



УНИВЕРЗИТЕТ "Св. КИРИЛ И МЕТОДИЈ"

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Проф. Д-р Александар Тоде Ношић

СТРУЈНОТЕХНИЧКИ МЕРЕЊА И ИНСТРУМЕНТИ

дополнето издание на книгата од 1995

СКОПЈЕ
2004

Рецензенти:

Проф д-р Томислав Бундалевски
Проф д-р Звонимир Костиќ

СИР - Каталогизација во публикација
Народна и универзитетска библиотека
„Климент Охридски“, Скопје

53.08:681.5(075.8)
53.08:532(075.8)

НОШПАЛ, Александар Т.
Струјнотехнички мерења и инструменти /
Александар Т. Ношпал. - Скопје : МБ 3,
1995. - xvii, 294 стр. : илустр. : 24 см

Тираж 500.
ISBN 9989-704-02-3

а) Мерења - Физички големини -
Примена во автоматика - Учебници
б) Мерења - Физички големини -
Примена во струјна техника - Учебници

Издавач: МБ-3, Рилски Конгрес 111,
Скопје

Уредник: Проф. д-р Наќе Бабамов
Лекитор: Оливера Павловска

Технички цртежи: Слободан Бундалевски
Корекшор: Вера Конеска-Бојкоска

*Ликовно обликување и
комијутерска обработка:* Наќе Бабамов

Печатница: 11 Октомври, Прилеп
Печатено во октомври, 1995

Забрането копирање и умножување
согласно Законот за авторско право

©

Според мислењето на Министерството за култура број 08-5480/2 од 30.08.1995 година, за
книгата „Струјнотехнички мерења и инструменти“ се плаќа повластена даночна стапка.

На

Ана

Давид

Тина

Вера

,, ... Мани, Текел, Фарес ...

МАНИ - го изброй Бог царството твоє
и му стави край;

ТЕКЕЛ - измерен си на кантар
и се најде многу лесен;

ФАРЕС - царството ти е разделено
на Медијаните и Персијците.“

Од Книгата на Пророк Данаил 5.25

ПРЕДГОВОР

Човекот, уште од почетокот на своето постоење како хомосапиенс, ги применувал меренјата со цел да ги утврди или докаже димензиите и вредноста на определени големини во природата. Со подигањето на нивото на сознанија се наметнува и потребата за покомплексни истражувања, што доведува до перманентен развој на најразлични мерни методи и инструменти. Особено со интензивниот технолошки развој, примената на мерната инstrumentација добива уште поголемо значење во науката и практиката воопшто.

Овој труд насловен, како „Струјнотехнички мерења и инструменти“, третира област која е многу значајна за истражувачката и стручната работа во машинството, но и во други соодветни области на техниката. Книгата наполно одговара на наставната програма по историјата на предметот на Машинскиот факултет при универзитетот „Св. Кирил и Методиј“. Меѓутоа, ценејќи ја во целина, освен за студентите на додипломските студии, таа ќе биде од полза и за слушателите на постдипломските студии, како и за стручните и научните работници кои се занимаваат со експериментални истражувања и апликација на мерната инstrumentација во струјната техника и автоматиката. Исто така, овој труд во голема мера може да им послужи и на истражувачите и инженерите од другите области на техниката, при разрешувањето на различни проблеми од процесната техника, експерименталната механика на флуиди, автоматиката и воопшто меренјата на неелектричните големини.

Авторот водеше сметка книгата да биде, што е можно повеќе, заснована на современите сознанија од светската литература од оваа област. При тоа, со добри познавања на фундаменталните научни дисциплини од техниката (механика, механика на флуиди, основи на автоматско управување, основи на електротехника), овозможено е лесно разбирање на поедините поглавја и материјата во целина.

Материјата е обработена во осум глави, пропратена со бројни слики и табели.

Во првата глава дадени се основите на примената на димензионалната анализа со практични примери од експерименталната механика на флуиди, со цел да се согледа користа од неа при: дефинирањето на врската помеѓу експериментот и постоечката теорија за определен проблем, можните обопштувања и формулатија на генерализирани емпириски врски, како и ползата при намалувањето на експерименталните мерења.

Втората глава ја опфаќа примената на теоријата на сличност, која е од особен интерес при лабораториските истражувања. Авторот најнапред се задржува на поимите за модел и прототип, како и воопшто процедурата за изведување на законитоста на одредена физичка појава по пат на експериментална анализа во лабораториски услови. Во посебни поглавја разработени се сличностите за поедини важни физички големини. Преку практичен пристап изведен се соодветните критериуми за сличност од механиката на флуиди. При тоа, за сложени услови објаснет е принципот на симулација и дефинирање на доминантни услови.

Во третата глава разработени се општите начини на примена на мерната инstrumentација. Посебно внимание е обратено на контролата на процеси и операции и експерименталната инженерска анализа. Понатаму, дадена е општата поделба и основните законитости на инструментите за неелектрични и електрични мерења, со подетална анализа на функционалните елементи и нивната поврзаност во најопшт случај. За точноста и грешките при мерење дадени се: општите дефиниции, типични примери за поедини видови грешки и можности за нивно смашување и контролата на точноста на мерење. Во поглавјето за изведување на експеримент и обработка на податоци дадени се: практични упатства за отчитување на мерните големини, основите на калибрирање на инструментите, основните облици за прикажување на мерните резултати.

Во дојолното pdf издание од 2004 година, додадено е пословје „3.9 Компјутериизирани системи за обработка и презентација на податоци”, во кое се претставени најдобриот начин основите од оваа материја - аквизиција на податоци, обработка и презентација на податоци, компјутериизиран аквизиционен систем, софтвер за прибирање и обработка на податоци.

Во четвртата глава прикажани се методите и најчесто применуваните инструменти за мерење на притисок. Почнувајќи со основните димензионални формули и мерни единици, авторот подетално се задржува на поимите за притисок при струење на флуид. При тоа, поаѓајќи од основните енергетски равенки за струење на некомпресибилен и компресибилен флуид, изведен се функционалните зависности помеѓу соодветните струјни големини. Дадени се основните методи за мерење на струен и тотален притисок за различни случаи на дозвучно и надзвучко струење. Во понатамошниот текст разработени се подетално

поедините видови манометри, со посебен осврт на современите електрични методи и сензори.

Петтата глава ги опфаќа мерењата на брзината и правецот на струењето. За мерење на овие големини преку разлика на притисоци изведени се изразите на зависност на локалната брзина за струења на компресибилен и некомпресибилен флуид, објаснети се основните методи на мерење, како и различните видови на мерни сонди. Мерењето на локалната брзина преку дејствувачка сила на флуидот врз сензорот, објаснето е со методот на динамометричко мерило, а мерењата преку аглова брзина низ примери со хидрометриски крилца и анемометри со крилца. Во наредните поглавја подетално се разработени современите методи и инструменти за мерење на локална брзина и правец на струење, како што се анемометрите со загреана жица и филм и ласер-доплер анемометарот.

Во шестата глава разработени се основните методи за мерење на проток на флуиди низ цевоводи и канали: волуменски методи за мерење на масен и волуменски проток, методологијата за мерење на проток со пригушување (со теоретски период и практични примери за примена), инструменти со лебдечко тело (ротаметри), примената на преливи, турбинските и хидромоторните мерачи, методите и инструментите со ултразвук.

Во седмата глава презентирани се најчесто применуваните методи и инструменти за мерење на температура. Поголемо внимание е обратнато на мерење на температура при струење на флуид, при што соодветно се дефинирани струјната и тоталната температура. Прикажани се оштите начини за мерење на тотална температура, а соодветно се објаснети и отстапувањата на измерената температура од вистинската, како и начините на заштита на температурните сонди. Во понатамошното излагање описаны се различни видови на термометри и методи на мерења со нив: термометри на принцип на топлотно ширење, електрични отпорни термометри, термоелектрични сензори, методи и инструменти на принцип на зрачење.

Осмата глава ги третира основните методи и инструменти за мерење на движење, сила и моќност. Поаѓајќи од фактот дека голем број физички големини во струјната техника и автоматиката многу често се мерат со нивно претворање во движење, прикажани се типични примери на современи методи и сензори за мерење на транслаторни и ротациони движења. За мерење на сила, на едноставен начин се илустрирани основните методи, а подетално се разработени методите за мерење на торзионен момент и моќност. Во посебно поглавје се дадени методите за мерење на механички големини со мерни ленти.

Во дополнето pdf издание од 2004 година, следејќи ги прендовите на развој на примената на комијутеризирани системи во оваа област, додадена е деветта глава "9. Реализација на експерименит со помош на комијутер", во која на соодветен начин - прилагоден за студените на Машинскиот факултет - претпирани се основните

системи за аквизиција и процесирање на податоци, функционалниште елементи на компјутеризиран аквизиционен систем и тако се презентирани пример за реализација на експеримент со компјутер.

Авторот настапуваше книга да биде со што е можно подобар квалитет, како од стручен, така и од технички аспект; што секако дека бараше соодветно вложен труд. Во оваа насока, од значајна помош беа сугестиите на рецензентите на првото издание проф. д-р. Томислав Бундалевски и проф. д-р. Звонимир Костиќ. Значајни се и советите на голем број колеги. Посебно се корисни директорите ангажирања и предлогите на проф. д-р Томислав Бундалевски, проф. д-р Валентино Стојковски, проф. д-р Наќе Бабамов и дил. инж. Слободан Бундалевски. Авторот ја изразува својата искрена благодарност кон сите нив.

На крајот, неизмрна и немерлива благодарност кон мојата фамилија, за нејзината љубов и трпение.

Машински факултет

Скопје, 2004

Александар Тодe Ноштал

С О Д Р Ж И Н А

ПРЕДГОВОР

vii

1. ПРИМЕНА НА ДИМЕНЗИОНАЛНАТА АНАЛИЗА	1
1.1 Димензионална хомогеност	2
1.2 Метод на Рејли	7
1.3 Примена на Рејлиевиот метод	9
1.3.1 Просто нишало	10
1.3.2 Стоксов закон за сила врз топка во ламинарно струење	11
1.3.3 Вентуриметар за проток	12
1.3.4 Бранови во компресибилните течности	16
1.4 Бездимензионални групи	18
1.5 Теорема на Ваши	21
1.6 Примена на методот на Ваши	24
1.6.1 Стоксов закон за сила врз топка во ламинарно струење	24
1.6.2 Анализа на струењето низ вентуриметар	27
2. ПРИМЕНА НА ТЕОРИЈАТА НА СЛИЧНОСТ	29
2.1 Вовед	29
2.2 Геометриска сличност	30
2.3 Кинематска сличност	35
2.4 Материјална сличност	39
2.5 Динамичка сличност	40
2.6 Вискоzни сили	42
2.7 Еластични сили	44
2.8 Сили на гравитација	45
2.9 Површинска напнатост (тензија)	47
2.10 Струења доминирани од две сили	49
2.11 Модел и прототип во исто гравитационо поле и сличност кога двата флуиди се исти	50
2.11.1 Пример за законот на сличноста кај хидрауличните турбини	52

3. НАЧИНИ НА ПРИМЕНА НА МЕРНАТА ИНСТРУМЕНТАЦИЈА, ТОЧНОСТ НА МЕРЕЊЕ, ПРИКАЖУВАЊЕ НА РЕЗУЛТАТИ	57
3.1 Вовед	57
3.2 Предупредување на процеси и операции (мониторинг)	57
3.3 Контрола на процеси и операции	58
3.4 Експериментална инженерска анализа	59
3.5 Видови мерни инструменти - општа поделба, функционални елементи на инструментот или мерниот систем	62
3.6 Точност и грешки при мерењето	66
3.7 Контрола на точноста на мерењето	68
3.7.1 Средна грешка при посредно мерење	72
3.8 Изведување на експеримент и обработка на податоци	73
3.8.1 Отчитување на мерни големини	73
3.8.2 Калибрирање на инструментите	73
3.8.3 Прикажување на мерни резултати	77
3.9 Компјутериизирани системи за обработка и презентација на податоци	84
3.9.1 Аквизиција на податоци	84
3.9.2 Обработка и презентација на податоци	84
3.9.3 Компјутериизиран аквизиционен систем	88
3.9.4 Софтвер за прибирање и обработка на податоци	89
4. МЕРЕЊЕ НА ПРИТИСОК	95
4.1 Струен и тотален (запирен) притисок	96
4.2 Мерење на струен притисок	101
4.3 Мерење на тотален (запирен) притисок	104
4.4 Комбинирана Прантл-Пито сонда	106
4.5 Приклучна врска сонда-манометар	106
4.6 Хидростатички манометри	108
4.6.1 Манометарска U цевка	110
4.6.2 U цевка со затворен крак	111
4.6.3 Хидростатички еднокрак манометар	113
4.6.4 Кос манометар	115

4.6.5 Диференцијални манометри за мали притисоци - микроманометри	115
4.6.6 Електрични методи за мерење на столбот на течност во диференцијалните манометри	118
4.7 Манометри со механички (еластични) претворачи	124
4.7.1 Манометар со Бурдона пружина	124
4.7.2 Манометар со набрана цевна пружина	126
4.7.3 Манометар со мембранска пружина	126
4.8 Калибрирање на манометри	130
4.9 Калибрирање на инструменти за ниски притисоци - Маклиодов вакуумметар	132
5. МЕРЕЊЕ НА БРЗИНА И ПРАВЕЦ НА СТРУЕЊЕ	135
5.1 Големина на локална брзина и правец на струење	135
5.2 Мерење на брзина и правец на струење преку разлика на притисоци со Прандл-Пито сонда	136
5.3 Мерење на брзина и правец на струење со модифицирани сонди	139
5.4 Плочеста сонда - динамометричко мерило	145
5.5 Мерење на брзина преку аголна брзина на ротирачки лопатки	148
5.5.1 Хидрометриско крило - турбински мерач	149
5.5.2 Анемометри со крилца	150
5.6 Анемометри со загреана жица и загреан филм	152
5.6.1 Принцип на функционирање на анемометарот со загреана жица	152
5.6.2 Мерење на правец на струење со анемометар со загреана жица	158
5.6.3 Анемометар со загреан филм	160
5.7 Ласер-доплер анемометар	161
6. МЕРЕЊЕ НА ПРОТОК	165
6.1 Мерење на проток со вага. Волуметрички метод	166
6.2 Мерење на проток со придушување	168
6.2.1 Основен теоретски приод за мерење на проток со придушување, односно со пад на притисок	169
6.2.2 Практична примена на мерна бленда, млазница и вентуриметар	175

6.3 Мерачи со лебдечко тело (ротаметри)	190
6.4 Преливи	192
6.4.1 Правоаголен прелив	193
6.4.2 Триаголен прелив	196
6.5 Ултразвучни мерачи на проток	197
6.6 Ротирачки протокомери	200
7. МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРА	205
7.1 Општи поими	205
7.2 Мерење на температура при струење на флуид	208
7.3 Термометри на принцип на топлотно ширење	215
7.3.1 Стаклени термометри	215
7.3.2 Притисни термометри	217
7.3.3 Термометри на принцип на термално ширење на метали	219
7.4 Електрични отпорни термометри	221
7.4.1 Проводнички сензори (отпорни термометри)	222
7.4.2 Полупроводнички сензори (термистори)	226
7.5 Термоелектрични сензори (термопарови)	230
7.6 Инструменти за високи температури - пиromетри	237
7.6.1 Оптички пирометар	238
7.6.2 Радиационен пирометар	240
8. МЕРЕЊЕ НА ДВИЖЕЊЕ, СИЛА И МОЌНОСТ	243
8.1 Општи поими за мерење на движење	243
8.2 Релативно поместување, трансляција и ротација	244
8.2.1 Отпорни потенциометри	244
8.2.2 Диференцијални трансформатори	247
8.2.3 Капацитативни давачи	248
8.2.4 Пиезоелектрични сензори	251
8.2.5 Електрооптички инструменти	256
8.2.6 Сензори на принцип младзник-плоча	260
8.3 Релативна брзина, трансляција и ротација	263
8.3.1 Механички инструменти за аголна брзина	263
8.3.2 Електрични методи и сензори	266
8.4 Сила, момент и моќност	269
8.4.1 Основни методи за мерење на сила	270

8.4.2 Методи за мерење на торзионен момент и моќност	276
Мерење на момент преку триење. Хидраулична кочница. Определување на моќност со мерење на параметри на електрична машина. Торзионен динамометар.	
8.4.3 Мерења со помош на мерни ленти	286
Мерења на истегнувања со помош на мерни ленти. Мерење на сила со помош на мерни ленти. Мерење на момент на свивање. Мерење на торзионен момент со мерни ленти.	
9. РЕАЛИЗАЦИЈА НА ЕКСПЕРИМЕНТ СО ПОМОШ НА КОМПЈУТЕР	301
9.1 Системи за аквизиција и процесирање на податоци	301
9.1.1 Модуларен систем со аналогна обработка на податоци	301
9.1.2 Компактен аквизиционен систем	303
9.1.3 Систем базиран на инструменти	304
9.1.4 Компјутеририран аквизиционен систем	306
9.2 Функционални елементи на компјутеризиран аквизиционен систем	307
9.2.1 Сензори и трансмитери	307
9.2.2 Кондиционери	309
9.2.3 Хардвер за аквизиција на податоци	314
9.2.4 Компјутер	318
9.2.5 Кабли и ефекти на шум кај аналогните сигнали	320
9.2.6 Софтвер и база на податоци	321
9.3 Реализација на експеримент со помош на компјутер - пример	327
9.3.1 Функционален опис на компјутеризиран мерен систем	327
9.3.2 Општ план за редослед на експериментот	330
ЛИТЕРАТУРА	333

ГЛАВА

ПРВА

1. ПРИМЕНА НА ДИМЕНЗИОНАЛНАТА АНАЛИЗА

Во инженерската практика, а особено во научноистражувачката работа, многу често се среќаваат проблеми за кои нема доволно адекватни теоретски описи и предикции. Во ваквите случаи се јавува потребата за екstenзивни експериментални истражувања, чии резултати би довеле до што е можно покомплетен и подобар опис на законитоста и однесувањето на определена физичка појава во истражуваната машина или процес. Притоа, несомнено дека е потребно да се дефинира врската помеѓу постојната теорија и експериментот, при што во голема мера помага примената на димензионалната анализа и теоријата на сличност.

Од друга страна, една од карактеристиките на експерименталниот метод за решавање на инженерските проблеми е дека тој најчесто дава резултати кои се применливи само за специфичниот проблем што се истражува. Меѓутоа, една од основните цели на истражувачката работа е да се овозможи што е можно поголема генерализација, т.е. применливост на добиените резултати за различни услови. За таа цел, во многу случаи димензионалната анализа обезбедува соодветни обопштувања и формулатија на генерализирани емпириски врски.

Користајќи од примената на димензионалната анализа, исто така, е многу значајна и во намалувањето на обемот на експерименталната работа (односно мерењата), преку соодветна трансформација на одредена функционална зависност во зависност, од т.н. бездимензионални групи.

Од наведените причини, во оваа глава се дадени основите на примената на димензионалната анализа со конкретни практични примери од експерименталната механика на флуидите. Дел од презентираната материја е корисен и за уочување на димензионалните формули и мерните единици на одделни физички големини.

1.1 ДИМЕНЗИОНАЛНА ХОМОГЕНОСТ

Равенките што се користат во физиката содржат во себе т.н. димензионална хомогеност. Ова не е само поради начинот на изведување на теоретските анализи туку, исто така, и поради патот на мерење на физичките големини, употребувајќи притоа униформни скали.

Под димензионална хомогеност се подразбира состојба кога сите членови на една равенка имаат иста физичка природа и се изразени со исти мерни единици.

На пример, во долуприкажаниот облик на Бернулиевата (Bernoulli) равенка за стационарно струење на флуиди со униформна густина,

$$p + \gamma h + \frac{\rho v^2}{2} = p_0 + \gamma h_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} \quad (1-1)$$

сите три члена се, или претставуваат, притисоци:

p - струен притисок;

γh - хидростатички притисок;

$\frac{\rho v^2}{2}$ - динамички притисок.

