјализованих компактних аутоматских мерних система са врло великим бројем мерних тачака и сразмерно високих перформанси. Притом је питање економичности остало по страни, с обзиром да се у овој области примене на однос перформансе/цена гледа на нешто другачији начин него што је то случај у индустрији. Предности оваквог приступа су вишеструке: бржи такт, локална интелигенција, велика меморија, мања електромагнетна интерференција, као и бржа комуникација преко 32-битне *VXI*-магистрале.

---

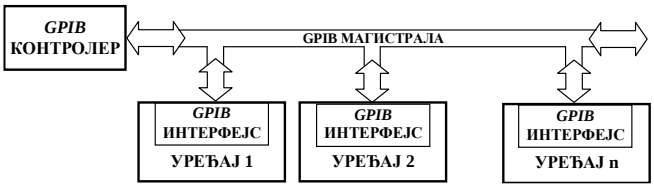
[38] *HP-IB = Hewlett-Packard Interface Bus*.

[39] *VXI = VMEbus Standard Extension for Instrumentation*, проширење међународног стандарда за архитектуру рачунара, *VMEbus*.

[40] Програмабилни мерни инструменти реализовани у виду модула који се постављају у заједничко кућиште (*Instrument On Card*).

***IEC625/IEEE488*** интерфејсни систем програмабилних мерних инструмената је најспорији, али и најједноставнији у погледу електричне и механичке спреге. Захваљујући подршци од стране произвођача мерне опреме и софтвера, спада у врло распрострањене стандарде јер представља економично и ефикасно решење проблема аутоматизације мерења у метролошким и истраживачким лабораторијама. Заснован је на бајт-серијском, бит паралелном преносу података. Првобитно намењен за међусобно спрезање аутономних дигиталних мерних инструмената, овај интерфејсни систем се, захваљујући флексибилној концепцији и сразмерно великој брзини преноса, показао погодним и за разне друге примене. Због своје универзалности, у литератури се најчешће назива *GPIB* (*General Purpose Interface Bus*). Волтметри, бројачки уређаји и генератори сигнала су били први представници нове генерације инструмената. Током година, спектар *GPIB* - компатибилних уређаја постао је врло богат, обухватајући хиљаде уређаја више стотина произвођача широм света, омогућујући реализацију комплетних аутоматизованих мерних система. Њихов се број непрекидно повећава, јер је интерфејс *GPIB* постао уобичајена опција мерних инструмената свих већих произвођача мерне опреме.

Полазна поставка при дефинисању интерфејса *GPIB* била је оптимизација техничких захтева са гледишта самих инструмената. Усвојена је магистрална структура везе, са наменским интерфејсом којим је опремљен сваки уређај у систему (слика 10.11). Уређаји су прикључени на магистралу посредством које размењују поруке. Пренос података заснован је на интерактивној спрези предајника и пријемника која омогућује асинхрони пренос брзином која одговара и најспоријем активном уређају који суделује у конкретном трансферу. Флексибилност и једноставност су стога основна обележја интерфејса *GPIB*. Магистрала је сама по себи пасивна, док се активна улазно/излазна кола, као и логички блокови помоћу којих се врши кодовање и декодовање порука, налазе у самим инструментима. Тиме је обезбеђена једноставност и економичност реализације, која може бити прилагођена специфичним захтевима одређеног инструмента.




Слика 10.11. Повезивање уређаја посредством интерфејса *GPIB*

Сваки од уређаја прикључених на *GPIB*-магистралу има своју нумеричку адресу која треба да буде јединствена, да би се избегле конфликтне ситуације при преносу података. Начин задавања адресе зависи од конкретног решења произвођача. Најчешће се адресовање врши хардверски (помоћу микропрекидача), али може бити остварено и софтверски, преко тастатуре на командној плочи уређаја. Са гледишта комуникације адреса представља низ знакова које контролер шаље да би одредио који уређај (треба да) шаље податке преко магистрале, односно који уређај(и) прима(ју) ту информацију. Адресовање може бити повезано са хардверским дефинисањем да инструмент само шаље или само прима информације.

Систем *GPIB* омогућује повезивање до 62 различита уређаја (31 предајник и 31 пријемник) али, према стандарду, највише до 15 уређаја могу бити повезани на једну магистралу, с тим да укупна дужина каблова не прелази 20 m. Уобичајена дужина комерцијално доступних каблова је 1,5 m. Да би се у потпуности искористиле могућности система, без прекорачења препорука у погледу дужине магистралних линија, неопходно је или на одговарајући начин решити проблем кабловског повезивања уређаја или помоћу додатног хардвера остварити гранање магистрала. У општем случају, у систему могу да постоје два или више контролера од којих у сваком тренутку само један сме да буде активан.

Подаци се преносе у облику кодираних порука преко 8 битне двосмерне (бидирекционалне) магистрале, асинхроно у бит-параленом, бајт-серијском режиму. Сам процес преноса регулише се помоћу три контролне линије (контролна магистрала) кроз интерактивну процедуру: предајник и пријемник непрекидно саопштавају један другом свој тренутни статус сигналима који индицирају:

- расположивост (валидност) информација на магистрали података (*DAV – data valid*),
- неспремност за пријем информације (*NRFD – Not Ready For Data*),
- потврду пријема информације (*NDAC – Not Data Accepted*).

На тај начин обезбеђује се поуздан пренос података брзином коју одређује најспорији пријемник. *DAV* линију контролише активни предајник, док друге две линије (*NRFD* и *NDAC*) припадају свим активним пријемницима.

Иако интерфејс *GPIB* није конципиран за индустријску примену, у низу случајева, у различитим аутоматизованим испитним станицама, он представља праву алтернативу и ван лабораторијских услова. Примена стандарда *GPIB* у рачунарској техници започела је у раној фази појаве личних рачунара. Једна од првих примена био је аутоматизовани затворени телевизијски систем за снимање и репродукцију. Постоји више произвођача електронске опреме (као што су *Agilent*, *National Instruments* и *Burr Brown*) који нуде разноврсне модуле *GPIB*-интерфејса за личне рачунаре.

> Примена *GPIB*-интерфејса добила је такве размере да су многи произвођачи мерне опреме били подстакнути не само да га уграђују у своје уређаје, него и да почну да производе разноврсне хардверске и софтверске алате који олакшавају реализацију мерних система и омогућују да се интеграција обави и без дубљег познавања рачунарске технике.

Модул *GPIB*-интерфејса се израђује у виду картице која се уграђује у рачунар као опција којом се реализују неке од функција дефинисаних стандардом. Димензије модула зависе од примењене технологије (степена интеграције) и перформанси (пре свега брзине преноса података).

Поред одговарајуће програмске подршке која омогућује рад са оваквим модулима, развијени су и наменски “програмерски алати” који олакшавају реализацију комплексних инструментационо - рачунарских система као што су картице које омогућују тражење и анализирање догађаја на магистрали, што приликом коришћења и развоја програма може да буде од посебног значаја.

Комуникација између уређаја, заснована на стандардним улазно/излазним наредбама (као што су *INPUT* и *OUTPUT*, односно њихови еквиваленти), представља најједноставнији метод повезивања корисничког програма са интерфејсним системом, а преко њега и са уређајима прикљученим на *GPIB*-магистралу. Међутим, када су у питању веће количине података, овај поступак постаје неефикасан, па се користи тзв. "баферизован[41] пренос", када се интерфејсном систему само саопштава са којим делом меморије рачунара треба да обави размену блока података (упис или читање). Овакав постпак се назива "директни меморијски приступ" (*DMA*).

# 10.7 *GPIB* ИНТЕРФЕЈСНИ СИСТЕМ

## 10.7.1 СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАДА

Функција *GPIB*-интерфејса је да обезбеди размену података између два или више уређаја у мерном систему. Пре него што пренос информација започне неопходно је да буде одређено који од уређаја предаје, а који уређаји примају податке. Одлуку о томе доноси уређај који у датом тренутку управља системом, а делује слично председавајућем на седници. У току нормалног рада, у сваком тренутку само један судеоник може да говори, али се може десити да се више њих истовремено јаве за реч. Председавајући је одговоран да региструје ове захтеве, идентификује учеснике и омогући им да дођу до речи. И у интерфејсном систему *GPIB* само један уређај може, након добијања дозволе, да "говори" (предаје податке), али је и "слушање" контролисано од стране уређаја који управља радом система.

Сваки уређај у *GPIB*-систему мора бити способан да оствари бар једну од улога:

- предајник (*talker* - говорник),
- пријемник (*listener* - слушалац),
- контролер (*controller*).

**Предајник** је уређај који, када је му то дозвољено, може да шаље податке другим уређајима. У било којем тренутку само један предајник може бити активан (*active talker*).

**Пријемник** је уређај који, када му је то дозвољено, може да прима информације од других уређаја у облику кодованих наредби или података. Више пријемника може да истовремено слуша податке које један предајник саопштава.

Поједини уређаји могу, али не морају, да обављају обе ове улоге (наравно, у различитим временским интервалима). На пример, програмабилни мерни инструмент мора да поседује способност да "слуша",

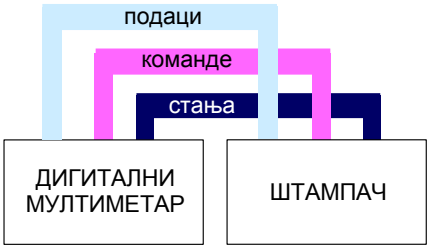
---

[41] Под називом "бафер" (енг. *buffer*) у општем случају подразумева се елемент (хардверски или софтверски) који се умеће између два дела са циљем да се минимизира (амортизује) међусобно повратно дејство (*buffer amplifier*, *data buffer*) .

да би примио контролне инструкције (наредбе), и да "говори", да би послао резултате мерења.

**Контролер** је уређај који може да одређује који од уређаја повезаних у *GPIB*-систем је предајник односно пријемник. У систему може бити више уређаја способних да обављају улогу контролера. У том случају разликују се два типа: **Активни контролер** и **систем-контролер**. Систем-контролер је јединствен и може преузети управљање системом и ако није активни контролер. На почетку рада седнице сви присутни обично слушају председавајућег, што није случај у *GPIB*-систему. Активни контролер најпре саопштава свим уређајима да не слушају (*unlisten*), а потом, појединачно сваком од уређаја да, уколико је то потребно, слуша податке (*addressing to listen*), тако да информације примају само они уређаји којима су подаци намењени (*active listener*). Сви остали "игноришу" податке који се преносе. Посебном акцијом контролер "даје реч" одређеном уређају (*addressing to talk*).

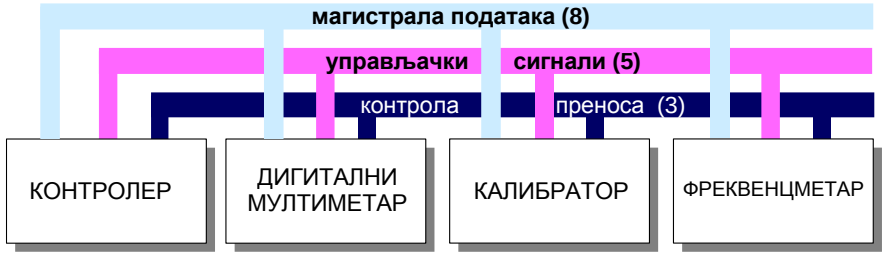
Минимални *GPIB*-систем састоји се од једног предајника и једног пријемника, без контролера. У таквој конфигурацији проток информација је сведен на директан пренос између уређаја постављеног у режим предајника (*talk only*) и уређаја постављеног у режим пријемника (*listen only*). У најједноставнијем облику, на пример, систем за регистрацију вредности мрежног напона садржи само један мерни инструмент (волтметар) који периодично обавља мерење и предаје податке регистратору (штампачу). Овако једноставни системи (слика 10.12) се веома ретко користе. Могућности *GPIB*-интерфејса далеко су више искоришћене када постоји контролер који руководи радом система, пре свега одређујући који уређај шаље, а који прима податке.




Слика 10.12. Минимални *GPIB* систем

Основна функција интерфејса је пренос порука у дигиталном облику између два или више уређаја повезаних у мерни систем. Прикључени уређаји су међусобно спрегнути преко 16 активних сигналних линија (слика 10.13) које формирају *GPIB*-магистралу (*GPIB bus*). Према функцији, сигналне линије се могу поделити у три групе:

- **подаци** (*data bus signal lines*);
- **сигнали за контролу преноса** (*data byte transfer control lines*);
- **управљачки сигнали** (*general interface management lines*).




Слика 10.13. Структура система програмабилних мерних инструмената - *GPIB*

Потпуни називи појединих сигнала дати су у табели 10.3.

| | | |
|---|---|---|
| МАГИСТРАЛА ПОДАТАКА (*data bus*) | *DIO1* | *data input/output signal line* 1 (*LSB*) |
| | *DIO8* | *data input/output signal line* 2 |
| | *DIO8* | *data input/output signal line* 3 |
| | *DIO8* | *data input/output signal line* 4 |
| | *DIO8* | *data input/output signal line* 5 |
| | *DIO8* | *data input/output signal line* 6 |
| | *DIO8* | *data input/output signal line* 7 |
| | *DIO8* | *data input/output signal line* 8 (*MSB*) |
| СИГНАЛИ ЗА КОНТРОЛУ ПРЕНОСА (*data byte transfer control lines*) | *DAV* | *data valid* |
| | *NRFD* | *not ready for data* |
| | *NDAC* | *not data accepted* |
| УПРАВЉАЧКИ СИГНАЛИ (*general interface management lines*) | *ATN* | *attention* |
| | *IFC* | *interface clear* |
| | *REN* | *remote enable* |
| | *EOI* | *end or identify* |
| | *SRQ* | *service request* |

Табела 10.3. Сигнали *GPIB*-магистрале

Помоћу пет сигнала управљачке магистрале омогућено је дефинисање радних режима прикључених уређаја, као и иницијализација интерфејса. Сигнали управљачке магистрале представљају једнолинијске команде (*uniline command*) помоћу којих активни контролер управља интерфејсним системом и непосредно контролише прикључене инструменте. На пример, преко *IFC* (*interface clear*) линије омогућено је успостављање почетног стања (ресетовање) интерфејса уређаја прикључених на *GPIB*-магистралу. Преко *SRQ* (*service request*) линије омогућено је да остали уређаји на магистрали поставе захтев за успостављањем комуникације (на пример, после завршетка задатог мерења, откривања грешке или потребе за преузимањем улоге активног контролера).

*GPIB*-интерфејс омогућује пренос кодираних порука помоћу којих се постављају функције појединих инструмената (*set-up*), преносе резултати мерења, усклађује рад уређаја и управља системом у целини, што (све заједно) омогућује прикупљање жељених мерних података. Контролер може

управљати специфичним активностима унутар других уређаја, (*device dependent action*) које се извршавају као одзив на одговарајућу поруку (*device dependent message*) послату преко магистрале, а представљају особеност конкретног инструмента, те се разликују од уређаја до уређаја.

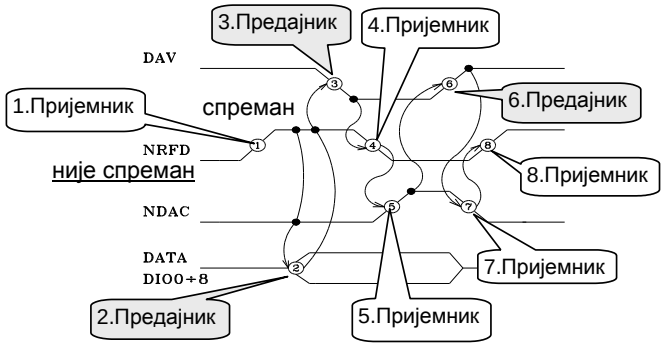
Предајници и пријемници не могу самостално да започну пренос података. То је задатак активног контролера који управља интерфејсним системом на основу информација које добија прозивањем (*polling*) прикључених уређаја да би идентификовао уређај који у том тренутку захтева интеракцију са контролером. Постоје два типа прозивања:

- серијским прозивањем (*serial poll*) добија се податак (*status byte*) за сваки појединачни уређај у систему;
- паралелним прозивањем (*parallel poll*) добија се обједињени податак за групу уређаја.

## 10.7.2 ИНТЕРАКТИВНИ ПРЕНОС ПОДАТАКА

Преко магистрале података преносе се кодоване наредбе или подаци из појединих уређаја као низови 8-битних речи. Пренос података у било којем смеру контролисан је сигналима контролне магистрале. Сигналом *DAV* активни предајник означава да је избацио податак на магистралу података (*DIO1* до *DIO8*). Линије *NRFD* и *NDAC* "припадају" пријемницима. Сваки од прикључених инструмената у своје време "ослобађа" *NRFD* линију. То значи да *NRFD* сигнална линија не може прећи у стање којим се означава спремност за пријем података док то не допусти и најспорији уређај прикључен на магистралу података. Другим речима, *NRFD* сигнал означава да бар један од активних пријемника није спреман за пријем и да активни предајник мора да чека пре него што избаци нови податак. *NDAC* сигнал означава да бар један од активних пријемника још увек није прихватио податак који се у том тренутку налази на магистрали података, и да активни предајник мора да и даље држи текући податак присутан на магистрали.

На слици 10.14. приказан је поједностављени временски дијаграм поступка преноса података, уз напомену да је за сигнале *GPIB*-интерфејса усвојена негативна логика - логичка нула је активно стање. Претпоставка је да су претходним преносом порука додељене улоге предајника и пријемника. Пријемник укидањем *NRFD* сигнала (1) означава да је спреман да прими податке које ће послати активни предајник. Предајник, пошто је избацио податак на магистралу података (2) и, након времена потребног за успостављање новог стања на магистрали, активира сигнал *DAV* (3) означавајући да пријемник може да преузме податак.



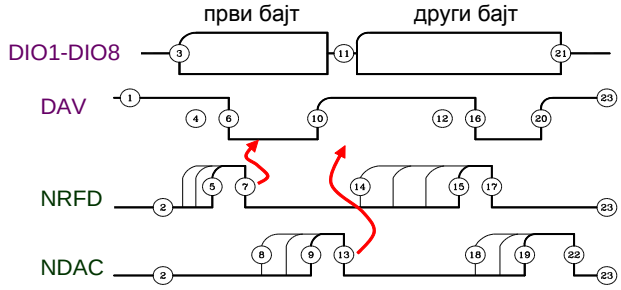

Слика 10.14. Временски дијаграми комуникационог протокола

Након откривања активног стања на *DAV* линији, пријемник одговара активирањем *NRFD* линије (4) чиме означава да није спреман да даље прихвата податаке. После уношења податка у свој пријемни регистар (интерни бафер), пријемник укида сигнал *NDAC* (5) чиме ставља до знања да је податак примио. Након откривања новог стања на *NDAC* линији, предајник укида *DAV* сигнал (6) чиме назначава да податак на магистрали убудуће није валидан. Пријемник тада активира *NDAC* сигнал (7), а затим укида сигнал *NRFD* (8), означавајући да нови податак може да буде постављен на магистралу. Тиме је поступак примопредаје окончан. Предајник сада припрема нови податак за предају, а пријемник очекује информацију да се нови податак појавио.

Промене сигнала *DAV* проузрокују промене сигнала *NRFD* и *NDAC*. При преносу поруке која садржи више бајтова, промене сигнала *DAV* представљају "одзив" контролера на узлазне (предње) ивице сигнала *NRFD* и *NDAC* (као што је приказано на слици 10.15). Дијаграм тока размене података између два уређаја приказан је на слици 10.16.

Три командне линије: *ATN*, *IFC* и *REN* припадају активном контролеру и представљају једнолинијске команде (*uniline interface messages*) преко којих он непосредно управља интерфејсним системом.

*ATN* линија (*attention*) има посебно значајну улогу у координирању процеса преноса података. Сигнал *ATN* може да успостави само активни контролер, да би одредио текући режим рада, односно тип податка на магистрали података. Када је *ATN* = 1 (*command mode*) информације на магистрали података представљају командне поруке (*bus command, interface message*), инструкције и адресе које примају сви остали уређаји прикључени на магистралу. Када је *ATN* = 0 активни предајник може почети се слањем података које треба да приме уређаји који се налазе у режиму пријема (активни пријемници). Сигнал *ATN* мора да буде дефинисан (постављен) пре започињања сваке процедуре преноса података.




Слика 10.15. Временски дијаграми преноса података

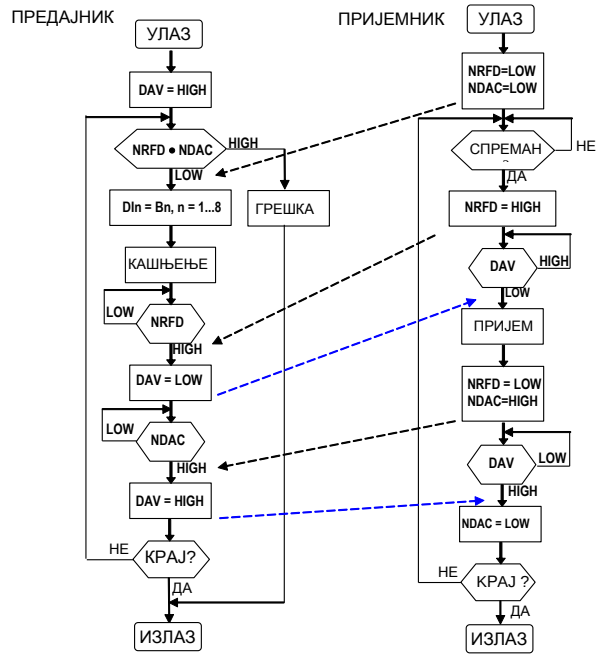
Сигналну линију *IFC* (*interface clear*) користи искључиво систем-контролер ради довођења интерфејсног система у дефинисано стање. Активира се импулсно (*IFC* = 1), након чега се интерфејс у сваком од прикључених уређаја ресетује и прелази у пасивно (*quiescent*) стање, а на магистрали се успоставља почетно стање. Ресетован уређај није ни предајник ни пријемник. Систем-контролер има улогу активног контролера.

Систем-контролер успоставља сигнал *REN* (*remote enable*) да би обезбедио да периферијски уређаји извршавају наредбе које примају преко магистрале. Ако сигнална линија *REN* није активирана, уређаји треба да игноришу сигнале на магистрали.

Сигнал *EOI* (*end or identify*) поставља активни предајник током преноса последњег бајта поруке. Употреба *EOI* сигнала није неопходна уколико је последњи бајт у поруци изабрани специјални знак (терминациони карактер), као што је на пример *CR* (*carriage-return*) или *LF* (*line-feed*). Активни контролер користи ову линију заједно са *ATN* линијом при започињању процедуре паралелног прозивања.

*SRQ* (*service request*) је сигнал прекида (*interrupt*) који може поставити било који од уређаја прикључених на магистралу да би назначио потребу за саобраћањем. Активни контролер тада серијским или паралелним произивањем утврђује који је од прикључених уређаја поставио захтев за опслуживање.

*SRQ* и *EOI* спадају у једнолинијске поруке уређаја (*uniline device messages*). Вишелинијске командне поруке (*multiline commands*) су заправо кодови које активни контролер шаље преко магистрале података при *ATN* = 1.




Слика 10.16. Процедура преноса података

У табели 10.4 дати су стандаризовани називи вишелинијских командних порука [4]. Према функцији и коду којим су представљене ове наредбе су сврстане у пет група.

- адресоване наредбе (*addressed command group - ACG*) које се односе на активне пријемнике,
- универзалне наредбе (*universal command group - UCG*) које се односе се на све прикључене уређаје,

- наредбе адресовања пријемника (*listen addres group - LAG*) које омогућују задавање режима активног пријемника адресованом уређају,
- наредбе адресовања предајника (*talk addres group - TAG*) које омогућују задавање режима активног предајника и
- секундарне наредбе (*secondary command group - SCG*) које се користи за специфицирање додатних адреса или функција унутар одређеног уређаја.

Целокупни поступак размене података започиње активни-контролер који, активирањем *ATN* командне линије, преузима управљање магистралом обустављајући сваки текући пренос података. Наредбом *UNL* контролер, са циљем поузданости, онемогућује "прислушкивање" информација које се преносе. Након тога, активни контролер слањем одговарајуће наредбе адресовања предајника (*TAG*) одређује који од прикључених уређаја треба да предаје податке, а затим, слањем одговарајућих наредби адресовања пријемника (*LAG*), контролер одређује који уређаји треба да примају поруке које ће се преносити преко магистрале података. После тога, ослобађањем *ATN* линије, активни контролер означава да пренос података може да почне.

Када је процес преноса започет, активни предајник, испитујући *NRFD* линију, чека да сви активни пријемници буду спремни за прихват података, а потом избацује први бајт поруке на магистралу података. Након тога, предајник преко *DAV* линије сигнализира исправност података и испитивањем *NDAC* линије очекује да овај податак буде прихваћен од стране свих пријемника. Само активни пријемници учествују у овом преносу. Пошто је први бајт поруке пренет, предајник може да избаци следећи бајт на магистралу података и почиње поново да чека да пријемници буду спремни за прихватање новог податка. Када се то догоди, предајник означи исправност податка и цео процес се понавља, док и последњи бајт поруке не буде пренет.

| симбол | назив | група |
|---|---|---|
| *DCL* | *device clear* | *UCG* |
| *GET* | *group execute trigger* | *ACG* |
| *GTL* | *go to local* | *ACG* |
| *LAG* | *listen address group* | *LAG* |
| *LLO* | *local lockout* | *UCG* |
| *PPC* | *parallel poll configure* | *ACG* |
| *PPD* | *parallel poll disable* | *SCG* |
| *PPE* | *parallel poll enable* | *SCG* |
| *PPU* | *parallel poll unconfigure* | *UCG* |
| *SDC* | *selected device clear* | *ACG* |
| *SPD* | *serial poll disable* | *UCG* |
| *SPE* | *serial poll enable* | *UCG* |
| *TAG* | *talk address group* | *TAG* |
| *TCT* | *take control* | *ACG* |
| *UNL* | *unlisten* | *LAG* |
| *UNT* | *untalk* | *TAG* |

Табела 10.4. Вишелинијске командне поруке

Уређај је адресован као предајник када од активног контролера прими кодирану наредбу (бајт пренет преко магистрале података када је сигнал *ATN* активан) групе *TAG* која садржи његову адресу. На истоветан начин уређај постаје адресован као пријемник по добијању одговарајуће кодиране наредбе која припада групи *LAG*.

Систем-контролер је јединствен уређај који увек има врховну контролу над системом. Након првог укључења систем-контролер је активни контролер и управља целокупним саобраћајем на магистрали. Међутим, систем-контролер може, уколико је то потребно, да пренесе контролну функцију неком другом уређају, који тиме постаје активни-контролер, а који такође може контролну функцију пренети даље, неком новом уређају. Чак и у случају када не игра улогу

активног контролера, систем-контролер задржава контролу над линијама *IFC* и *REN*, што му омогућује да преузме управљање системом кад год је то потребно.

## 10.7.3 ЕЛЕКТРИЧНЕ И МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

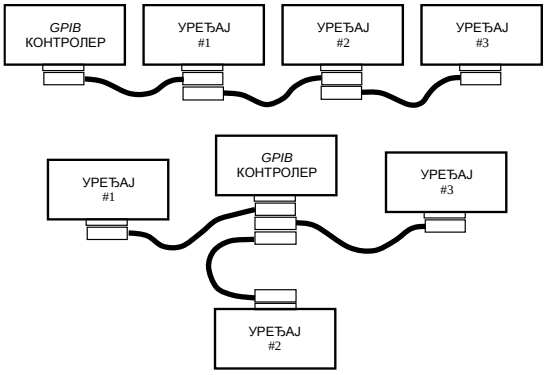
Међусобна веза уређаја у систему *GPIB* остварује се спрежним вишежилним каблом у којем 16 проводника представља сигналне линије, а остали проводници су повезани са масом и имају улоге екрана који смањују пресликавање између осам контролних линија (*DAV, NRFD, NDAC, IFC, ATN, EOI, REN и SRQ*) [5]. *IEC* и *IEEE* стандарди, нажалост, прописују различите типове конектора. *IEC* препоручује, према европском стандарду, 25-пински конектор (слика 10.17.а), док се *IEEE* стандард заснива на 24-пинском конектору (слика 10.17.б), па спрезање уређаја европских и северно-америчких произвођача захтева одговарајући адаптер.

На основу расположивих адреса, *GPIB*-систем теоријски омогућује повезивање до 62 различита уређаја (31 предајник и 31 пријемник), али, према стандарду, највише до 15 уређаја могу бити повезани на једну магистралу, с тим да укупна дужина каблова не прелази 20 m. Уобичајена дужина кабла је 1,5 m. Да би се у потпуности искористиле могућности система, без прекорачења препорука у погледу дужине магистралних линија, неопходно је или на одговарајући начин решити проблем кабловског повезивања уређаја или, помоћу додатног хардвера остварити гранање магистрале.



Слика 10.17. *IEC* и *IEEE* конектор

Сваки *IEEE* конектор на каблу поседује утични део (*plu*g) и утичницу (*receptacle*) чиме је омогућено прикључивање више каблова на једном месту, тако да се *GPIB*-магистрала веома једноставно проширује новим уређајима. Основне конфигурације повезивања уређаја, линијска (*daisy chain*) и звездаста спрега, приказане су на слици 10.18.



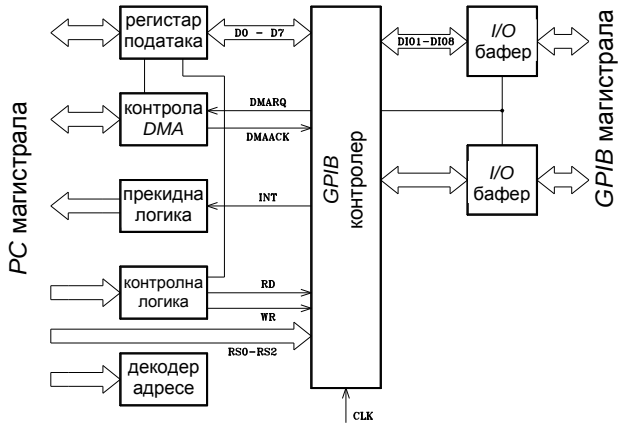

Слика 10.18. Основне конфигурације повезивања уређаја у систему *GPIB*

Модул *PC*-компатибилног *GPIB*-интерфејса представља картицу која се уграђује у рачунар као опција којом се реализују неке од функција дефинисаних стандардом. Димензије модула зависе од примењене технологије (степена интеграције појединих функционалних блокова), а у вези са тим и од перформанси (пре свега брзине преноса података), као и од постојања неких хардверских проширења функција самог модула. На слици 10.19 приказан је

изглед модула. Принципска блок шема интерфејсног модула заснованог на примени интегрисаног *GPIB*-контролера приказана је на слици 10.20.



Слика 10.19. Изглед рачунарског модула *GPIB*-интерфејса




Слика 10.20. Блок шема модула *GPIB*-интерфејса рачунара

# ЛИТЕРАТУРА


1. *A modular instrumentation system for data handling; CAMAC, IEC 516, (1975) 1984*.
2. *L. Costrell, CAMAC Instrummentation szstem - Introduction and General Description, IEEE Trans. on Nuclear Science, vol NS-20, no. 2, April 1973.*.
3. *Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation, IEEE Std 488, (1975,1978,1987), ANSI MC 1.1, (1975, 1979)*.
4. *Standard Codes, Formats, Protocols and Common Commands for use with IEEE Std 488.1, IEEE Std 488.2* (*1987, 1992)*.
5. *Programmable measuring instruments - interface system (byte serial, bit parallel), Part 1: Functional specifications, electrical specifications, mechanical specifications, system applications and requirements for the designer and user, IEC Publication 625-1 (1979, 1993)*.
6. *Programmable measuring instruments - interface system (byte serial, bit parallel), Part 2: Codes, Formats, Protocols and Common Commands. IEC Publication 625-2 (1980, 1993)*.
7. *IEC 60488-2, Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation - Part 2: Codes, Formats, Protocols and Common Commands*, *2004*
8. *60488-1, IEC/IEEE Standard for Higher Performance Protocol for the Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation - Part 1: General, 2004*.

# 11. АУТОМАТИЗОВАНИ МЕРНИ СИСТЕМИ

Аутоматизација извршавања одређеног мерног поступка, као процеса добијања информације, спада у основна обележја развоја савремене мерне технике. На овај начин не само да се мерни поступак остварује успешније и поузданије, него и значајни део обраде мерних података, коју је некада морао да врши човек (мерач), обавља сам инструмент (мерило). Аутоматски се извршава процедура узимања и меморисања низа вредности одбирака мерене величине, без икаквог учешћа човека. Мерни уређај постао је, на неки начин, "интелигентан" (*smart*).

Може се сматрати да је развој интелигентних мерних система започео, доста давно, појавом првих уређаја у којима се врши самоподешавање нуле инструмента (*auto-zero*). Дигитални електронски волтметри омогућили су периодично аутоматско подешавање параметара који одређују карактеристику преноса. То се постиже одговарајућом компензацијом сопственог помераја нуле, насталог услед старења или промена услова околине, као и подешавањем појачања улазног кола са циљем прилагођења мерног опсега инструмента опсегу вредности улазног сигнала (*autorange*). У међувремену, много што шта се догодило. Пре свега променио се начин на који је оператор „повезан“ са мерним уређајем. Техника је постала све више софтверски оријентисана. Наменске, хардверски дефинисане системе ограничене функционалности заменили су вишенаменски, софтверски оријентисани системи изванредних могућности. Развој технологије омогућио је настанак сложених, али и флексибилних испитних система заснованих на софтверској платформи, Скраћено је време потребно за њихов развој, а смањени су издаци за реализацију, као и трошкови одржавања.

У овом поглављу разматра се примена стандардног *PC* рачунара као контролера мерног система образованог од програмабилних инструмената. Приказана је основна концепција програмске подршке. Примена рачунара у систему даљинског (обрачунског) мерења разматра се у посебном поглављу.

## 11.1 РАЧУНАР КАО КОНТРОЛЕР СИСТЕМА ПРОГРАМАБИЛНИХ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА

Најраспрострањенија примена рачунара у мерној техници је везана за његову улогу као контролера система образованог од аутономних уређаја међусобно повезаних стандардним интерфејсом. Хардверска основа за обављање ове функције се остварује релативно лако. Постоји широк избор спрежних модула који се једноставно додају у рачунар као његова периферијска улазно/излазна јединица (*pheripheral I/O device*). Са становишта корисника, интерфејс посредством којег се остварује спрега рачунара са мерним уређајима, може да се сврста у две категорије.

- **Програмабилни интерфејс** представља хардверску и софтверску "надградњу" рачунара опште намене. Њиме се управља преко одговарајућих наредби у оквиру корисничког програма. Избор наредби, којима се иницира обављање појединих активности на магистрали програмабилног интерфејса, односно прослеђује рачунару одзив присутних уређаја, зависи од типа интерфејса.
- **Транспарентни интерфејс је** функционално "невидљив" за рачунар (односно корисника, јер не захтева специјално програмирање), а омогућује размену података између различитих интерфејсних система, на пример између *GPIB*-компатибилних уређаја и уређаја опремљених неким другим типом комуникационог интерфејса, као што је серијски (*RS*-232, модем) или паралелни интерфејс (*IEEE-1284, SCASI*).

Уз физички модул интерфејса произвођач, обично, испоручује и програмски пакет (модул) који садржи известан број основних рутина које могу да се позивају из стандардних програмских језика. Прикупљање мерних података, односно њихов пренос у меморију рачунара, остварује се, у начелу, на три начина:

- методом прозивања,
- методом прекида,
- методом директног приступа меморији.

**Метод прозивања** (*polling*) се састоји од цикличног, софтверски контролисаног обраћања појединим уређајима са циљем откривања захтева за пренос података. Прозивање се типично користи од стране контролера да би одредио уређај који захтева интеракцију са контролером. У *GPIB*-систему, на пример, постоје два типа прозивања. Серијском прозивком добија се информациони бајт који описује стање (статус) појединачног уређаја у систему. Паралелним прозивањем добија се обједињен податак о стању групе уређаја.

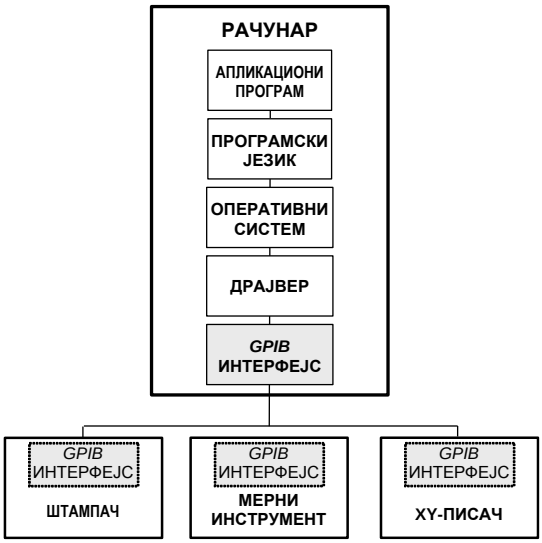
**Прекид** (*interrupt*) је сигнал којим се означава податак да централни процесор рачунара треба да, у погодном тренутку, суспендује текућу активност (процес, *task*) да би обавио активност вишег приоритета.

**Директни меморијски приступ** (*direct memory access - DMA*) представља поступак који омогућује пренос пакета (блокова) података између меморије и периферијског уређаја, без посредства централног процесора. Пренос се врши под надзором посебног хардвера, при чему постоје две могућности:

- потпуно заустављање процесора и активирање *DMA*-хардвера, који остварује пренос, после чега се процесор враћа на извршење текуће програмске секвенце,
- извршавање преноса јединичног податка после завршетка инструкције текућег програма (чиме се извршење следеће инструкције одлаже).

Са становишта корисника, програмска подршка мерног рачунарског

система представља знатно озбиљнији проблем. Пре свега поставља се питање избора "програмерског алата". Корисник, по правилу, треба да направи избор: да ли да користи неки од класичних програмерских језика, и своје евентуално искуство у програмирању, или да се определи за неки "нови" програмерски алат, за који зна, или очекује, да у овој области има ширу примену. У сваком случају, примена мерних система заснованих на комерцијалним рачунарима опште намене захтева располагање одговарајућим програмима. Испоручилац интерфејса обично нуди кориснику и сопствени програмски модул који садржи известан број рутина које се могу позвати из стандардних програмских језика. Али је то, често, само почетни корак у решавању мултидисциплинарног метролошког проблема. Мерни систем заснован на рачунару опште намене и *GPI*B-компатибилним уређајима (слика 11.1) представља широко распрострањено решење подржано међународно прихваћеним стандардима [1], [2].




Слика 11.1. Мерни систем заснован на *GPI*B-компатибилним уређајима.

Програмска подршка мерних рачунарских система обухвата широк спектар програмерских алата, од основних рутина до комплетних интегрисаних програмских система високог нивоа. Програмски руковаоци спрежним модулима (драјвери), прилагођени елементарним захтевима аутоматизованих мерних система (иницијализација, започињање мерења, очитавање резултата, прозивање), омогућују, по правилу, ефикасно коришћење расположивих хардверских ресурса. Њихова примена, међутим, подразумева одређено познавање рачунарске технике. Програмерски алати вишег нивоа стављају на располагање развојно окружење унутар којег се налазе одабране функције које су потребне да би се направила апликација којом се извршава жељени алгоритам рада мерног система. Крајње решење је у суштини модификован облик основног програма који је прилагођен

конкретној примени. На врху лествице су објектно[1] оријентисани програмски језици који омогућују израду програма коришћењем графичких симбола, алгоритама и визуелних структура за опис система који се развија.

## 11.2 ПРИМЕНА *GPIB*-СИСТЕМА

Примена *GPIB*-интерфејса добила је такве размере да су многи произвођачи мерне опреме били подстакнути не само да га уграђују у своје уређаје, него и да почну да производе разноврсне хардверске и софтверске алате који олакшавају реализацију мерних система и омогућују да се интеграција обави и без дубљег познавања рачунарске технике [3]. Појавили су се и специјализовани произвођачи који нуде разноврсна решења *GPIB*-интерфејса, као и мерних система заснованих на његовој примени [4], [5]. Тиме је, међутим, цео проблем поново пренет на корисника који, у мноштву разноврсних могућности, треба да пронађе оптимално решење које задовољава његове потребе и услове. То практично значи да је, осим познавања неких општих принципа функционисања рачунара и његових делова, неопходно познавање начина рада појединих хардверских односно софтверских компоненти *GPIB*-система.

Програмска подршка *GPIB*-система обухвата три основна нивоа:

**програмски руковаоц** интерфејсом, који обезбеђује:

- довођење интерфејса и инструмената у почетно стање,
- пренос команди и адреса,
- пренос података између рачунара и инструмената,
- започињање извршавања мерних функција,
- прозивање прикључених уређаја.

**програмски модули** инструмената, који омогућују:

- формирање управљачких порука,
- рад са подацима (промена формата, нумеричка обрада,...),

**програм,** којим се остварују функције конкретног мерног система.

Програмски модул који управља радом одређеног инструмента (драјвер инструмента) је усаглашен са специфичним захтевима програмирања конкретног уређаја. Интегрисани програмски пакети за управљање *GPIB*-системом садрже библиотеке драјвера за инструменте познатих произвођача. Програм којим се реализује алгоритам контроле појединих уређаја у циљу извршавања мерног задатка, као и програми за прорачун параметара, постаквизициону обраду и штампање резултата, представља конкретну рачунарску апликацију (*application program*) којом се извршавају планиране активности у оквиру мерног система.

---

[1] Објектно оријентисано програмирање (*Object-oriented programming*, *OOP*) је техника програмирања заснована на концепту објеката. То су структуре података са придруженим скупом процедура и функција којима се оперише са подацима који чине објекат. Кориснички програм (апликација) је скуп објеката који размењују поруке.

## 11.2.1 ПРОГРАМСКИ РУКОВАОЦИ GPIB-ИНТЕРФЕЈСОМ

Руковаоци *GPIB*-интерфејсом, које произвођачи модула интерфејса за персоналне рачунаре испоручују, садрже рутине за уношење или издавање података у облику појединачних бројева или низова знакова (*string*), форматирање (претварање података из знаковног у нумерички формат), прозивање и проверу статуса уређаја, за непосредно управљање појединим контролним линијама магистрале, односно за издавање вишелинијских *GPIB* команди. Основни улазно/излазни захтеви остварују се помоћу наредби типа УЛАЗ/ИЗЛАЗ (*ENTER/OUTPUT*). Начин управљања радом инструмента задаје се одговарајућим наредбама ДАЉИНСКО/ЛОКАЛНО (*REMOTE*/*LOCAL*). Време потребно за пренос великог броја података у меморију рачунара се скраћује применом наредби којима се остварује директан приступ меморији (*DMA transfer*). Основни (заједнички) типови наредби које се користе у интерфејсном систему *GPIB* приказани су у табели 11.1.

| | |
|---|---|
| *ABORT* | обуставлјање свих активности уређаја у *GPIB*-систему, слање *IFC* (*interface clear*) наредбе; |
| *CLEAR* | иницијализација уређаја, слање *DCL* (*device clear*) наредбе; |
| *DMA* | одређивање начина на који се остварује *DMA*-пренос; |
| *ENTER* | очитавање (уношење) података из уређаја адресованог као предајник; |
| *EOI* | дефинисање коришћења сигнала *EOI* (*end or identify*); |
| *EOL* | дефинисање терминатора поруке *EOL* (*end of line*); |
| *LOCAL* | дозвола приступа адресованом уређају преко управљачке (контролне) плоче - издавање наредбе *GTL* (*go to local)*; |
| *LOCAL LOCKOUT* | онемогућавање приступа преко управљачке (контролне) плоче уређаја- издавање наредбе *LLO* ( *local lockout*); |
| *OUTPUT* | издавање података; |
| *PPOLL* | паралелно прозивање уређаја; |
| *PPOLL CONFIG* | конфигурисање паралелног позивања; |
| *PPOLL UNCONFIG* | онемогућавање паралелног позивања; |
| *REMOTE* | задавање режима даљинског управљања уређајем; |
| *RESET* | иницијализација модула интерфејса; |
| *SEND* | слање основне *GPIB*-команде; |
| *SPOLL* | серијско прозивање одређеног уређаја; |
| *STATUS* | одређивање текућег стања интерфејсног модула; |
| *TIMEOUT* | максимално дозвољено време чекања на одговор; |
| *TRIGGER* | започињање извршавања мерне функције; |

Табела 11.1. Основни типови наредби интерфејсног система *GPIB*

*I/O* комуникација, заснована на стандардним улазно/излазним наредбама (као што су *INPUT*(*ENTER*) и *OUTPUT*, односно њихови еквиваленти), представља најједноставнији метод повезивања корисничког програма са интерфејсним системом, а преко њега са уређајима прикљученим на *GPIB*-магистралу. Међутим, када су у питању веће количине података, овај поступак постаје неефикасан, па се користи тзв. баферизован пренос, када се интерфејсном систему само саопштава са којим делом меморије треба да обави размену блока података (упис или читање).

Синтакса[2] појединих конкретних драјвера може бити различита, а могу постојати и извесна одступања у значењу. У начелу, сваки пренос података завршава се слањем одређеног низа знакова (терминатор). Обично се користи

[2] Синтакса је граматичка дисциплина која проучава узајамне односе између елемената реченичке структуре, као и правила која одређују низање реченица. У рачунарској техници (програмирању), под називом синтакса подразумева се скуп правила која дефинишу облик комбинације симбола која представљај улаз рачунара, да би је он "разумео" .

комбинација *CR*[3] *LF EOI*. Иницирање мерења, може бити ручно или аутоматско, интерно или екстерно (спољашњим сигналом) или остварено пријемом одговарајуће наредбе (*REMOTE*).

# 11.3 ПРОГРАМИРАЊЕ И ОЧИТАВАЊЕ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА

Основне функције рачунара као контролера мерног система су задавање радног режима инструмента, иницирање мерења и уношење резултата у меморију рачунара. Поступак којим се реализује процес мерења у *GPIB*-систему приказан је дијаграмом на слици 11.2.




Слика 11.2. Мерна процедура у систему *GPIB*

Начин на који се ове функције остварују зависи унеколико од карактеристика хардвера примењеног при реализацији модула интерфејса, у знатној мери од специфичности инструмента којим се управља, а у највећој мери од концепције програмске подршке интерфејсног модула.

## 11.3.1 ПРИМЕР 1: ЗАДАВАЊЕ РАДНОГ РЕЖИМА ИНСТРУМЕНТА И ОЧИТАВАЊЕ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

Инструмент *Nanovoltmetar Model* 181 фирме *KEITHLEY* омогућује мерење једносмерног напона у 7 опсега (од 2 mV до 1000 V) са осетљивошћу која одговара приказивању резултата са 5 или 6 цифара [6]. При приказивању резултата са 6 цифара на опсегу 2 mV резолуција мерења је 10 nV. На опсегу 2 V, при нормалним температурним условима (22 °C до 24 °C), стабилност је боља од 55 ppm, за период од 24 h након калибрације, односно боља од 90 ppm за период од једне године. Температурски коефицијент је мањи од 10 ppm/ °C.

[3] Ознаке (односно називи) *CR* (*carriage return*) и *LF*(*line feed*) су преузете из скупа команди које су првобитно коришћене за управљање електричним писаћим машинама.

Радом инструмента управља 8-битни микропроцесор. Пренос података преко *GPIB*-магистрале остварује се помоћу посебног контролера. Изглед уређаја приказан је на слици 11.3.



Слика 11.3. Инструмент *Nanovoltmetar Mode*l 181

Инструмент прихвата све једнолинијске команде *GPIB*-интерфејса: *ATN, EOI, REN, IFC, SRQ*; као и вишелинијске команде: *DCL, LLO, SPE, SPD, UNT, UNL, SDC, GET, GTL*. Дефинисање режима мерног система инструмента врши се слањем поруке у којој су наведени одговарајући кодови. Основне наредбе које одређују радни режим инструмента приказане су у табели 11.2.