Разбираливо е дека сите три члена ќе имаат иста димензионална формула $[FL^{-2}]$ т.е $[ML^{-1}T^{-2}]$, и ќе бидат изразени во исти димензии на пример $[N/m^2]$.

Бернулиевата равенка не случајно е избрана како пример; не само затоа што е добро позната, туку и поради тоа што е еден од малкуте физички закони кои можат да се уобличат во два или три различни димензионални облици. Покрај обликовот даден во (1-1), следи:

$$\frac{p}{\rho} + gh + \frac{v^2}{2} = gH_0 \quad (1-2)$$

Во овој случај, секој член има димензии на квадрат од должина врз квадрат од време $[L^2T^{-2}]$, што може да се интерпретира како енергија или работа по единица маса. Според, тоа секој член соодвено би одговарал на: притиска, потенцијална и кинетичка специфична енергија.

Уште почеста форма на Бернулиевата равенка е:

$$\frac{p}{\gamma} + h + \frac{v^2}{2g} = H_0 \quad (1-3)$$

Во равенката (1-3) секој член има димензија [L] или, подобро речено, висина, додека физичкото објаснување е аналогно како за (1-2), односно работи по единица сила. Сите овие три висини (притисна, позициона и брзинска) можат да се прикажат при мерења во лабораторија, за што ќе стане збор подоцна.

За подобро следење на претстојните анализи, како и за запознавање со некои мерни единици, во *табела 1.1* се дадени димензионалните формули на најчесто среќаваните физички големини во два мерни системи: маса, должина, време, температура (M,L,T,θ) и сила, должина, време, температура (F,L,T,θ). Притоа се дадени и соодветни мерни единици во SI и во стариот технички систем на мерни единици.

Табела 1.1

Димензионални формули

а) Геометрички големини

Големина	Симбол	Димензии		Мерни единици	
		M,L,T,θ	F,L,T,θ	SI	Технички
должина	<i>l, r, a, b</i>	L	L	m	m
површина	A	L ²	L ²	m ²	m ²
волумен	V	L ³	L ³	m ³	m ³
закривеност	C=I/R	L ⁻¹	L ⁻¹	m ⁻¹	m ⁻¹
хидрауличен радиус	R	L	L	m	m
рапавост	k	L	L	m	m
бранова должина	λ	L	L	m	m
агол	α, β, γ, ...	—	—	rad ; ⁰	rad ; ⁰
отпорен момент	W	L ³	L ³	m ³	m ³
геометрички момент на инерција	I	L ⁴	L ⁴	m ⁴	m ⁴

6) Кинематски големини

Големина	Симбол	Димензии		Мерни единици	
		M,L,T,θ	F,L,T,θ	SI	Технички
време	t	T	T	s	s
степен на деформација	$\partial v_j / \partial x_i$	T^{-1}	T^{-1}	s^{-1}	s^{-1}
аголна брзина	ω	T^{-1}	T^{-1}	s^{-1}	s^{-1}
фреквенција	f	T^{-1}	T^{-1}	s^{-1}	s^{-1}
аголно забрзување	$\dot{\omega}$	T^{-2}	T^{-2}	s^{-2}	s^2
брзина	u, v, w	LT^{-1}	LT^{-1}	m/s	m/s
забрзување	a, \dot{v}	LT^{-2}	LT^{-2}	m/s^2	m/s^2
проток	Q	$L^3 T^{-1}$	$L^3 T^{-1}$	m^3/s	m^3/s
дводимензионален проток	q	$L^2 T^{-1}$	$L^2 T^{-1}$	m^2/s	m^2/s
циркулација	Γ	$L^2 T^{-1}$	$L^2 T^{-1}$	m^2/s	m^2/s
кинематска вискозност	ν	$L^2 T^{-1}$	$L^2 T^{-1}$	m^2/s	m^2/s
виорност	$\vec{\Omega} = \vec{\nabla} \times \vec{v}$	T^{-1}	T^{-1}	s^{-1}	s^{-1}

в) Динамички големини

Големина	Симбол	Димензии		Мерни единици	
		M,L,T,θ	F,L,T,θ	SI	Технички
маса	m	M	$FT^2 L^{-1}$	kg	kps^2/m
сила	F	MLT^{-2}	F	$kgm/s^2=N$	kp
притисок	p	$ML^{-1} T^{-2}$	FL^{-2}	N/m^2	kp/m^2
напретање	σ, τ	$ML^{-1} T^{-2}$	FL^{-2}	N/m^2	kp/m^2
градиент на притисок	$\Delta p / \Delta x_i$	$ML^{-2} T^{-2}$	FL^{-3}	N/m^3	kp/m^3
густина	ρ	ML^{-3}	$FT^2 L^{-4}$	kg/m^3	kps^2/m^4
специфична тежина	γ	$ML^{-2} T^{-2}$	FL^{-3}	N/m^3	kp/m^3
импулс, момент, количство	$\bar{M},$	MLT^{-1}	FT	kgm/s	kps

движење	$\vec{K} = m\vec{v}$				
аголен моментум	$H = mr^2\omega$	ML^2T^{-1}	FLT	kgm^2/s	kpms
флукс на импулс, сила на импулс	$\vec{F}_R = \rho Q\vec{v}$	MLT^{-2}	F	kgm/s^2	kp
момент на импулс	\vec{M}_k, \vec{M}_m	ML^2T^{-1}	FLT	Nms	kpms
момент на сила, торзионен момент	\vec{M}, \vec{M}_T, T	ML^2T^{-2}	FL	Nm	kpm
момент на инерција на маса	J	ML^2	FLT^2	kgm^2	$kpms^2$
релативна атомска маса	A	1	1	1	1
релативна молекул. маса	M	1	1	1	1
енергија	E	ML^2T^{-2}	FL	$kgm^2/s^2 = J$	kpm
работа	W	ML^2T^{-2}	FL	J=Nm	kpm
енергетска висина	$h = \frac{v^2/2g + p/\gamma + z}{v^2/2g + p/\rho + gz}$	L	L	Nm/N	kpm/kp
енергија по единица маса	$gh = \frac{v^2/2g + p/\rho + gz}{v^2/2g + p/\rho + gz}$	L^2T^{-2}	L^2T^{-2}	m^2/s^2	m^2/s^2
моќност, ефект	P	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}	$W = J/s$	kpm/s
динамичка вискозност	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	FTL^{-2}	Ns/m^2	kps/m^2
вртложна вискозност	ε	$ML^{-1}T^{-1}$	FTL^{-2}	kg/ms	kps/m^2
модул на еластичност	E	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}	N/m^2	kp/m^2
волуменски модул на еластичност	$E_V = \Delta p / (\Delta V/V)$	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}	N/m^2	kp/m^2
проток на маса	\dot{m}, q	MT^{-1}	FTL^{-1}	kg/s	kps/m
површинска напнатост	σ	MT^{-2}	FL^{-1}	N/m	kp/m
коефициент на дифузија на мас.	k, D	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}	m^2/s	m^2/s
концентрација на маса	c	ML^{-3}	FL^4T^{-2}	kg/m^3	kpm^4/s^2

г) Термодинамички големини

Големина	Симбол	Димензии		Мерни единици	
		M,L,T,θ	F,L,T,θ	SI	Технички
температура	T	θ	θ	K	^0C , ^0K
температурски градиент	$\Delta T/\Delta x_i$	$L^{-1}\theta$	$L^{-1}\theta$	K/m	$^0\text{C}/\text{m}$
количество на топлина	Q	ML^2T^{-2}	FL	J=Nm	$\text{kcal}=427 \text{ kpm}$
коefficient на топловодливост	λ	$MLT^{-3}\theta^{-1}$	$FT^{-1}\theta^{-1}$	W/mK	$\text{kcal/sm}^0\text{K}$
ентропија	S, dS	$ML^2T^{-2}\theta^{-1}$	$FL\theta^{-1}$	J/K	kcal^0K
енталпија	I, H	ML^2T^{-2}	FL	J	kcal
гасна константа	R	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	J/kgK	$\text{kcal/kg}^0\text{K}$
специфична топлина	c_p, c_v	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	J/kgK	$\text{kcal/kg}^0\text{K}$
специфична енталпија	i, h	L^2T^{-2}	L^2T^{-2}	J/kg	kcal/kg
специфична ентропија	s	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	J/kgK	$\text{kcal/kg}^0\text{K}$
густина на топлински флукс	q_H	MT^{-3}	$FL^{-1}T^{-1}$	W/m ²	$\text{kcal/m}^2\text{s}$
коef. на терм. дифузија	χ	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}	m ² /s	m ² /s

Очигледно е дека за „сложените големини“ се користени соодветни изрази кои ја покажуваат нивната законитост; на пример за работа по единица маса:

$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} = gh \quad [L^2T^{-2}] .$$

1.2 МЕТОД НА РЕЈЛИ

Покрај тоа што постои ошта теорија на димензионалната анализа претставена преку Вашиевиот (Vashy) метод (види поглавие 1.5), тута ќе биде прикажан приод кој води директно кон практично и ефективно користење на ова релативно силно орудие за анализа.

Потребно е да се напомене дека димензионалната анализа се применува практично добро во области за кои веќе постои ошто важечка теорија, но која е делумно успешна во изнаоѓањето решенија за специјални проблеми. Ако сè уште нема теорија скоро е невозможно да се формираат условите на хомогеност. Од друга страна, ако стојат на располагање комплетни теориски решенија, димензионалната анализа е непотребна. Меѓутоа, за да се разбере методот, неговите можности и недостатоци, добро би било да се започне со испитување на проблеми за коишто постојат теориски решенија и експериментални податоци.

Од своите истражувања и од својата пракса лорд Рејли (Reyleigh) установил дека повеќето од решенијата на теориската анализа се во облик на производи на степени на променливи и вклучени параметри. Општиот облик на овие зависности може да се прикаже како:

$$P = C q^w r^x s^y t^z \quad (1-4)$$

Како наједноставен пример ќе биде прикажан изразот за период при осцилации на просто нишало со должина l , водено од силата на гравитација, за случај кога амплитудата на осцилациите е мала и ако може да се занемари силата на отпорот:

$$\theta = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1-5)$$

Во изразот (1-5), очигледен е производот од должината на степен $1/2$ и Земјиното забрзување на степен $-1/2$; константата 2π е бездимензионална.

Како друг пример може да се наведе изразот за пад на притисокот по единица должина во хоризонтална цевка со дијаметар d , кога струењето е ламинарно и веќе воспоставено:

$$\frac{\Delta p}{L} = 32 \mu \frac{v_{sr}}{d^2} \quad (1-6)$$

каде што се:

μ - динамички вискозитет;

$v_{sr} = Q/A$ - средна брзина.

Ако беше претпоставено дека изразот (1-6) сè уште не постои, но дека $\Delta p/L = f(\mu, v_{sr}, d)$, тогаш според Рейлиевиот период следи:

$$\frac{\Delta p}{L} = C \mu^x v_{sr} d^z \quad (1-7)$$

Рейлевиот метод би дал пат за определување на експонентите x , y и z како $x = 1$, $y = 1$ и $z = -2$, следејќи ја идејата дека: ако $\Delta p/L$ мора да биде функција само од μ , v_{sr} и d , тогаш постои само еден можен облик на производ на степени на μ , v_{sr} и d кој би дал големина со димензии на $\Delta p/L$. Константата C , како што ќе се види подоцна, не може да се определи со овој метод.

Во изразот (1-4), на произволен начин е прикажана зависност од четири независно променливи, но нивниот број може да биде кој и да било. Не постои можност за губење на генералноста ако се применува одреден број променливи, но дискусијата треба да биде базирана на што е можно помал број фундаментални димензии. На пример, ако се работи за проблем од механиката на флуиди, обично ќе се разгледуваат маса, должина, време и температура (M, L, T, θ) како фундаментални димензии.

Рейлиевиот метод е базиран на претпоставката дека во израз со форма слична на (1-4) димензиите на двете страни од равенството се исти. Ова води кон онолку алгебарски равенки колку што има фундаментални димензии. Ако бројот на равенките е помал од непознатите, може да се предвиди дека не сите експоненти ќе бидат детерминирани. Ова веќе покажува едно од ограничувањата на димензионалната анализа.

Рейлиевиот метод ќе биде илустриран низ примери, но пред да се направи тоа, важно е да се проучи концептот на зависни и независни променливи. Во изразот (1-4) големината P е наречена зависно променлива, а q , r , s и t независно променливи. Истите независно променливи можат да бидат поврзани со различни зависно променливи големини. На пример, ако се разгледува тангенцијалното напрежање при сидот на една

цевка, низ која има ламинарно струење:

$$\tau_w = 8\mu \frac{v_{sr}}{d} \quad (1-8)$$

може да се уочи дека овој израз и изразот (1-6) имаат исти независно променливи големини, само се разбира со други експоненти.

Која е зависно променлива, а кои се независно промеливи големини зависи од начинот на кој проблемот е формулиран или од начинот на кој се појавува. Ако, во случајот на ламинарно струење низ цевка, од интерес беше средната брзина v_{sr} , тогаш во изразот:

$$v_{sr} = f(\mu, \Delta p/L, d) \quad (1-9)$$

v_{sr} игра улога на зависно променлива, а μ , $\Delta p/L$, и d се независно променливи големини.

Важно е да се напомене дека при анализата на специфичен проблем не е пожелно да се вклучуваат, по грешка, една или повеќе додатни зависно променливи големини меѓу избраните независно променливи. Ова не значи дека не постои место за дискусија на зависноста меѓу зависно променливите големини, но во овој момент тоа нема да претставува цел.

1.3 ПРИМЕНА НА РЕЈЛИЕВИОТ МЕТОД

И покрај тоа што овој метод е стар еден век, сè уште многу убаво одговара на проблемите од практичната димензионална анализа. Следејќи ја Рейлиевата констатација, се применува следнава процедура: откако ќе се одредат зависната (P) и независните (q, r, s, t, \dots) променливи во даден проблем, можно е да се примени општиот израз (1-4) и треба да се задоволи условот на димензионалната хомогеност, што овозможува да се детерминираат алгебарските равенки кои одговараат на воведените експоненти (w, x, y, z, \dots). На крајот ќе се пресметаат онолку експоненти колку што е можно и ќе се напише крајниот резултат.

1.3.1 Просто нишало

Како прв пример на примена на овој метод ќе биде разгледан проблемот на просто нишало. Ќе се претпостави дека многу малку се знае за овој феномен, но доволно за да се каже дека периодот на осцилациите зависи само од g и од l ,

$$\theta = f(g, l) \quad (1-10)$$

Според (1-4) зависноста (1-10) може да се напише како:

$$\theta = C l^x g^y \quad (1-11)$$

Тука се јавуваат само кинематски големини и користејќи ја *табелата 1.1*, следат следниве димензионални формули:

$$[\theta] = L^0 T^1 ; [l] = L^1 T^0 ; [g] = L^1 T^{-2} . \quad (1-12)$$

Од (1-10) и (1-12) се добива:

$$L^0 T^1 = (L)^x (L^y T^{-2y}) \quad (1-13)$$

од каде произлегуваат две алгебарски равенки:

$$\begin{aligned} 0 &= x + y \\ 1 &= -2y \end{aligned} \quad (1-14)$$

од кои следи:

$$x = 1/2 \quad \text{и} \quad y = -1/2.$$

На крај, може да се напише:

$$\theta = C l^{1/2} g^{-1/2} \quad (1-15)$$

Вредноста на бездимензионалната константата C не е можно да се определи со димензионалната анализа; тоа е можно да се оствари само по аналитички или експериментален пат.

1.3.2 Стоксов закон за сила врз топка во ламинарно струење

Тука ќе биде применета димензионалната анализа за да се верифицира Стоксовиот (Stokes) закон за сила на флуид врз топка (Fluid Drag) опструјувана од флуид кој е толку бавен што инерцијалните сили можат да се занемарат. Ова е ламинарно струење, но толку доминирано од вискозните сили, што силата врз топката F_D може да се претпостави дека зависи само од динамичката вискозност на флуидот μ , средната брзина далеку од топката v , како и од дијаметарот на топката d . Проблемот може да се разгледува и обратно: определување на силата на отпорот F_R на топка опструјувана од бавно ламинарно струење. Притоа се добива целосно иста зависност, односно $F_R = F_D$.

Следејќи го горе кажаното, како и Рейлиевиот метод, се добива:

$$F_D = C \mu^x v^y d^z \quad (1-16)$$

При тоа, треба да се напомене дека погрешен избор на независно променливите големини предизвикува погрешни резултати на анализата. Тоа би одговарало на погрешна формулација во аналитичката механика или на погрешно започнати експерименти.

Од *табела 1.1* произлегуваат следниве димензионални формули:

$$[F_D] = MLT^{-2}; \quad [\mu] = ML^{-1}T^{-1}; \quad [v] = M^0LT^{-1}; \quad [d] = M^0L^1T^0 \quad (1-17)$$

Со примена на условот за димензионална хомогеност се добиваат следните три равенки:

$$\begin{aligned} x &= 1 && \text{за } M \\ -x + y + z &= 1 && \text{за } L \\ -x - y &= -2 && \text{за } T \end{aligned} \quad (1-18)$$

кои даваат решенија:

$$x = 1, \quad y = 1, \quad z = 1,$$

после што следува:

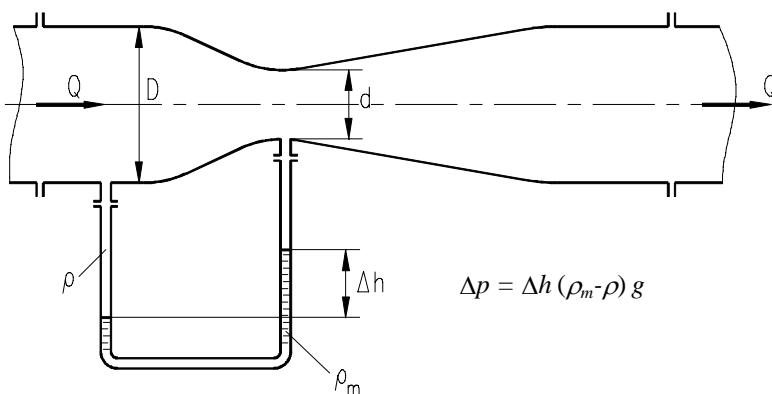
$$F_D = C \mu v d \quad (1-19)$$

што го верифицира Стоксовиот закон

$$F_D = 3\pi\mu d v.$$

1.3.3 Вентуриметар за проток

Еден од класичните принципи за мерење на проток е оној при кој се користи некоја природна или вештачка неуниформност на струењето, што овозможува врска меѓу протокот Q и падот на притисокот Δp (пиезометриски пад). Хершел (Herschell), инспириран од трудовите на Вентури (Venturi), пронашол инструмент, врз основа на овој принцип, за мерење на проток во водови. На сл. 1.1 е дадена скица на вообичаената форма на Вентуриева цевка со диференцијален манометар, од кој може да се прочита диференцијалниот притисок Δp .



Сл. 1.1 Скица на Вентуриева цевка

Од механиката на флуидите е познат изразот за проток:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \left[1 - \frac{d^4}{D^4} \right]^{1/2} \quad (1-20)$$

кој за овој случај е добиен со користење на Бернулиевата равенка и равенката за континуитет.

Ако наместо теориската механика на флуидите се користи димензионалната анализа, најпрво треба да се изучи струјниот феномен и да се установи од кои независни променливи би зависел протокот Q . Очигледно е дека веднаш паѓаат во очи: падот на притисокот Δp и промената на дијаметрите d и D , кои претставуваат причина за промената на брзината, односно протокот. Определена тешкотија претставува определувањето на физичките големини на флуидот кои би влегле во независно променливите големини. Ако се претпостави дека флуидот е забрзан кон грлото поради силите на притисок, со многу мала контрибуција на вискозните сили, тогаш густината ρ ќе се вметне меѓу независно променливите, а влијанието на вискозноста μ може да се занемари. Во тој случај следи:

$$Q = f(\Delta p, \rho, d, D),$$

односно

$$Q = C \Delta p^x \rho^y d^z D^u \quad (1-21)$$

Применувајќи го условот за димензионалната хомогеност и користејќи ја *табелата 1.1*, се добива:

$$M^0 L^3 T^{-1} = M^x L^{-x} T^{-2x} M^y L^{-3y} L^z L^u \quad (1-22)$$

од каде што следат алгебарските равенки:

$$\begin{aligned} x + y &= 0 \\ -x - 3y + z + u &= 3 \\ -2x &= -1 \end{aligned} \quad (1-23)$$

Веднаш се забележува дека изразот за протокот Q ќе содржи непознат експонент, бидејќи постојат три равенки за определување на четири непознати големини. Од (1-23) следи: $x = 1/2$, $y = -1/2$, $z = 2 - u$, или за протокот:

$$Q = C \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} d^2 (D/d)^u \quad (1-24)$$

Ова е резултат кој доста личи на (1-20), но сè уште не одговара во целост на неговата форма.

За ваквиот тип несогласувања Рејли во своите трудови, сугерира користење на степенски ред за да се претпостави променливата P во изразот (1-4), наместо вообичаениот производ на степени. Што се однесува за конкретниот разгледуван случај, наместо $(D/d)^u$ во зависноста на Q (1-24) се вклучува степенски ред по D/d , што би можело секако да резултира во функција од $(1 - d^4/D^4)^{-1/2}$, види (1-20).

Како резултат на гореизложеното, изразот (1-24) може да се генерализира во:

$$Q = C \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} d^2 \cdot F(d/D) \quad (1-25)$$

Треба да се напомене дека нема потреба секојпат да се оди кон формализам на претпоставување со степенски ред. Кога и да се јави еден од експонентите како недефиниран, доволно е да се воведе симболичен функционален израз, на кој начин резултатот се прави поопшт (и покрај тоа што комплетно не е определен). Ако повеќе од еден експонент остануваат неопределени, може да се воведе функција од онолку променливи колку што непознати експоненти се јавуваат.

Во разгледуваниот пример функционалната зависност $F(d/D)$ може да се определи со експеримент.

♦ **Поцелосна анализа на струењето низ вентуриметар**

Додека во претходната анализа беше занемарена вискозноста на флуидот, сега ќе биде земена предвид и оваа големина меѓу независно променливите, што би одговарало на истиот вентуриметар

за флуиди со различни густини и вискозности. Треба да се напомене дека теоретско решение на така поставен проблем сè уште не е најдено, па затоа се повикува на помош димензионалната анализа. Следејќи го Рейлиевиот став (1-4), за овој пример ќе биде:

$$Q = f(\Delta p, \rho, d, \mu, D) = C \Delta p^x \rho^y d^z D^u \mu^v \quad (1-26)$$

Со користење на условот за димензионална хомогеност и *табелата 1.1*, се добива:

$$L^3 T^{-1} = C (ML^{-1}T^{-2})^x (ML^{-3})^y L^z L^u (ML^{-1}T^{-1})^v,$$

од каде следат равенките:

$$\begin{aligned} x + y + v &= 0 \\ -x - 3y + z + u - v &= 3 \\ -2x - v &= -1 \end{aligned} \quad (1-27)$$

или

$$\begin{aligned} x &= 1/2 - v/2 \\ y &= -1/2 - v/2 \\ z &= 2 - u - v \end{aligned} \quad (1-28)$$

што доведува до:

$$Q = C \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} d^2 \left(\frac{D}{d} \right)^u \left(\frac{\mu}{\sqrt{\rho \Delta p d}} \right)^v \quad (1-29)$$

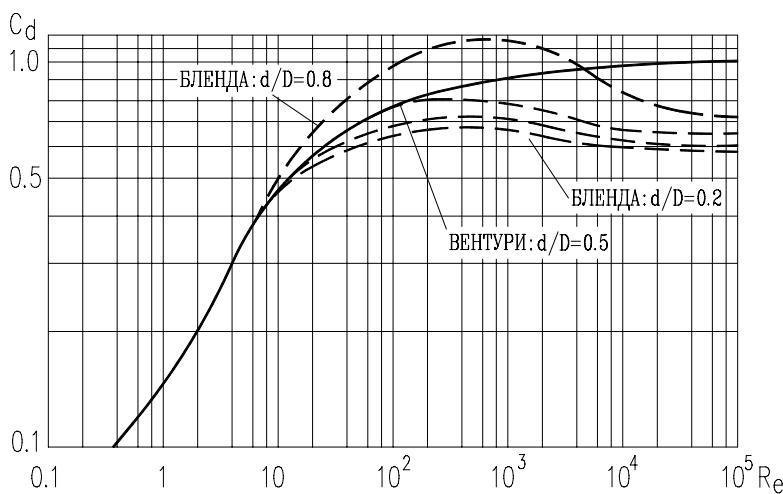
кое Рейли би го заменил со:

$$Q = C \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} d^2 \cdot F_1 \left(\frac{d}{D}, \rho \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \frac{d}{\mu} \right) \quad (1-30)$$

Ако се воведе поимот за т.н. коефициент на проток C_d :

$$C_d = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} = F\left(\frac{d}{D}, Re\right) \quad (1-31)$$

и ако вториот член $\rho \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \frac{d}{\mu}$ се смета како одредена форма на Рейнолдсовиот (Reynolds) број (Re), може да се каже дека C_d за вентури-метар со ист облик е функција од Re и односот d/D . На сл. 1.2 е даден график кој ја покажува промената на C_d за придушувач и вентуриметар. Уочлива е тенденцијата на C_d да биде константен за Рейнолдсови броеви поголеми од одредена вредност. Вредностите на C_d , односно $F\left(\frac{d}{D}, Re\right)$ очигледно е дека се добиени по експериментален пат.



Сл. 1.2 Коефициент на пропоток за придушувач и вентури-метар во функција од Рейнолдсовиот број

1.3.4 Бранови во компресибилните течности

Уште Жуковски го изучил, и теоретски и експериментално простирањето на брановите на притисок поради нестационарноста во цевководи. Овие бранови имаат брзина на простирање која зависи од

карактеристиките на течноста, како и од еластичноста, дијаметарот и дебелината на сидот на цевководот. Ако се разгледува поедноставен случај во кој цевката се третира како крута, брзината на простирање на брановите зависи само од густината на флуидот ρ и неговиот волуменски модул на еластичност E_V . Проблемот станува наполно аналоген на оној за простирање на акустични ефекти во течности.

Според претходно кажаното:

$$c = f(\rho, E_V) = C \rho^x E_V^y \quad (1-32)$$

од *табела 1.1* се добиваат димензионалните формули:

$$[c] = M^0 L T^{-1}, \quad [\rho] = M^1 L^{-3} T^0, \quad [E_V] = M L^{-1} T^{-2}$$

а од условот за димензионална хомогеност следат алгебарските равенки:

$$\begin{aligned} x + y &= 0 \\ -3x - y &= 1 \\ -2y &= -1. \end{aligned}$$

Се забележува дека се јавува една равенка повеќе од бројот на непознатите. Од третата равенка веднаш се добива $y = 1/2$, а од првата $x = -1/2$; очигледно е дека втората равенка е задоволена со овие решенија. На крајот, за брзината на простирање на брановите на притисок во течност се добива:

$$c = C \left(\frac{E_V}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1-33)$$

И покрај тоа што нема многу, сепак, во димензионалната анализа се јавуваат вакви примери во кои бројот на равенките е поголем од бројот на непознатите, но тоа не би требало да создава забуни ако се познава физичката страна на проблемот.

Од досега кажаното може да се заклучи дека во димензионалната анализа се јавуваат поголем, помал или еднаков број алгебарски равенки од непознатите експоненти, но во секој случај, ако исправно се постави проблемот, може да се добие решение.

1.4 БЕЗДИМЕНЗИОНАЛНИ ГРУПИ

Во некои од презентираните примери беше покажано дека примената на димензионалната анализа води кон трансформација на одредена почетна функционална зависност во друга, која содржи помалку променливи. Новите променливи се составени од производи на степени на старите променливи. На пример, во случај на анализа на вентуриметар, во почетокот беа претпоставени функционални зависности:

$$Q = f(\Delta p, \rho, d, D) \quad (1-34)$$

за невискозен флуид, и

$$Q = f(\Delta p, \rho, d, D, \mu) \quad (1-35)$$

кога вискозните ефекти се земаат предвид. Со примената на димензионалната анализа, зависноста (1-34), која содржи четири променливи, се редуцира во функција зависна само од една:

$$\frac{Q}{d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} = F(d/D) \quad (1-36)$$

Во вториот случај зависноста од пет променливи (1-35) е трансформирана во функција од само две променливи големини:

$$\frac{Q}{d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} = F(Re, d/D) \quad (1-37)$$

Како што беше дадено во примерот за вентуриметар, овие функции можат да се определат по експериментален пат, а во некои случаи и по аналитички пат, користејќи ја теоретската механика на флуидите.

Понекогаш функционалните врски можат да се определат така добро што само константата останува како непозната. Меѓу таквите примери се јавуваат веќе споменатите: просто нишало, за кое е

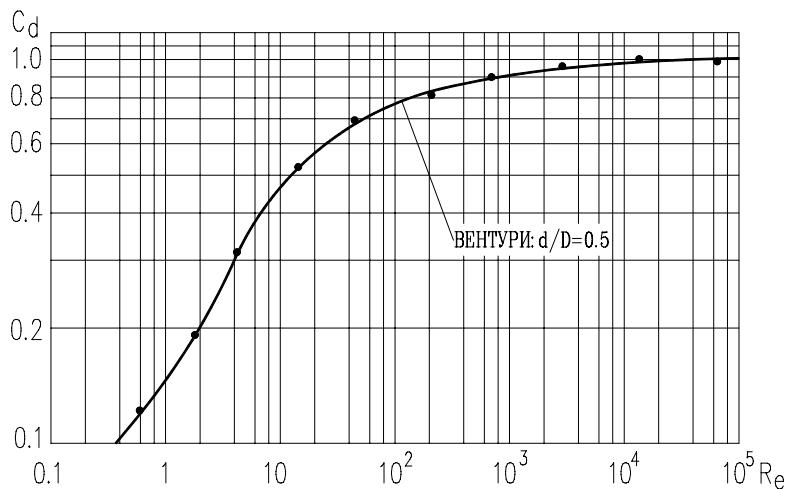
$$\frac{T}{(l/g)^{1/2}} = C \quad (1-38)$$

и стационарно, униформно, ламинарно струење низ цевка, за кое е

$$\frac{\Delta p/L}{\mu v/d^2} = C \quad (1-39)$$

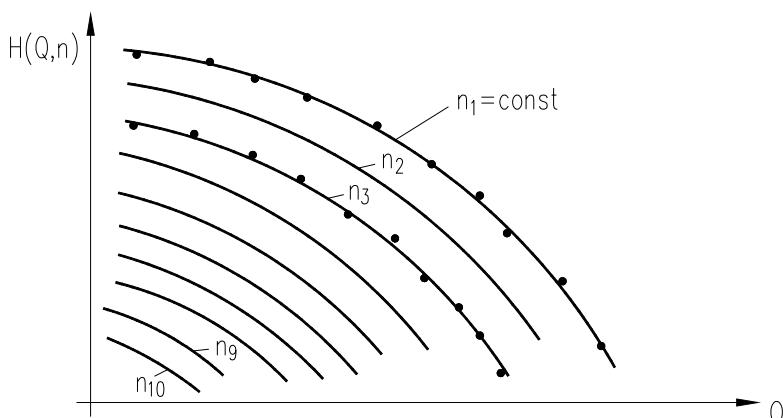
Последниве два примера (1-38) и (1-39) ја покажуваат суштинската корист од димензионалната анализа: формата на функцијата е комплетно определена и останува само изнаоѓање на константата. Теоретски, доволен е само еден добар експеримент за нејзино определување.

И во другите два примера, (1-36) и (1-37), користа е, навистина, многу значајна. Имено, нека се претпостави дека за функција од $n = 1$ променлива се потребни 10 експериментални точки за определување на кривата на нејзината зависност (види сл. 1.3).



Сл. 1.3 Функција од една променлива големина, 10 експериментални точки

За функција од $n = 2$ променливи ќе биде потребна фамилија криви (на пример 10 криви), односно 10^2 експериментални точки (види сл. 1.4); за функција од n променливи, ако се примени индуктивен заклучок, би биле потребни 10^n експериментални точки. Тука е очигледно дека, на пример, со редуцирање на изразот (1-34) на израз со само една променлива (1-36), бројот на експерименталните точки ќе се намали за 1000 пати.



Сл. 1.4 Функција од две променливи ѝолемини,
 10^2 експериментални точки за 10 криви

Покрај оваа огромна корист во однос на смалувањето на обемот на експерименталната работа, има и други предности во примената на димензионалната анализа и воведување нови променливи во облик на бездимензионални групи.

Овде треба да се напомене дека бездимензионалните групи можат да имаат различни форми во даден проблем, што зависи од можностите за решавање на алгебарските равенки, на пример (1-27) во различни правци. Ако (1-27) се решеше наместо во зависност од u и v , во зависност од u и z , би следело:

$$\begin{aligned}x &= 1 + y \\u &= 3 + 2y - z \\v &= -1 - 2y\end{aligned}$$

односно за протокот:

$$Q = C \frac{\Delta p}{\mu} D^3 \left(\frac{\rho \Delta p D^2}{\mu^2} \right)^y \left(\frac{d}{D} \right)^2$$

или,

$$\frac{Q}{\frac{\Delta p}{\mu} D^3} = f \left(\frac{\rho \Delta p D^2}{\mu^2}, \frac{d}{D} \right) \quad (1-40)$$

Добиена е повторно функција од две променливи, но изгледа доста различно од (1-37), а од друга страна треба да го репрезентира истиот физички закон (1-35). За да се согледа врската меѓу (1-40) и (1-37) треба да се изврши одредена трансформација (која овде нема да биде наведена), којашто доведува до нов облик на (1-40):

$$\frac{Q}{d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} = \frac{R_e}{\left(\frac{d}{D} \right)^2} f(R_e^2, \frac{d}{D}) = \psi(R_e, \frac{d}{D}) \quad (1-41)$$

што не е различно од (1-37).

Следи заклучокот дека еден проблем може да се реши по различни патишта, кои се разликуват само во својата појава. Покрај тоа, бројот на бездимензионалните групи е инваријанта на проблемот (види Вашиева теорема).

1.5 ТЕОРЕМА НА ВАШИ

За разлика од Рејли, кој екстензивно го користел својот практичен приод кон димензиската анализа, Ваши развиил теорија во врска со оваа проблематика. Неговата теорема, како што е познато, гласи:

Која и да било функција $f(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n) = 0$, што претставува врска меѓу n физички променливи u_i и ја задоволува димензионалната хомогеност, може да се редуцира на функцијата $F(G_1, G_2, G_3, \dots, G_{n-r}) = 0$ која содржи $n-r$ бездимензионални променливи, каде што r е редот на матрицата на димензии.

Во некоја литература оваа теорема се сретнува како π теорема.

Постојат повеќе математички докази на оваа теорема, но овдека ќе биде даден доказ кој се базира повеќе на физички аргументи. Притоа ќе се работи со одредени барања за опсервацијски процедури, како и за процедури за прибирање податоци, и ќе се покаже дека тие водат кон теоремата на Ваши.

За таа цел ќе се започне со промена на фундаменталните големини од еден од вообичаените системи во специјализиран систем, во кој се користат r нови фундаментални големини.

Нека се претпостави дека е $r = 3$ и дека новите димензии (кои одговараат на u_1, u_2, u_3) се U_1, U_2, U_3 . Притоа, низ експерименти е составена табела на вредности од $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$; односно табела која ја дефинира функцијата f во еден од вообичаените системи на фундаментални димензии (на пример, M,L,T):

u_1	u_2	u_3	u_4	...	u_i	...	u_n
u_{11}	u_{21}	u_{31}	u_{41}	...	u_{i1}	...	u_{n1}
u_{12}	u_{22}	u_{32}	u_{42}	...	u_{i2}	...	u_{n2}
...

Функцијата f е задоволена секогаш, односно за кој и да било соодветен систем на единици што може да се користи. Како резултат, функцијата може да биде задоволена со вредностите во секој ред од табелата, изразени во различни системи на мерки ако е потребно.

Тука беа избрани единиците на U_1, U_2, U_3 да бидат идентични со вредностите на u_1, u_2, u_3 во секој ред на табелата. Оваа постапка не ја уништува табеларно претпоставената функција, но податоците дадени во сите први три колони стануваат единици. Другите колони добиваат вредности определени со бездимензионални комбинации на $u_4, u_5, u_6, \dots, u_n$ со u_1, u_2, u_3 , на пример:

1	1	1	u_4/u_1	...	$u_i/u_1u_2u_3$	...	u_n/u_1u_2
1	1	1	$(u_4/u_1)_1$	...	$(u_i/u_1u_2u_3)_1$	...	$(u_n/u_1u_2)_1$
1	1	1	$(u_4/u_1)_2$	...	$(u_i/u_1u_2u_3)_2$	...	$(u_n/u_1u_2)_2$
...

Горниот доказ е од елементарна природа, но тој не само што ја покажува вистинитоста на теоремата туку дава и метод за формирање на бездимензионални променливи.

За да се прикаже доказот појасно, ќе се разгледа случајот на струење низ цевка $f(\tau, \rho, u, d, \mu, k) = 0$.

Податоците за овој случај, добиени со експерименти, согласно со претходно изложената постапка, можат да се прикажат табларно во вообичаен систем на основни димензии (на пример M, L, T), како во *табела 1.2*.

Табела 1.2

<i>Пример за систематизирани „податоци“ при исчишување на струење низ цевка</i>					
ρ	u	d	μ	k	τ
ρ_1	u_1	d_1	μ_1	k_1	τ_1
ρ_2	u_2	d_2	μ_2	k_2	τ_2
ρ_3	u_3	d_3	μ_3	k_3	τ_3

Доколку (следејќи го горниот доказ) се работи со нови димензии D, V, L (одговараат на големините ρ, u, d), тогаш, според Ваши, функцијата $f(\rho, u, d, \mu, k, \tau) = 0$ може да се редуцира во функција $F(\mu/\rho u d, k/d, \tau/\rho u^2) = 0$, а табелата за обработка на податоци може да се поедностави, односно би се добила *табела 1.3*.

Табела 1.3

<i>Обработка на податоци за $f(\rho, u, d, \mu, k, \tau) = 0$ со нови димензии D, V, L (ρ, u, d)</i>					
1	1	1	$\mu/\rho u d$	k/d	$\tau/\rho u^2$
1	1	1	$\mu_1/\rho_1 u_1 d_1$	k_1/d_1	$\tau_1/\rho_1 u_1^2$
1	1	1	$\mu_2/\rho_2 u_2 d_2$	k_2/d_2	$\tau_2/\rho_2 u_2^2$

Обработката на податоци, илустрирана во *табелиите 1.2 и 1.3*, е иреверзибилна: со добивање на вредностите $\mu/\rho ud$, k/d , $\tau/\rho u^2$ (реципрочна вредноста на Re , релативна рапавост, коефициент на отпор) се губи можноста за враќање на почетните вредности од кои се пресметани. Притоа, како во многу случаи на обработка на податоци, се губат одредени информации, но се добива опис на појавата за кој се претпоставува дека ќе биде најкорисен за понатамошни анализи. Во тој случај крајниот облик на табелата би бил:

Re	k	C
Re_1	k_1	C_1
Re_2	k_2	C_2
Re_3	k_3	C_3

$Re = \rho ud/\mu$ - Рејнолдсов број

k - релативна рапавост

C - кофициент на отпор (кофициент на тангенцијално напрегање).