Резултат који се приказује (односно преноси даљински) може да представља одступање мереног напона у односу на почетну вредност. На овај начин омогућено је елиминисање напона претполаризације мерене величине, укључујући и померај нуле самог инструмента (нулирање, *zero suppresion*). Брзина одзива инструмента може да се подеси помоћу интерног дигиталног филтра, при чему се начин рада (пригушење скоковитих промена улазног сигнала, *damping*) и временска константа филтра могу мењати. Комбинацијом ових функција могуће је прилагођавање одзива инструмента са циљем остваривања компромиса између опречних захтева у погледу брзине одзива и неосетљивости на сметње. Брзина мерења је четири или осам очитавања у секунди (зависно од мерног опсега). Адреса инструмента задаје се помоћу микропрекидача на његовој задњој плочи.

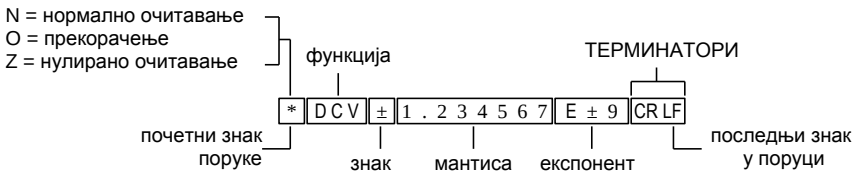
| функција | код функције | | параметри |
|---|---|---|---|
| мерни опсег | *R* | 1<br>2<br>3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 1 mV,<br>10 mV,<br>100 mV,<br>1 V,<br>10 V,<br>100 V,<br>1000 V. |
| тригер | *T* | 0<br>1<br>2<br>3 | асинхрони,<br>синхрони,<br>асинхрони на *GET*,<br>синхрони на *GET*. |
| филтер | *P* | 0<br>1<br>2 | без филтера,<br>филтер 1,<br>филтер 2. |
| пригушење | *D* | 0<br>1 | без пригушења,<br>са пригушењем. |
| аутоматско подешавање нуле | *Z* | 0<br>1 | без подешавања,<br>са подешавањем. |
| резолуција приказа | *B* | 0<br>1 | 5½ цифара,<br>6½ цифара. |
| прекид | *M* | 0<br>1 | без прекида,<br>слање *SRQ*. |
| статус | *U* | | |
| извршавање наредбе | *X* | | |

Табела 11.2. Кодови наредби инструмента *Nanovoltmetar Model* 181

Задавање радног режима инструмента омогућено је локално, преко предње плоче, и даљински преко *GPIB*-интерфејса. Осим тога, даљински може да се програмира и започињање мерења. Начин на који се мерење иницира (*trigger*) може да буде асинхрон или синхрон. У првом случају, после пријема поруке којом се уређај адресује као предајник (режим *T0*, табела 11.2) или пријема наредбе *GET* (режим *T2*), садржај бафера, у којем се чува резултат мерења, иновира се континуално, сталном брзином (зависно од мерног опсега). У другом случају, иновирање излазног бафера се врши само једном, након првог важећег мерења, после пријема поруке којом се уређај адресује као предајник (режим *T1*), или пријема наредбе *GET* (режим *T3*). У режимима *T0* и *T1* уређај адресован као предајник одговара слањем поруке која садржи податак о садржају излазног бафера. У режимима *T2* и *T3* пре слања мерног податка уређај мора да прими наредбу *GET*.

У једном низу симбола који представљају команду (командни стринг) могу да се наведу све потребне наредбе, при чему је редослед навођења произвољан. На пример низови: "*R4B0*", "*R4 B0*" и "*B0R4*" имају исто значење. Једино ограничење представља дужина командног низа, који не сме да има више од 17 знакова. Да би појединачна команда или командни низ био извршен, мора да буде послат (и примљен) *ASCII*[4] знак *X*. Командне поруке које не садрже извршну наредбу (*X*) смештају се у командни бафер инструмента до пријема наредбе за извршење. Нерегуларне комаде се не прихватају (не доводе до никаквих промена у режиму рада инструмента).

Податак о резултату мерења шаље се у облику низа чија дужина зависи од програмираног броја терминационих знакова. Формат податка приказан је на слици 11.4.




Слика 11.4. Формат података инструмента *Nanovoltmetar Mode*l 181

На слици 11.5 приказан је, као практичан пример, изглед подпрограма којим се остварује задавање радног режима и очитавање низа узастопних мерења. На почетку програма се дефинишу програмски параметри: број мерења (*BROJM* = 10) и временско ограничење при чекању одговора (*CEKANJE* = 2s). Затим се формира комуникациона адреса инструмента (*ADRESA* = 705) на основу задатог кода модула интерфејса уграђеног у рачунар (*ISC* = 7) и адресе која је додељена инструменту (*INSTADR* = 5), постављене помоћу микропрекидача на његовој задњој плочи.

Потом се издају наредбе којима се дефинише почетно стање система. Врши се иницијализација интерфејса (наредба *RESET*) и активира се рутина за временску контролу (наредба *TIMEOUT*) којом се ограничава време чекања на одговор. Након тога се иницијализују сви уређаји прикључени на магистралу интерфејсног модула (*CLEAR*) и онемогућује локално командовање преко тастера на њиховој командној плочи (*LLOCKOUT*). Са циљем преузимања контроле над мерним инструментом издаје се наредба којом се он доводи у режим даљинског управљања (*REMOTE*).

Након иницијализације (као и након укључивања напона напајања), мерни

[4] Ознака *ASCII* потиче од назива: амерички стандардни код за размену информација (*American Standard Code for Information Interchange*). У нашем језику се назива *"*аски код*"* .

опсег нановолтметара *Mode*l 181 је 1000 *V* (*R7*), а резолуција одговара приказу са 5½ цифара (*B0*). Дефинисање жељеног режима рада мерног система инструмента врши се издавањем наредбе *OUTPUT* која адресованом уређају прослеђује задати командни стринг *PORUKA$*. Он садржи одговарају}е кодове који дефинишу изабрани мерни опсег (*R4* : 1 *V*), резолуцију (*B1* : 6 цифара), тригер инструмента (*T1* : појединачни) и захтев за извршењем примљене поруке (*X*).

```
BROJM = 10 : CEKANJE = 2
ISC = 7 : INSTADR = 5
ADRESA = ISC*100 + INSTADR
RESET (ISC)
TIMEOUT (ISC, CEKANJE)
CLEAR (ISC)
LLOCKOUT (ISC)
REMOTE (ADRESA)
CLS : PRINT "NANOVOLTMETAR MODEL 181 (05)"
PRINT "INICIJALNO STANJE: [R7, P1, D0, Z0, B0]"
PORUKA$ = "R4 B1 T1 X"
DUZINA = LEN (PORUKA$)
OUTPUT (ADRESA, PORUKA$, DUZINA)
CLS : PRINT "MERNI OPSEG: 1V"
PRINT "IZMERENE VREDNOSTI"
FOR N = 1 TO BROJM
ENTER (ADRESA, REZULTAT)
PRINT ,N,REZULTAT
NEXT N
CLEAR (ADRESA)
LOCAL (ADRESA)
```

Слика 11.5. Задавање радног режима и очитавање резултата десет мерења

Резултат мерења уноси се у рачунар наредбом *ENTER* којом се измерена вредност очитава и додељује нумеричкој променљивој *REZULTAT* која се приказује на екрану. Овај поступак се понавља задати број пута (*BROJM*).

Након завршеног процеса аквизиције, инструмент се враћа у иницијално стање (*CLEAR*) и режим локалног управљања (*LOCAL*).

## 11.3.2 ПРИМЕР 2: РЕГИСТРАЦИЈА (ЗАПИС МЕРЕЊА)

Често се појављује потреба за записивањем низа вредности неке величине током дужег временског интервала, на пример са циљем анализе временске зависности оптерећења које у односу на електроенергетску мрежу представља неки одређени потрошач (или група потрошача), или са циљем утврђивања стабилности којим сигнал-генератор "држи" задату вредност неког параметра сигнала на свом излазу (амплитуду, учестаност или фазу). Аутоматизација овог процеса подразумева периодично очитавање вредности посматране величине, при чему се брзина узорковања усваја на основу компромиса захтева у погледу финоће временске резолуције (која зависи од очекиване брзине промене посматране величине), времена потребног да се мерена величина очита и региструје са жељеном тачношћу, као и расположивог капацитета меморијског медијума на којем се подаци записују.

Дигитални мултиметар *hp3456A* је један од првих правих представника генерације програмабилних мерних инструмената и може се узети и као типичан пример њених припадника. Детаљан опис структуре, функција и мерно-техничких карактеристика дат је у документацији овог инструмента, а овде ће, само у неопходној мери, бити описане функције које се у овом примеру користе [7]. Уређај садржи три микропроцесора и посебан контролер за *GPIB*-интерфејс. Осмобитни микропроцесор остварује функцију главног контролера, а посебан 4-битни процесор служи за управљање мерним функцијама. Спрега између мерног и централног управљачког дела остварује се преко 8-битног процесора специјалне изведбе. Адреса мултиметра задаје се помоћу микропрекидача на његовој задњој плочи. Изглед инструмента приказан је на слици 11.6.



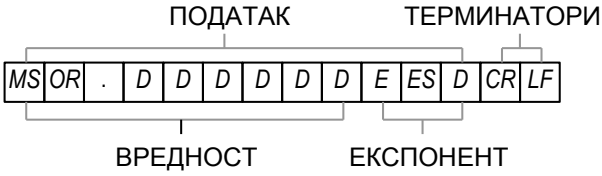

Слика 11.6. Дигитални мултиметар *hp3456A*

Управљање инструментом и очитавање измерених вредности остварује се слањем порука које садрже низ знакова који представљају кодове који дефинишу начин његовог рада. Кодови основних команди приказани су у табели 11.3.

| Мерна функција | | Мерни опсег | |
|---|---|---|---|
| једносмерни напон (*DCV*) | *F1* | аутоматско подешавање | *R1* |
| наизменични напон (*ACV*) | *F2* | 100 mV/0.1 kΩ | *R2* |
| *ACV+DCV* | *F3* | 1 V/ 1 kΩ | *R3* |
| отпорност (двожично) | *F4* | 10 V/ 10 kΩ | *R4* |
| отпорност (четворожично) | *F5* | 100 V/100 kΩ | *R5* |
| | | 1000 V/ 1 MΩ | *R6* |
| Тригер | | 10 MΩ | *R7* |
| интерни | *T1* | 100 MΩ | *R8* |
| екстерни | *T2* | 1000 MΩ | *R9* |
| појединачни | *T3* | | |
| даљински | *T4* | Аутоматско подешавање нуле | |
| | | укључено | *Z1* |
| Интерна меморија | | искључено | *Z0* |
| укључена | *RS1* | | |
| искључена | *RS0* | Филтер | |
| | | укључен | *FL1* |
| | | искључен | *FL0* |

Табела 11.3. Програмски кодови основних команди мултиметра *hp3456A*

Мерни подаци се шаљу *GPIB*-контролеру у *ASCII* или пакованом формату. Податак приказан у *ASCII*-формату састоји се од 14 знакова (слика 11.7). Сваком знаку одговара један бајт. Поларитет измерене величине приказује је знацима "+" и "-" на почетку поруке (*MS*). Након знака за прекорачење (*overrange*, *OR*), који може бити 1 или 0, следи бројна вредност приказана мантисом и експонентом (*scientific notation*). Децимална тачка може да буде на било којем месту десно од знака за прекорачење, а лево од ознаке експонента (*E*). Као терминатори поруке користе се знаци којим се означавају *ASCII* наредбе *CR* (*carriage return*) и *LF* (*line feed*).




*MS* = знак измерене вредности; 0 = "+"; 1 = "-"
*OR* = прекорачење
*D* = декадна цифра; $D \in \{0...9\}$
*ES* = знак експонента; 0 = "+"; 1 = "-"

Слика 11.7. *ASCII*-формат података

Знак мерене величине (*MS*) као и знак експонента приказани су логички тако да "0" представља симбол "+", док "1" представља симбол "-". Бројке експонента и мантисе приказане су у *BCD* (*binary coded decimal*) коду. Децимална тачка је на првом месту иза знака за прекорачење (*OR*), који може бити 0 или 1. Након пријема података у пакованом облику неопходно је њихово довођење у стандардни облик у којем се у рачунару користе.

```
BROJM = 100 : CEKANJE = 2 : PERIODM = 10
ISC = 7 : INSTADR = 22 : ADRESA = ISC*100 + INSTADR
RESET (ISC)
TIMEOUT (ISC, CEKANJE)
CLEAR (ISC)
LLOCKOUT (ISC)
REMOTE (ADRESA)
PRINT "KONTROLA MREZNOG NAPONA ",BROJM;"MERENJA"
PORUKA$ = "F2 R6 FL0 Z0 6STG T4" : DUZINA = LEN (PORUKA$)
OUTPUT (ADRESA, PORUKA$, DUZINA)
PRINT "hp 3456A (";INSTADR;") : 1000 VAC"
POCETAK:
    INPUT "POCETAK MERENJA (d)? ",ODG$
    IF ODG$ <> "d" THEN BEEP : GOTO POCETAK
CLS: PRINT "MERENJE U TOKU"
ON TIMER (PERIODM) GOSUB OCITAVANJE
N = 0
TIMER ON
NASTAVAK:
    IF N < BROJM THEN NASTAVAK
CLEAR (ADRESA)
LOCAL (ADRESA)
OCITAVANJE:
    N = N + 1
    ENTER (ADRESA, REZULTAT)
    PRINT N, REZULTAT
    RETURN
```

Слика 11.8. Контрола мрежног напона

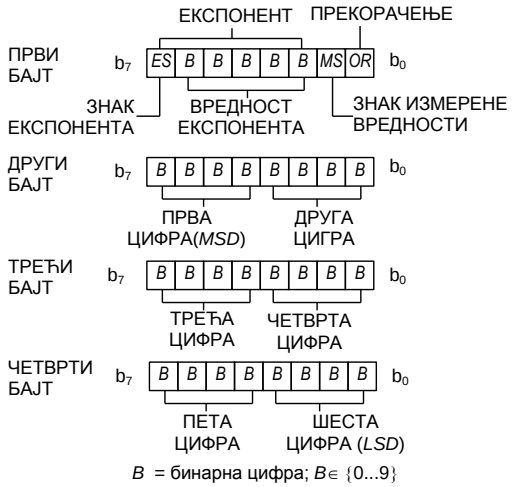
На слици 11.8 приказан је изглед подпрограма којим се остварује контрола мрежног напона прикљученог на улаз инструмента. На почетку програма се дефинишу програмски праметри: укупан број мерења (*BROJM* = 100), временско ограничење при чекању одговора (*CEKANJE* = 2 *s*) и трајање временског интервала између два мерења, исказан у секундама (*PERIODM* = 10 *s*). Комуникациона адреса инструмента (*ADRESA* = 722) одређује се на основу кода

модула интерфејса уграђеног у рачунар (*ISC* = 7) и адресе која је, у овом примеру, додељена инструменту помоћу микропрекидача на његовој задњој плочи (*INSTADR* = 22).

Задавање радног режима дигиталног мултуметра *hp3456A* врши се слањем поруке у којој су сви потребни параметри дефинисани помоћу одговарајућих кодова. Редослед навођења појединих кодова у поруци је произвољан. Ради бољег уочавања, командни стринг садржи размаке између појединих кодова, што није неопходно.

За одмеравање времена између два сукцесивна мерења користи се наредба *ON TIMER*. Између два очитавања извршава се програмска "петља" *ODBROJAVANJE* која се, у начелу, може проширити за обављање других функција корисничког програма. Након сваког извршеног и у меморију рачунара унетог мерења, на екрану се приказује његов редни број (*N*) і очитана вредност мерене величине (*REZULTAT*).

Већа брзина очитавања података остварује се преношењем података у тзв. пакованом облику. У том случају, бројна вредност која представља резултат мерења приказана је помоћу 4 бајта (уместо 14 колико захтева *ASCII*-формат). Сваки бајт садржи одређени део мерног податка (слика 11.9).




Слика 11.9. Паковани формат података

## 11.3.3 ПРОЗИВАЊЕ МЕРНИХ ИНСТРУМЕНАТА

У оба претходна примера рачунар непосредно контролише процес узимања вредности мерене величине. То захтева његово перманентно ангажовање на репетитивном извршавању процедуре дијалога, а осим тога имплицира дуго време потребно за појединачно преношење низа сукцесивних вредности (резултата мерења). Када је потребно прикупити већи број узорака, цео процес се ефикасније остварује уколико мерни инструмент поседује сопствену меморију у којој може да сачува резултате низа мерења, који се преносе у меморију рачунара на крају читавог експеримента (или једне његове фазе). У међувремену рачунар, током програма који обавља, само проверава да ли је контролисани инструмент извршио поверени задатак.

Мултиметар *hp3456A* поседује интерну меморију у којој могу да се сместе програм рада и резултати низа мерења. До 350 очитавања може да буде меморисано и касније очитано локално или даљински. У режиму даљинског управљања расположиви меморијски простор може да се подели тако да један део служи за смештање програма (*program memory*), а други (преостали) део за

податке добијене мерењем (*reading store*). Програм представља низ командних кодова и нумеричких података који одређују радну конфигурацију инструмента и секвенце мерног процеса. Укупан расположиви меморијски простор је 1400 бајтова. Сваки мерни податак заузима 4 бајта, док кодови појединих програмски команди заузимају од 1 до 3 бајта (не рачунајући нумеричке вредности програмабилних параметара). Уписивање програма (низа командних кодова и задатих параметара) остварује се наредбама "*L1*" (на почетку командног стринга који треба уписати у меморију) и "*Q*" (крај уписа). Наредбом "*X1*" покреће се извршавање програма смештеног у меморији уређаја. Након што се програм, који дефинише конфигурацију инструмента и секвенцу мерења, унесе у меморију, његово извршавање може да буде иницирано слањем само ове наредбе.

Дефинисано је седам догађаја чији настанак може да узрокује потребу за саобраћањем инструмента са *GPIB*-контролером. Сваки од ових догађаја представљен је једним битом у статус-бајту који уређај даје као одговор на упит серијским прозивањем (табела 11.4). Ручни захтев за саобраћањем са контролером поставља се притиском на тастер на предњој плочи инструмента, када се овај налази у режиму *LOCAL*. Овај догађај приказује се првим битом (*b0*) у статус-бајту инструмента. Бит *b1*, којим се означава да је целокупан код који дефинише меморисани мерни програм (конфигурација инструмента и мерна секвенца) извршен, аутоматски се укида (поставља на нулу) поновним извршавањем.

| сигнал | бит | значење | декадни код |
|---|---|---|---|
| *DIO1* | *b0* | захтев за саобраћањем постављен преко командне плоче инструмента (*front panel* SRQ) | 65 |
| *DIO2* | *b1* | извршавање интерног програма (*program memory execution complete*) | 66 |
| *DIO3* | *b2* | спремност мерних података за пренос (*data ready*) | 68 |
| *DIO4* | *b3* | превремено иницирање мерења | 72 |
| *DIO5* | *b4* | нерегуларно стање, интерна или синтаксна грешка | 80 |
| *DIO6* | *b5* | грешка у програмској меморији | 96 |
| *DIO7* | *b6* | захтев *SRQ* (потреба за саобраћањем) | 64 |
| *DIO8* | *b7* | прекорачење границе | 192 |

Табела 11.4. Статус-бајт инструмента *hp3456A*

Индикација спремности података за очитавање (бит *b2*) укида се аутоматски иницирањем новог мерног циклуса. Појава спољашњег тригер-сигнала за време извршавања мерног циклуса приказује се као грешка (*trigger too fast*, *b3)*.

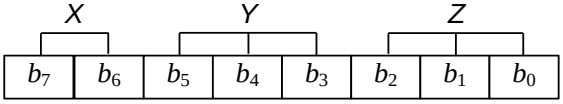
Нерегуларно стање инструмента, бит *b4*, обухвата три догађаја:

- погрешно задат радни режим (*illegal instrument state*), (на пример: задат је опсег *10M* (наредбом *R7*) при мерењу једносмерних напона (наредба *F1*);
- интерна грешка (*internal error*), квар инструмента;
- синтаксна грешка (*syntax error*) - наредба која дефинише радни режим инструмента садржи непостојећи код (на пример: задат је код *F9* који не постоји).

Грешка у интерном програму (*b5*, *program memory error*) настаје ако је команда за извршење програма (или тестирање уређаја) уписана у меморију, или ако је приликом уписивања програма дошло до прекорачења расположивог меморијског простора (*overflow*).

Бит *b6* једнак је 1 (*true*) када год постоји *SRQ* захтев. Прекорачење задатих граница мерене величине, бит *b7*, односи се на контролу граничних вредности у оквиру математичке обраде. Постављање *SRQ*-захтева је програмски контролисано. Постављањем *SRQ*-маске одређује се који од наведених догађаја проузрокује активирање линије *SRQ*. Маска представља троцифрени октални код (*XYZ*) статус-бајта, као што је то приказано на слици 11.10. На пример, Код 377 значи да сваки од наведених догађаја може бити узрок постављања *SRQ*-захтева. Код 106 значи да инструмент може, преко *SRQ*-линије, да извести контролер када

су након извршења унетог програма мерни подаци спремни за пренос.




Слика 11.10. *SRQ* маска

# 11.4 ПРОГРАМСКА ПОДРШКА МЕРНИХ СИСТЕМА

Појава програмабилних мерних инструмената био је само први корак на путу повезивања мерне и рачунарске технике. Након тога уследила је примена рачунара опште намена (*PC*) као контролера који управља мерним системом образованим од програмабилних уређаја. Са тим циљем стандардизовани су одговарајући интерфејси, [8], [9], и реализовани модули којима се физички остварује спрега са рачунаром. Следећи корак била је стандардизација језика и синтаксе подесне за све програмабилне инструменте. У првобитном облику то је било урађено у оквиру спецификација *IEEE* 488.2 стандарда, који се односи на *GPIB* интерфејс, да би се убрзо развио посебан документ *SCPI* (*Standard Commands for Programmable Instruments*) којим су дефинисани синтакса, структура команди и формат података који треба да буду заједнички за све произвођаче и све моделе програмабилних мерних уређаја.

Стандардом *SCPI* уведене су генеричке команде, као *CONFigur*e и *MEASure* које треба да користе сви инструменти. Дефинисане су класе мерних инструмената као што су осцилоскоп, мултиметар, генератор, извор за напајање и други. *SCPI* команде су текстуални низови који се шаљу инструментима преко одговарајућег физичког интерфејса као што је на пример *GPIB*. Представљају низове кључних речи (које могу да садрже параметре) којима се дефинише стање инструмента (*set* ), или представљају упит (*query*) којим се врши очитавање. Упити се шаљи инструменту постављањем знака питања на крају команде. Називи команди садрже велика и мала слова. Скраћени облици, код којих се користе само велика слова, имају исто значење. На пример, команда којом се интерфејс за серијску комуникацију поставља на брзину преноса од 2400 бита у секунди има облик:

*SYSTem:COMMunicate:SERial:BAUD* 2400,

односно у скраћеном облику:

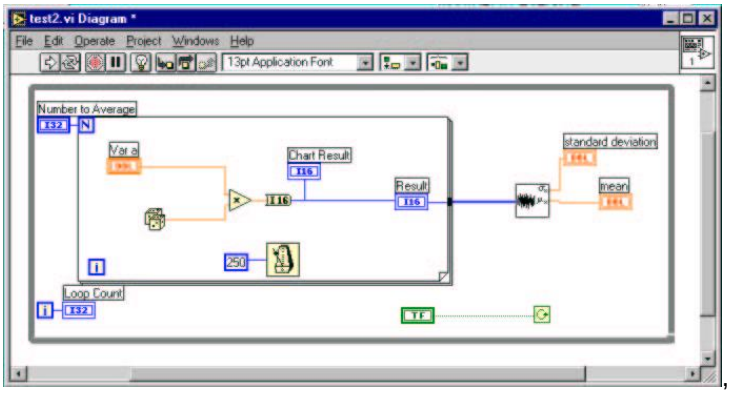
*SYST:COMM:SER:BAUD* 2400.

Порука која налаже дигиталном мултиметру (*DMM*) да се конфигурише и да обави мерење наизменичног напона на опсегу 20 V са резолуцијом 0.001 V има облик:

*MEASure:VOLTage:AC*? 20, 0.001

Кључне речи *MEASure:VOLTage:AC* „обавештавају“ инструмент да врши мерење наизменичног напона. Знак ? представља налог да инструмент врати мерни податак рачунару (контролеру). Бројеви 20 и 0.001 специфицирају мерни опсег (20 V) и резолуцију (.001 V).

За потребе мерења и баратања мерним информацијама развијени су посебни програмски језици. Текстуелно заснован рачунарски језик користи низове знакова (карактера) за израду програма, док је визуелни програмерски језик (*Visual programming language, VPL*) заснован на просторном распореду и повезивању графичких симбола (елемената). Такву једну платформу и развојно окружење представља *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) који је развила фирма *National Instruments* за потребе аутоматизовања примене процесне и мерне опреме при реализацији одређеног лабораторијског експеримента. Има широку примену. На слици 11.11 приказан је пример примене таквог графичког програмирања.




Слика 11.11. Пример *LabVIEW* програма

Посебан значај у развоју савремене мерне технике има појава виртуелних мерних инструмената (*Virtual Instrument, VI*). Састоје се од основног мерног хардвера којим се остварује спрега са физичким светом, и универзалнпг рачунара којим се остварује анализа и приказ мерних података, а омогућује и симулацију мерних експеримената. Основна идеја виртуелног мерног инструмента је да се рачунар опште намене, који представља веома приступачну развојну платформу, велике процесне моћи, претвори, уз додатак специфичног харвера[5], у мерни систем у којем улогу појединачних мерних инструмената остварују софтверски модули. Програмска организација виртуелних мерних инструмената дефинисана је стандардом *VISA* (*Virtual Instrument Software Architecture*) који је установљен од стране *VXIplug&play Alliance* и прихваћен као индустријски стандард за виртуелне инструменте о којем се стара организација *IVI*[6] *Foundation*.

*VISA* стандард обухвата спецификације које се односе на комуникацију између појединих уређаја (који не морају да буду инструменти). Начин на који међусобно делују поједине софтверске компоненте дефинише се одговарајућим софтверским интерфејсом (*Application Programming Interface,*

[5] Виртуелни мерни инструмент не треба мешати са виртуелним инструментом, који представља софтвер који омогућује кориснику да производи звук на рачунару.

[6] *IVI (Interchangeable Virtual Instrumentation) Foundation* је отворено удружење основано са циљем да унифицира спецификације за програмабилне мерне уређаје. Тиме се постиже замењивост, остварују боље перформасе и смањују трошкови развоја и одржавања.

*API*)[7]. Библиотека *VISA Library* дефинише стандардизовано представљање појединих операција. Софтверске рутине које поједностављују даљинску контролу појединих инструмената називају се драјвери (*Instrument Drivers*). На тај начин *VISA* омогућује, на једном апстрактном нивоу, успостављање комуникационог канала између мерне опреме који не зависи од коришћеног интерфејса. Стандард *VISA* дефинише комуникацију у мерном систему која се врши између дела који служи за обраду информација (као што је, на пример, рачунар) и окружења, посебно комуникацију у којој учествују људи и мерни инструменти, али и други информациони системи.

## 11.4.1 ПРОГРАМСКИ ЈЕЗИК *VEE Pro*

*VEE Pro* је програмски језик намењен за примену у мерним системима у којима рачунар остварује улогу контролера који управља програмабилним инструментима. Осмишљен је у фирми *Hewlet Packard* (данас *Agilent*) тако да омогућује једноставно писање програма и лако праћење тока извршавања, што је веома значајно за почетнике, односно за оне који немају довољно искуства у програмирању. Основне предности употребе програмског језика *VEE Pro* су једноставност, велики број готових и разноликих објеката за управљање, функционалан и разнолик графички интерфејс за унос и приказ података, виртуелни генератори сигнала подесиве амплитуде и учестаности, комуникација са свим програмима из *Windows* окружења, могућност повезивања са свим мерним инструментима фирме *Agilent*, али и осталих најпознатијих светских произвођача. Постоји могућност директног повезивања са документима направљеним у *Microsoft Office* пакету (*Exce*l, *Microsoft Word*, *Microsoft Access*). Програм написан у програмском језику *VEE Pro* може се директно позивати и користити из програма написаног, на пример, у програмском језику *Visual Basic*.

За комуникацију рачунара са програмабилним мерним уређајима користи се посебан објекат, *Instrument Menager*, који омогућује комуникацију преко стандардног серијског, *GPIB, USB/GPIB* или *Lan* интерфејса. На основу документације произвођача инструмента пише се код за комуникацију са уређајем. Све команде које иду од рачунара ка уређају почињу кључном речи *WRITE TEXT,* а завршавају са *EOL*. Све команде које иду од уређаја ка рачунару почињу кључном речи *READ* и завршавају са *EOF*.

*VEE Pro* спада у категорију такозваних визуелних програмских језика (*visual programming language*, *VPL*) којима се програм израђује, не помоћу текстуелног описа, већ помоћу графичких објеката којима се манипулише у складу са одговарајућим правилима. Основни кораци за израду програма су [10]:

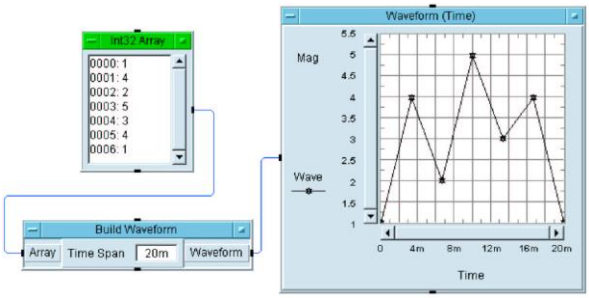
- избор и постављање на радну површину потребних објеката за решавање конкретног задатка,
- дефинисање својстава сваког постављеног објекта,
- међусобно повезивање објеката,
- израда корисничког интерфејса,
- испитивање (тестирање) програма,
- израда извршне верзије програма (*Run Time Version*).

Основни типови података, који се користе у програмском језику *VEE Pro* су уобичајене програмске променљиве: логичке променљиве (*boolean*), цели бројеви (*integer*), реални бројеви (*real*), комплексни бројеви (*complex*), текст (*text*), низ (*array*), запис (*record*) и датум/време (*date/time*), као и неке посебне, као што су "таласни облик" (*waveform*) и "спектар" (*spectrum*).

---

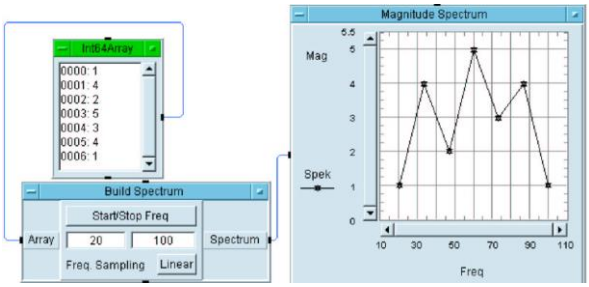
[7] Њима је обухваћен приступ базама података, али и појединим хардверским јединицама. Најчешће је у облику библиотека које садрже спецификације функција, структура података, класе објеката и променљиве.

"Таласни облик" представља податке у фреквенцијском домену. Формира се помоћу објекта *Build Waveform* у чије поље *Array* се уноси низ бројева којима је у *XY* дијаграму дефинисана *Y*-оса, а у пољу *Time Span* подаци који се приказују на *X*-оси (слика 11.12).




Слика 11.12. Представљање података типа *Waveform*

"Спектар" представља податке у временском домену. Формира се помоћу објекта *Build Spectrum* у чије поље *Array* се уноси низ бројева којима је у *XY* дијаграму дефинисана *Y*-osa, док се у поље *Start*/*Stop Freq* уноси распон између најниже и највише учестаности које се приказују на *X*-оси. Скала може бити линеарна или логаритамска (слика 11.12).



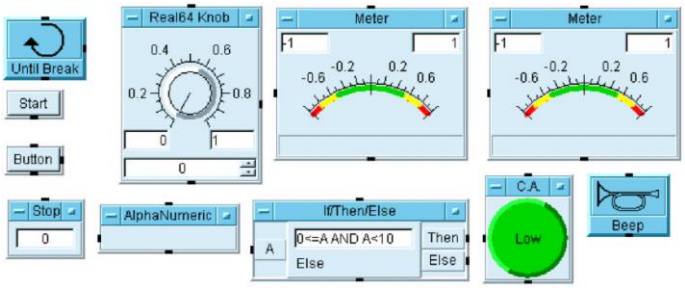

Слика 11.13. Претствљање података типа *Spectrum*

Писање програма врши се избором објеката од којих су основни приказани на слици 11.14. То су:

- бесконачно понављање програма (*Until Break*),
- дугме за почетак и контролу извршавања програма (*Start, Button*),
- крај програма (*Stop*),
- генератор реалних бројева у облику кружног потенциометра (*Real64 Knob*),
- симулатор аналогних инструмената (*Meter*),
- приказ бројевне вредности (*Alpha Numeric*),
- приказ аларма у боји (*Color Alarm, CA*),
- условно гранање (*If/Then/Else*),
- генерисање звучног сигнала (*Beep*).

Објекат *Until Break* је намењен за понављање неког низа наредби све док се не догоди догађај *Break* за прекид[8]. Објекат *Start* омогућује покретање једног дела или комплетног програма. Објекат за условно грањање, *If/Then/Else*, има два улаза и два излаза. Улаз *A* се користи за довођење сигнала који се проверава, а улаз на врху графичког приказа (слика 11.14) представља улаз за побуду. Излаз *Then* је једнак логичкој јединици, ако је наведен услов испуњен. У противном, излаз *Else* је једнак логичкој јединици. Објекат *Stop* зауставља програм.

[8] Могући су и други облици објеката за вишеструко понављање. .




Слика 11.14. Објекти програма *VEE Pro*

Приказивање података врши се на више начина. Објекат *Alpha Numeric* се користи за приказ нумеричких података. За аналогни приказ постоји пет објеката типа *Indicator*. Објекат *Meter* се користи за приказ бројевних вредности симулацијом аналогног инструмента. Помоћу објекта *Color Alarm* (*CA*) приказују се сигнализације и аларми. Објекат *Beep* се користи за генерисање звука као знака упозорења. За генерисање бројевних вредности постоје посебни објекти чији графички приказ има изглед линеарног или обртног потенциометра.

За графички приказ података постоје три објекта: *XY Trace, Strip Chart* и *Polar Plot*. За приказ који одговара осцилоскопу постоје такође три објекта: *X vs Y Plot, Complex Plane* и *Waveform (Time)*. Фреквенцијска анализа сигнала (*Spectrum Freq*) остварује се помоћу четири објекта: *Magnitude Spectrum, Phase Spectrum, Magnitude vs Phase (Polar)* и *Magnitude vs Phase* (*Smith*). Поред тога постоје и објекти помоћу којих се врши бројање (*Counter*), сабирање сукцесивних вредности (*Accumulator*), израчунавање временске разлике (*Timer*) и памћење неколико последњих вредности (*Shift Register*). Посебан објекат омогућује коришћење готових функција које постоје у *MATLAB*–у (*MATLAB Script*). Сви потребни објекти се постављају на радну површину за израду програма. Када се објекти поставе, врши се задавање својстава (*properties*) сваког од објеката. На тај начин се објекти прилагођавају њиховој намени. Подешавају се натпис на објекту, икона, фонт, боја и величина слова, боје појединих дијелова објекта, формат приказа бројевних вредности, начин активирања...

У документацији програмског језика *VEE Pro* постоји низ готових примера програма који могу да послуже као основа за учење овог језика. До примера се може доћи и преко интернета.

## 11.5 АУТОМАТИЗОВАНИ ИСПИТНИ СИСТЕМИ

Аутоматизовани испитни системи постали су неизбежни у развојним лабораторијама код којих испитивање подразумева праћење великог броја разноврсних променљивих величина, при чему се сам поступак испитивања мења сходно потребама експеримента. Они се користе и при испитивању мерних уређаја које се обавља по утврђеном (прописаном) алгоритму, а обухвата више испитних тачака. Аутоматизовани системи су неопходни при овери[9] великог броја мерних уређаја који подлежу периодичном прегледу. Овде пре свега спадају бројила електричне и топлотне енергије, гасомери и водомери, али и таксаметри, ваге са аутоматским функционисањем, мерила брзине у саобраћају, дозиметри...

[9] Оверавање мерила (*verification of a measuring instrument*) је поступак који обухвата преглед и жигосање (*marking*) и/или издавање уверења о оверавању (*verification certificate*), којим се утврђује и потврђује да је мерило усклађено са законским захтевима. Може да се овери само мерило за које постоји одобрење типа.

У Републици Србији послове оверавања мерила могу да обављају привредни субјекти и друга правна лица која су овлашћена за обављање тих послова. Овлашћена тела морају да имају одговарајући акт о акредитацији[10], као и да испуњавају прописане услове који се односе на стручну оспособљеност запослених, на квалитет просторија и опреме за рад, на захтеве у погледу независности и непристрасности у односу на лица повезана са мерилом које је предмет оверавања, као и на захтеве у погледу поверљивости, односно чувања пословне тајне [11].

Оверавање мерила обухвата преглед и жигосање, односно издавање уверења којим се потврђује да је мерило у складу са одобреним типом мерила, односно да испуњава прописане метролошке захтеве. Оверавање мерила може да буде прво, редовно или ванредно. Првом оверавању подлежу нова мерила, као и мерила која нису раније оверавана. Мерило на прво оверавање може да поднесе домаћи произвођач, овлашћени увозник односно овлашћени дистрибутер. Редовном оверавању подлежу мерила која су у употреби. Спроводи се периодично, у временским интервалима који су прописани за одређену врсту мерила [12].

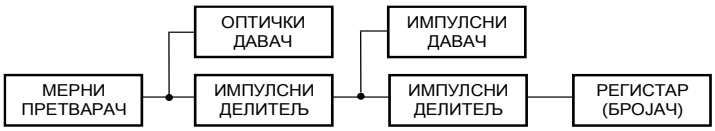
### 11.5.1 ЛАБОРАТОРИЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ И ОВЕРУ БРОЈИЛА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Бројила електричне енергије заузимају посебно место, не само због масовности, већ и због разноврсности у погледу функција и класе тачности. Најбројнија су бројила активне електричне енергије намењена за мерење у тзв. широкој потрошњи, директним мерењем на дистрибутивној мрежи на ниском напону. Могу бити једнофазна или трофазна, једнотарифна или двотарифна. Другу групу чине бројила која се прикључују преко струјних мерних трансформатора. За мерења на средњем и високом напону користе се трофазна бројила која се прикључују преко напонских и струјних мерних трансформатора (трансформаторска бројила). Њихов референтни напон је 100 V, а референтна (називна) струја 1 A или 5 A. Омогућују мерење енергије која се преноси у једном или оба смера, у једној или две тарифе. Осим тога постоје и бројила реактивне електричне енергије. Метролошке карактеристике бројила утврђене су одговарајућим правилницима Дирекције за мере и драгоцене метале [13], [14], [15], [16], [17].

Бројила електрине енергије могу да се представе принципском електричном шемом приказаном на слици 11.15. Податке о измереној енергији бројило даје преко:

- једног или више регистара,
- давача импулса за даљинско мерење,
- оптичког давача за потребе испитивања.

[10] Акредитовање је поступак којим државна служба надлежна за акредитацију (у Србији је то Акредитационо тело Србије, АТС) на прописан начин утврђује оспособљеност и компетентност организације за оцењивање усаглашености, при чему се званично потврђује њихова способност да обављају одређене послове оцењивања усаглашености.




Слика 11.15. Функционална шема бројила електричне енергије

Регистар је електромеханички или електронски уређај, који обухвата меморију[11] и дисплеј[12], који чува и приказује измерену вредност електричне енергије. Један електронски дисплеј може да се користи за више електронских меморија, како би се формирало више електронских регистара. Са становишта примене, регистар представља главни излаз бројила чијим се очитавањем на месту мерења (уградње) утврђује измерена количина пренете енергије. Импулсни давач омогућује даљинско мерење са резолуцијом која је за ред величине боља од резолуције приказа измерене енергије на самом бројилу. Спрезање са додатном мерном опремом је једноставно. Сваки импус на излазу импулсног давача представља тачно одређену количину измерене енергије. Одређивање укупне енергије своди се на бројање импулса акумулираних током интервала посматрања. Оптички давач представља излазни орган бројила намењен за њихово испитивање приликом овере.

Испитивање бројила врши се на мерној опреми, односно еталонима који морају да испуњавају прописане услове и која поседују одговарајући документ о следивости до националних или међународних еталона. Рачунар опште намене служи за спрегу са корисником, управља радом система, припрема, чува и штампа извештаје о раду.

Еталони и мерна опрема која чини мерни систем за преглед бројила морају да пруже одговарајућу тачност, тако да проширена мерна несигурност мерног система за преглед бројила буде најмање три пута мања од највеће дозвољене грешке за бројило које се прегледа. У лабораторији морају да буду обезбеђени референтни услови у складу са одговарајућим правилницима.

Визуелним прегледом утврђује се да ли постоје сви саставни делови бројила, да ли одговарају опису у решењу о одобрењу типа мерила, да ли је бројило састављено на одговарајући начин и да ли се налази у стању употребљивости (чисто, без натписа и налепница).

Пре почетка испитивања бројило треба да се 24 часа налази у референтним условима лабораторије. Напонска кола бројила и мерна опрема на којој се врши испитивање морају бити довољно дуго прикључени на референтни напон да се оствари температурска стабилизација у складу са захтевима који су дати у документацији произвођача.

[11] Меморија је део бројила у којем се чувају информације у дигиталном облику.
[12] Дисплеј је део бројила који приказује резултат мерења односно садржај меморије.

Празан ход бројила испитује се при отвореним струјним колима. Напонска кола прикључују се на напон једнак 115%$U_{\text{n}}$. Минимално време трајања испитивања празног хода израчунава се по обрасцу:

$$\Delta t \geq \frac{N \cdot 10^6}{k m U_{\text{n}} I_{\max}} \text{ (мин)}, \tag{11.1}$$

где је $k$ број импулса које емитује испитни излаз по $kWh$ (имп/$kWh$), односно по $kvarh$ (имп/$kvarh$); $m$ је број мерних система[13]; $U_{\text{n}}$ је референтни напон ($V$); $I_{\max}$ је максимална струја ($A$), а $N$ сачинилац чија вредност зависи од класе тачности[14] бројила, наведен у следећој табели 11.5:

| класа тачности | 0,2S | 0,5S | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| $N$ | 900 | 600 | 600 | 480 | 480 |

Табела 11.5. Сачинилац трајања испитивања празног хода

Бројило испуњава услове празног хода ако не даје више од једног импулса на изводу за испитивање, односно давачу импулса за даљинско мерење, и не региструје енергију већу од вредности која одговара једном импулсу.

При испитивању бројила користе се импулси из давача импулса намењеног за испитивање или импулси из давача импулса намењеног за даљинско мерење. Испитивање поласка (почетак регистрације) врши се при напонским колима прикљученим на референтни напон. Фактор снаге једнак је јединици при испитивању бројила активне електричне енергије ($\cos\varphi$ = 1), односно једнак нули при испитивању бројила реактивне енергије ($\sin\varphi$ = 1). Бројило мора да почне да даје импулсе и да непрестано региструје енергију при вредностима струја које су дате у одговарајућим прописима. Струје оптерећења при испитивању поласка бројила активне електричне енергије дате су у табели 11.6.

| Струја оптерећења | Класа тачности | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0,2S | 0,5S | 1 | 2 |
| % $I_{\text{n}}$ (односно % $I_{\text{o}}$)[15] | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,5 |

Табела 11.6. Струје оптерећења при испитивању поласка бројила

Грешка бројила представља разлику вредности коју је испитивано бројило показало и тачне вредности. Тачност бројила исказује се релативном грешком. Највећа дозвољена грешка (НДГ) је утврђена одговарајућим захтевима за одређени тип бројила.

Испитивање тачности при прегледу бројила, у начелу, може да буде остварено методом која се назива снага-време. То је индиректан метод: при

---

[13] У начелу, трофазно бројило садржи три мерна система, по један за сваку фазу. Под одређеним условима мерило може да садржи два мерна система (Аронова спрега).

[14] Класа тачности (*accuracy class*) је категорија мерних средстава која задовољавају одређене метролошке захтеве у погледу грешке мерења или мерне несигурности, у специфицираним условима рада. Обично се означава договором прихваћеном ознаком или бројем.

[15] $I_{\text{n}}$ је назначена струја трансформаторског бројила, а $I_0$ основна струја бројила за директан прикључак.

сталној средњој снази количина пренете енергије сразмерна је трајању мерног интервала. Помоћу посебног извора (калибратора снаге) одржава се константна снага коју при којој испитивано бројило ради, а помоћу одговарајућег инструмента (штоперице) одређује се трајање временског интервала потребног да бројило региструје одређену енергију. Овај поступак, примењиван у двадесетом веку, у данашње време је напуштен.

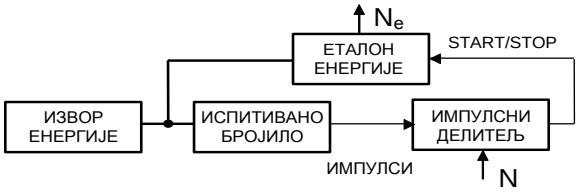
Испитивање бројила остварује се његовим поређењем са одговарајућим еталоном који, током временског интервала у којем се бројило испитује, интеграли снагу која је једнака или сразмерна вредности снаге на улазу бројила које се проверава. Притом се примењује поступак задатог очитавања: одређује се стварна (тачна) вредност износа енергије коју је испитивано бројило измерило, тако што се очитава еталон који је, током временског интервала потребног да испитивано бројило региструје задату вредност енергије, $W_Z$, мерио исту снагу. Вредност $W_Z$ исказује се као број импулса (инкремената енергије) $N$ који се у току процеса мерења очекује на посматраном излазу испитиваног бројила:

$$W_Z = N\Delta W \ , \tag{11.2}$$

где $\Delta W$ представља "енергијску" вредност једног инкремента (импулса). При испитивању преко регистра важи $\Delta W = \delta W$, где је $\delta W$ резолуција приказивања енергије измерене бројилом. При испитивању преко давача импулса за даљинско мерење је $\Delta W = C_I$, где је $C_I$ константа давача импулса (у Wh/имп). При испитивању преко оптичког давача је $\Delta W = 1/C_L$, где је $C_L$ константа бројила[16] у имп/Wh.

Неопходно је да вредност броја $N$ буде изабрана тако да трајање мерног интервала буде довољно дуго да грешка квантовања при очитавању еталона буде довољно мала. Да би релативна грешка квантовања исказана у процентима мерене вредности била мања од $\varepsilon_q$ потребно је да бројевна вредност, која се добија очитавањем еталона, буде већа од $100/\ \varepsilon_q$. Практично, еталон треба да омогући мерење са резолуцијом 0.0001 Wh или бар 1 Ws, да би се могао применити за оверу бројила класе тачности 0,5S.

Мерење треба да одпочне и заврши се у тренутку појављивања импулса на посматраном излазу испитиваног бројила. Задати број импулса $N$ одређује трајање мерења. Тачност резултата непосредно зависи од тачности резултата добијеног помоћу еталона. Принципска блок шема мерног система је приказана на слици 11.16.




Слика 11.16. Испитивање бројила поређењем са еталоном

[16] Константа бројила представља однос између енергије коју је регистровало бројило и одговарајуће вредности добијене на излазу за испитивање бројила. Исказује се као број импулса по ватсату.

Грешка испитиваног бројила израчунава се према изразу:

$$G[\%] = \frac{N_\text{т} - N_\text{e}}{N_\text{e}} 100\,, \tag{11.3}$$

у којем $N_\text{e}$ представља стваран резултат добијен очитавањем еталона, а $N_\text{т}$ је "права" вредност која би се добила као резултат очитавања еталона при испитивању "савршеног" бројила, односно, у случају када је грешка испитиваног бројила једнака нули:

$$N_\text{т} = N \frac{\Delta W}{\delta W_\text{e}}\,, \tag{11.4}$$

где је $\delta W_\text{e}$ резолуција очитавања еталона.