1.6 ПРИМЕНА НА МЕТОДОТ НА ВАШИ

Некои од примерите работени во 1.3, преку Рејлиевиот метод, повторно ќе бидат разгледани, но со примена на Вашиевиот приод.

1.6.1 Стоксов закон за сила врз топка во ламинарно струење

Од формулата (1-16) од поглавјето 1.3.2 следи функционалната зависност:

$$f(F_D, \mu, v, d) = 0 \quad (1-42)$$

Првиот чекор при овие анализи е да се определи редот на матрицата на димензии во еден од вообичаените системи на единици, на пример во системот M, L, T .

	F_D	μ	v	d	
M	1	1	0	0	
L	1	-1	1	1	(1-43)
T	-2	-1	-1	0	

За да може да се оствари промена во нов систем на димензии, односно старите димензии да се изразат во зависност од новоизбраните, во матрицата (1-43) потребно е да се изнајде детерминанта којашто ќе биде различна од нула, $\det[a_{ij}] \neq 0$. Бидејќи од матрицата на димензии може да се оддели барем една детерминанта со вредност различна од нула, следува дека редот на матрицата во овој случај е $r = 3$.

Во некои случаи не е можно да се изнајде $\det[a_{ij}] \neq 0$ со ред еднаков на бројот на примарните димензии ($r = 4$ за систем M, L, T, θ). Во тој случај потребно е да се испитаат детерминантите од понизок ред, $r = 3$ или $r = 2$. Ако се случеше да не може да се изнајде детерминанта различна од нула, тогаш промената ќе беше невозможна, што значи лош избор на новите примарни големини, односно димензии.

Вториот чекор при овие анализи е да се изберат новите големини како специјализирани примарни големини за овој проблем. Нека тоа бидат динамичката вискозност на флуидот μ , средната брзина доволно далеку од топката v , и дијаметарот на топката d . Ако сега наместо M, L и T се избере нов систем на единици W, V, L (кој одговара на μ, v, d), ќе може да се напише матрица во зависност од новите димензии.

Претходно треба да се добијат зависностите:

$$M = M(W, V, L), \quad L = L(W, V, L) \text{ и } T = T(W, V, L).$$

Знаејќи дека се

$$W = ML^{-1}T^{-1}; \quad V = M^0LT^{-1}; \quad L = L;$$

следи:

$$M = WV^{-1}L^2; \quad T = LV^1; \quad L = L. \quad (1-44)$$

Односно матрицата на зависност од новите димензии ќе биде:

	μ	ν	d	F_D
W	1	0	0	1
V	0	1	0	1
L	0	0	1	1

(1-45)

Третиот чекор се состои во формирање $n-r$ бездимензионални групи комбинирани со μ, ν, d , односно од $f(u_1, u_2, \dots, u_n) = 0$ се преоѓа на $F(G_1, G_2, \dots, G_{n-r}) = 0$. Во овој случај $n = 4$, а $r = 3$, односно следи дека треба да се оформи една бездимензионална група G_1 , за која, со користење на димензиите на F_D во W, V, L системот, се добива:

$$G_1 = \frac{F_D}{\mu \nu d} \quad (1-46)$$

Според тоа, крајниот резултат е:

$$F\left(\frac{F_D}{\mu \nu d}\right) = 0 \quad (1-47)$$

што секако може да се напише како:

$$F_D = f(\mu \nu d) \quad (1-48)$$

што не е различно од изразот (1-19) добиен во 1.3.2.

1.6.2 Анализа на струењето низ вентуриметар

Во поглавјето 1.3.3 беше покажана функционалната зависност:

$$f(\rho, \Delta p, d, D, \mu, Q) = 0 \quad (1-49)$$

Прво се составува матрицата на димензии, со цел потоа да се определи нејзиниот ред r :

	ρ	Δp	d	D	μ	Q
M	1	1	0	0	1	0
L	-3	-1	1	1	-1	3
T	0	-2	0	0	-1	-1

(1-50)

Бидејќи постои барем една $\det[a_{ij}] \neq 0$, следи дека редот на матрицата е $r = 3$. Ако се избере наместо M, L, T нов систем на единици D, P, L (одговара на $\rho, \Delta p, d$) може да се определат зависностите:

$$M = M(D, P, L); \quad L = L(D, P, L) \quad \text{и} \quad T = T(D, P, L)$$

т.е. од

$$D = ML^{-3}; \quad P = ML^{-1}T^2; \quad L = L;$$

следи:

$$M = DL^3; \quad T = D^{1/2}P^{-1/2}L; \quad L = L, \quad (1-51)$$

Така може да се напише матрица во зависност од новите димензии:

	ρ	Δp	d	D	μ	Q
D	1	0	0	0	1/2	-1/2
P	0	1	0	0	1/2	1/2
L	0	0	1	1	1	2

(1-52)

Претстои формирање на $n-r$ бездимензионални групи

комбинирани со ρ , Δp и d ; односно од $f(u_1, u_2, \dots, u_n) = 0$ се преоѓа на $F(G_1, G_2, \dots, G_{n-r}) = 0$. Во овој случај $n = 6$, а $r = 3$, па следи дека треба да се оформат три бездимензионални групи G_1 , G_2 и G_3 за кои, со користење на димензиите на D , μ и Q во D, P, L системот, се добива:

$$G_1 = \frac{D}{d}; \quad G_2 = \frac{\mu}{\rho^{1/2} \Delta p^{1/2} d}; \quad G_3 = \frac{Q}{\rho^{-1/2} \Delta p^{1/2} d^2} \quad (1-53)$$

Според тоа, крајниот резултат е:

$$F\left(\frac{Q}{d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}}, \frac{d}{D}, Re\right) = 0 \quad (1-54)$$

што не е различно од изразот (1-31).

ГЛАВА

ВТОРА

2. ПРИМЕНА НА ТЕОРИЈАТА НА СЛИЧНОСТ

2.1 ВОВЕД

Идејата за изведување експерименти на некој феномен во одредена скала, а со цел да се добијат податоци кои потоа можат да се преведат во друга скала, е доста стара, но научниот приод кон ваквиот метод е релативно од пос코ро време. Сè додека теориската и експерименталната физика не постигнале одредено ниво, не можело да се зборува за познавање на врските меѓу резултатите добиени при моделно истражување на одделни појави и резултатите добиени при истражувањето на истите појави на прототипот. Можеби Галилео Галилеј (Galileo Galilei) бил навистина првиот кој заклучил дека врските меѓу моделот и прототипот не се едноставни и дека е потребно многу повеќе знаење, отколку во негово време, за да се разјасни сличноста меѓу моделот и прототипот.

За веќе споменатите поими модел и прототип (оригинал) потребно е да се дадат одредени објаснувања. Многу често не е можно да се вршат истражувања директно врз оригиналот, без разлика дали станува збор за машина, процес или појава. Во такви случаи се вршат лабораториски истражувања врз т.н. модел (на машина, процес или појава), при што од моделот се бара да ги исполнi условите на геометриска, кинематичка и динамичка сличност. Како што ќе се види подоцна, најчесто не е можно да се остварат сите услови за целосна сличност; во тој случај, за меродавни услови се земаат оние за кои ќе се утврди дека се доминантни. Откако ќе се извршат потребните истражувања на моделот, следејќи ја соодветната врска за сличност, добиените резултати се преведуваат на оригиналот, односно прототипот.

Според тоа, процедурата за изведување на законитоста на одредена физичка појава по пат на експериментална анализа во лабораториски услови би се состоела од следното:

1. анализа на проблемот и уочување на законите и големините што го водат;
2. дефинирање на врски на сличност помеѓу моделот и оригиналот (прототипот);
3. конструирање на моделот;
4. експерименти врз моделот и прибирање податоци;
5. систематизација и анализа на добиените резултати;
6. преведување на резултатите од моделот на оригиналот, користејќи ги врските на сличност.

Очигледна е предноста на моделните истражувања, не само за случаи на испитување нови, по димензии големи машини (турбини и сл.), туку и за машини од сериско производство. Сигурно дека е по економично да се вршат испитувања и дотерувања на модел, со цел да се добие оптимална работа, отколку директно да се работи со оригиналот. Се разбира дека тоа се однесува и на најразлични процеси и појави. Притоа треба да се напомене дека моделот по димензии не мора секогаш да биде помал од оригиналот, а што зависи од случај до случај.

Често пати се случува теоријата на сличност да биде поистоветена со димензионалната анализа, иако последнава е, фактички, по општа област; толку по општа, што за сличноста може да се зборува како за нејзин дел, како што всушност и доста голем број автори ја третираат.

Тука ќе биде прикажан директен приод кон сличноста, имајќи ја на ум и намената на разработуваната материја во целост.

2.2 ГЕОМЕТРИСКА СЛИЧНОСТ

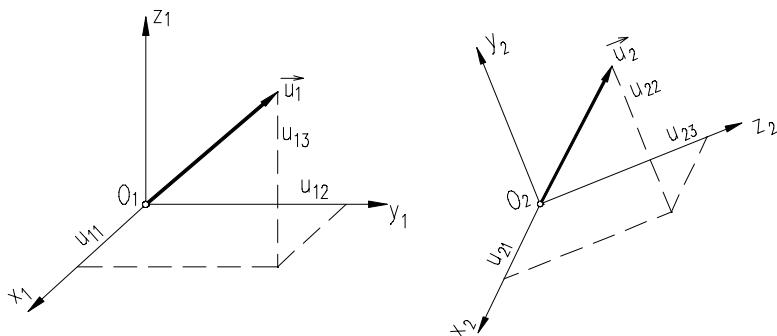
Рационална дискусија за сличност на геометриски фигури можеби за прв пат се појавила во трудовите на Еуклид во стара Грција. Тој покажал дека триаголници со исти агли, а со различни страни, се слични меѓу себе, при што односот на соодветните страни е константен:

$$\frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{A_2C_2}{A_1C_1} = \frac{B_2C_2}{B_1C_1} = S_L \quad (2-1)$$

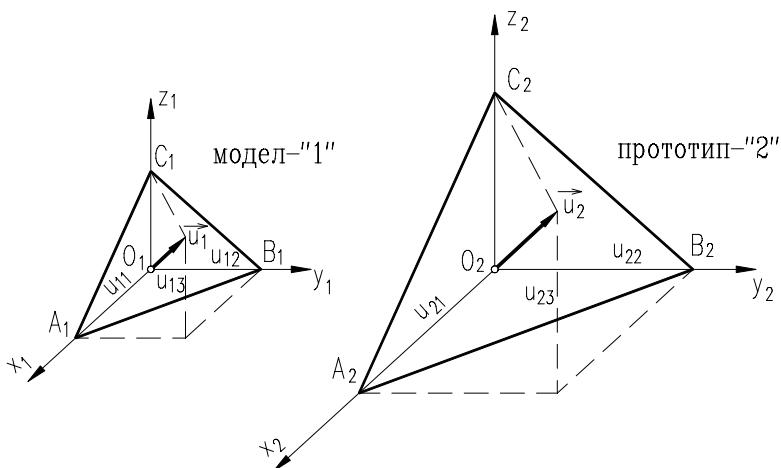
Во продолжение на анализата се земаат два координатни системи $O_1x_1y_1z_1$ и $O_2x_2y_2z_2$ (на пример лев и десен) и се посматра по еден вектор соодветно во секој систем u_{1i} и u_{2i} ;

$$u_{1i} = (u_{11}, u_{12}, u_{13})$$

$$u_{2i} = (u_{21}, u_{22}, u_{23}) \quad (2-2)$$



Сл. 2.1 Сличност на вектори



Сл. 2.2 Сличност на геометрически фигури

Ако се постави условот:

$$u_{2i} = S_L u_{1i} \quad (2-3)$$

тогаш се вели дека векторите се слични, а фигурите што ги формираат соодветните проекции ќе бидат, исто така, геометрички слични. На пример, ако векторите се определени со:

$$\begin{aligned} u_{21}(0,0,2); u_{22}(0,2,0); u_{23}(2,0,0) \\ u_{11}(0,0,1); u_{12}(0,1,0); u_{13}(1,0,0) \end{aligned}$$

тогаш напишаните проекции формираат слични триаголници, со однос на соодветните страни 2:1.

На ист начин може да се конструира каков и да било полигон или полихедрон. Сличноста може да се постави и за закривени површини или тела.

Ако се посматра, на пример, елипсоид во системот 1

$$\frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{y_1^2}{b_1^2} + \frac{z_1^2}{c_1^2} = 1 \quad (2-4)$$

и ако е потребно да се конструира сличен елипсоид во системот 2

$$\frac{x_2^2}{a_2^2} + \frac{y_2^2}{b_2^2} + \frac{z_2^2}{c_2^2} = 1 \quad (2-5)$$

при што за која и да било димензија е воспоставена скалата S_L , односно

$$\begin{aligned} x_2 &= S_L x_1, & y_2 &= S_L y_1, & z_2 &= S_L z_1; \\ a_2 &= S_L a_1, & b_2 &= S_L b_1, & c_2 &= S_L c_1 \end{aligned} \quad (2-6)$$

ќе се види дека релацијата (2-4) е задоволена.

Во продолжение ќе бидат изведени скали на сличност за некои геометрички големини.

За должина: ако во два соодветни системи (прототип и модел) кои било две растојанија се во сооднос S_L , може да се покаже дека за која било должина во прототипот (l_p) и моделот (l_m) важи:

$$l_p = S_L l_m \quad (2-7)$$

При тоа, $S_L = l_p/l_m$ се дефинира како основна скала за геометричка сличност.

Доказ:

$$\text{ако се } l_m = \int_{A_1}^{B_1} \sqrt{dx_1^2 + dy_1^2 + dz_1^2} \quad \text{и} \quad l_p = \int_{A_2}^{B_2} \sqrt{dx_2^2 + dy_2^2 + dz_2^2} ,$$

$$\text{и ако се } dx_2 = S_L dx_1, \quad dy_2 = S_L dy_1, \quad dz_2 = S_L dz_1 ,$$

$$\text{следи: } \int_{A_2}^{B_2} \sqrt{dx_2^2 + dy_2^2 + dz_2^2} = \int_{A_1}^{B_1} S_L \sqrt{dx_1^2 + dy_1^2 + dz_1^2} = S_L l_m .$$

За површина: вообичаена формула за пресметка на квадратурата на закривена површина $z = f(x, y)$ е:

$$A = \iint dxdy \sec \gamma = \iint dxdy \sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2} \quad (2-8)$$

$$\text{каде што се: } f_x = \frac{\partial f}{\partial x}; \quad f_y = \frac{\partial f}{\partial y} .$$

$$\text{Ако е } A_m = \iint dx_1 dy_1 \sec \gamma_1$$

$$\text{и сличната површина } A_p = \iint dx_2 dy_2 \sec \gamma_2 ,$$

$$\text{при што е } dx_2 = S_L dx_1, \quad dy_2 = S_L dy_1, \quad \sec \gamma_1 = \sec \gamma_2 ,$$

$$\text{следи: } A_p = S_L^2 \iint dx_1 dy_1 \sec \gamma_1 = S_L^2 A_m$$

па скалата на сличност за површини е:

$$S_A = A_p / A_m = S_L^2 \quad (2-9)$$

За волумен: за скалата на слични волуумени на модел и прототип, слично како погоре, се добива:

$$V_p = \iiint dx_2 dy_2 dz_2 = S_L^3 \iiint dx_1 dy_1 dz_1 = S_L^3 V_m$$

односно

$$S_V = V_p / V_m = S_L^3 \quad (2-10)$$

Аналогна постапка може да се примени за добивање на скалите на сличност на геометрички момент на инерција, отпорен момент, хидрауличен радиус и сл.

Во следната табела 2.1 се дадени скали на сличност за одделни геометрички големини, како и нивните соодветни димензионални формули. Очигледна е врската меѓу соодветните скали на сличност и димензионалните формули.

Табела 2.1

Скали на сличност за некои геометрички големини		
Скала	Големина	Димензионална формула
S_L	должина	L
S_L^2	површина	L^2
S_L^3	вolumен	L^3
S_L^3	момент на површина	L^3
S_L^4	момент на volumен	L^4
S_L^4	момент на инерција на површина	L^4
S_L^5	момент на инерција на volumен	L^5

Потребно е да се напомене дека $S_L \geq 1$, што значи дека постојат модели помали од оригиналот (најчест случај), но понекогаш се потребни и модели поголеми или исти со него.

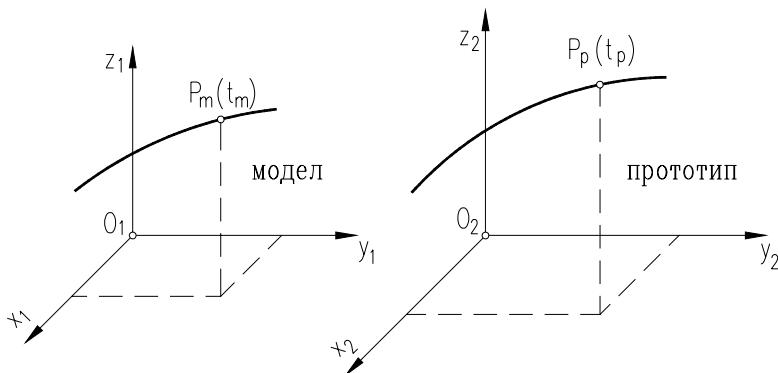
Геометриската сличност не е без практична граници. Често пати постојат случаи кога не е можно да се оствари целосна геометриска сличност (на пример: модел на рапавост и сл.).

2.3 КИНЕМАТСКА СЛИЧНОСТ

Како што е познато кинематиката, всушност, е геометрија на движењето, односно ги третира основните концепти на просторот и времето. Соодветно, доколку се зборува за кинематичка сличност, потребно е само да се воведе скала за времиња во моделот и прототипот, како додаток на скалата за должина.

Без да се изгуби воопштувањето може да се претпостави дека прототипот и неговиот модел се поставени, соодветно, во системи со координатни оски паралелни меѓу себе. Ова ја прави полесна споредбата на соодветните векторски големини во двата система.

Ако се набљудува точка во прототипот P_p и кореспондентна точка $P_m(t_m)$ во моделот и ако овие две точки се движат, нивните движења можат да се претстават со $P_p(t_p)$ и $P_m(t_m)$, каде t_p и t_m се соодветни времиња.



Сл. 2.3 Движење на точка во модел и йрототип

Може да се каже дека кинематичка сличност ќе постои ако за сите парови кореспондентни точки (модел, прототип) постои врската:

$$S_L P_m(t_m) = P_p(S_T t_m) \quad (2-11)$$

каде $S_T = t_p / t_m$ претставува временска скала, при што нулите на t_m и t_p се исти.

Равенката (2-11), всушност, го кажува следното: ако координатите на точка од моделот при време t_m се помножат со должинската скала S_L

се добиваат координатите на соодветна точка во прототипот при соодветно време t_p (каде $t_p = t_m S_T$).

Притоа, брзините на соодветните точки при коресподентни времиња се во константен однос, кој ја претставува т.н. скала на брзини.

Ако се разгледа изводот на изразот (2-11) по t_m :

$$S_L \frac{dP_m}{dt_m} = \frac{dP_p}{dt_p} \frac{dt_p}{dt_m} \quad (2-12)$$

а бидејќи е

$$dt_p = S_T dt_m ,$$

следи:

$$S_L v_m = S_T v_p \quad (2-13)$$

односно

$$S_v = v_p / v_m = S_L S_T^{-1} \quad (2-14)$$

На сличен начин, за забрзувањето се добива скала на сличност:

$$S_L \frac{d^2 P_m}{dt_m^2} = S_T^2 \frac{d^2 P_p}{dt_p^2} \quad (2-15)$$

од каде следи:

$$S_a = a_p / a_m = S_L S_T^{-2} \quad (2-16)$$

Во механиката на флуидите од интерес се одделни големини чии скали, односно врски меѓу моделот (m) и прототипот (p), овдека се одредени.