Одређивање грешке може да се оствари одбројавањем импулса еталон бројила током временског интервала потребног да испитивано бројило региструје задати износ енергије, а то значи да се на посматраном излазу испитиваног бројила појави задати број импулса $N$ (слика 11.17). Заправо, одређује се однос учестаности испитиваног и еталон бројила.




Слика 11.17. Испитивање бројила поређењем са еталон бројилом

Ако $f_\text{en}$ представља учестаност импулса, изражену у Hz, које даје еталон бројило при називној вредности мерене снаге, тада је "права" вредност броја $N_\text{т}$ одређена изразом:

$$N_\text{т} = N \frac{f_\text{en}}{f_\text{n}}\,, \tag{11.5}$$

где је $f_\text{n}$ учестаност импулса испитиваног бројила при називној вредности мерене снаге.

Константа импулса оптичког давача прецизних трансформаторских бројила типа *PBO* је 3200 имп/Wh, за бројила чија је називна струја 1 A, односно 640 имп/Wh, за бројила чија је називна струја 5 A. Константа давача импулса је 0,1 Wh/имп за бројила чија је називна струја 1 A, односно 0,5 Wh/имп за бројила чија је називна струја 5 A. Називна учестаност $f_\text{n}$ је једнака 153,96 Hz, ако се бројило испитује преко оптичког давача, односно 0,48112 Hz, ако се бројило испитује преко давача импулса за даљинско мерење. Ако је $f_\text{en}$ = 10 kHz, тада је за испитивање бројила преко оптичког давача при $N$ = 1000 вредност $N_\text{т}$ једнака 64 952. Мерење траје око 6,5 секунди. За испитивање преко излаза за даљинско мерење при $N$ = 3, мерење траје приближно 6,2 секунде, а вредност $N_\text{т}$ једнака је 62355.

При испитивању тачности бројила, напонска кола прикључују се на декларисани референтни напон. Испитивана бројила и еталон бројило међусобно се повежу и оптерећују снагом која одговара тачки испитивања бројила. За исто време одбројавају се импулси које даје еталон бројило и импулси које даје бројило које се испитује. Релативна грешка испитиваног бројила у % израчунава се по обрасцу :

$$G(\%) = \frac{\frac{K}{K_e} N - N_e}{N_e} 100 \,, \qquad (11.6)$$

где је $K$ константа испитиваног бројила, $K_e$ константа еталона, $N$ број импулса које даје испитивано бројило и $N_e$ број импулса које даје еталон бројило.

Утврђивање релативних грешака бројила за једнофазна бројила активне енергије и трофазна бројила активне енергије при уравнотеженом оптерећењу врши се при струјама оптерећења датим у табели.

| Струја оптерећења % $I_n$, односно % $I_o$ | Фактор снаге $\cos\varphi$ | Границе релативне грешке (%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Класа тачности | | | |
| | | 0,2 S | 0,5S | 1 | 2 |
| 1 | 1 | ±0,4 | ±1,0 | - | - |
| 5 | 1 | - | - | ±1,5 | ±2,5 |
| 50 | 0,5 ind.<br>0,8 kap. | ±0,3<br>±0,3 | ±0,6<br>±0,6 | ±1,0<br>- | ±2,0<br>- |
| 100 | 1 | ±0,2 | ±0,5 | ±1,0 | ±2,0 |
| $I_{max}$[17] | 1<br>0,5 ind.<br>0,8 kap. | ±0,2<br>±0,3<br>±0,3 | ±0,5<br>±0,6<br>±0,6 | ±1,0<br>±1,0<br>±1,0 | ±2,0<br>±2,0<br>±2,0 |

Табела 11.7. Радне тачке при испитивању тачности бројила

Испитивање регистра се остварује провером слагања приказивања измерене енергије на дисплеју са енергијом очитаном преко импулсног излаза. Пре почетка испитивања записују се почетна стања регистра бројила. На основу задате радне тачке и резолуције регистра одређује се трајање мерног интервала током којег се бројило побуђује назначеном (основном) струјом бројила. Време трајања овог испитивања бира се тако да се однос вредности енергије коју региструје бројчаник бројила и вредност енергије која се добије може одредити са тачношћу која је најмање четири пута већа од класе тачности испитиваног бројила. Израчунавање се своди на множење константе давача импулса и броја импулса које је регистровао бројач импулса прикључен на давач импулса за даљинско мерење.

О извршеном прегледу бројила води се записник о оверавању бројила. Бројила за која се прегледом утврди да испуњавају прописане метролошке услове, жигошу се годишњим жигом.

Изглед једне лабораторије за испитивање и оверу једнифазних и трофазних бројила електричне енергије приказан је на слици 11.18. У лабораторији се налази сталак за постављање и повезивање бројила која се прегледају. Бројила која се једновремено испитују морају да имају једнаке називне напоне, једнаку максималну струју, једнак број мерних система, једнаку основну струју и резолуцију бројчаника, исту врсту енергије и исту класу тачности. Могу да се разликују по димензијама, принципу рада, да имају различиту константу и начин издавања импулса.

[17] $I_{max}$ је максимална струја трансформаторског бројила и бројила за директан прикључак.



Слика 11.18. Лабораторија за преглед бројила електричне енергије

Напонски улази бројила прикључују се паралелно, а струјни улази серијски. Бројила се напајају из стабилисаног рачунарски управљаног трофазног извора. Вредности референтног напона и учестаности се задају програмски. Сталак за бројила приказан је на слици 11.19.



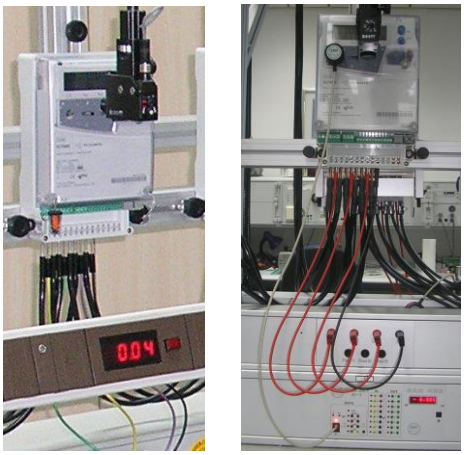
Слика 11.19. Сталак за испитивање бројила

Операторски сто преко којег се води и надзире процес испитивања приказан је на слици 11.20.



Слика 11.20. Операторско место

Одређивање грешке испитиваног бројила врши се помоћу рачунара. На основу импулса доведених из еталон бројила и импулса испитиваног бројила, грешка се аутоматски израчунава и приказује на показивачу за свако испитивано бројило (слика 11.21).



Слика 11.21. Испитивано бројило са фото-главом и показивачем грешке

Поступак испитивања може да буде у потпуности аутоматизован. Резултати испитивања чувају се у одговарајућој бази података.

# ЛИТЕРАТУРА


1. *Programmable measuring instruments - interface system (byte serial, bit parallel), Part 1: Functional specifications, electrical specifications, mechanical specifications, system applications and requirements for the designer and user, IEC Publication* 625-1, (1979) 1993.
2. *Programmable measuring instruments - interface system (byte serial, bit parallel), Part 2: Codes, Formats, Protocols and Common Commands. IEC Publication 625-2, (1980)1993*.
3. *Intefaces For The IEEE 488 Bus, Iotech*.
4. *IEEE-488 and VXIbus Control, Data Acquisition and Analysis, National Instruments.*
5. *HP Standard Instrument Command Library, Hewlett Packard.*
6. *Model 181, Service Manual, Keithley.*
7. *Digital Voltmeter hp 3456A, Operating and Service Manual, Hewlett Packard.*
8. *Digital Interface for Programmable Instrumentation, IEEE Std* 488, (1975)1978, ANSI MC 1.1, (1975) 1979.
9. Sistema interfeisa dla izmeritelnih ustroistv s bait-posledovatelnim, bit-paralleliniim obmenom informaciei. Trebovania k sovmestimosti. GOST 26.003-80.
10. *S Damjanović, P. Katanić*, *Programski jezik VEE Pro, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, elektrotehnički fakultet, 2011*
11. Правила акредитације, АТС ПА-01, 2010.
12. Наедба о мерилима за која је обавезан преглед, “Службени лист СЦГ 32/2003”.
13. Метролошко упутство за оверавање електронских (статичких) вишефункцијских бројила електричне енергије, Службени гласник ЗМДМ, број 1/2007.
14. *Pravilnik o metrološkim uslovima za statička brojila aktivne električne energije klase tačnosti 0,2S i 0,5S ("Službeni list SFRJ", broj* 28/89).
15. *Pravilnik o metrološkim uslovima za indukciona brojila za električnu energiju ("Službeni list SFRJ", broj* 54/89).
16. *Pravilnik o metrološkim uslovima za statička brojila aktivne električne energije klase tačnosti 1 i 2 ("Službeni list SFRJ", broj* 9/92).
17. *Pravilnik o brojilima reaktivne električne energije klase tačnosti 2 i 3, "Sl. glasnik RS", br*. 118/2013.

# 12.
# ДАЉИНСКО МЕРЕЊЕ

Настанак и развој даљинског мерења везан је за развој комуникационих техника: телеграфије[1] и телефоније[2]. Почетак „мерења на даљину“ повезује се за остваривањем преноса између царског Зимског дворца и команде руске војске (1845). Подаци о времену и висини снежног покривача на Мон-Блану преношени су до Париза (1874). Из астрономске опсерваторије у Пулкову (крај Петрограда) праћен је рад околних сеизмолошких станица (1906). Метеорологија и сеизмологија су биле прва подручја примене, али убрзо су нове области почеле да се појављују. Томас Едисон је применио даљински надзор оптерећења у својој енергетској мрежи (Чикаго, 1912). Нешто касније остварен је и надзор брана и нивоа воде у Панамском каналу (1913–1914).

Развој радио-технике је омогућио бежични пренос информација о температури, атмосферском притиску и влажности, добијених помоћу метеоролошкох балона (1920). Сматра се да се дигитални пренос аналогних величина се појавио у Француској и Русији 1930. године, када је остварен даљински пренос температуре и притиска применом Морзеовог кода[3]. Прва примена импулсне кодне модулације у мерењима везује се за пренос у ракетној техници (1943. године вршено је даљинско праћење параметара ракете *V1*).

Развој „просторних“ телеметријских система био је нарочито интензиван после Другог светског рата. У “земаљској” телеметрији економичност је један од примарних фактора, јер најчешће не постоје строга ограничења у погледу величине и тежине. То међутим није случај када се ради о мерењу у летећим објектима. Маса, димензије и поузданост мерних средстава су од превасходног значаја. Да би се осигурала непрекидна спрега између астронаутске кабине и контролног центра на земљи постоје независни подсистеми за двосмерни пренос говора, једносмерну видео комуникацију, праћење летилице, пренос команди до летилице, као и пренос физиолошких и амбијенталних података до надзорног центра. Напредне мерне технике, развијене за војне потребе, нашле су своју примену и у истраживачким лабораторијама, при испитивању мотора и турбина, при раду са радиоактивним материјалима, као и у океанографским истраживањима.

---

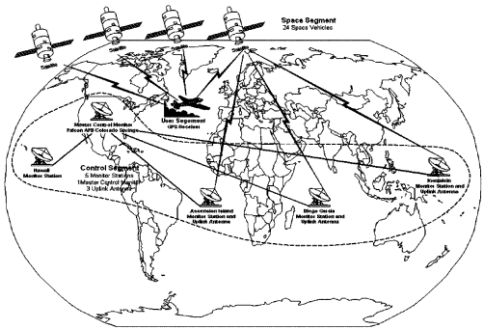
[1] Телеграфија је најстарији и најједноставнији начин преношења информација електричним путем (*P. Shilling*, 1832). Пренос порука остварује се успостављањем везе између слова азбуке и таласног облика електричне струје.

[2] Телефонија се бави преношењем звука (људског гласа). Развој телефоније везује се за Бела (1875), проналазача и оснивача компаније *Bell*. Савремена телефонија обухвата и пренос слика и других информација.

[3] Морзеов код је поступак преношења говорних порука помоћу дугих и кратких електричних, звучних или светлосних импулса.

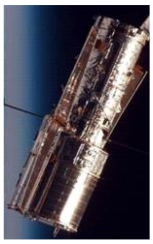
Први вештачки сателит Спутник-1 обавио је испитивање густине горњих слојева атмосфере (1957). Вештачки сателит Спутник-3 представљао је прву космичку метролошку лабораторију коју су људи саградили (1958). Помоћу ње су извршена истраживања горњих слојева атмосфере и "блиског" космоса (састав атмосфере, космичко зрачење, магнетско и електрично поље, детекција микрометеора). „Свемирска трка" је довела до бројних истраживања Сунчевог система. Космички брод *Voyager*, лансиран 1977 године, одпочео је, тридесетпет година касније, истраживање међузвезданог простора [1]. Крајем 2014. године налазио се на удаљености од 20 $10^9$ km.

Реализација сателитског система који омогућује одређивање положаја било које тачке на површини Земље (*Global Positioning System - GPS*), дистрибуцију временске скале, као и мерење брзине кретања објеката, започела је 1978. године. Развијен првенствено за војне потребе, овај систем је нашао примену у геодезији, саобраћају и електропривреди [2].

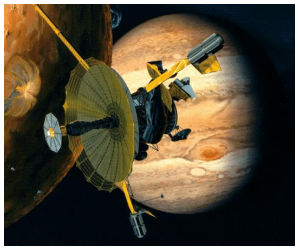



Слика 12.1. Глобални позициони систем - *GPS*

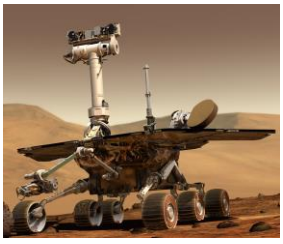
Од 1990. године телескоп *Hubble*, удаљен више од 500 km од Земље, врши осматрања у ултраљубичастом, видљивом и инфрацрвеном делу спектра и омогућује поглед у дубину и прошлост Универзума. Космичка сонда *Galileo* доспела је до Јупитера (1995) и извршила спектрометријску анализу. На основу сачињених снимака закључено је да други по величини сателит Јупитера, Европа, представља потенцијално пребивалиште ванземаљаког живота. Роботи-истраживачи, спуштени почетком 2004. године на планету Марс, изванредан су пример споја аутоматике и мерне технике. Опремљени камерама и спектрометрима за испитивање састава тла, "близанци" *Spirit* и *Opportunity*, послали су значајне информације о геолошкој историји Земљиног суседа. *Opportunity* је и после десет година лутао "црвеном планетом".



Телескоп *Hubble*



Космичка сонда *Galileo*



*Mars rover*

Слика 12.2. Савремене космичке метролошке лабораторије

На крају двадесетог века, посебна пажња је посвећена телеметрији у областима биологије и медицине. Развијени су минијатурни телеметријски ендосистеми чија имплантација не утиче (битно) на стање организма. Све већа пажња се посвећује истраживању света дивљих животиња. Различити неинвазивни[4] поступци се примењују за праћење њиховог кретања.

За потребе ваздухопловства развијен је посебан радио примопредајник (*transponder, transmitter + responder*) који омогућује аутоматску идентификацију летилице. Минијатурни овакви уређаји су примењени за радарско праћење пчела радилица. Оно је показало да, када обилазе вишеструке цветове, пчеле проналазе оптималну путању.



Телемедицина је омогућила превазилажење просторне и временске границе у пружању здравствене заштите, што је веома значајно за пацијенте чија болест захтева хитну интервенцију, за становнике руралних подручја, посаде и путнике у бродском и авионском саобраћају, за истраживачке екипе у географски удаљеним областима наше планете, као и чланове космичких експедиција.

Да би се унапредила примена телеметрије било је неопходно остварити компатибилност поступака преноса и пријема, као и опреме за прослеђивање мерних сигнала. Стандардизација је започела у области војне технике. Комитет за вођене пројектиле америчког Одсека за развој одбране (*Department of Defense Research*) формирао је посебну групу за телеметрију, названа *IRIG* група (*Inter-Range Instrumentation Group*), која је развила стандарде који се данас користе у војне и цивилне сврхе. Међу првим документима у овој области били су стандарди за телеметрију вођених ракета земља-ваздух донесени од стране америчког министранства за одбрану, убрзо после другог светског рата (1948). Нешто касније донети су и стандарди за ваздухопловне телеметријске предајнике и одговарајуће земаљске пријемнике.

Телеметрија данас представља широку област мерне технике. Све већи број индустријских мерења обавља се даљински. Подаци се преносе до центра у којем се сакупљају, обрађују, записују и приказују. У овом поглављу разматрају се само нека подручја, вазана за област електротехнике. Детаљнији приказ превазилази обиме овог уџбеника.

## 12.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Између делова сложеног система, као и међу различитим системима постоје везе преко којих они делују једни на друге, размењујући енергију и супстанцију (материју). Утицај једног система на стање другог, међутим, не

[4] Назив потиче од лат. *invasivus*, нападан, освајачки.

мора бити одређен количином пренете (примљене) енергије односно материје. У системима које сачињавају жива бића подједнако значајну улогу има информациони садржај веза са околином и другим живим бићима. Такве информационе везе су заправо сигнали који се могу представити као физичко (материјално) остварење порука које системи, односно њихови делови, међусобно размењују. Преношењем сигнала на даљину остварује се веза између просторно одвојених система. Записивање (памћење) сигнала омогућује међусобно повезивање временски раздвојених система.

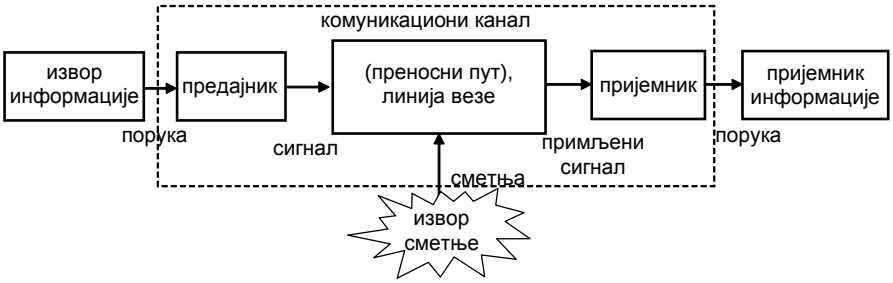


У међусобном споразумевању људи размењују информације у облику дискретних саопштења на одређеном језику. Сваки језик има своју азбуку која се састоји од симбола од којих се формирају речи. Сматра се да су прву азбуку створили људи бронзаног доба. Феничанско писмо је послужило као основа за грчки алфабет.

Међусобном комуникацијом два система утичу један на други. Може се сматрати да они размењују поруке (*message*) које се састоје од скупа симбола (као што је то случај када се порука може представити писаним текстом) или класе временских функција (када се преноси говор, музика, слика). Развој технике обраде и преноса информација нераскидиво је повезан са развојем електронике. Ако се занемаре поступци као што су слање димних сигнала, махање рукама и заставицама, давање звучних сигнала и коришћење класичних електромеханичких направа, пренос информација на даљину се данас остварује искључиво електронским средствима, као што су радио и телевизијски предајници и пријемници, уређаји за пренос података, телефонске централе, комуникациони сателити. Проучавање физичких процеса и појава, метода реализације система, производња и експлоатација одговарајућих техничких средстава за пренос порука (саопштења) предмет су телекомуникација. У овој области људског знања, која се веома бурно развијала током последњих стотину година, разматрају се “механизми” преноса порука у одређеној средини, истражују и пореде различити поступци и средства за преношење, при чему смисао и делотворност поруке немају никакав значај.

У најопштијем облику, комуникациони систем се састоји од извора и корисника информација, повезаних комуникационим каналом. Извор информација производи (генерише) поруке које, посредством комуникационог канала, треба пренети ономе коме су намењене. Предајник (*transmitter*) трансформише изабрану поруку у сигнал подесан за пренос - намерно изазван одређени физички процес који у себи носи жељену поруку. Линија везе (*link*) представља средину кроз коју се сигнал преноси од предајника до пријемника. Пријемник (*receiver*) обавља инверзну операцију: трансформише примљени сигнал у поруку коју корисник може да прихвати (разуме). Комуникациони канал (*channel*), који образују линија везе и пар предајник-пријемник, мора да задовољи услове преноса за било коју од могућих порука. Међутим, због присуства сметњи, послати сигнал није једнозначно одређен примљеним сигналом. У начелу, извори сметњи, односно поремећаја који доводе до настанка грешке у преносу, постоје и у појединим деловима овог система (унутрашњи поремећаји, сопствени шум појачавача, неисправност елемената који чине канал). На слици 12.3. приказан је уопштени модел комуникационог система који је дефинисао Клод Шенон у својој математичкој

теорији комуникација [3]. Основни задатак технике преноса је тражење најекономичнијег решења за остваривање комуникационог канала који испуњава захтеве у погледу брзине преноса, расположивости, поузданости и сугурности.




Слика 12.3. Блок шема комуникационог система

У свакодневном животу реч информација се користи са разноврсним и понекад, обично само наизглед, неповезаним значењима. У техници, појам информације има одређенији, а самим тим и нешто ужи смисао, обликован захтевом да се дефинише квантитативни показатељ информационог садржаја поруке и одређује успешност преноса информација. Мера за количину информације је потребна при математичкој анализи услова и параметара који утичу на пренос и обраду информација, њихово записивање и чување, неопходна је за прорачун пропусне моћи комуникационог канала, за описивање својстава уређаја којима се генеришу и примају сигнали, за одређивање сврсисходности представљања поруке у одређеном облику. У оквирима теорије информација дефинисана је јединица информације при преношењу порука које се могу представити низом симбола узетих из неког скупа који садржи коначан број симбола. Такав скуп назива се азбука[5], а сваки појединии симбол слово (*character*). Коначан низ симбола (*string*), узетих из неке азбуке, назива се реч (*word*) у датој азбуци.

Извор информација бира једну поруку из скупа могућих и шаље кориснику. Корисник унапред зна све могуће поруке које извор може да пошаље, али не зна која ће од тих порука бити послана. Информација представља степен слободе у избору поруке из скупа могућих порука. Саопштење може да представља, на пример, неки текст на српском језику писан ћирилицом. Азбука таквог саопштења је шира од обичне ћирилице: поред тридесет словних (алфабетских[6]) користи се и десет бројчаних (нумеричких) и одређени број специјалних знакова (размак између речи, знаци интерпункције и други. Било која комбинација слова, размака и интерпункције представља реч такве азбуке, без обзира да ли та реч има икакав смисао у српском језику. Комуникација дискретним саопштењима омогућује преношење информације о успостављању једног одређеног стања, од ма како великог али коначног броја могућих стања, коришћењем малог броја симбола неке азбуке. Представљање информације (поруке коју треба пренети, саопштити) словима изабране азбуке назива се кодовање. У комуникационом ланцу постоје и средства (уређаји) који, на једном крају, врше кодовање, односно промену кода, а на другом декодовање, односно враћање на првобитни облик представљања.

Ако се систем може налазити у једном од $N$ различитих стања чије је мноштво познато примаоцу саопштења, тада је за пренос податка о стању система довољно дати редни број стања у којем се налази. Тај број се представља као реч у азбуци чија су слова цифре. Најмањи број слова у азбуци

[5] Азбука се у најопштијем случају дефинише као скуп свих могућих симбола који се користе у одређене сврхе.

[6] Назив “алфабет” потиче од прва два слова грчког писма.

којом се преносе поруке је два. У начелу, за преношење (представљање) било којег дискретног саопштења довољна су само два симбола, на пример ☺ и ☻.

Сложено саопштење се представља низом ових симбола. Реч која садржи само једно слово азбуке која се састоји од само два симбола може да прикаже два стања система. Таква реч дужине два слова може да прикаже четири стања:

☺☺, ☺☻, ☻☺, ☻☻.

У општем случају, број стања, $N$, која могу да се представе низом од $n$ бинарних симбола једнак је:

$N = 2^n$.

На основу претходног разматрања следи да је дужина низа, $n$, потребна за пренос неког саопштења од $N$ могућих саопштења, коришћењем азбуке која садржи само два симбола[7], једнака:

$n = \log_2 N$.

Интуитивно је јасно да количина информација коју садржи одређена порука зависи од броја могућих саопштења. Информациона вредност поруке која представља податак о стању система одређен је несигурнушћу са којом се, пре пријема поруке, може сматрати да се систем налази у одређеном стању. Као јединица мере усвојена је количина информације која се садржи у једном од два могућа саопштења. Ова јединица назива се бит[8].

Остваривање везе између временски одвојених система захтева постојање "складишта", у којем се информација чува током временског интервала који раздваја тренутак стварања саопштења од тренутка када се користи. Такви "резервоари" информација омогућују памћење биолошким објектима и представљали су, без сумње, предуслов за развој људске врсте. Остваривање памћења у вештачким системима је један од најважнијих задатака савремене технике.

Да би се информација сачувала потребно је електрични (физички) сигнал који се мења у времену пресликати у неки запис на одговарајућем медијуму[9], односно траг у одговарајућој средини, који не зависи, односно може се прихватити да не зависи, од времена. Памћење је, дакле, пресликавање временски променљивог сигнала у стање неке средине (носилац информације кроз време) које се може одржавати без значајнијих промена у току довољно дугог времена после ишчезавања спољњег дејства.

Памћење дискретних информација се постиже дискретним променама стања медијума, као што су, на пример, бушење папирне карте, поларизација диелектрика или намагнетисање магнетског материјала. Развој технологије омогућио је остваривање спремника[10] информација великог капацитета и малих димензија.

У електронским уређајима и системима за обраду, пренос и чување информација, дискретне информације се приказују помоћу слова бинарне азбуке. Уобичајено је да се ова слова означавају са 0 и 1. Количина информације коју носи свако слово једнака је један бит, па се овај назив користи и за слова бинарне азбуке. Најмања количина података која се може прочитати или уписати у меморију се назива бајт (*byte*). Најчешће се под називом бајт подразумева група од осам битова (октет). Група битова којој се приступа као једној целини је реч. У начелу, брзина обраде података утолико је већа уколико је већа количина информација којом се "барата" у сваком кораку, (односно, која се једновремено

---

7 Бинарна азбука (*binary notation*).

8 Назив, који је предложио Клод Шенон, представља акроним (скраћеницу састављену од делова речи у пуном називу) од енг. *binary digit*.

9 Од лат. *medium* средина, посредник, оно кроз шта се преноси дејство.

10 Складиште (*storage*) података.

"захвата", обрађује или прослеђује). У рачунарима се реч обично састоји од неколико бајтова.

Рачунари су првобитно развијани са циљем аутоматског обављања низа рачунских операција. Способност памћења података (међурезултата и коначних исхода израчунавања) прерасла је у способност памћења начина (поступка) израчунавања, чиме је створена могућност једноставне измене алгоритма рада и изградње уређаја опште намене – универзалних рачунских машина. Развој рачунарске технике, нераскидиво повезан са развојем дигиталне електронике, довео је до настанка нове области: информатике (*information science*), која се у најопштијем смислу бави задацима и проблемима сакупљања, организације, чувања, претраживања, тумачења и коришћења података. Електроника је, омогућивши сагледавање нових начина преношења информација кроз време, дала нову димензију областима људског знања које се баве информацијама, њиховим преносом, обрадом и чувањем (*library science*), и створила услове да вештина примене рачунара прерасте у науку (*computer science*).

Пренос информација подразумева одређена техничка средства посредством којих се врши. Информација која се преноси може да буде у аналогном или дигиталном облику. Дигитални пренос информација, заснован на преносу дискретних саопштења, порука, које се могу представити низом симбола узетих из неког скупа који садржи коначан број симбола, има све ширу примену.

## 12.2 ПРЕНОС ПОДАТАКА

Савремени људи свакодневно путем радија, телевизије, интернета примају разне извештаје о нечему што се десило, обавештења о нечему што се дешава или се очекује да ће се десити, упутства како треба поступити. Обични људи примају све те информације најчешће без праве представе о техничкој страни поступка којим су пренете, обрађене и представљене. Даљински пренос информација може да буде остварен на различите начине, оптичким, хидрауличким, акустичним и електричним средствима. Електрични поступци су најраспрострањенији, али оптички пренос, заснован на примени оптичког влакна, има предност у погледу неосетљивости на електромагнетске сметње, мањих губитака у преносу, велике брзине, повећане сигурности података и мањег преслушавања. Оптички каблови, дебљине људске власи, омогућили су симултани пренос више милиона говорних сигнала. Могућ је и акустички пренос, заснован на ултразвуку. Пнеуматски пренос се користи на растојањима до пар стотина метара, у срединама које имају висок ниво електромагнетских сметњи, као и у случајевима где је из безбедоносних разлога немогуће користити електричне сигнале.

У начелу, пренос сигнала електричним путем може да се подели на две групе, на оне које су засноване на примени жичаних линија везе и оне друге, остварене бежичном везом. Телефонски каблови омогућују пренос мерних сигнала у основном опсегу спектра, од једносмерних до оних чија је учестаност неколико десетина kHz. Коаксијлни кабл може да има пропусни опсег до неколико стотина MHz. Предности жичаног преноса представљају једноставност и могућност коришћења постојеће инфраструктуре (нпр. примена енергетских водова или телефонских каблова). Ограничење је релативно мала брзина која се може постићи, односно ограничен пропусни опсег. Бежични пренос је у начелу сложенији од жичаног, али је упркос томе у

широкој употреби, јер омогућује постизање веће удаљености, веће брзине и пренос више канала. Развијене су различите технике у зависности од дела електромагнетског спектра који се за пренос информација користи[11].

При жичаном преносу постоји физичка веза између предајника и пријемника сигнала. Физичка величина која представља носилац информације може да буде напон или струја. Успостављање везе засновано на временској или фреквенцијској расподели (мултиплексирање) омогућује пренос више сигнала преко истог комуникационог канала. Информациони параметар може да буде амплитуда, фаза или учестаност периодичног сигнала.

Преносни вод у облику упредене парице, телефонске линије или коаксијалног кабла може да се, на ниским учестаностима и при средњој дужини, представи као једноставно $RC$ коло где је $R$ отпорност жице, а $C$ капацитивност вода. Вод се, дакле, понаша као филтер пропусник ниских учестаности. Типичне вредности су око 100 Ω/km и 50 nF/km. Слабљење, ограничен пропусни опсег, преслушавање канала и шум узрокују проблеме који су нарочито изражени при преносу дигиталних сигнала. У ту сврху користи се посебан уређај који се назива модем (модулатор/демодулатор).

Радио фреквенцијски (*radio frequency, RF*) пренос информација са једног места на друго има широку примену у цивилној и војној комуникационој техници. Остварује се простирањем електромагнетских таласа чија учестаност се налази у одређеном делу спектра. Радио пренос обухвата опсег од екстремно ниских учестаности (*extremly low frequency*, *ELF*), од 3 Hz до 30 Hz (које се користе за подводну комуникацију), до екстремно високих (*extremly high frequency*, *EHF*), од 3 GHz до 300 GHz (које се користе у радиоастрономији и војној техници). Пренос телеметријских сигнала се врши амплитудском, фазном или фреквенцијском модулацијом неког *RF* носиоца. Међународна унија за телекомуникације (*International Telegraph Union*, *ITU*) врши доделу фреквенцијских опсега сходно међународном уговору. За бежичну медицинску телеметрију (*Wireless Medical Telemetry Service, WMTS*), на пример, у Америци су предвиђени опсези 608-614 MHz, 1395-1400 MHz и 1427-1432 MHz.

Телеметрија заснована на преносу сигнала у њиховом основном опсегу, представљених напоном, технички је најједноставнија, али је ограниченог домета због слабљења које зависи од односа отпорности линије и улазне отпорности пријемника. Недостатак је и велика осетљивост на сметње које се суперпонирају мерном сигналу. Повољније решење представља коришћење струјног сигнала као носиоца информације. Додавањем претварача напона у струју успешно се превазилази проблем утицаја импедансе линије. Пад напона због отпорности проводника који повезују предајник и пријемник не утиче на сигнал који се преноси. На пријемној страни сигнал се детектује мерењем напона на отпорнику познате отпорности. У индустрији се најчешће користи сигнал чији је радни опсег од 4 mA до 20 mA, јер омогућује детекцију прекида линије (нула милиампера). Помоћу претварача аналогне величине у учестаност постиже се, применом трансформатора, галванска изолација предајника и пријемника од преносног пута.

Пренос више мерних канала преко једне линије може да буде остварен додељивањем различитих спектралних опсега појединим мерним каналима (*frequency-division multiplexing, FDM*), или секвенцијалним преносом једног по једног канала (*time-division multiplexing,TDM*). У фреквенцијском мултиплексу сваки мерни канал модулише синусни сигнал различитог опсега учестаности. Сви модулисани сигнали се сабирају, тако да се преко комуникационог канала модулацијом носиоца преноси сложен комбинован (композитни) сигнал. У временском мултиплексу сваком мерном каналу додељује се посебан део временског интервала који представља период одабирања. Сигнал који се добије после мултиплексера представља поворку импулса. Најширу примену има импулсно-кодна модулација (*pulse-code modulation, PCM*).

[11] Бежични пренос могуће је остварити и применом инфрацрвеног зрачења.

Модеми, помоћу којих се остварује пренос дигиталних сигнала преко јавних телефонских линија, засновани су на дигиталној фреквенцијској (*frequency-shift keying, FSK*) или дигиталној фазној модулацији (*phase-shift keying, PSK*).

Брзина преноса (*bit rate*) је значајан параметар преноса информација. У следећој табели дати су неки оквирни подаци.

- класична (*dial-up*) телефонска веза, теоријски максимум: 56 kb/s;
- *ISDN* (*Integrated Services Digital Network*), интегрисани пренос аналогних и дигиталних сигнала преко стандардних телефонских линија: 128 kb/s;
- закупљена линија између две локације: до 2 Mb/s;
- мобилна телефонија: 116 kb/s (*GPRS, General packet radio service*) до 75 Mb/s (четврта генерација мобилних телефона);
- класична радио веза: 9,6 (19,2) kb/s;
- микроталасна радио веза: 256 kb/s до 100 Mb/s;
- сателитска веза: 2 Mb/s;
- *ADSL* (*Asymetric Digital Subscriber Line*) веза са Интернетом: >1 Mb/s;
- бежичне мреже на даљину *(Wireless Wide Area Network – WWAN)* које користе радио и сателитске линкове и тако покривају релативно велике географске просторе: > 22 Mbps.

Поједини делови радио опсега међународно су прихваћени за индустријске, научне, медицинске, кућне и сличне примене, другачије од телекомуникационих (*industrial, scientific and medical radio bands, ISM band*). За њихово коришћење, у начелу, није потребна дозвола (лиценца).

## 12.3 ДИСТРИБУИРАНИ МЕРНИ СИСТЕМИ

Телеметрија има посебну улогу у географски дистрибуираним системима као што су, на пример, мреже метеоролошких и сеизмолошких станица. Аутоматска метеоролошка станица податке о смеру и брзини ветра, температури, релативној влажности, притиску и количини падавина шаље радио путем до удаљеног центра (слика 12.4).




Слика 12.4. Аутоматска метеоролошка станица

Информације о температури, влажности, падавинама, олисталости, интензитету сунчевог озрачивања и брзини ветра значајне су за пољопривреду и управљање системима за наводњавање. Микро-климатски

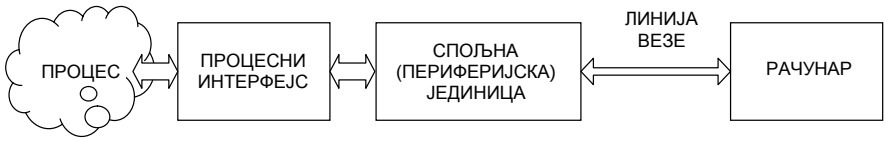
услови могу да буду променљиви, због чега треба располагати подацима о усеву на ширем подручју. Земаљском или сателитском радиовезом они се преносе до одговарајућег центра.

Бежична сензорска мрежа (*wireless sensor network*, *WSN*), коју чине просторно расподељени аутономни сензори, омогућује надзор физичке појаве која се одвија унутар одређеног подручја (области). Развијене првобитно за војне намене, такве мреже се примењују и за цивилне потребе (слика 12.5). На овај начин контролишу се ваздух, вода и земљиште, сеизмичка активност, али и чврсте структуре као што су зграде и мостови, и велике машине.



Слика 12.5. Сензорска мрежа у пољопривреди

Развој комуникационих технологија омогућио је појаву и развој дистрибуираних мерних система помоћу којих се остварује даљински надзор (*supervision*) али и управљање (*control*) разноврсним процесним системима, као што су електроенергетски системи, системи за дистрибуцију нафте и гаса, као и многи сложени индустријски производни системи. Једноставан *SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition*) систем за надзор и управљање удаљеним објектом (процесом) приказан је на слици 12.6.




Слика 12.6. *SCADA* систем

Рачунар представља централну јединицу која је посредством одговарајуће комуникационе линије повезана са удаљеном периферијском јединицом (*Remote Terminal Unit - RTU*). Комуникација је заснована на принципу "позив – одзив". Посредством одговарајућег интерфејса остварује се спрега са процесом који се надзире, односно којим се управља. Помоћу посебног интерфејса (*Human-Machine Interface – HMI*) остварује се спрега система и оператора који њиме руководи.

Основне активности *SCADA* система су:

- захват (аквизиција) података из процеса (погонски подаци),
- управљање процесом (погоном),
- локална обрада података,
- локална и даљинска комуникација,
- *on-line* тестирање и дијагностика.

Улазни подаци из процеса обухватају нормализоване и стандардизоване аналогне и дигиталне електричне сигнале који одговарају

различитим физичким погонским величинама[12]. Аутоматска аквизиција погонских података обавља се периодично, са сталним или променљивим циклусом сканирања.

Под називом аналогни улазни подаци (*analog inputs*[13]) подразумевају се физичке величине (температуре, притисци, нивои, напони, струје...) које се посредством одговарајућих сензора и мерних претварача пресликавају на нормализоване напонске и струјне сигнале, и у таквом аналогном облику уводе у систем. Улазна кола обезбеђују галванско одвајање, уколико је то потребно. Помоћу АД претварача (типично 12-битних) вредност аналогне величине се пресликава у нумерички еквивалент који процесни рачунар обрађује и записује.

Дигитални улазни подаци (*digital inputs*[14]) су сигнали којима се представљају дискретна стања погонске опреме, као што су двоположајни апарати (прекидачи, растављачи), индикатори прекорачења, алармни уређаји. Прихватају се као једноструки или двоструки[15] напонски сигнали, који се по потреби филтрирају. Бројачки улазни подаци (*counter inputs*) су импулсни сигнали који се сабирају (одбројавају)[16].

Излазни подаци за процес обухватају аналогне и дигиталне поставне вредности, импулсне и трајне команде. Због њиховог значаја и последица које имају на процес, посебна пажња се посвећује интегритету[17] и сигурности свих излазних података. Локално и даљинско генерисање управљачких налога и њихово непосредно издавање у процес подразумева програмабилност, као и контролу сигурног и поузданог извршења.

Аналогни излазни подаци су напонски или струјни сигнали који представљају референтне и поставне вредности. Двостепене (двоструке) команде су напонски импулсни налози фиксне ширине којима се делује на прекидаче, растављаче и сличну двопозициону погонску опрему. Извршавају се у два корака. Први корак представља избор командног излаза (командованог апарата), који се наставља извршењем команде у другом кораку (издавање импулсног напонског сигнала), али тек после потврде правилно обављеног избора (*select before operate*). У противном се извршење команде блокира. Двостепене команде су обично организоване у паровима (команде укључи & искључи) и посебно се проверавају да се онемогући једновремено извршавање већег броја команди. Једностепене команде су напонски импулси којима се командовање типа “изабери-и-изврши” (*select and execut*e) обавља само у једном командном кораку (*direct execute controls*).

---

[12] Нормализација се обавља посебном опремом као што су релеа, претварачи, трансформатори....

[13] У стручној литератури уобичајено је да се користи назив „мерења“.

[14] У стручној литератури за бинарне сигнале уобичајено је да се користи назив „сигнализације“.

[15] Двоструки сигнал представља пар комплементарних бинарних сигнала.

[16] Иако су ови подаци у суштини дигитални, њихово порекло, значај и начин аквизиције чини их специфичним па се они третирају одвојено (*integrated totals*).

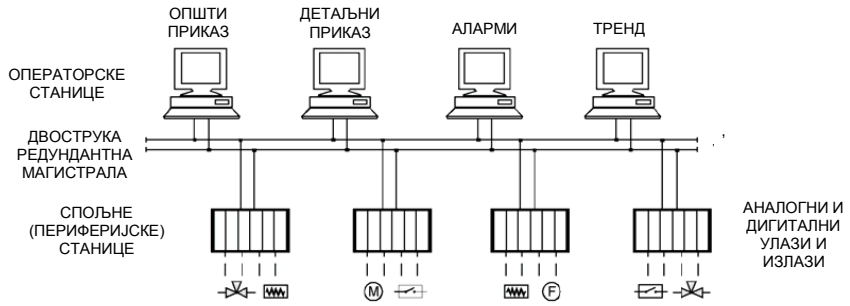
[17] Под називом „интегритет података“ подразумева се непроменљивост информационог садржаја од извора до корисника (*data integrity*).

Трајање (ширина) командног напонског импулса је програмабилна на нивоу појединачног командног излаза, а једновремено извршење већег броја команди је дозвољено. Трајне команде остварују директно командовање контролабилним апаратима чији је двоположајно стање директно одређено самим командним излазом. Трајне команде су најчешће резултат локалних обрада података, односно извршења одговарајућих командних алгоритама.

Локална обрада података обухвата идентификацију и конфигурацију система, идентификацију процесних података (називи, адресе, намена...), њихову логичку и математичку обраду (границе, трендови, брзине, хронолошка регистрација догађаја,...), издавање упозорења и аларма на бази резултата локалне обраде, интерактивно дефинисање контролно-управљачких алгоритама, генерисање и издавање контролно-управљачких података, тестирање и *on-line* дијагностику. Локална извештавања обухватају:

- редовне дневне извештаје,
- периодичне штампане прегледе, и извештавање на захтев,
- извештаје о хронолошкој регистрацији догађаја (ХРД),
- дијагностичко извештавање,
- извештавање о контролно-управљачким активностима,
- различита локална упозорења и аларме.

Међусобно локално повезивање појединачних уређаја (слика 12.7) остварује се мрежном комуникацијом према *TCP/IP* протоколу *(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)*. Оваква директна комуникација омогућује груписање аутономних делова и формирање већих управљачких система велике процесне моћи и оптимизоване расподеле послова, са циљем удвајања критичних ресурса и остваривања високо поузданих решења.




Слика 12.7. Сложени *SCADA* систем

Даљинска комуникација са надређеним управљачким центрима омогућује остваривање дистрибуираних једнонивоских и хијерархијских управљачких система. Пренос података на даљину подразумева стални двосмерни проток података. Ова двосмерна серијска комуникација се одвија по принципу позив/одзив (*request/response*). Управљана је из центра. Поједини периферијске јединице (спољне станице) су идентификоване јединственом адресом.

*On-line* дијагностика обухвата:

- континуирани надзор напојних јединица и аутоматско упозорење или блокирање када је потребно (у случају редундантног напајања врши се аутоматско пребацивање напајања);
- периодичну проверу улазног дела процесног интерфејса (у случају откривеног квара неисправни улазни модул се суспендује из даљег рада што се сигнализира припадајућим светлосним индикатором и обавештава одговарајућом поруком);
- периодичну проверу излазног дела процесног интерфејса (у случају откривеног квара, неисправни излазни модул се означава припадајућим индикатором и оператор обавештава о квару, док се сам модул искључује из даљег рада);
- периодична провера исправног рада комуникационих, серијских и мрежних, портова и припадајуће комуникационе опреме.

### 12.3.1 КОМУНИКАЦИОНИ ПРОТОКОЛ

У системима даљинског надзора и управљања сложеним процесима потребно је да буде омогућена двосмерна комуникација спољне станице[18] са рачунаром који представља надређену (централну) станицу. Комуникациони подсистем мора да обезбеди максималну повезаност између стања мерених величина и њихове слике у бази података система. Због физичке природе процеса преноса података, пренос информација неизбежно захтева неко коначно време. Због утицаја сметњи (шума околине), као и кварова појединих компонената, поруке могу да буду оштећене. Дефинисање протокола преноса података[19] има за циљ да обезбеди поуздану и ефикасну размену података, нарочито за податке које имају посебну важност.

**Порука** је информација пренета као целина која може бити састављена од више делова. **Оквир** (*frame*) је низ узастопних битова (секвенца) који, у начелу, садржи три поља: информационо, управљачко и поље за проверу. Почетак и крај оквира морају бити означени на поуздан начин, нпр. граничним знацима (карактерима), тако да омогућују да пријемник детектује почетак и крај пакета у низу симбола. Ако је пријемник повезан у систем у току преноса, он игнорише податке до тренутка када детектује почетак нове секвенце. Поруке фиксне дужине се користе за пренос захтева и одговора који немају додатне параметре. Тиме се постиже ефикасна и једноставна комуникација за кратке и важне поруке. Поруке променљиве дужине омогућују размену комплексних информација између периферијске (крајње) станице и централног рачунара.

Пренос података се често остварује у условима "непријатељског окружења“ које карактеришу изражена електромагнетска интерференција, разлике у потенцијалу уземљења и други извори поремећаја и шума на преносном путу. Исправан пренос подразумева постојање ефикасне заштите порука од грешака, губитака или добијања случајних информација. Наиме, само недетектоване грешке или губици доприносе смањењу интегритета преноса података. Детектоване грешке и губици подлежу унапред дефинисаним стратегијама, као што су аутоматска ретрансмисија или обавештавање корисника (оператера, руковаоца). То може да утиче на укупну расположивост система, али се сматра да обавештавањем о овим грешкама протокол размене података испуњава функцију.

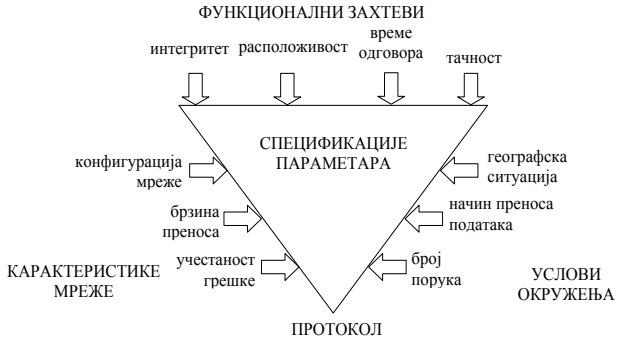
---

[18] Удаљена (крајња) станица (*outstation*, *terminal unit*).

[19] Под називом „протокол преноса података“ подразумева се скуп правила у складу са којима мора деловати комуникациони систем да би се комуникација остварила.

Обезбеђење кратког времена преноса информација постиже се применом ефикасних, стандардизованих протокола за пренос порука преко преносних путева са ограниченим пропусним опсегом и са недефинисаним карактеристикама шума. Висок интегритет и ефикасан пренос података су међусобно контрадикторни захтеви, јер се повећани интегритет података може остварити само на рачун смањења протока корисних информација, па је потребно да се нађе прихватљив компромис између ова два својства, заснован на анализи услова и захтева конкретне примене.

У начелу, комуникациони протокол треба да омогућује прихватање и прослеђивање произвољног низа битова које генерише извор података (*code transparent data trasmission*). Не треба да постоје никаква ограничења у погледу садржаја порука које се преносе. Захтеви у погледу брзине и интегритета преноса бирају се у сагласности са наменом система и условима преноса. Сви параметри морају бити усаглашени. Поред неизбежних компромиса у погледу брзине и интегритета, постоје и други услови који утичу на избор одговарајућег протокола (слика 12.8) [4], [5], [6].




Слика 12.8. Избор комуникационог протокола

**Кодовање** је начин представљања информација помоћу симбола одређеног скупа који чине азбуку. Порука се може исправно протумачити само ако је позната шифра, кључ помоћу којег је извршено кодовање. У ширем смислу, под појмом **код** подразумевају се правила помоћу којих се успоставља једнозначна веза између информације и њеног приказа помоћу знакова, симбола или елемената сигнала. У ужем смислу, реч "код" означава однос између две групе знакова. Кодовањем се порука преводи у изабрани код. Обрнута операција се назива **декодовање**. Понекад се за део система који обавља обе ове функције користи назив кодек (*codec*)[20].