На пример, за проток е познат изразот:

$$Q = \int_A (\vec{v}, d\vec{A}) \quad (2-17)$$

Соодветната скала заprotoци би била:

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{\int (\vec{v}_p, d\vec{A}_p)}{\int (\vec{v}_m, d\vec{A}_m)} = \frac{\int (S_v \vec{v}_m, d\vec{A}_p)}{\int (\vec{v}_m, d\vec{A}_m)} \quad (2-18)$$

$$S_Q = S_L^2 S_v = S_L^3 S_T^{-1} \quad (2-19)$$

За циркулацијата познат е следниот израз:

$$\Gamma = \int_L (\vec{v}, d\vec{L}) \quad (2-20)$$

Скалата за циркулации, слично како досега, се добива на следниов начин:

$$\frac{\Gamma_p}{\Gamma_m} = \frac{\int(\vec{v}_p, d\vec{L}_p)}{\int(\vec{v}_m, d\vec{L}_m)} = \frac{\int(S_v \vec{v}_m, S_L d\vec{L}_m)}{\int(\vec{v}_m, d\vec{L}_m)} \quad (2-21)$$

или

$$S_\Gamma = S_L S_v = S_L^2 S_T^{-1} \quad (2-22)$$

Во наредната *табела 2.2* се дадени скали и, поради споредба, димензионални формули за некои кинематички големини.

Табела 2.2

Скали на сличност за некои кинематички големини		
Скала	Големина	Димензионална формула
S_L	должина	L
S_T	време	T
$S_L S_T^{-1}$	брзина	$L T^{-1}$
S_T^{-1}	аголна брзина	T^{-1}
$S_L S_T^{-2}$	забрзување	$L T^{-2}$
$S_L^3 S_T^{-1}$	проток	$L^3 T^{-1}$
$S_L^2 S_T^{-1}$	циркулација	$L^2 T^{-1}$

Може да се забележи дека како основни скали се користени скалите S_L и S_T . Понекогаш можат да се усвојат други скали како основни (на пример скали на должина и брзина, S_L и S_v или скали на време и проток S_T и S_Q) и преку нив да се изразат другите скали на сличност.

Пример 1: Кинематички модел е конструиран за изучување на комплициран хидрауличен механизам. Моделот е 12 пати поголем од прототипот (кој е микромеханизам) и скалата на брзината е одбрана како $S_v = 4$. Потребно е да се најдат скалите за аголната брзина (S_ω) и забрзувањето (S_a).

Познато е дека $S_\omega = S_T^{-1}$ и $S_a = S_L S_T^{-2}$. Ако се земе $S_v = S_L S_T^{-1}$ може веднаш да се пресметаат:

$$S_\omega = S_T^{-1} = S_v S_L^{-1} = 4 \cdot 12 = 48$$

$$S_a = S_L S_T^{-2} = \frac{1}{12} \cdot 48^2 = 192$$

каде е

$$S_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{1}{12} .$$

Пример 2: Виор е проучуван во прототип, при што е описано дека се состои од ротационен дел преку радиуси од 0 до r_{2c} , и неротационен дел за остатокот. Конструиран е модел во кој виорот е репродуциран постепено. Телото на виорот прави 6 вртења на час во прототипот и 3 вртења во минута во моделот. Радиусот на телото во моделот е 2 см, додека во прототипот $r_{2c} = 24$ см. Да се најде скалата за циркулација S_Γ и за забрзување S_a .

$$S_\omega = \frac{\omega_p}{\omega_p} = \frac{6}{3 \cdot 60} = \frac{1}{30} = S_T^{-1}$$

$$S_L = \frac{r_{2cp}}{r_{2cm}} = \frac{24}{2} = 12$$

Од горното следи:

$$S_L = \frac{r_{2cp}}{r_{2cm}} = \frac{24}{2} = 12$$

$$S_\omega = \frac{\omega_p}{\omega_m} = \frac{6}{3 \cdot 60} = \frac{1}{30} = S_T^{-1}$$

Ова важи секаде, т.е. и во ротациониот и во неротациониот дел на виорот.

$$\text{За забрзувањето: } S_a = S_L S_T^{-2} = \frac{12}{30^2} = 0.0133$$

$$\text{За циркулацијата: } S_\Gamma = S_L^2 S_T^{-1} = \frac{12^2}{30} = 4.8 .$$

2.4 МАТЕРИЈАЛНА СЛИЧНОСТ

Материјалната сличност често пати е третирана како дел од динамичката. Односно, согласно со M , L , T системот на основни димензии, покрај геометриската и динамичката сличност, може да се води дискусија и за сличност на маси.

Како водечка идеја, притоа се јавува: ако сите динамички (секундарни) големини можат да се изведат од примарните M , L , T ; тогаш може да се изведе и скала на сличност за која и да било динамичка големина, преку соодветните фундаментални скали S_M , S_L , S_T .

Ако се посматраат два материјални система P и M , со соодветни волуумени V_p и V_m , и ако притоа е поставено барањето за сличност на маси, потребно е да се утврди соодветна скала на сличност:

$$S_M = \frac{m_p}{m_m} \quad (2-23)$$

каде што се: m_p и m_m соодветни маси во прототипот и моделот.

Во механиката на флуиди често пати густината се јавува како побитна големина. Аналогно на тоа, потребно е да се дефинира и соодветна скала на сличност S_ρ :

$$S_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{\Delta m_p / \Delta V_p}{\Delta m_m / \Delta V_m} = S_M S_V^{-1} \quad (2-24)$$

т.е.

$$S_\rho = S_M S_L^{-3} \quad (2-25)$$

Како значајна големина во механиката на флуиди се среќава флуксот на маса, Φ , а соодветната скала на сличност може да се дефинира како:

$$S_\Phi = \frac{\Phi_p}{\Phi_m} = \frac{\Delta m_p / \Delta t_p}{\Delta m_m / \Delta t_m} = S_M S_T^{-1} = S_\rho S_v S_L^2 \quad (2-26)$$

Кога се зборува за кинематичка и материјална сличност, би требало да се постават и скалите на сличност за момент и за кинетичка енергија. Но, дефинирањето на овие, како и на скалите на сличност на други динамички големини, би било поедноставно после уочувањето на динамичката сличност.

2.5 ДИНАМИЧКА СЛИЧНОСТ

Врз флуидот, при одреден струен процес, дејствуваат различни сили, што води кон идејата за што е можно подетално дефинирање на динамичката сличност.

Во поглед на истражувачката работа, потребно е да се знае како да се мери силата во моделот (F_m) за да се добие соодветната дејствуваачка сила во оригиналот (F_p), за која цел е неопходно дефинирање на скалата на сличност за сила, S_F .

За кој и да било проблем во динамиката се уочува дека S_F не е независна скала, ако веќе се избрани S_L , S_T и S_M . Причина за тоа е секако II-от Ќутнов закон, $\vec{F} = m\vec{a}$, од кој произлегува:

$$S_F = \frac{m_p a_p}{m_m a_m} = S_M S_L S_T^{-2} \quad (2-27)$$

Овдека S_M , S_L и S_T можат да се третираат како фундаментални скали на сличност. Меѓутоа, може да се уочи дека за многу проблеми S_L , S_v и S_ρ се попогодни отколку претходните, преку кои S_F може да се дефинира како:

$$S_F = S_L^2 S_v^2 S_\rho \quad (2-28)$$

Користејќи ја досега изложената процедура, можат да се дефинираат и скали за сличност за работа, притисок, кинетичка енергија и за други динамички големини. И овдека се согледува аналогијата помеѓу скалите на сличност и димензионалните формули на посматраните големини.

За работа:

$$S_W = \frac{(\vec{F}_p, d\vec{r}_p)}{(\vec{F}_m, d\vec{r}_m)} = S_F S_L = S_L^2 S_T^{-2} S_M \quad (2-29)$$

За кинетичка енергија:

$$S_{Ek} = \frac{\frac{1}{2} m_p v_p^2}{\frac{1}{2} m_m v_m^2} = S_M S_v^2 = S_L^2 S_T^{-2} S_M \quad (2-30)$$

Произлегува дека $S_W = S_{Ek}$, што е, и инаку, и димензиски очигледно.

Следи следниов заклучок: ако две големини имаат исти димензионални формули, тие ќе имаат и исти формули за нивните скали на сличност.

Пример: Притисокот, вискозниот напон, турбулентниот напон имаат исти формули за скала на сличност, иако се различни од физички аспект.

Типични примери за скали на сличност и димензионални формули дадени се во табела 2.3.

Табела 2.3

Скали и димензионални формули за некои динамички големини		
Скала	Големина	Димензионална формула
S_L	должина	L
S_T	време	T
S_M	маса	M
$S_M S_L^{-3}$	густина на маса	ML^{-3}
$S_L S_T^{-2} S_M$	сила	MLT^{-2}
$S_L^2 S_T^{-2} S_M$	момент на сила; кинетичка енергија; работа	$ML^2 T^{-2}$
$S_L^{-1} S_T^{-2} S_M$	притисок; тангенцијален напон; турбулентен напон	$ML^{-1} T^{-2}$
$S_L S_T^{-1} S_M$	импулс; количество движење (моментум)	MLT^{-1}
$S_L S_T^{-2} S_M$	флукс на моментум	MLT^{-2}
$S_L^2 S_T^{-1} S_M$	момент на импулс; момент на моментум	$ML^2 T^{-1}$
$S_L^{-2} S_T^{-2} S_M$	градиент на притисок	$ML^{-2} T^{-2}$

Во понатамошното излагање ќе бидат третирани конкретни случаи од механиката на флуиди:

1. само еден тип на сила го контролира струењето,
2. два типа (или повеќе) на сили имаат ист степен на влијание врз струењето.

2.6 ВИСКОЗНИ СИЛИ

Во претходната глава, повеќе примери, во кои се манифестира влијанието на вискозните сили, беа третирани од аспект на димензионалната анализа. Притоа, Рейнолдсовиот број Re се јавуваше во еден или друг облик во соодветните функционални зависности.

Во ова поглавје, при дефинирањето на условите за сличност, Re ќе се изнајде како критериум за сличност помеѓу модел и прототип. Притоа, се разгледува некомпресибilen флуид со линеарно вискозно однесување. Според Њутон (Newton), вискозната сила што се јавува при струење на ваков флуид е дефинирана со изразот:

$$F_\mu = \mu A \frac{dv}{dn} \quad (2-31)$$

каде што се:

F_μ - вискозна сила;

A - површина преку која силата е распределена;

dv/dn - степен на деформација на флуидот;

μ - динамичка вискозност.

Флуидите кои го задоволуваат изразот (2-31) се познати како љутонски флуиди.

Според тоа, скалата са сличност за вискозни сили ќе биде:

$$S_{F_\mu} = \frac{F_{\mu_p}}{F_{\mu_m}} = \frac{\mu_p A_p \frac{dv_p}{dn_p}}{\mu_m A_m \frac{dv_m}{dn_m}} = S_\mu S_L^2 S_T^{-1} \quad (2-32)$$

Од друга страна, од основните закони на механиката е познато дека која и да било скала за сила мора да биде еднаква на S_F , определена со изразот (2-27), т.е.:

$$S_{F\mu} = S_F \quad (2-33)$$

или

$$S_\mu S_L^2 S_T^{-1} = S_M S_L S_T^{-2}$$

Оттаму следи скалата на сличност за динамичка вискозност:

$$S_\mu = S_M S_L^{-1} S_T^{-1} = S_\rho S_L S_v \quad (2-34)$$

Ако одделните скали на сличност во изразот (2-34) се изразат со соодветните големини во моделот и прототипот, следи:

$$\frac{S_\rho S_L S_v}{S_\mu} = \frac{\frac{\rho_p l_p v_p}{\rho_m l_m v_m}}{\frac{\mu_p}{\mu_m}} = 1 \quad (2-35)$$

Оттаму се согледува Рейнолдсовиот критериум или закон за вискозни струења во кои има меѓусебно дејство на вискозните и инерцијалните сили, т.е.:

$$Re_p = \frac{\rho_p v_p l_p}{\mu_p} = \frac{\rho_m v_m l_m}{\mu_m} = Re_m \quad (2-36)$$

претставува основно барање за сличност во овој случај.

Изразите (2-35) и (2-36) изгледаат исти, но даваат различни информации. На одреден начин, изразот (2-35) дава повеќе информации, бидејќи ги опфаќа геометриската сличност (S_L), кинематичката (преку S_v) и динамичката (преку S_ρ и S_μ).

2.7 ЕЛАСТИЧНИ СИЛИ

Сеопфатноста нема да се изгуби ако еластицитетот на флуидите се анализира на ист начин како во претходната глава, односно, ако се изучува појавата на еластични сили во цевководи низ кои струи течност. Притоа, многу едноставно може да се согледа дека истата анализа може да се спроведе како за течности така и за цврсти материјали.

Според тоа, еластичната сила може да се изрази со познатиот израз:

$$F_\varepsilon = E_V A \cdot \varepsilon \quad (2-37)$$

каде што се:

- E_V - модул на еласичност;
- A - површина;
- ε - релативна деформација (волуменска $\Delta V/V$ за течност, линеарна $\Delta l/l$ за цврстите сидови на цевката).

Со споредба на двете кореспондентни сили во прототипот и моделот, $F_{\varepsilon p}$ и $F_{\varepsilon m}$, се добива скалата на сличност на дејствувачките еластични сили.

$$S_\varepsilon = \frac{F_{\varepsilon p}}{F_{\varepsilon m}} = \frac{E_{Vp} A_p \varepsilon_p}{E_{Vm} A_m \varepsilon_m} = S_{E_V} S_L^2 \quad (2-38)$$

при што

$$\varepsilon_p = \varepsilon_m.$$

Од врската

$$S_F = S_L^2 S_v^2 S_\rho = S_\varepsilon$$

следи:

$$\frac{S_v^2}{S_{E_V}/S_\rho} = 1 \quad (2-39)$$

Ова претставува основен критериум на сличност кога еластичните и инерцијалните сили го детерминираат струењето. Од изразот (2-39) се добива:

$$\frac{v_p^2}{E_{Vp}/\rho_p} = \frac{v_m^2}{E_{Vm}/\rho_m} \quad (2-40)$$

Изразот (2-40) е познат како Кошиев (Cauchy) закон на сличност, или во некоја литература Хајген-Релиев (Heigen-Rayleigh) закон за компресибилни течности.

Одовде може да се дефинира Кошиевиот број како однос на квадратот на брзината на супстанцата и квадратот на брзината на звукот во таа супстанца:

$$\frac{v_p^2}{c_p^2} = \frac{v_m^2}{c_m^2} \quad (2-41)$$

Ако се земе квадратен корен од изразот (2-41), ќе се добие познатиот Махов (Mach) број:

$$M = \frac{v_p}{c_p} = \frac{v_m}{c_m} \quad (2-42)$$

Брзината на звукот во течноста е изразена како:

$$c = \left(\frac{E_V}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} .$$

2.8 СИЛИ НА ГРАВИТАЦИЈА

За случаи кога се размгледуваат струења кои се мали по димензии во споредба со Земјата како планета и се случуваат во поле со униформна гравитациона сила, познат е изразот:

$$G = mg$$

каде што се:

- m - маса на флуидот;
- G - гравитациона сила (тежина);
- g - земјино забрзување,

($g = const$, при што се занемаруваат малите промени на g со промената на географската широчина),

($g \neq const$, кога би се посматрале струења на различни планети, вселенски станици и слично).

Ако се G_p и G_m гравитациони сили на соодветни делови на флуидот во прототип и модел, скалата на сличност ќе биде:

$$S_G = \frac{G_p}{G_m} = \frac{\gamma_p V_p}{\gamma_m V_m} \quad (2-43)$$

Со споредба на скалата за гравитациони сили S_G со скалата за инерцијални сили S_F , следи:

$$S_\gamma S_V = S_M S_L S_T^{-2} \quad (2-44)$$

Ако се заменат $S_V = S_L^3$, $S_M = S_L^3 S_\rho$ и $S_T = S_L S_v^{-1}$ од изразот (2-44) се добива:

$$\frac{S_v^2 S_L^{-1}}{S_\gamma / S_\rho} = 1 \quad (2-45)$$

Ова е една од формите на Фрудовиот (Froude) закон. Попознат облик се добива ако се земе предвид дека скалите на сличност претставуваат односи на соодветните големини во прототипот и моделот:

$$\frac{v_p^2 / l_p}{\gamma_p / \rho_p} = \frac{v_m^2 / l_m}{\gamma_m / \rho_m} \quad (2-46)$$

Знаејќи дека $\gamma_p / \rho_p = g_p$ и $\gamma_m / \rho_m = g_m$ (претпоставувајќи дека g_p може да биде различно од g_m), може да се напише:

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p l_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m l_m}} \quad (2-47)$$

односно, Фрудовите броеви на прототипот и моделот треба да бидат исти:

$$Fr_p = Fr_m .$$

Потребно е да се напомене, иако всушност $g_p = g_m$, g не смее да се елиминира од законот за сличност, односно:

$$\frac{v_p}{\sqrt{gl_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{gl_m}} \quad (2-48)$$

Во овој случај скалата за сличност на брзини ќе биде:

$$S_v = (S_L)^{1/2} \quad (2-49)$$

2.9 ПОВРШИНСКА НАПНАТОСТ (ТЕНЗИЈА)

Површинската тензија е важен фактор при исражувањето на т.н. двофазни струјни феномени, во кои флуидот содржи мали делови на друг флуид со кој не се меша; на пример, масло во вода, гасни меури во течност и т.н. Површинската тензија е причина за создавање бранови при меѓуповршините на флуидите што не се мешаат. Примери: бранови при слободна површина, пловење на минерали и друго.

Може да се претпостави дека силата на површинската напнатост се изразува како:

$$F_\Sigma = \sigma l \quad (2-50)$$

каде што се:

- σ - површинска напнатост (дименционална формула FL^{-1});
- l - одредена должина на меѓуповршината на двета флуида.

Скалата на сличност за соодветните дејствувачки сили во прототипот и моделот ќе биде:

$$S_\Sigma = \frac{F_{\Sigma p}}{F_{\Sigma m}} = \frac{\sigma_p l_p}{\sigma_m l_m} = S_\sigma S_L \quad (2-51)$$

Ако се направи споредба со $S_F = S_M S_L S_T^{-2}$, следи скалата на сличност на површинската напнатост:

$$S_\sigma = S_L S_v^2 S_\rho \quad (2-52)$$

Според тоа, критериумот на сличност може да се претстави како:

$$\frac{S_L S_v^2}{S_\sigma / S_\rho} = 1 \quad (2-53)$$

или во пофамилијарна форма:

$$\frac{v_p^2 l_p}{\sigma_p / \rho_p} = \frac{v_m^2 l_m}{\sigma_m / \rho_m} \quad (2-54)$$

Со земање квадратен корен од изразот (2-54) се добива т.н. Веберов (Weber) критериум:

$$\sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho_p l_p}} = \sqrt{\frac{\sigma_m}{\rho_m l_m}} \quad (2-55)$$

т.е.

$$We_p = We_m .$$

Со други зборови, ако е потребно да се изучуваат само ефектите на површинската тензија, динамичката сличност ќе биде осигурана ако Веберовите броеви се исти и во моделот и во прототипот.

Можат да се постават и други критериуми на сличност, за случаи кога се јавуваат други видови сили, кои доминираат при некој струен процес. Овдека беа дадени само најтипични случаи, а дефинирањето на другите критериуми се остава за прилики кога би се изучувале конкретните струења. Притоа, патот на изведување на соодветните критериуми на сличност ќе биде во иста насока како во претходно прикажаните случаи.

2.10 СТРУЕЊА ДОМИНИРАНИ ОД ДВЕ СИЛИ

Секако дека постојат струења во кои само еден тип сила игра улога, но почесто се среќаваат ситуации во кои барем два типа сили го покажуваат своето влијание.