Поступком кодовања се може било која информација изразити у облику бројева у изабраном систему бројева. Група симбола, којом се представља (кодује) неки појам, назива се **кодна реч**. Број симбола у кодној речи се назива **дужина речи**. Она може бити стална или променљива[21].

Кодови за пренос порука треба да омогуће пренос свих симбола који се користе у тексту који се преносе: слова, бројеви и посебни знаци као што су $, ≈, &, %. Најширу примену има *ASCII*-код[22] који омогућује представљање симбола азбуке, графичке симболе и одређених наредби. То је алфанумерички *BCD*-код са седам бита по симболу. *ASCII*-кодом обухваћени симболи, односно скраћенице,

---

[20] У англоамеричкој литератури се за поступак представљања поруке изабраним кодом користи и термин *encode*.

[21] У телеграфији се користи азбука у којој речи, које представљају слова латинице, имају променљиву дужину. Код који је Морзе (*Samuel Morse*) изабрао за пренос текстуалних порука је заснован на анализи учестаности појављивања сваког од слова у енглеском језику. Најчешћа слова латинице, *e*, *t* и *a*, означена су најкраћим речима: ".", "–" и "· –".

[22] Ознака *ASCII* потиче од назива: амерички стандардни код за размену информација (*American Standard Code for Information Interchange*). У нашем језику се назива "аски код".

приказани су у табели 12.1 сврстани у осам колона, које одговарају групи од три најтежа бита кода (заглавље табеле), и 16 редова, који одговарају групи од четири бита мање тежине (крајња лева колона табеле).

| | $b_6$ $b_5$ $b_4$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_3$ $b_2$ $b_1$ $b_0$ | 000 | 001 | 010 | 011 | 100 | 101 | 110 | 111 |
| 0000 | *NUL* | *DLE* | SP | 0 | @ | P | \ | p |
| 0001 | *SOH* | *DC1* | ! | 1 | A | Q | a | q |
| 0010 | *STX* | *DC2* | ” | 2 | B | R | b | r |
| 0011 | *ETX* | *DC3* | # | 3 | C | S | c | s |
| 0100 | *EOT* | *DC4* | $ | 4 | D | T | d | t |
| 0101 | *ENQ* | *NAK* | % | 5 | E | U | e | u |
| 0110 | *ACK* | *SYN* | & | 6 | F | V | f | v |
| 0111 | *BEL* | *ETB* | ' | 7 | G | W | g | w |
| 1000 | *BS* | *CAN* | ( | 8 | H | X | h | x |
| 1001 | *HT* | *EM* | ) | 9 | I | Y | i | y |
| 1010 | *LF* | *SUB* | * | : | J | Z | j | z |
| 1011 | *VT* | *ECS* | + | ; | K | [ | k | { |
| 1100 | *FF* | *FS* | , | < | L | \ | l | \| |
| 1101 | *CR* | *GS* | - | = | M | ] | m | } |
| 1110 | *SO* | *RS* | . | > | N | ^ | n | ~ |
| 1111 | *SI* | *US* | / | ? | O | _ | o | DEL |

Табела 12.1. *ASCII*-код

Скраћенице се односе на команде и инструкције првобитно коришћене за даљинско управљање електричним писаћим машинама (телепринтерима), као што су звучни сигнал (*BEL*) или прелазак на почетак новог реда при штампању (табела 12.2).

| скраћеница | значење | опис |
|---|---|---|
| *ACK* | *Acknowledge* | потврда пријема поруке |
| *ETX* | *End of Text* | крај текста |
| *EOT* | *End of Transmision* | крај предаје |
| *BEL* | *Bel* | звоно, звучни сигнал |
| *LF* | *Line Feed* | прелазак у следећи ред |
| *FF* | *Form Feed* | прелазак на почетак следеће стране |
| *CR* | *Carriage Return* | прелазак на почетак реда |
| *SP* | *Space (blank)* | размак |
| *DEL* | *Delete* | брисање |

Табела 12.2. *ASCII* наредбе и инструкције

У проширеном алфанумеричком коду *EBCDIC* (*Extended Binary Coded Decimal Interchange Code*) користи се осам бита, што омогућује представљање 256 знакова.

Стандард за пренос података у системима даљинског надзора и управљања који је дефинисала Међународна електротехничка комисија (*IEC* 60870 *Telecontrol equipment and systems*) састоји се из шест делова у којима су дата општа разматрања, радни услови, елементи спреге, захтеви у погледу перформанси, трансмисиони протоколи и компатибилност са *ISO* и *ITU* препорукама.

Општа правила преноса су следећа:

- неактивна линија се бинарно означава јединицом (“1”);
- сваки знак (*character*) има један почетни (*START*) бит (бинарна нула), осам информационих битова (*byte*), један бит парности (*EVEN/ODD PARITY*) и један завршни (*STOP*) бит;
- интервали неактивне линије нису дозвољени између знакова једне поруке;

- после откривања грешке захтева се најкраћи интервал од 33 бита неактивне линије између поруке.

Низ корисничких података се завршава 8-битним контролним збиром (*CHECK SUM*) који представља аритметички збир по модулу 256 свих корисничких бајтова.

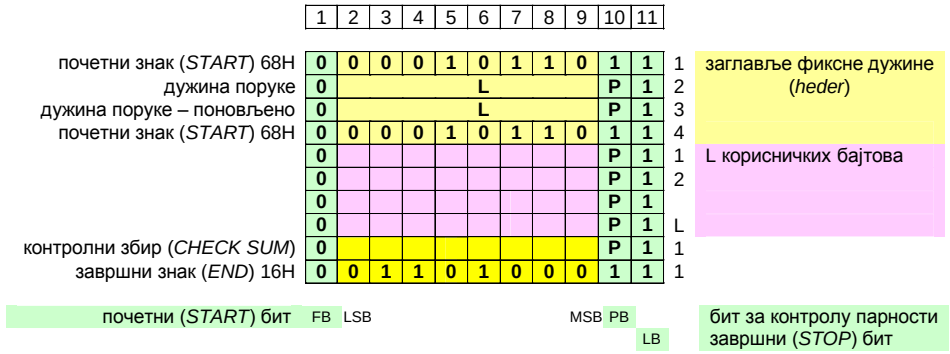
Поруке фиксне дужине се састоје од пет бајтова. То су:

- почетни (*START*) карактер (знак) *10H*,
- контролни карактер,
- адреса спољне станице којој је порука упућена, односно која шаље поруку,
- контролни збир (*CHECK SUM*) и
- завршни (*STOP*) карактер (*16H*).

Поруке променљиве дужине се састоје од:

- почетног (*START*) карактера,
- два идентична карактера која одређују дужину (*L*) корисничког дела поруке,
- другог почетног (*START*) карактера,
- корисничких података,
- контролног збира (*CHECK SUM*) и
- завршног (*STOP*) стоп карактера.

Дужина поруке, односно број корисничких бајтова података (до 255) се поставља зависно од количине података које је потребно пренети. Дужина се понавља два пута да би се обезбедила боља заштита за заглавље поруке, независно од остатка поруке. Изглед поруке променљиве дужине приказан је на слици 12.9.




Слика 12.9. Формат поруке променљиве дужине

Кориснички део поруке садржи контролни и адресни знак и блокове корисничких података. Контролни карактер садржи информације које одређују смер и намену поруке, и обезбеђује контролне функције за сузбијање удвајања порука. Адресни карактер одређује адресу крајње станице којој је порука упућена (у случају порука из централног рачунара), односно адресу крајње станице која упућује поруку према централном рачунару. Сваки блок корисничких података има јединствену структуру.

На почетку блока се налази знак који одређује тип блока односно дефинише врсту и структуру података од којих се блок састоји. Следећи знак представља дужину блока, односно број знакова у блоку (без почетна два). Даље се у оквиру блока налазе кориснички подаци чија је структура у потпуности дефинисана типом блока.

Прималац поруке проверава:

- *START*-бит,
- *STOP*-бит,

- парност сваког карактера у поруци,
- формат поруке (*START*-карактер на почетку и на крају заглавља поруке, једнакост два податка о дужини поруке, број примљених картактера (*L+6*), контролни збир (*CHECK SUM*) и завршни карактер),
- интервал неактивне линије.

Порука се одбацује ако било која од ових провера не успе, иначе се прослеђује на даљу обраду.

Посебан документ (870-5-12) односи се на пренос стања бројила (*counter reading, integrated total*). Овај стандард је препоручен од стране *UCPTE* (*The Union for the coordination of Transmission of Electricity*) за прикупљање података са обрачунских мерних места.

## 12.4 АУТОМАТСКО ОЧИТАВАЊЕ БРОЈИЛА

Мерење, обрада и размена мерних података неизбежни су пратиоци размене добара од ране историје људске цивилизације. Мерила која се користе у вези са обрачуном (као што су ваге, таксиметри, водомери, гасомери, справе за мерење течних горива, уклопни часовници, калориметри) имају улогу "објективног посредника" између продавца и купца, због чега представљају категорију од посебне важности. С обзиром на намену, њихове карактеристике су прецизно дефинисане, регулисане одговарајућим прописима и контролисане. Са развојем мерне технике, током двадесетог века, првенствено су се мењали конструкција и принцип рада ових мерила, док се за функције и мерна својства може рећи да су дуго времена била практично инваријантни у односу на развој технологије. Међутим, при купо-продаји роба и услуга не захтева се само мерење количине (пређеног пута, масе, запремине флуида, топлотне или електричне енергије), већ и одговарајућа обрада резултата мерења, у складу са условима који су дефинисани одговарајућим прописом и/или купо-продајним уговором. Дакле, потребно је омогућити да се на месту мерења очита износ вредности робе или услуге, као и да се одговарајући подаци аутоматски региструју и пренесу у одговарајући центар.

Централизовано прикупљање мерних података у систему који може да садржи више стотина хиљада просторно дистрибуираних мерних места представља веома сложен задатак. У начелу, регистровање измерених вредности, може да се оствари ручно, од стране овлашћеног лица, полуаутоматски, посредством локалног комуникационог система, или аутоматски, помоћу система за даљински пренос података. Ручно регистровање је засновано на непосредном визуелном приступу мерилу у циљу очитавања, док полуаутоматско прикупљање података подразумева коришћење специјализованих преносивих електронских уређаја (*hand-held terminal, HHT*). Потпуно аутоматско очитавање, засновано на принципима даљинске комуникације, остварује се применом система мрежне тонфреквентне команде (МТК), телефоније, радио везе и других електричних или оптичких система намењених за локални или даљински пренос података.

Даљинско мерење у сложеним системима са веома великим бројем мерних места постало је неминовност, као предуслов за надзор и управљање географски распрострањеним индустријским процесима (као што су

производња електричне енергије или дистрибуција гаса), али и као решење проблема прикупљања података за потребе аутоматизованог обрачуна трошкова за испоручену енергију, нафту или гас. Ефикасно управљање сложеним техничким системима постало је нужност.

Рационална експлоатација енергетских ресурса подразумева располагање тачним и поузданим подацима који карактеришу обим и режим њиховог коришћења. Једино мерењем се може добити увид у стање и економичност рада неког система. Подаци добијени мерењем електричне енергије, на пример, користе се не само за обрачун трошкова него и за анализу режима потрошње и ефеката тарифа, прогнозирање оптерећења, планирање развоја мреже, управљање мрежом. Све ове активности захтевају централизовану рачунарску обраду резултата мерења добијених у карактеристичним тачкама географски распрострањеног система. Непрекидно праћење и добијање веродостојних података представља полазну тачку за смањивање трошкова производње и испоруке електричне енергије, али и за њену уштеду односно рационализовање потрошње.

Проблематика даљинског мерења у сврхе обрачуна развијала се у почетку у оквиру мерења потрошње електричне енергије на местима испоруке, нудећи решења која су била економски прихватљива само у случајевима великих производних, дистрибутивних и индустријских објеката. Даљинско мерење сводило се на даљинско бројање импулса добијених из мерила електричне енергије чиме се, у начелу, не могу решити ни елементарни проблеми прикупљања обрачунских података у системима са великим бројем потрошача. Развојем технологије електронских кола, у спрези са развојем микрорачунарске и комуникационе технике, обезбеђени су потребни услови за решавање проблема који постоји од првих дана производње електричне енергије на комерцијалној основи. Први значајнији кораци у том правцу остварени су у оквиру управљања објектима електроенергетских система. Иако су подаци о потрошњи електричне енергије прикупљани искључиво у сврхе надзора, информациона технологија, развијена за потребе централизованог даљинског управљања електроенергетским системом представљала је основу на којој су заснована решења која су касније примењена и у области обрачунског мерења.

Под називом аутоматско очитавање бројила (*automatic meter reading, AMR*) подразумева се поступак аутоматизованог прикупљања података добијених помоћу мерила количине (електричне или топлотне енергије, гаса или воде) и њихов пренос до одговарајућег централне базе података на основу које се врши обрачун, дијагностика стања дистрибутивне мреже и анализа режима потрошње одређеног ресурса.

Првобитна бројила представљала су механичке или електромеханичке направе, прихватљиве тачности, али без могућности управљања и даљинског очитавања. Класичан поступак очитавања заснивао се на непосредном приступ мерилу. Увођење опреме за даљинско очитавање захтевало је знатне инвестиције. Крајем двадесетог века, електронска бројила електричне енергије омогућила су бољу тачност, ограничено управљање и ефикаснију спрегу са опремом за пренос података. Пренос података у основи је био

једносмеран, од мерног места до обрачунског центра јавне службе (*utility company*).

Развој електронске и комуникационе технологије омогућио је појаву интелигентних бројила (*smart meter*). То су у основи дигитални уређаји који не само да одмеравају потрошњу у складу са потребама обрачуна и измерене вредности прослеђују до одговарајућег центра, већ омогућују и даљински надзор потрошње, односно управљање њоме са циљем оптимизације трошкова и експлоатације ресурса. Такво бројило представља елемент напредне мерне инфраструктуре (*Advanced metering infrastructure, AMI*). Аутоматска размена информација остварује се двосмерном комуникацијом између интелигентног бројила, које има своју *IP* адресу (*Internet Protocol address*), и одговарајућег центра. На овај начин подаци о потрошњи сакупљају се у реалном времену[23], што омогућује да корисник, на бази стварних података, може да прилагоди своју потрошњу сходно дефинисаним тарифним ставовима у погледу цене, коју испоручилац доставља да важи (у зависности од потражње) у одређеном временском интервалу. На овај начин могуће је остварити програм уштеде на нивоу једне заједнице.

Сматра се да напредна инфраструктура пружа три врсте значајних предности. Предност у погледу функционисања система огледа се у смањивању служби које се баве очитавањем и администрацијом обрачуна, смаљивању могућности настајања грешке при очитавању, ефикаснијем откривању злоупотреба, брзој детекцији прекида у снабдевању, као и у могућности даљинског укључивања и искључивања са циљем спровођења програма редукције снабдевања. Предности у опслуживању корисника испољавају се у детекцији отказа мерила, повећаној тачности обрачуна и флексибилнијем тарифном систему. Финансијске предности огледају се у смањењу трошкова за одржавање и бржем отклањању прекида у снабдевању.

Систем може да обухвати мерила различитих величина: бројила електричне енергије, калориметре, гасомере и водомере (слика 12.10)

[23] Под појмом “реално време” (*real-time*) подразумева се стварно време у којем се одвија неки физички процес. Односи се на извршавање дигиталне обраде такорећи у исто време када се одвија процес којим се управља. Дигитални уређај мора да буде у стању да “реагује” (а то значи да прихвати сигнале из спољашњег света и обави потребну обраду) унутар предетерминисаног временског интервала.




Слика 12.10. Напредна мерна инфраструктура

Напредна мерна инфраструктура је значајни део интелигентне мреже (*smart grid*) која, иако у неким стварима контраверзна[24], представља стратешко опредељење развијених држава [7], [8], [9].

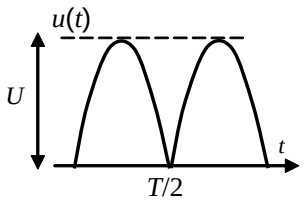
# ЛИТЕРАТУРА


1 *http://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_program*.
2 *A.G. Phadke, Synchronized Phasor Measurements in Power Systems, IEEE Computer Applications in Power, vol 6, No 2, pp 10 -15*.
3 *C. E. Shannon* "*A mathematical theory of communication*", *Bell System Technical Journal*, 27: 379–423 1948, http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf.
4 *Telecontrol equipment and systems, Part 5, Transmision protocols. Section One - Transmission frame formats, IEC* 870-5-1, 1990.
5 *Telecontrol equipment and systems, Part 5, Transmission protocols, Section 102: Companion standard for the transmision of integrated totals in electric power systems, IEC* 870-5-102, 1996.
6 P.Bošnjaković, D.Bogojević, V.Vučurević, D.Rađenović, Programska podrška sistema za daljinsko obračunsko merenje električne energije, 24 Savetovanje JUKO-CIGRE, 1999, Zbornik radova, R.
7 *Smart Grid European Technology Platform, http://www.smartgrids.eu/*.
8 *https://www.smartgrid.gov/*.
9 *http://endthelie.com/2011/07/15/smart-meters-public-health-nightmare-or-public-utility-boon/*.

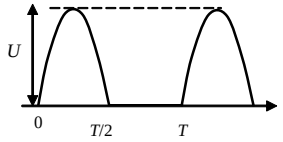

[24] Овде се мисли, пре свега, на могућност испоручиоца да контролише додељени износ потрошње и искључи потрошача, губитак приватности откривањем детаља који се односе на потрошњу, повећана могућност надзора од стране трећих лица, смањена поузданост повећањем сложености, повећан ризик безбедности од неовлашћеног даљинског приступа и губитак посла за читаче бројила.

# ПРОБЛЕМИ

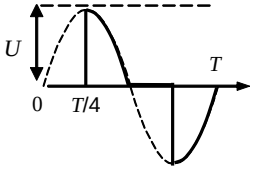
1. Одредити показатељ облика (*form factor, F*) периодичног напона чији је временски дијаграм приказан на слици.



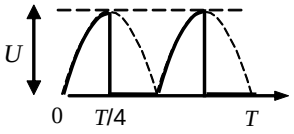

2. Одредити показатељ врха (*crest factor, CF*) периодичног напона чији је временски дијаграм приказан на слици.



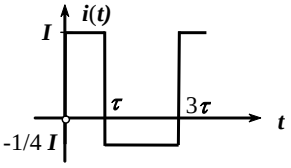

3. Одредити показатељ облика (*form factor, F*) периодичног напона чији је временски дијаграм приказан на слици.




4. Одредити показатељ врха (*crest factor, CF*) периодичног напона чији је временски дијаграм приказан на слици.

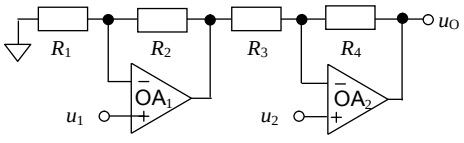



5. Одредити распон, средњу, средњу исправљену и ефективну вредност периодичног сигнала чији је таласни облик приказан на слици.

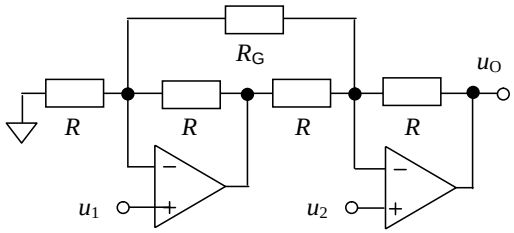



6. Нацртати принципску шему кола које омогућује мерење темене (вршне) вредности напонског импулса.

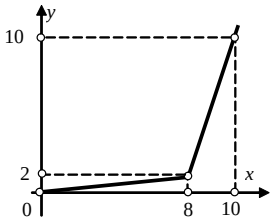
7. Одредити потребан услов у погледу односа отпорности да коло приказано на слици представља инструментациони појачавач који на свом излазу даје напон сразмеран разлици улазних напона..



8. Одредити општи израз за вредност излазног напона у колу приказаном на слици.

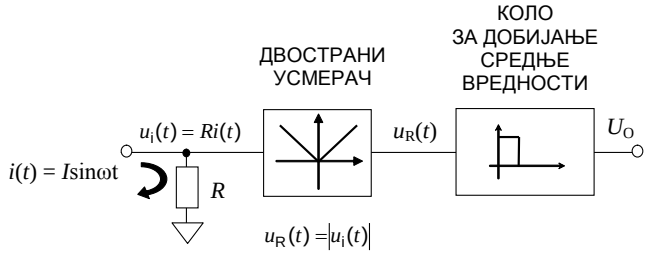



9. Написати аналитички израз који представља математички модел претварача чија је карактеристика преноса приказана на слици.




10. Одредити параметре карактристике преноса кондиционера који струјни сигнал у опсегу од 4 mA до 20 mA пресликава у напон од -10 V до 10 V. Описати поступак подешавања.

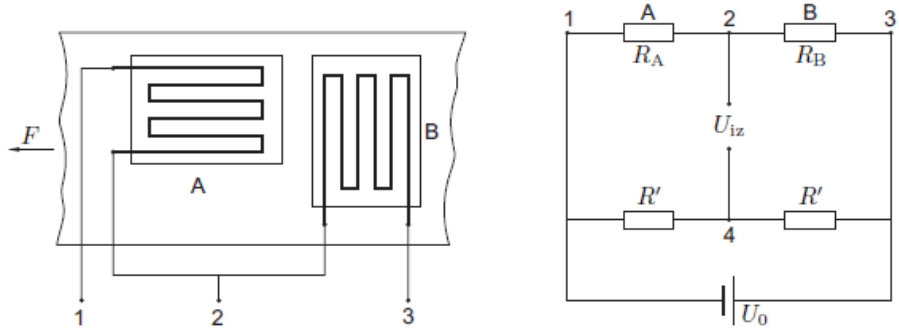
11. Одредити вредност отпорности $R$ тако да вредност излазног напона у колу приказаном на слици, изражена у волтима, представља ефективну вредност улазне струје изражене у милиамперима.



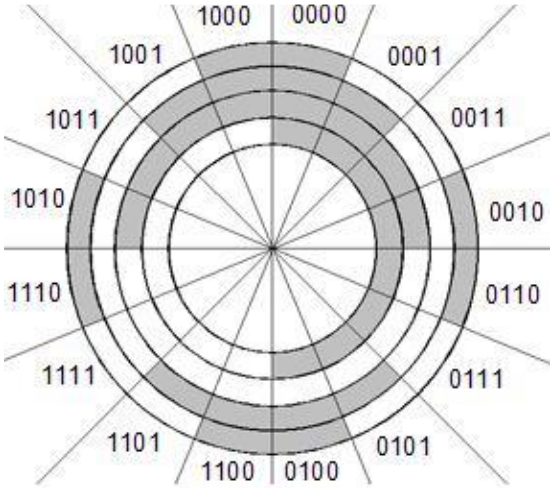

12. Написати израз за израчунавање грешке бројила методом поређења са еталон бројилом. Одредити бројне вредности параметара при испитивању трофазног трансформаторског бројила чији је референтни међуфазни напон 100 V, називна струја 1 A, а константа импулса оптичког давача 3200 имп/Wh, ако је број импулса једнак 10, а учестаност импулса еталон бројила при називној вредности мерене снаге једнака 10 kHz. Колико траје мерење?

13. Извести израз за излазни напон моста $U_{iz} = U_{24}$, ако се за компензацију температуре примењују две мерне траке, као што је приказано на слици, под претпоставком да се промена отпора $\Delta R$ услед уздужне деформације јавља само на мерној траци A, док је су попречне

деформације на траци B занемарљиве у односу на уздужне. Отпорности мерних трака када нису изложене напрезању су идентичне и износе $R$.

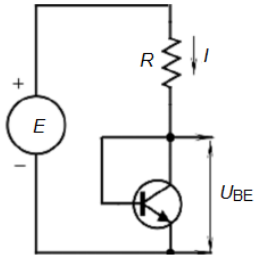



14. На слици је приказан диск апсолутног оптичког енкодера. Који тип бинарног кодовања је примењен? Који опсег вредности углова може да се дектује бинарним кодом 0010?