Многу чест случај е оној при кој и вискозните и гравитационите сили треба да се земат предвид. Притоа, за да се обезбеди целосна динамичка сличност, треба да се задоволат критериумите на сличност и за вискозните и за гравитационите сили, односно соодветните скали меѓу моделот и прототипот:

$$Re_m = Re_p \quad \text{и} \quad Fr_m = Fr_p$$

т.е. да се задоволат изразите кои ги поврзуваат соодветните скали на сличност:

$$\frac{S_v S_L}{S_\mu / S_\rho} = 1 \quad ; \quad \frac{S_v^2 S_L^{-1}}{S_\gamma / S_\rho} = 1 \quad (2-56)$$

Од равенките (2-56) следи:

$$\frac{S_L^3 (S_\gamma / S_\rho)}{(S_\mu / S_\rho)^2} = 1 \quad (2-57)$$

односно можат да се дефинираат скалите на сличност за одделни големини.

◆ Скала за должини:

$$S_L = \frac{(S_\mu / S_\rho)^{2/3}}{(S_\gamma / S_\rho)^{1/3}} \quad (2-58)$$

◆ Скала за брзини:

$$S_v = (S_\mu / S_\rho)^{1/3} (S_\gamma / S_\rho)^{1/3} \quad (2-59)$$

- ◆ Скала за времиња:

$$S_T = S_L / S_v = \frac{(S_\mu / S_\rho)^{1/3}}{(S_\gamma / S_\rho)^{2/3}} \quad (2-60)$$

- ◆ Скала за забрзувања:

$$S_a = S_L S_T^{-2} = S_\gamma / S_\rho = S_g \quad (2-61)$$

На прв поглед изгледа дека условите (2-56), т.е. (2-58) и (2-59), би можеле да се задоволат без проблем. Но, во суштина, ограничувањата за реализација на оваа сличност се многу строги.

Овие ограничувања се јавуваат најмногу заради причината дека не е можно по желба да се произведат флуиди со какви и да било особености. Само во некои случаи, на пример: прототип - сирово минерално масло со $\nu = 36 \text{ cSt}$, модел - вода при $t = 15^\circ\text{C}$, може да се оствари геометриска скала на сличност $S_L = 10$.

Можеби најдобро задоволување на двета критериуми ($Re_p = Re_m$ и $Fr_p = Fr_m$) би било со промена на гравитационото поле, $S_g = S_\gamma / S_\rho \neq 1$ (пример: експерименти на Месечината или во друга вселенска лабораторија).

Очигледно дека проблемот се усложнува уште повеќе ако се земе да бидат меродавни повеќе од две сили.

2.11 МОДЕЛ И ПРОТОТИП ВО ИСТО ГРАВИТАЦИОНО ПОЛЕ И СЛИЧНОСТ КОГА ДВАТА ФЛУИДА СЕ ИСТИ

Ако моделот и прототипот мораат да бидат во исто гравитационо поле (што е реалност), се јавува прилично строг услов:

$$S_g = S_\gamma / S_\rho = 1$$

поради што, во претходните услови (2-56), би се добило:

$$\frac{S_v S_L}{S_\nu} = 1 \quad ; \quad S_v^2 S_L^{-1} = 1 \quad (2-56a)$$

каде што е $S_\nu = S_\mu / S_\rho$, а потоа (2-58) се трансформира во:

$$S_L = S_\nu^{2/3} \quad (2-58a)$$

Тоа значи дека S_L и S_ν се директно поврзани. Ако се избере на пример S_L , скалата за кинематичката вискозност S_ν е фиксирана. На пример: ако е $S_L = 20$, следи $S_\nu \approx 90$; ако во прототипот се користи вода, флуид за моделот не е можно да се изнајде.

Во практиката, освен случаи во кои за изучување на струење на вода се употребува воздух (или обратно), на пример моделно испитување на хидраулични машини, има многу малку примери на користење различни флуиди во моделот и прототипот. Ова не е само заради строгиот услов (2-58a), туку и поради чинењето на различни специјални флуиди, како и поради нивните негативни особини (корозија, експлозивност, отровност и сл.).

Ценејќи го претходното кажаното се наметнува прашањето: Дали е оставено да се моделираат само прототипи во кои се јавува само една сила? Одговорот би бил да, ако се бара стриктна сличност; а не, ако се користи „уметноста“ на симулација.

Притоа се постапува на долу наведениот начин.

Од случај до случај, потребно е да се согледа кој вид сили е поважен (доминантен) за даденото истражување; со тоа соодветниот критериум за сличност ќе се земе како основен, а критериумите кои одговараат на другите сили како контролни.

На пример, ако се повлијателни гравитационите сили, тогаш Фрудовиот критериум би бил основен, а Рейнолдсовиот ќе служи евентуално за контрола. Обратно, ако се уочи дека вискозните сили се повлијателни (ламинарно струење), Re - закон ќе биде меродавен, а Fr - контролен.

Сопред тоа, ако Re се јавува како основен критериум, мора да се исполни законитоста (2-35):

$$\frac{S_L S_\nu}{S_\rho} = 1$$

каде што е $S_\nu = S_\mu / S_\rho = 1$ за исти флуиди при исти температури, поради што следи порестрективен критериум:

$$S_L S_v = 1 \quad (2-62)$$

од каде произлегува дека, за веќе избрана скала S_L , скалата на сличност за брзините $S_v = S_L^{-1}$ ќе биде фиксирана, што понекогаш може да создава проблеми; на пример, ако е $S_L = 50$ (моделни истражувања на авион во аеротунел, на речен ток и сл.), брзините во моделот мора да бидат $v_m = 50 v_p$.

Од друга страна, Фрудовиот закон не е под влијание на користењето на ист флуид во моделот и прототипот. Односно, од изразот (2-45), ако се земе дека е $S_g = 1$, се добива врската на скалите на сличност:

$$S_v^2 S_L^{-1} = 1 \quad (2-63)$$

Очигледно е дека во (2-63) не се јавува скала на сличност за физичките особини на флуидите, што во голема мера ја олеснува примената на овој критериум. Во овој случај, ако е избрана S_L , скалата на сличност за брзини ќе биде $S_v = S_L^{1/2}$.

2.11.1 Пример за законот на сличноста кај хидрауличните турбини

Типичен пример на моделни истражувања се јавува при градбата на водните турбини. При проектирањето на нова турбина, за нејзините проточни делови (ротирачки и неротирачки) најнапред се вршат потребните теоретски пресметки, а потоа се изработува модел на турбината и се врши негово испитување во лабораторија. Резултатите од испитувањата на моделот се користат за верификација и корекција на теоретските пресметки, пред да се пристапи кон дефинитивна конструкција и изработка на турбината.

Од изложеното во претходните поглавја е очигледно дека, за моделот и моделните истражувања на турбината, потребно е да се задоволат соодветните критериуми за геометриска, кинематичка и динамичка сличност.

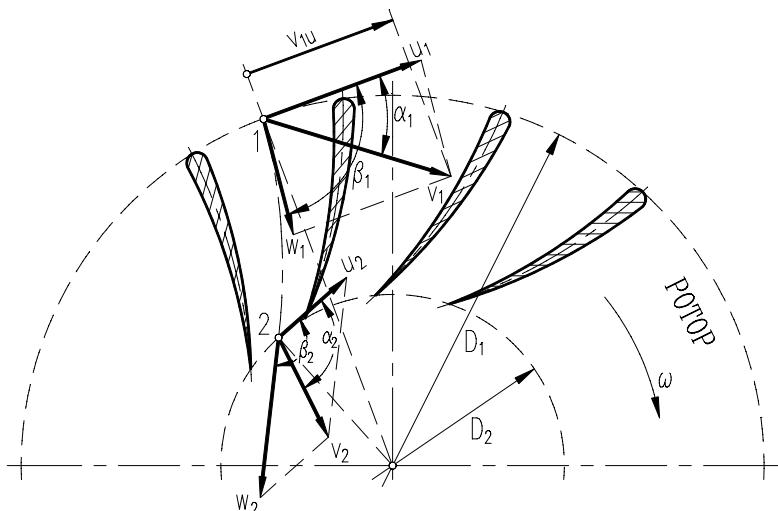
Условите за геометриска сличност се сведуваат на сличност на конфигурациите на опструјуваните површини на елементите од проточните делови на турбината, т.е. треба која и да било должинска големина

на опструјуваните површини на оригиналот (прототипот) на турбината, l_p , да биде пропорционална на соодветната должина во моделот, l_m . Односно, за која и да било должина на проточните површини треба да биде задоволена соодветната геометричка скала на сличност, $S_L = l_p / l_m$.

Условите за кинематичка сличност се сведуваат на сличност на струјните слики при протекување на водата низ проточните делови на прототипот и моделот на турбината. При тоа, во која и да било соодветна точка на струјниот ток, брзините во прототипот и моделот треба да имаат исти насоки и да задоволуваат иста скала на сличност на брзините:

$$S_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{w_p}{w_m} = \frac{u_p}{u_m}$$

За ротирниот канал на турбината (види сл. 2.4), v ја претставува апсолутната брзина, а w и u се нејзини компоненти (релативна и периферна брзина).



Сл.2.4 Шема на спирење низ турбински ротирен канал

Со други зборови, условите за кинематичка сличност се сведуваат на сличност на триаголниците на брзините (сл. 2.4) во соодветните точки на спирењето во прототипот и моделот.

За остварување на целосна динамичка сличност помеѓу прототипот и моделот на турбината потребно е да се задоволат истовремено и Рейнолдсовиот и Фрудовиот критериум ($Re_p = Re_m$ и $Fr_p = Fr_m$), односно условите (2-56а), што практички не е остварливо.

Скалите на сличност на одделни кинематички и динамички големини (на пример: брзини, проток и мокност), при избрана скала на геометриска сличност, можат да се изведат од познатата главна равенка на турбините:

$$\eta_h gH = u_1 v_{1u} - u_2 v_{2u} \quad (2-64)$$

каде што се:

η_h - хидрауличен коефициент на корисно дејствие;

H - нето-пад (напор) на турбината;

u_1 и u_2 - периферни брзини на влезот и излезот од ротирниот канал;

v_{1u} и v_{2u} - проекции на апсолутните брзини по правец на соодветните периферни брзини (сл.2.4).

Со земање во обсир на соодносот на проекциите на одделните брзини во соодветниот триаголник на брзини (на пример, на влезот „1“ во ротирниот канал, сл. 2.4),

$$\frac{v_1}{\sin \beta_1} = \frac{w_1}{\sin \alpha_1} = \frac{u_1}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)}$$

како и врската на периферните брзини $u_2 = (D_2/D_1)u_1 = ku_1$, се добива трансформиран облик на главната равенка (2-64):

$$\eta_h gH = \frac{u_1^2 \sin \beta_1 \cos \alpha_1}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)} - \frac{u_1^2 k^2 \sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin(\beta_2 - \alpha_2)} \quad (2-64a)$$

од каде е уочлива зависноста на периферната брзина u_1 :

$$u_1 = k_u \sqrt{\eta_h gH} \quad (2-65)$$

На аналоген начин се добиваат и изрази за апсолутната и релативната брзина:

$$v_1 = k_v \sqrt{\eta_h gH} \quad \text{и} \quad w_1 = k_w \sqrt{\eta_h gH} \quad (2-66)$$

Коефициентите k_u , k_v и k_w зависат само од аглите α_1 , β_1 , α_2 , и β_2 , и при обезбедена геометриска и кинематичка сличност, тие се исти за моделот и прототипот: $k_{um} = k_{up}$, $k_{vm} = k_{vp}$, $k_{wm} = k_{wp}$.

На истиот начин може да се изведе зависност на брзините за која и да било точка во струјниот ток.

Според тоа, доколку се споредуваат брзините помеѓу моделот и прототипот, скалата на сличност на брзините ќе биде:

$$S_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{k_v \sqrt{\eta_{hp} g H_p}}{k_v \sqrt{\eta_{hm} g H_m}} = \sqrt{\frac{H_p}{H_m}} \quad (2-67)$$

При тоа е усвоено дека $\eta_{hp} = \eta_{hm}$.

Земајќи предвид дека односот на напорите H_p/H_m (изразени во метри столб на течност, m/m) одговара на соодветната скала на сличност $S_L = H_p/H_m$, од изразот (2-67) е очигледно дека скалата на сличност за брзините го задоволува Фрудовиот критериум (2-63).

Одтука, со занемарување на разликата помеѓу η_{hp} и η_{hm} , можат да се изведат скалите на сличност за другите големини, на пример:

– за бројот на вретежи $n = u/\pi D$,

$$S_n = \frac{n_p}{n_m} = \frac{D_m}{D_p} \sqrt{\frac{H_p}{H_m}} = S_L^{-1} \left(H_p / H_m \right)^{1/2} \quad (2-68)$$

– за протокот,

$$S_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{w_p A_p z}{w_m A_m z} = \frac{D_p^2}{D_m^2} \sqrt{\frac{H_p}{H_m}} = S_L^2 \left(H_p / H_m \right)^{1/2} \quad (2-69)$$

каде што се:

A_p и A_m - соодветна површина на пресекот на каналот помеѓу две соседни лопатки;

z - број на ротирните лопатки (ист во прототипот и во моделот, $z_p = z_m$).

– за моќноста на турбината (при $\eta_p = \eta_m = \eta$),

$$S_p = \frac{P_p}{P_m} = \frac{\rho g Q_p H_p \eta}{\rho g Q_m H_m \eta} = S_L^2 \left(H_p / H_m \right)^{3/2} \quad (2-70)$$

Задоволување на Рейнолдсовиот критериум во оригиналот и моделот на турбината, практично, не е можно да се обезбеди.

Поаѓајќи од условот (2-62), ако се замени скалата на сличност за брзините (2-67), и при услов на $\eta_{hp} = \eta_{hm}$, се добива:

$$S_L \left(H_p / H_m \right)^{1/2} = 1 \quad \text{т.е.} \quad H_m = S_L^2 H_p$$

Овој услов во практиката е многу тешко да се обезбеди. На пример: за $S_L = 5$, напорот на моделот треба да биде 25 пати поголем од напорот на прототипот.

Од друга страна, бројни експерименти покажале дека при $Re > 10^5$, при кои обично работат моделните и оригиналните турбини, промената на Re нема значајно влијание врз обликот на струењето, па со доволна точност Фрудовиот критериум може да се земе како основен, а изведените скали на сличност (2-67) до (2-70) како доволно точни.

Лабораториските истражувања на модел на турбина обично се вршат со $H_m = 4 \div 5$ m, при што $Re_m < Re_p$.

Влијанието на Re врз коефициентот на корисно дејствие η е, исто така, мало, а може да се земе во обсир и да се извршат корекции на големините и параметрите на оригиналот со примена на соодветни емпириски изрази. На пример, според Акерет (Ackeret) изведена е следнава зависност на η_h за прототип и модел:

$$\eta_{hp} = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \eta_{hm} \right) \left[1 + \left(Re_m / Re_p \right)^{1/5} \right]$$

На аналоген начин може да се изведат законитостите на слична работа на модел и прототип и за турбопумпите.

ГЛАВА
ТРЕТА

3. НАЧИНИ НА ПРИМЕНА НА МЕРНАТА ИНСТРУМЕНТАЦИЈА, ТОЧНОСТ НА МЕРЕЊЕ, ПРИКАЖУВАЊЕ НА РЕЗУЛТАТИ

3.1 ВОВЕД

Како основа за понатамошните изучувања на мерните инструменти и нивните карактеристики, би било корисно најнапред да се уочат општите начини на примена. Овдека се дадени следниве можности за примена на мерната инструментација:

1. предупредување на процеси и операции.
2. контрола на процеси и операции.
3. експериментална инженерска анализа.

Секоја од овие класи на примена ќе бидат описаны како што следи.

3.2 ПРЕДУПРЕДУВАЊЕ НА ПРОЦЕСИ И ОПЕРАЦИИ (МОНИТОРИНГ)

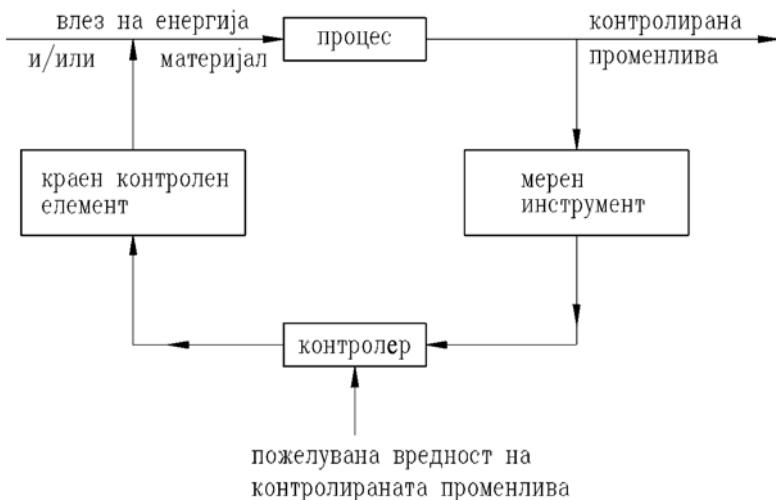
Некои примени на мерните инструменти можат да се карактеризираат, во основа, да имаат чисто предупредувачка природа. Инструментите едноставно ги означуваат условите што владеат во процесите на некоја машина или систем; и притоа нивните читања не служат, во обична смисла, за каква и да било контролна функција.

Примери: хидрометеоролошки мерења, мерења на потрошувачка на гориво и енергија, потрошувачка на вода, температура во просторија, манометри во улога на означување на притисок во некој процес, брзиномери во возила, Гајгерови бројачи и слично.

3.3 КОНТРОЛА НА ПРОЦЕСИ И ОПЕРАЦИИ

Овој тип примена се јавува во случаи кога инструментот служи како компонента на автоматски контролиран систем. Очигледно дека ваквата примена е од екстремно важен карактер.

Функционален блок дијаграм којшто го илустрира принципот на работа на еден таков автоматски контролиран систем, е прикажан на сл. 3.1



Сл. 3.1 Повратен систем на контрола

Јасно е дека, за да се контролира некоја големина со ваков „повратен“ (feedback) систем, потребно е најнапред да се измери истата.

Според тоа, секој од ваквите типови на автоматски системи за контрола треба да содржи барем еден мерен инструмент.

Примерите за ваквиот тип на примена се безбројни: контрола на моментот и бројот на вртежи на некоја машина, контрола на протокот во хидрауличен или хидроенергетски систем, контролирано централно греене, системи за контрола на авиони и ракети и друго. Како типичен пример може да се земе системот за контрола на авион; еден ваков систем бара информации од повеќе мерни инструменти, како што се: Прандл-Питот сонди, сензори за нападен агол, термопарови, акцелерометри, алтиметри, жirosкопи.

Очигледна е врската помеѓу мерната инструментација што се користи во првиот и вториот начин на примена, доколку се работи за мерење на исти големини. Разликата е само во додатната опрема за пренос на податоци и, се разбира, за функцијата на контрола. Често пати, дури, може да настане и конфузуза околу дефинирањето на типот на примената; така на пример, податоците од хидрометеоролошката служба служат чисто како известување за обичниот човек, меѓутоа тие имаат контролна функција за земјоделецот, кој презема соодветни активности за заштита или понатамошна обработка. Во таа смисла, бројни се и многу други примери: служба за контрола на летови, предвидување на времето и т.н.

Добиените податоци од првиот и вториот начин на примена на мерната инструментација многу често наоѓаат примена и при експерименталната инженерска анализа.

3.4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИНЖЕНЕРСКА АНАЛИЗА

За решавање на инженерски проблеми, два генерални метода стојат на располагање: теоретскиот и експерименталниот. Многу проблеми, особено од научноистражувачки карактер, бараат примена на двата метода. Во зависност од природата на проблемот, единот или другиот метод, соодветно, наоѓаат поголема или помала примена.

Особено за проблеми кои се на границата на знаењето, т.е. за кои нема доволно адекватни теоретски описи и предикции, потребни се екstenзивни експериментални истражувања. Притоа, несомнено е дека сепак е потребно дефинирање на врската помеѓу постојната теорија и експериментот. За таа цел, во голема мера помага примената на

дисциплините, како што се димензиската анализа и теоријата на сличност (соответно разработени во претходните две глави).

Резултат на теоретскиот метод на истражување е дефинирање соодветен математички модел, кој дава опис на истражуваниот (физички, хемиски или друг) процес. Доколку се можни аналитички решенија на математичкиот модел, тогаш се добиваат сеопфатни резултати кои ќе важат за најразлични услови. Затоа и се настојува кон изнаоѓање, првенствено, на аналитички решенија. Меѓутоа, многу малку се примерите за кои можат да се добијат аналитички решенија. За таа цел, од математичкиот модел се дефинира соодветен нумерички модел, при што најчесто се применуваат разни упростувачки претпоставки, чиишто нумерички решенија даваат предикции за однесувањето на соодветниот процес. Со примена на современите компјутери е можно решавање на такви нумерички модели, за кои во минатаото било потребно исклучително долго време или воопшто не можеле да се решат.

За спроведување на експерименталниот метод потребно е да се дефинира и да се реализира соодветен физички модел. Притоа, најдобро би било моделот да биде наполно сличен на оригиналот (процес или машина), што, како што е познато од претходната глава, во многу малку случаи е остварливо. Затоа, при дефинирањето на физичкиот модел, како и условите при кои ќе се спроведува експериментот, се користат поставките на теоријата на сличност, со цел да се определат доминантните (основните) критериуми. За дефинираниот физички модел се реализира соодветна лабораториска, т.е. експериментална постројка, со која се врши експериментот преку мерење на водечките големини. Секако дека, за спроведување на експериментот, потребна е и соодветна мерна инструментација.

Корисно е накратко да се сумираат битните карактеристики на теоретскиот и експерименталниот метод.

◊ **Карактеристики на теоретскиот метод**

1. Најчесто дава резултати кои се повеќе за општа примена отколку за некоја ограничена апликација.
2. Постојано (или многу често) бара внесување упростувачки претпоставки, што резултира во дефинирање на „упростен математички модел“ на изучуваниот проблем.

Резултат: теоретски предвиденото однесување секогаш повеќе или помалку, се разликува од реалноста.

3. Во некои случаи води кон комплицирани математички модели. Денеска, со применета на современите брзи компјутери се решаваат и проблемите за кои во минатото не можело ни да се сонува.
4. Бара само молив, хартија, сметачка машина и т.н. Посебни лабораториски услови и опрема, коишто можат да бидат доста скапи, не се потребни. Се разбира дека цената на компјутерот е значителна, меѓутоа тој се користи за решавање на бројни други проблеми и од повеќе истражувачи.
5. Се остварува заштеда во време коешто би било потребно за изработка на физички модели, набавка и контрола на инструменти, прибиранје податоци и слично.



Карактеристики на експерименталниот метод

1. Најчесто дава резултати кои се применливи само за специфичен проблем кој се истражува. Меѓутоа, техниките каква што е димензионалната анализа овозможуваат одредени генерализации.
2. Не се потребни упростувачки претпоставки, доколку експериментите се вршат на оригинален систем (физички модел). Вистинското однесување се уочува.
3. Потребни се точни мерења за да се добие вистинска слика. Ова многу често резултира во примена на скапа и комплицирана опрема. Притоа, карактеристиките на опремата треба добро да се познаваат.
4. Истражувањата се вршат врз оригинал или на модел максимално можно сличен на оригиналот. Доколку се користи модел со определена скала на сличност, потребно е да се дефинираат законитетите на сличност на сите значајни големини, при што, како што е познато, може да се наиде на определени тешкотии.
5. Потребно е соодветно време за проектирање и конструирање на лабораториската инсталација, како и набавка и баждарење на мерната инструментација.

При инженерската анализа, а особено при научноистражувачката работа, потребно е за секој проблем добро да се уочи користа од единиот или другиот метод, т.е. како најрационално да се користат нивните можности. Многу проблеми бараат примена на двата метода. Во која

мера ќе се примени едниот или другиот зависи од природата на проблемот. Теоријата и експериментот мора да се комплементарни меѓу себе. Истражувачот кој внимава на ова однесување, секако, е поефикасен во решавањето на проблемите.

При разгледувањето на примената на мерните инструменти во проблемите на експерименталната анализа, корисно би било да се има при рака определена класификација на видовите проблеми што притоа би можело да се решат. Оваа класификација може да се направи согласно со неколку различни планови, а една од можните е прикажана како што следи:

- ◊ **Тип на проблеми што можат да се решат со експериментална анализа**
 1. Тестирање на валидноста на теоретските предикции базирани на упростувачки претпоставки.
 2. Формулација на генерализирани емпириски врски за решенија за кои адекватна теорија не постои.
 3. Опредлување на параметрите на материјалите, компонентите и системот кој се истражува; параметрите на променливите големини и нивното однесување.
 4. Проучување на проблемот со надеж да се развие соодветна теорија.
 5. Решавање на математичките равенки со помош на аналогии.

3.5 ВИДОВИ МЕРНИ ИНСТРУМЕНТИ ОПШТА ПОДЕЛБА, ФУНКЦИОНАЛНИ ЕЛЕМЕНТИ НА ИНСТРУМЕНТОТ ИЛИ МЕРНИОТ СИСТЕМ

При мерењата на физички, хемиски, геометриски и други неелектрични големини се користат, воглавно, следниве основни видови мерни инструменти:

- а) инструменти за неелектрични мерења на неелектрични големини.
- б) инструменти за електрични мерења на неелектрични големини.

Основните законитости врз кои се базираат наведените видови мерни инструменти се изнесени како што следи:

а) Мерењата со инструменти за неелектрични мерења се засноваат на директна примена на некој физички или физичко-хемиски закон. Преку овој закон големината што се мери се трансформира во соодветна физичка големина, чиј квантитет може директно да се определи.

Примери: мерења на притисок преку висината на столбот на манометарската течност, проток преку разликата на притисок во Вентури-метар или мерна бленда.

Значи, потребно е да се познава функционалната зависност помеѓу големината што се сака да се определи и големината со помош на која се врши мерењето, во дадените примери $p = p(\Delta h)$ и $Q = Q(\Delta p)$. Зависноста може да биде линеарна или нелинеарна. Во многу случаи определувањето на соодветната големина се врши по посреден пат, како што е случајот во вториот пример: се определува притисокот преку столбот на течност $\Delta p = \Delta p(\Delta h)$, па дури потоа протокот Q ; или со трансформација да се дојде до директна зависност од големината со која се врши мерењето, на пример $Q = Q(\Delta h)$.

б) Со електричните мерења се овозможени пошироки можности. Кај овие инструменти се врши трансформација на неелектричната мерна големина во соодветна електрична големина, којашто може да се измери со аналоген или дигитален електричен инструмент. Во овие инструменти можат да се согледаат два основни составни дела: давач (сензор) и нормализатор на сигнал.

Давачот (сензор, претворач, transducer) е основен елемент на мерното коло. Во него се врши трансформација на мерената големина во некоја примарна електрична големина. Имено, промената на неелектричната мерна големина предизвикува промена на соодветна електрична големина; на пример, промена на: напон, струја, отпор, капацитет, индуктивност, фреквенција и т.н. Во зависност од која електрична големина се менува и сензорите добиле соодветни називи: напонски, капацитативен и т.н.

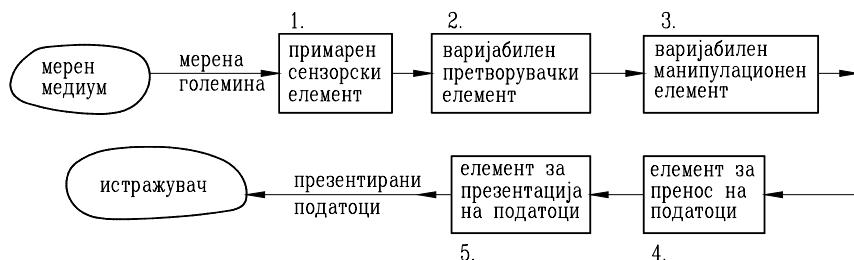
Често пати големината што се сака да се определи прво се трансформира во друга физичка големина, па потоа во соодветна електрична. На пример: мерење на проток преку диференцијален притисок, кој се претвора во електрична големина.

Нормализаторот на сигнал (мерен претворач, transmitter) врши обработка на примарната електрична големина и ја претвора во нормализирана електрична големина. Нормализаторот на сигнал содржи

во себе компоненти како што се: електрични уреди за засилување, конверзија на електричниот сигнал, линеаризација и т.н.

Како излезна големина од овие уреди се добива нормализиран електричен сигнал, најчесто во струен или напонски облик. Овој сигнал може директно да се отчитува на аналоген или дигитален инструмент, осцилоскоп, пишувач или компјутер.

Доколку се направи испитување на различни инструменти кои се наменети да извршуваат иста функција, без разлика дали се работи за инструменти за неелектрични или електрични мерења, се согледува, од аспект на генерализација, дека секој инструмент содржи функционални елементи кои вршат иста функција. Според тоа, во секој инструмент или мерен систем, од двата наведени вида а) и б), се содржат соодветни функционални елементи наменети да извршат определени функции. На сл. 3.2 е прикажана една таква шема на функционалните елементи, којашто би можела да биде корисна во полесното разбирање на функционирањето на кој било инструмент или во планирањето на конструирање нов инструмент или мерен систем.



Сл. 3.2 Шема на функционални елементи на инструмент или мерен систем

На прикажаната шема се содржани сите основни функции што се сметаат за потребни при описот на кој било инструмент. Примарниот сензор 1. прима енергија од мерениот медиум и произведува излезен сигнал. Важно е да се напомене дека инструментот секогаш одзема определена енергија од мерениот медиум, што резултира во соодветна грешка на измерената големина. Според тоа, мерената големина е секогаш нарушена од актот на мерењето. Реализација на перфектно мерење теоретски не е можна. Добрите инструменти се конструирани да го минимизираат овој ефект, меѓутоа определена грешка секогаш е присутна.

Излезната големина од 1. е некоја физичка големина, на пример поместување или електричен напон. За да може инструментот да ја изврши својата функција, често пати е потребно да се изврши конверзија на оваа големина во некоја попогодна, запазувајќи ја притоа информацијата содржана во оригиналниот сигнал. Елементот кој ја врши оваа функција е наречен варијабилен претворувачки (конверзионен) елемент (2.). Потребно е да се потенцира дека секој инструмент не мора секогаш да содржи варијабилен претворувачки елемент, но некои инструменти имаат по неколку. Шемата на сл. 3.2. претставува само блок дијаграм на функционалните елементи, а не на физичките елементи на инструментот. Тоа значи дека се можни различни комбинации; на пример, специфична компонента од хардверот на инструментот може да остава неколку од базичните функции.

За остварувањето на неговата задача, во инструментот често пати потребно е да се изврши манипулација во определена насока на сигналот од мерената големина. Под манипулација, овдека, специфично се подразбира промена во нумеричката вредност согласно со некое дефинирано правило, но зачувувајќи ја при тоа физичката природа на мерената големина. Елементот кој ја остварува оваа функција е наречен варијабилен манипулационен елемент (3.). Таков може да биде, на пример, електронскиот засилувач (amplifier) кој го прима сигналот со мала волтажа како инпут и произведува излезен сигнал (output), исто така, волтажа, но неколку пати посилен. И овдека не треба да буни редоследот даден во блок дијаграмот на сл. 3.2. Варијабилниот манипулатор не мора секогаш да ја следи компонентата 2.; може да се појави пред неа, или на некое друго место во веригата на функционални елементи, или воопшто да го нема.

Кога функционалните елементи на инструментот се фактички физички одвоени, станува потребно да се пренесат податоците од еден елемент до друг, којшто функција ја врши т.н. елемент за пренос на податоци (4.). Тоа може, наједноставно, да биде вратило со лежишта на инструментот, или, значително положено, телеметриски систем за пренос на сигнали од авион или ракета до соодветната опрема на земјата.

Понатаму, информацијата за мерената големина се презентира на истражувачот преку соодветен елемент за презентација на податоци (5.); тоа може да биде, на пример, нивото на столбот на течност во диференцијален манометар, стрелката на аналогниот инструмент, покажувањето на дисплејот на дигиталниот инструмент или осцилоскопот, податоците или дијаграмите добиени на принтерот од компјутерот.

Потребно е, уште еднаш, да се потенцира дека блок-дијаграмот на сл. 3.2 претставува само водилка за презентирање на концептот на функционалните елементи, а не физичка шема на генерализиран инструмент. Определен инструмент може да ги содржи базичните функции во кој било број или во кои било комбинации; тие не мора да се појавуваат по редоследот како на сл. 3.2, а определена физичка компонента може да врши неколку од основните функции.

3.6 ТОЧНОСТ И ГРЕШКИ ПРИ МЕРЕЊЕТО

Точноста на мерењето, во најопшти случај, може да се каже дека зависи од точноста на отчитувањето на скалата (дисплејот) на инструментот и од точноста со која покажува самиот инструмент.

Максималното отстапување што го покажува инструментот, заради сопствената неточност, се дефинира како негова грешка и може да се изрази во: соодветната мерна единица - апсолутна грешка, или во проценти, најчесто во однос на целиот опсег на покажување на инструментот - релативна грешка.

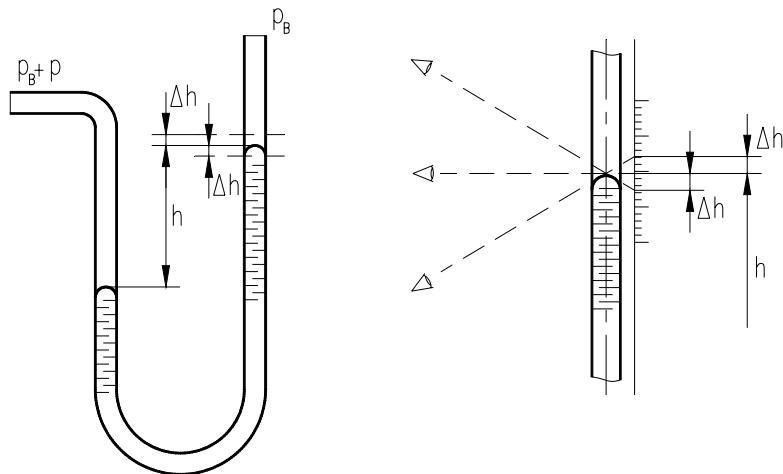
Во најопшти случај, грешката при мерењето се дефинира како разлика помеѓу добиената вредност со мерење и вистинската вредност на големината што се мери. Грешките на мерењето можат да се поделат на две основни групи: систематски и случајни грешки.

Систематските грешки, во најголема, мера потекнуваат од специфичните грешки на мерниот инструмент, неговото неисправно инсталирање и неправилното ракување со него. Самото име покажува дека овие грешки се повторуваат систематски и можат да се установат ако една иста големина се мери со разни методи, односно со замена на мерниот инструмент. Со исправно баждарење (калибрирање) на инструментот се настојува систематските грешки да се сведат на минимум.

Поврзано со систематската грешка може да се дефинира и т.н. карактеристика на инструментот. Карактеристиката на инструментот се добива со негово баждарење (калибрирање), односно со негово споредување со соодветен точен инструмент (наречен еталон, т.е. стандард) или со некој директен метод на мерење (на пример, калибрирање на манометар со пружина со помош на живин манометар). Притоа, за определен инструмент се вели дека е надежен доколку неговата карактеристика не се менува за што е можно по долго време на употреба.

Случајните грешки најчесто се од субјективна природа, односно од неточноста со која истражувачот отчитува од инструментот, како и од нарушувањата на процесот на мерење поради повремени грешки во инструментот (триење на лежишта, хистерезис и сл.) и од влијанието на условите на околната (промена на температурата, влажноста и сл.). Случајната грешка е со променлив знак и нејзината промена при последователно мерење на една иста големина подлегнува на статистичките законитости.

Типичен пример на случајна грешка е појавата на паралакса, односно непоклопување на рамнината на гледање со рамнината на индикаторот на инструментот (столбот на манометарска течност, стрелката на инструментот), види сл. 3.3. За примерот на сл. 3.3, при релативно точни мерења, оваа грешка може да изнесува $\Delta h = \pm 0,1$ mm, односно апсолутната грешка е 0,1 mm. Очигледно дека при поголема паралакса оваа грешка може да биде поголема. Релативната точност при отчитувањето ќе зависи од големината на прочитаната вредност; на пример, ако е прочитаната вредност $h = 100$ mm, релативната грешка ќе биде $\Delta h/h = \pm 0,001$ (односно 0,1%).



Сл. 3.3 Пример на случајна грешка при отчитување на столб на течност во диференцијален манометар

Зголемување на точноста на отчитување може да се постигне со смалување на случајните грешки преку:

- отстранување на грешката заради паралакса; со поставување на огледало зад индикаторот на инструментот, со примена на нониус, разни зголемувачи и сл.,
- смалување на осцилациите на индикаторот; со примена на разни придушувачи, електронски интегратори за усреднување на пулсирачката големина и сл.,
- земање предвид на промената на условите на околната; односно промена на мерената големина со промена на околните услови (температура, влажност и сл.),
- неколку последователни читања на мерената големина со истиот инструмент, или најдобро отчитовање на мерената големина од инструментот од повеќе лица.

Со цел да се извршат што е можно поточни мерења, како и да се зголеми валидноста на добиените резултати, потребно е да се определи границата на грешката на мерењето, што се остварува преку т.н. контрола на точноста на мерењето.

3.7 КОНТРОЛА НА ТОЧНОСТА НА МЕРЕЊЕТО

Контролата на точноста на некое мерење се врши со споредба на грешката при мерењето со некоја гранична вредност. Соодветно се дефинираат ограничувања на апсолутната или релативната (процентуалната) грешка.

Во ова поглавје, на едноставен начин се дефинирани одделни видови грешки за кои се смета дека се корисни при согледувањето на контролата на точноста на мерењето. Притоа, во најголема мера се користени заклучоците што можат да се извлечат од основите на теоријата на статистиката и веројатноста. Во инженерската практика е установено дека т.н. Гаусова распределба (Gauss) во значителна мера одговара на реалната распределба на определени статистички податоци, во конкретниот случај податоци од мерења на една иста големина во определен интервал. Густинската функција или распределба според Гаус се изразува со изразот:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}; \quad -\infty < x < +\infty \quad (3-1)$$

каде што се:

$$f(x) = \frac{(\text{број на отчитувања во интервал}) / (\text{вкупен број на отчитувања})}{\text{ширина на интервалот}}$$

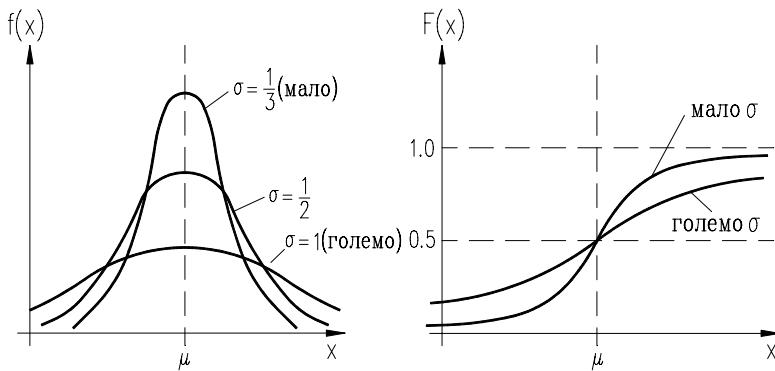
x - вредност на отчитувањето

σ - стандардна девијација (отстапување)

μ - средна вредност на мерната големина

На сл. 3.4 е прикажан изгледот на Гаусовата функција $f(x)$, за мала и голема вредност на σ . На истата слика е прикажана и промената на т.н. кумулативна дистрибуциона функција, $F(x)$, којашто претставува веројатност дека отчитувањето е помало од која и да било избрана вредност на x . Оваа функција е дадена со изразот:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (3-2)$$



Сл. 3.4 Гаусова распределба

Претпоставената вредност на μ најчесто се дава со символот \bar{x} , и претставува обична аритметичка средина. Гаус докажал дека аритметичката средина \bar{x} , на сите n извршени мерења на една иста големина x_i е најблиска до вистинската вредност на мерната големина M , ($M \approx \mu$), односно:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3-3)$$

Ако се претпостави дека точната мерна големина изнесува M , тогаш разликите:

$$x_i - M = \varepsilon_i \quad (3-4)$$

претставуваат вистински грешки на одделните мерења.