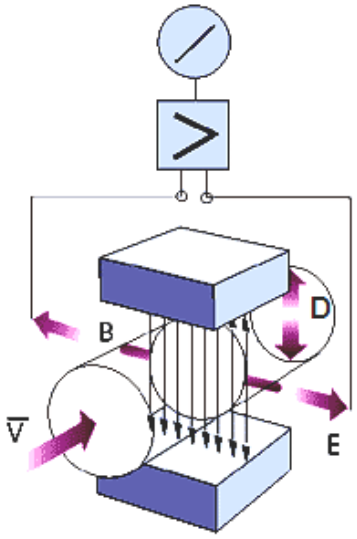



15. Помоћу струна сензора мери се механичко напрезање на површини објекта направљеног од материјала чија је еластичност $E = 12 \times 10^4 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$. Ако је сензор дужине 120 mm, дредити колико је механичко напрезање сензора $\sigma$, ако се крај жице под дејством силе $F$ помери за 4 mm.

16. У ком опсегу треба да буде вредност отпорника у колу транзисторске диоде приказане на слици, која се користи као сензор температуре, да би струја у колу имала вредност у опсегу од 100 μA до1 mA, ако је напон напајања 10V.




17. Колики проток мери електромагнетни мерач протока приказан на слици, ако је његов пречник $D$ = 100 mm, индукција електромагнета $B$ = 0, 01 T и индуковани напон на електродама $E$ = 10 mV. Колика запремина течности протекне кроз мерач у току једног минута?



# РЕЧНИК ПОЈМОВА

**азбука** (алфабет) – у најопштијем случају дефинише се као скуп свих могућих симбола који се користе у одређене сврхе.

**аквизиција података** (*data acquisition, DAQ*) – прикупљање и примарна обрада (мерних) података.

**амплитудска фреквенцијска карактеристика** (*frequency characteristics, frequency response*) – модуо комплексне фреквенцијске карактеристике. Количник амплитуда одзива и побуде линеарног елемента (система).

**аналогна величина** (*analog quantity*) – величина која може да има било коју вредност која припада одређеном опсегу вредности.

**аналогни сигнал** (*analog signal*) – сигнал чији информациони параметар може да поприми било коју вредност унутар одређеног непрекидног интервала вредности.

**аналогно/дигитални претварач**, А/Д претварач (*analogue-to-digital converter*) – елемент који остварује пресликавање вредности улазне аналогне величине на вредност излазне дигиталне величине.

**бинарна азбука** (*binary alphabet*) – азбука која садржи само два симбола.

**бинарни сигнал** (*binary signal* – дигитални сигнал чији информациони параметар може да поприми само једну од две дискретне вредности.

**векторска величина** (*vector quantity*) – величина карактерисана, у *n*-димензионалном простору, са *n*-скаларних величина уређених у датом реду.

**временски мултиплекс** (*time-division multiplexing*) – пренос више сигнала преко истог комуникационог канала секвенцијалном расподелом тако да се сваки улазни сигнал преноси током низа предефинисаних временских интервала..

**дигит** (*digit*) – члан коначног скупа ненегативних целих бројева који се користи за представљање информација.

**дигитална величина** (*digital quantity*) – величина која може да има само неке из низа одвојених (дискретних) вредности.

**дигитални сигнал** (*digital signal*) – сигнал чији информациони параметар може да има само неку од вредности из скупа унапред дефинисаних дискретних вредности.

**дигитално/аналогни претварач**, Д/А претварач (*digital-to-analogue converter*) – елемент који остварује пресликавање вредности улазне дигиталне величине на вредност излазне аналогне величине.

**диференцијални напон** (*differential voltage*) – разлика два напона, напон који није дефинисан према нултом потенцијалу (маси) система.

**диференцијални појачавач** (*differential amplifier*) – елемент који појачава разлику два сигнала представљена величином исте врсте, појачавач разлике (два напона), појачавач диференцијалног напона.

**елемент** (*element*) – саставни део који се не може поделити на мање делове, а да се не изгубе карактеристична (електрична) својства односно функције.

**извор напона** (*voltage source*) – активни елемент са једним приступом. Извор енергије чију карактеристичну величину представља напон.

**извор струје** (*current source*) – активни елемент са једним приступом. Извор енергије чију карактеристичну величину представља струја.

**импулсна кодна модулација** (*pulse code modulation, PCM*) – поступак дигиталног представљања аналогних сигнала низом импулса кодираних на подесан начин.

**инвертор** (*unity gain inverting amplifier, inverter*) – појачавач чије је појачање једнако минус један.

**интерфејс** (*interface*) – граница, спој, спрега између система или делова система преко које се врши пренос информација.

**инструментациони појачавач** (*instrumentation amplifier*) - диференцијални појачавач са великом улазном отпорношћу.

**јединични појачавач** (*unity gain noninverting amplifier, buffer amplifier, voltage follower*) - операциони појачавач са јединичном повратном спрегом.

**карактеристика преноса** (*transfer characteristics*) – однос између улазне величине, која представља побуду, и излазне величине, која представља одзив елемента (система).

**линеаран елемент** (*linear*) – елемент (систем) који се може да опише линераним операторима.

**мерни сигнал** – променљива физичка величина, функција времена, која представља мерену величину.

**модем** – акроним од *modulator-demodulator*. Уређај који излазни сигнал једне врсте опреме претвара у сигнал који одговара улазу опреме другог типа. На пример, помоћу модема рачунар се повезује са телефонском мрежом.

**мултиплексирање** (*multiplexing*) – симултани пренос више сигнала преко једне линије без губљења идентитета индивидуалних сигнала.

**називна вредност** (*nominal value*) – одговарајућа заокружена или приближна вредност величине која се користи да се означи или идентификује елемент, компонента односно уређај, или формулише упутство за његову употребу.

**напон помераја нуле сведен на улаз** (*input offset voltage*) – напон који мора да делује између улазних прикључака операционог појачавача без повратне спреге, да би напон на његовом излазу био једнак нули.

**осцилатор** (*oscillator*) –систем у којем постоји промена електричног напона, односно струје, у односу на неку референтну вредност, тако да је осцилујућа величина наизменично већа и мања од неке референтне вредности. У ужем

смислу, уређај који производи наизменичну струју чија је учестаност одређена карактеристикама тог уређаја.

**периодични** (*periodic*) – променљива величина која се идентично репродукује у једнаким интервалима независно променљиве.

**пливајући** (*floating*) – односи се на елемент (уређај) који није повезан са неким извором напона.

**поларитет** (*polarity*) – испољавање позитивне или негативне вредности у електричном колу или уређају.

**поларизација** (*bias*) – поступак којим се (појачавачки) елемент доводи у радне услове који омогућују жељени одзив на побуду која представља улазни (управљачки) сигнал.

**приступ** (*port*) – пар крајева преко којих се приступа елементу, такав да су струје у њима једнаке по интензитету, а супротног смера.

**пратећи систем** (*tracking system*) – систем који вредност улазне величине (управљачка променљива) пресликава на вредност излазне величине (управљана променљива), независно од поремећаја.

**програм** – распоред по којем ће се нешто изводити (обављати).

**протокол** – скуп правила за пренос података између било која два дела система.

**процес** – скуп операција који остварује трансформацију, пренос или складиштење материјала, енергије или информација.

**резолуција** (*resolution*) – способност разлагања, најмања промена посматране величине која може да се опази.

**систем** – скуп међусобно повезаних елемената, посматран у одређеном контексту као целина, састављена са циљем да се оствари одређена функција.

**скаларна величина** (*scalar quantity*) – величина карактерисана једним (реалним или комплексним) бројем.

**спектар** (*spectrum*) – расподела неке величине у функцији учестаности или таласне дужине.

**спољна станица** (*outstation, remote terminal unit, RTU*) – периферијски уређај система за надзор и управљање процесом.

**талас** (*wave*) – промена физичког стања средине, која се у тој средини простире у функцији времена.

**таласни облик** (*waveform*) – приказ величине којом је дефинисан талас помоћу дијаграма, цртежа, једначина, табела или статистичких података.

**телеграфија** – најстарији облик комуницирања електричним путем. Француски физичар Ампер (*André Marie Ampére, 1775-1836*) је први предложио да се електромагнетско дејство електричне струје искористи за преношење порука на даљину. Ако за свако слово азбуке постоји посебно електрично коло које садржи прекидач, на предајној, и магнетну иглу, на

удаљеној (пријемној) страни, тада скретање појединачне игле на месту пријема означава да је на удаљеном месту предаје укључен прекидач који одговара одређеном слову

**у квадратури** (*in quadrature*) **-** временски однос две простопериодичне величине, исте учестаности, чија је разлика фаза једнака $\pm\pi/2$.

**у фази** (*in phase*) – временски однос две простопериодичне величине, исте учестаности, чија је разлика фаза једнака нули.

**фазна фреквенцијска карактеристика** (*frequency characteristics, frequency response*) – аргумент фреквенцијске карактеристике у функцији учестаности. Разлика фаза одзива и побуде линеарног елемента (система).

**фреквенцијска карактеристика** (*frequency characteristics, frequency response*) – комплексна величина која приказује како линеарни елемент типа улаз-излаз делује на амплитуду и фазу сигнала зависно од његове учестаности. Ако наизменична величина $x(t)$ представља простопериодичну улазну, а величина $y(t)$ излазну величину, фреквенцијска карактеристика представља комплексну функцију одређену количником комплексних ликова излазног, $\boldsymbol{Y}(j\omega)$, и улазног сигнала, $\boldsymbol{X}(j\omega)$.

**фреквенцијски мултиплекс** (*frequency-division multiplexing*) – пренос више сигнала преко истог комуникационог канала расподелом различитих фреквенцијских опсега.

**функција преноса** (*transfer function*) – комплексна величина једнака количнику комплексних ликова који представљају Лапласове трансформације одзива и побуде посматраног елемента односно система.

**Фуријеова (хармонијска) анализа** – представљање периодичних сигнала тригонометријским (Фуријеовим) редом.

**хармонијска функција** (*harmonic function*) – функција синусног облика (простопериодична функција).

***auto-zero*** – самоподешавање нуле инструмента.

***BCD*–код** (*Binary Coded Decimal*) –представљање вишецифреног декадног број низом бинарних симбола тако да је свака цифра декадног броја приказана у бинарном запису.

***bus*** – скуп паралелних линија који се користи за пренос сигнала.

***SCADA*** (*Supervisory Control And Data Acquisition*) – систем за надзор и управљање.

***RTU*** (*remote terminal unit*) – удаљена крајња станица.

# СКРАЋЕНИЦЕ

| | |
|---|---|
| *ac, AC* | *Alternating Current* |
| *ADC* | *Analog-To-Digital Converter* |
| *ADSL* | *Asymetric Digital Subscriber Line* |
| *AM* | *amplitude modulation* |
| *ANSI* | *American National Standards Institute* |
| *ACII* | *American Standard Code for Information interchange* |
| *avg, AVG* | *average* |
| *BCD* | *Binary Coded Decimal* |
| *BIPM* | *Bureau International des Poids et Measures* |
| *bps* | *Bits Per Second* |
| *CCITT* | *Comite Consultatif International Telephonique et Telegraphique* |
| *CPU* | *Central Processing Unit* |
| *CR* | *Carriage-Return* |
| *CTS* | *Clear To Send* |
| *DAC* | *Digital-To-Analog Converter* |
| *DAV* | *Data Valid* |
| *dc, DC* | *Direct Current* |
| *DCE* | *Data Circuit-terminating Equipment* |
| *DIO* | *Digital Input Output* |
| *DSP* | *Digital Signal Processing* |
| *DTE* | *Data Derminal E\|quipment* |
| *EIA* | *Electronic Industries Alliance* |
| *EMC* | *electromagnetic compatibility* |
| *EURAMET* | *European Association of National Metrology Institutes* |
| *FDM* | *Frequency-Division Multiplexing* |
| *FM* | *Frequency Modulation* |
| *FSK* | *Frequency-Shift Keying* |
| *FSR* | *Full-Scale Range* |
| *GPIB* | *General Purpose Interface Bus* |
| *HF* | *High Frequency* |
| *HMI* | *Human Mashine Interface* |
| *HP-IB* | *Hewlet-Packard Interface Bus* |
| *HV* | *High Voltage* |
| *IC* | *Integrated Circuit* |
| *IEC* | *International Electrotechnical Commission* |
| *IEEE* | *Institute of Electrical and Electronics Engineers* |
| *IEV* | *International Electrotechnical Vocabularu* |
| *IOC* | *Instrument On Card* |
| *IRIG* | *Inter-Range Instrumentation Group* |
| *ISO* | *International Organisation For Standardisation* |
| *ISQ* | *International System of Quantities* |
| *ITU* | *International Telecommunication Union* |
| *IDSN* | *Integrated Services Digital Network* |
| *LF* | *low frequency* |
| *LF* | *line-feed* |
| *LSB* | *Least Significant Bit* |
| *LSD* | *Least Significant Digit* |
| *LSI* | *Large-Scale Integration* |
| *MID* | *Measuring Instruments Directive* |
| *MMI* | *Man Mashine Interface* |
| *NDAC* | *Not Data Accepted* |
| *NRFD* | *Not Ready For Data* |
| *NTC* | *Negative Temperature Coefficient* |
| *OIML* | *Organisation Internationale de Métrologie Légale* |
| *PAM* | *Pulse Amplitude Modulation* |
| *PCM* | *Pulse Code Modulation* |
| *PDM* | *Pulse Duration Modulation* |
| *ppm* | *Pars Per Milionen* |
| *PRR* | *Pulse Repetition Rate* |
| *PRT* | *Platinum Resistance Thermometer* |
| *PSK* | *Phase-Shift Keying* |
| *RF* | *Radio Frequency* |
| *rms, RMS* | *Root-Mean Square* |
| *RS* | *Recommended Standard* |
| *RTU* | *Remote Terminal Unit* |
| *RTD* | *resistive thermal device, resistance temperature detector* |
| *RTS* | *Request To Send* |
| *RxD* | *receive data* |
| *SCADA* | *Supervisory Control And Data Acquisition* |
| *SCSI* | *Small Computer System Interface* |
| *SI* | *International System of Units* |
| *SRQ* | *service request* |
| *TDM* | *time-division multiplexing* |
| *TIA* | *Telecommunication Industry Association* |
| *TC* | *Temperature Coefficient* |
| *TxD* | *Transmit Data* |
| *UART* | *Universal Asinchronous Receiver Transmitter* |
| *UHF* | *ultrafigh frequency* |
| *UV* | *ultraviolet* |
| *VFC* | *voltage to frequency converter* |
| *VHF* | *Very High Frequency* |
| *VIM* | *International vocabulary of metrology* |
| *VXI* | *VMEbus Standard Extension for Instrumentation* |
| *WWAN* | *Wireless Wide Area Network* |
| *ГОСТ* | *Государственый стандарт* |

# ИНДЕКС


**А**

А/Д претварач 75, 90, 96
азбука 351, 360
аквизиција 23, 27, 357
Акредитационо тело Србије 339
акцелерометар 164
- индукциони 164
- контактни 164
- пиезоелектрични 166, 170
- полупроводнички 167

алгоритам 22, 285, 338
аналогна величина 3, 14
аналогни сигнал 14
анемометар 229
- са угрејаном жицом 229
- са константном температуром 230

архитектура инструмената 246
аутоматизација 3, 9, 321

**Б**

бајт 298
Батервортов филтер 50
бафер 312, 316
баферизован пренос 312
бинарна величина 14, 91
бинарно-кодовани декадни запис 273
бит 14, 298, 352
блок-дијаграм 9
бод (*baud*) 302
Бурдонова цев 33, 179, 193

**В**

величина 3, 14, 17
- аналогна 3, 14, 22
- дигитална 4, 14, 101
- једносмерна 62
- наизменична 17, 20, 61

Вентуријева цев 213, 215
виртуелни инструмент 26, 335
Витстонов мост 124, 183, 205
волуметријски мерач 218
вртложни мерач протока 220
вршна вредност 16, 62

**Д**

децибел 47
детектор нивоа 231
- пловак 231
- кондуктивни 232

дигит 4, 14
дигитална величина 4, 14, 101
дигитални сигнал 15
динамометар 172, 174
диода 144, 207
Дирекција за мере и драгоцене метале 93, 106, 339

**Е**

екситација 35, 244, 269
електрични претварачи влажности 237
- капацитивни 237
- отпорни 237

електромагнетни мерач протока 221
ендо 12
енкодер 146
- апсолутни 154
- инкрементални 146, 155

еталон 1, 68, 92
ефективна вредност 17, 62

**З**

законска метрологија 1, 105

**И**

импулсна модулација 305
импулсна кодна модулација 347, 354
индекс класе тачности 55, 95
индустријска метрологија 1
интеграција 255, 284, 290
интегрисано коло 4, 248, 271
интегритет података 357, 360
интелигентни мерни уређај 5
интерфејс 6, 245, 263
- командни 292
- комуникациони 247, 292, 297
- модулни 296
- процесни 356

информација 3, 10, 13
инфрацрвена термографија 210

**К**

калибрација 179, 270, 274
калориметар 263, 265
карактеристика 3, 9, 30
- динамичка 30, 34, 41
- одзива 9
- преноса 9, 30, 36
- статичка 9, 30, 35
- фреквенцијска 9, 46

Келвин 185
Келвинова температурна скала 185
класа тачности 341
код 154, 245, 289
кодна реч 360
компатибилност 292, 349, 361
кондиционер 32, 268, 277
константа бројила 108, 111, 342
контролер 246, 273, 313
крајња станица 297, 359

**Л**

линија везе 10, 292, 397

**М**

магистрала 294, 304, 311
магнетострикциони ефекат 175
манометри 178
- са електричним излазом 181
- са капацитивним претварачем 182

са мембраном 182
математички модел 5, 15, 38
материјализована мера 141, 144
Међународна електротехничка комисија 13
Међународни биро за тегове и мере 2
Међународни систем величина 83
Међународни систем јединица 1
мерење 2, 146, 171
вибрација 167
влажности 263
напрезања услед торзије 176
нивоа 230
помераја 146
притиска 177
протока 212
силе и момента 171
температуре 185
угаоне брзине 157
мерна ћелија 174
мерна трака 33, 128
мерни ланац 23, 32, 146
мерни претварач 23, 33, 268
микроконтролер 269
микропроцесор 4, 36, 104
модем 298, 304, 354
модул 8, 24, 272
модулатор 91, 305, 354
модулација 92, 305, 354
модулисани сигнал 305, 354
модулишући сигнал 305
Морзеов код 347
мултиплекс 354

**Н**

наизменична величина 17, 61
наизменични 61
научна метрологија 1
непрекидна функција 18, 20
носећи сигнал 305

**О**

објектно програмирање 324
оверавање мерила 106, 338
овлашћено тело 106
одзив 9, 30, 42
одобрење типа 84, 106, 338
отпорни мост 124
отпорни силицијумски сензор 201
основна копмпонента 21
оцењивање усаглашености 339

**П**

период 15
периферијска јединица 25, 272, 321
пиезоелектрични 45, 140
сензори притиска 183
платински *RTD* 199
пирометар 208
оптички 208
радијациони 209
Питоова цев 216
побуда 9
повратна спрега 7, 10
показатељ таласности 22
показатељ пулсације 21
поларизација 35
померај 38, 146, 327
нуле 38, 327
линеарни 148
транслаторни 146
угаони 146, 154
порт 59, 302, 307
порука 359
потенциометар 7
предајник 10, 226, 305
пренос података 11, 265, 297
претварач 23
аналогно/дигитални 65, 271
дигитално/аналогни 9, 101, 309
еластични 179
електромагнетни 157
мерни 23, 33, 268
на бази Холовог ефекта 157, 162
на принципу струне 153
оптоелектронски 161
са мембраном 180
пригушнице 213
са блендом 213
са млазницом 213
принцип мерења 31
пријемник 10, 303, 305
програм 5
проток флуида 30, 212, 219
запремински 212
масени 212
протокол 294, 301, 359
процес 3
процесни рачунар 29
пропусни опсег 49
пулсирајућа величина 17

**Р**

реално време 365
регистар 95, 249
резолуција 4
Реомир 185
Реомирова температурна скала 185
референтни услови 253
рипл 50, 56, 65
ротаметри 217
рутина 26

**С**

сабирница 294
самоподешавање 243, 255, 321
сензор 23
активни 31, 121, 143
електродинамички 139
индуктивни 136, 151
капацитивни 31, 131, 150
неелектричних величина 129
отпорнички 31, 121, 146
пасивни 31, 121
сеизмички 169
силе 172, 173
фотоелектрични 142
сензор нивоа 230
капацитивни 233
отпорни 234
ултразвучни 235
сензор притиска 184
са слободном жицом 184

- са мерним тракама 184
сензор температуре 187
- неелектрични 189
- електрични 194
- на бази PN споја 205
сервосистем 7
сертификат 106, 338
сигнал 13
- аналогни 14
- бинарни 14, 298
- грешке 7
- дигитални 15
- електрични 16
- мерни 13, 15
синтакса 325
систем 3
слабљење 43
спектар 20
справа за мерење течних горива 363
спољна станица 304, 359
средња апсолутна вредност 17
средња вредност 17
стандард 290
статика 35
статичка карактеристика 9, 35, 73
струјна петља 299
структура 271

**Т**

тара 37
тарифа 109
талас 16
тахогенератор 159
телеграфија 347
телекомуникације 10
телеметрија 11
телемеханика 7
телепринтер 299
темена вредност 16
тензиометријски 32
теорија информација 11
терминал 291
терминатор 262
термистор 122
термобатерија 197
термограм 210
термометри 189
- биметални 191
- дилатациони 190
- експанзиони 189
- живин 189
- инфрацрвени 210
- манометарски 192
- отпорни 197
термометрија 185
термопар 5, 194, 281
терминални уређај, терминал 29, 291, 301
термички мерачи протока 228
томографија 27
топологија 295
транзистор 205
тројна тачка воде 186
турбински мерач протока 219

**У**

уверење о одобрењу типа 106
удаљена станица 297, 359
ултразвучни мерач протока 224
- емисиони 224
- Доплеров 226

**Ф**

фазна модулација 305
фактор изобличења 21
Фаренхајт 185
Фаренхајтова температурна скала 185
функционални блок 292
филтер 42
фреквенцијска карактеристика 9, 47
фреквенцијска модулација 305
формат података 246, 289
фундаментална метрологија 2
функција 9, 15, 53
- глатка 50
- непрекидна 18
- преноса 9, 53
- хармонијска 15
Фурије 19

**Х**

хармонијска функција 15
Холов ефекат 68, 162

**Ц**

Целзијус 185
Целзијусова температурна скала 185

**Џ**

Џозефсонов ефект 68
Џулов закон 67

**Ш**

Шенон 10, 14, 350

**#**

*ADSL* 355
*AM* 305
*ANSI* 290
*ASCII* 328, 360
*auto-zero* 255, 321
*BCD* 154, 331
*bias* 35, 278
*BIPM* 2
*bus* 294, 304
*CAMAC* 308
*CCITT* 300
*Centronics* 306
*character* 298, 351
*CPU* 4, 272, 296
*dataway* 309
*DCE* 301
*DIO* 307
*DMA* 312, 322
*DTE* 301
*EURAMET* 1
*fan-in* 294
*fan-out* 294
*feedback* 7
*FM* 305
*frame* 359
*FSK* 306, 355
*gain* 278
*GPIB* 244, 297, 312
*handshake* 243
*highway* 230
*HMI* 228

*IEC* 13, 61, 290
*IEEE* 290
*ISO* 298
*ISQ* 83
*IOC* 24,309
*LSB* 299
*link* 297, 350
*mainframe* 309
*mark* 298
*MSB* 234
*NTC* 122, 202
*outstation* 297, 359
*PAM* 306
*PCI* 25
*PLC* 8
*PM* 305
*PSK* 306
*port* 59, 302
*ppm* 283
*PSK* 306
*PTC* 121, 203
*range* 278
*remote station* 297
*RMS* 18
*RTD* 198
*RS232* 300
*RS485* 304
*string* 325, 351
*SCADA* 8, 268
*SCSI* 308
*SI* 1
*smart sensor* 271
*space* 298
*UART* 304
*USB* 304
*VXI* 309
*word* 336, 351
*WWAN* *355*