Бидејќи M не е можно точно да се определи, земајќи ја во обсир констатацијата кон изразот (3-1), приближните грешки на одделните мерења ќе бидат:

$$x_i - \bar{x} = \nu_i \quad (3-5)$$

Според Гаус стандардната девијација σ , види израз (3-1), одговара на т.н. средна грешка ε , којашто може да се определи со изразот:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(x_1 - M)^2 + (x_2 - M)^2 + \dots + (x_n - M)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (3-6)$$

Средната грешка може да се определи и преку приближните грешки ν_i , од изразот:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{n-1}} \quad (3-7)$$

Очигледно дека големините \bar{x} и ε ќе бидат подобрени со земање на повеќе отчитувања x_i .

Релативната средна грешка, односно процентуалната средна грешката се добива ако ε се подели со средната вредност, т.е.:

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (3-8)$$

Средната вредност \bar{x} , повеќе или помалку, се разликува од вистинската мерна големина M . Соодветно може да се дефинира и грешката на средната вредност, т.е стандардна девијација на средната вредност:

$$E = \bar{x} - M = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} \quad (3-9)$$

Со земање во обсир на изразите (3-6) и (3-7), грешката на средната вредност може да се изрази како:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}} \quad (3-10)$$

односно,

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}} \quad (3-11)$$

Процентуалната грешка на средната вредност може да се пресмета од изразот:

$$E_p = \frac{E}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (3-12)$$

Во зависност од важноста на квалитетот на експериментот, се даваат ограничувања за ε или E , или за двете. На пример, доколку е дадено ограничување за средната грешка ε_{max} , за мерењата велиме дека се квалитетно извршени ако ε , пресметано според изразот (3-7), го задоволува условот: $\varepsilon \leq \varepsilon_{max}$.

При лабораториски мерења, обично, границата на средната грешка изнесува $\varepsilon_{max} = \pm 1\%$, додека при мерења во погонски услови не би требало да ја помине вредноста од $\pm 5\%$.

Средна грешка при посредно мерење

Многу често, определен мерен систем се состои од верига на компоненти, од кои секоја има своја поединечна неточност. Во тој случај се поставува проблемот на определување на вкупната грешка, доколку се познати поединечните грешки. Сличен проблем се јавува во експеримети во кои се користат мерења од повеќе инструменти за да се пресмета определена големина. Со други зборови, ако се познати грешките на одделните инструменти, потребно е да се определи и грешката на пресметаната големина.

Нека се претпостави дека е потребно да се пресмета определена големина R , која е непозната функција од n независно променливи (поединечни мерења) $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$, т.е. :

$$R = R(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n) \quad (3-13)$$

Како типичен пример може да се земе определувањето на масен проток \dot{m} при струење на воздух низ придушувач. Масениот проток може да се прикаже со функционална зависност $\dot{m} = \dot{m}(p_1, \Delta p, T_1)$; каде се : p_1 и T_1 - апсолутен притисок и температура пред придушувачот, Δp - разлика на притисоци пред и зад придушувачот. Во овој случај, масениот проток се определува по посреден пат и, за да се дознае со колкава точност е пресметан \dot{m} , потребно е да се знаат средните грешки на наведените одделни мерени независно променливи $p_1, T_1, \Delta p$.

Во општ случај, за да се определи средната грешка на големината R , потребно е да се знаат средните грешки на одделните мерени големини ε_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Еден од најдобрите методи за определување на вкупната абсолютна средна грешка на функцијата R , ε_R , е оној според т.н формула на корен од „суми на квадрати“:

$$\varepsilon_R = \sqrt{\left(\varepsilon_1 \frac{\partial R}{\partial u_1} \right)^2 + \left(\varepsilon_2 \frac{\partial R}{\partial u_2} \right)^2 + \dots + \left(\varepsilon_n \frac{\partial R}{\partial u_n} \right)^2} \quad (3-14)$$

каде се: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ се абсолютни средни грешки на одделните мерени големини u_i .

Потребно е да се напомене дека, за случаи кога е потребна висока точност, покрај границата на средната грешка на резултатот $\varepsilon_{R_{max}}$, се задаваат и границите на средните грешки на одделните мерени големини $\varepsilon_{i_{max}}$. Соодветно пресметаните грешки се споредуваат со поставените граници.

3.8 ИЗВЕДУВАЊЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ

3.8.1 Отчитување на мерни големини

При претпоставка дека систематските грешки се сведени на минимум, посебно внимание треба да се обрне на субјективните грешки при отчитувањето на мерната големина од инструментот, односно истите да се сведат на што е можно помала мера. Во таа смисла потребно е:

- избегнување на појавата на паралакса, односно да се обезбеди окото и индикаторот (сказалка, ниво на манометарска течност и сл.) да лежат во рамнината нормална на скалата на инструментот. Примената на огледало зад индикаторот на инструментот, нониус и слично, овозможува значително избегнување на оваа појава;
- ублажување на влијанието на инерцијата и триењето во инструментот, што може да се постигне со благо потчукнување на истиот;
- мерењето да се изведе во што е можно пократко време, но притоа да се внимава на степенот на точност. Доколку се бара голема прецизност, треба да се извршат неколку последователни отчитувања, или отчитувања од две лица;
- пред мерењето, преку анализа на грешките, да се уочи кои големини најмногу влијаат на вкупниот резултат, за да може при прибирањето и обработката на податоците да се обрне посебно внимание на нив.

3.8.2 Калибрирање на инструментите

Со цел да се установат систематските грешки (види поглавје 3.6), потребно е инструментот да се калибрира (баждари); со што, доколку постои можност, тие да се избегнат, односно нивното влијание врз резултатот од мерењето да се сведе на минимум. За некои многу

прецизни мерења потребно е баждарење на инструментот пред и по експериментот.

Калибрирањето се изведува за инструменти со кои се мерат определени големини по посреден пат, од некои други големини. На пример: $v = v(\Delta p)$, $Q = Q(\Delta p)$, $T = T(U)$ (U - од галванометарот) и сл.

Инструментот се баждари со негово споредување со соодветен точен инструмент, наречен стандард или еталон, или со некој директен метод на мерење на мерната големина. Најчесто, еталоните што се користат во лабораториските истражувања претставуваат всушност секундарни стандарди, калибрirани со примарни еталони коишто се чуваат во државната управа за стандарди (разни тегови, мерила за должина, термометри и т.н.). Најпознатата светска управа за еталони и скапоцени материјали се наоѓа во Севр кај Париз.

Кога е можно, секогаш се настојува инструментите да се баждарат со т.н. директни методи. На пример: баждарење на манометар со пружина со помош на живин манометар, или со помош на стандардно мерило со тегови.

Како резултат на баждарењето се добива т.н. карактеристика на инструментот, којашто се претставува со соодветна калибрациона крива или, доколку е можно, со емпириски израз.

Калибрационата крива се добива со графичко претставување на резултатите добиени од баждарењето на инструментот. Притоа, секако дека е потребно што е можно повеќе мерни точки за целото мерно подрачје (односно дијапазон на баждарење).

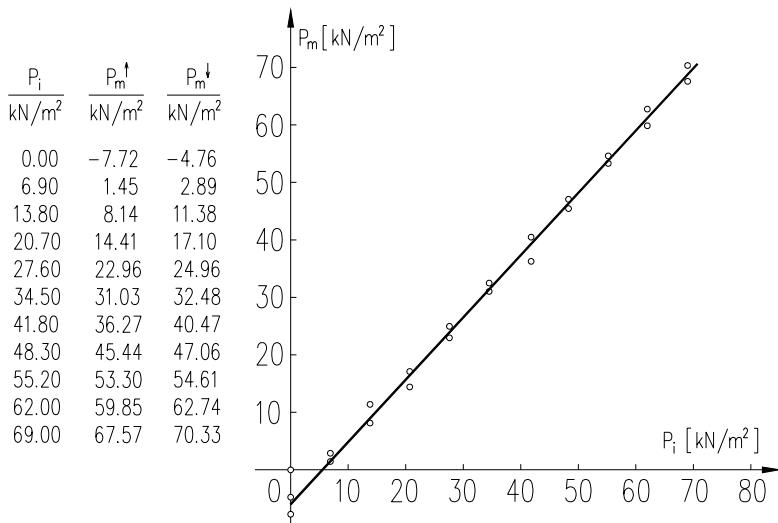
Калибрирањето се врши во две насоки; прво, во насока на зголемување на мерената големина, па потоа во спротивна насока смалување на мерената големина.

Баждарната крива се добива како средна вредност на добиените резултати, односно како интерполационна крива, за целото мерно подрачје. Интерполационата крива се добива како: а) аритметичка средина, ако мерењата се вршат при исти услови, и б) со примена на методот на најмали квадрати, ако мерењата се вршат при променлива состојба (на пример, променлива температура или влажност на околината и слично).

Овдека се дадени некои начелни примери за добивање калибрациони криви за определени инструменти. Подетално, кои инструменти можат да се користат за калибрирање, како и соодветните методологии на баждарење, ќе биде прикажано во соодветните поглавја за мерење на одделни големини.

Пример: Калибрирање на манометар со цевна пружина со помош на инструмент со тегови.

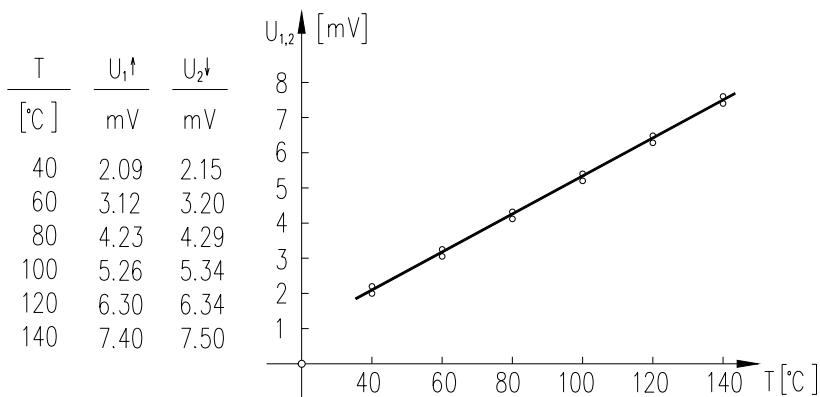
Еден од најчесто применуваните инструменти за мерење на притисок во погонски услови е т.н. манометар со цевна пружина, кој поради релативно големата систематска грешка, се баждари со попрецизен инструмент или со некој директен метод за мерење на притисок. Во овој случај, како стандард за калибрирање е применет инструмент со тегови (види поглавје 4.8). Во табелата на сл. 3.5 се дадени податоци од процедурата на баждарење: со p_m е означена излезната големина (функција), т.е. отчитување од инструментот што се калибрира; со p_i е означена влезната големина (аргумент), т.е. „вистинската големина“ отчитана од еталонот. Резултатите се прикажани за случај на зголемување на притисокот (p^{\uparrow}) и негово смалување (p_{\downarrow}). Калибрационата крива претставува права линија и е добиена со методот на најмали квадрати: $p_m = ap_i + b$.



Сл. 3.5 Калибрационна крива на манометар со цевна пружина

Пример: Баждарење на термоелемент.

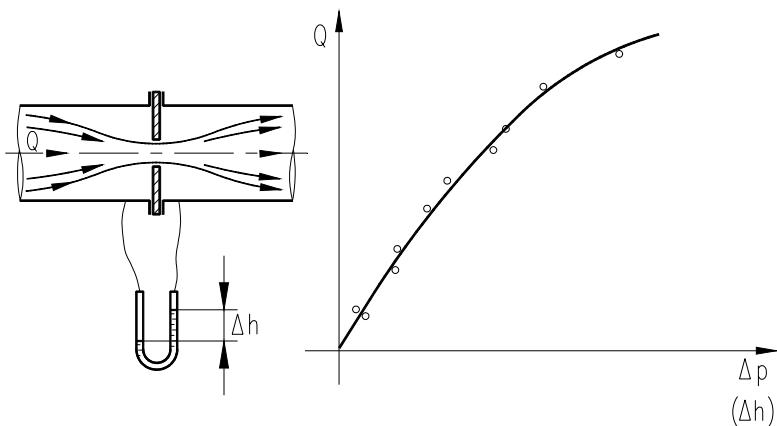
Во овој пример е прикажана баждарна крива добиена при баждарење на определен термопар (Cu-Constantan) со помош на живин термометар (претходно калибриран со примарен стандард). Со T ($^{\circ}\text{C}$) се означени вредностите отчитани од Hg-термометарот, а со U_1^{\uparrow} и U_2^{\downarrow} (mV) вредностите отчитани од галванометарот (прецизен волтметар), приклучен на термоелементот (термопарот). Баждарната крива претставува права добиена со методот на најмали квадрати.



Сл. 3.6 Калибрациона крива на термоелемент Cu-Const.

Пример: Калибрирање на мерна бленда.

Протокот се определува со мерна бленда преку падот на притисокот во диференцијалниот манометар приклучен на неа, $Q = Q(\Delta h)$. Баждарењето на ваквиот инструмент за мерење на проток на течност најдобро се врши со т.н. волуметрички метод, односно со мерење на волумен на сад исполнет со работната течност за единица време (види поглавје 6.1). На сл. 3.7 е прикажан обликот на зависноста $Q = Q(\Delta p)$.



Сл.3.7 Калибрационна крива на мерна бленда

Калибрационите криви служат директно за определување на точната вредност на мерената големина, или со нивна помош соодветно да се дотера скалата на инструментот. Доколку се работи за линеарна промена на калибрационата крива, доволно е да се дотера „нулата“ на инструментот; во спротивно, потребна е соодветна промена на неговата скала (на пример, од декадна во логаритамска). Кај електричните инструменти разни дотерувања се вршат со соодветни електронски кола (на пример, линеаризација и слично).

3.8.3 Прикажување на мерни резултати

Резултатите од експерименталната работа се прикажуваат во три основни облици; табеларно, графички и аналитички. Подолу се објаснети поединечно наведените облици.

a) Табеларен приказ

Определен струен феномен е карактеризиран со соодветна функционална зависност $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, односно во експлицитен облик $y = y(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$. При дефинирањето на обликов на функционалната зависност, несомнено дека, покрај познавањата на постојната теорија за истражуваниот феномен, потребно е да се применат и соодветните техники од димензионалната анализа, пред да се пристапи кон

приирање податоци во експериментот. Податоците од мерењата (независно променливите), како и пресметаната од нив функција (y), најнапред се прикажуваат во соодветна табела. За таа цел, обично, однапред се подготвуваат листови со табулација која овозможува нивна примена и за други истражувања. На сл. 3.8 е даден можен облик на еден таков лист за табеларен приказ на мерените и пресметаните големини; притоа, пред да се пристапи кон внесување на податоците, секако дека, потребно е да се внесат основните податоци за истражувањето: називот на проектот, предметот на истражувањето и т.н.

**ИНСТИТУТ ЗА ХИДРОТЕХНИКА, ПНЕВМАТИКА И
АВТОМАТИКА**
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

ПРОЕКТ: Истражување на атмосфера и нестапалацја лист:

ПРЕДМЕТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ: Карактеристика на име:
турбодвигача; Мерење на проток со Вентури метар дата:

Q	Δp	D/d	d	Re	p_v	p_i	H_m		

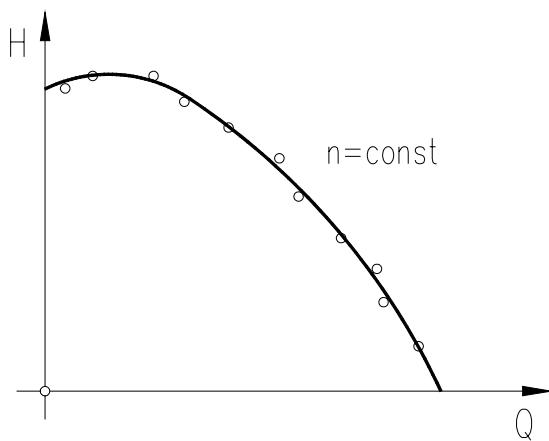
Сл. 3.8 Пример на лист за табеларен приказ

Доколку мерењата се вршат со современи инструменти за електрични мерења на неелектрични големини, истите можат да бидат поврзани со процесен компјутер во кој, со соодветна програма, може да се изврши обработка на податоците, а, како излез, на принтерот да се добие табеларен приказ во сакана форма.

б) Графички приказ

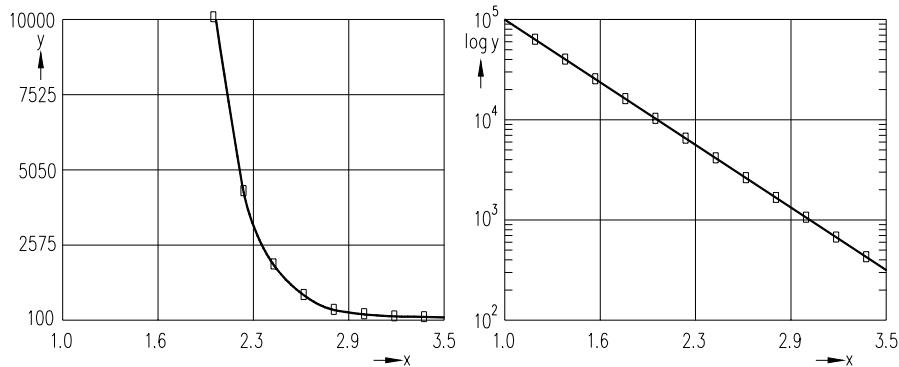
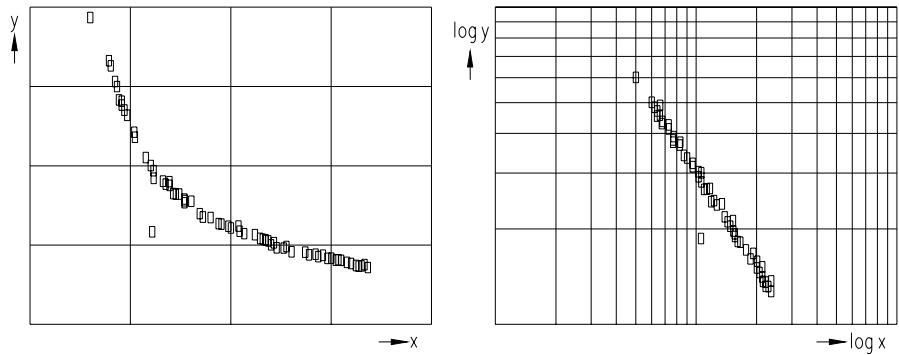
По оформувањето на табеларниот приказ, добиените резултати се анализираат со цел да се прикажат дијаграмски во најпогодна форма. Дијаграмскиот приказ овозможува, не само согледување на промената на одделните големини, туку и идеја за понатамошна обработка на резултатите, со цел да се дефинира соодветен емпирички израз.

На сл. 3.9 е прикажана карактеристика на турбопумпа којашто би се добила со внесување на резултатите добиени од табеларен приказ како на сл. 3.8.



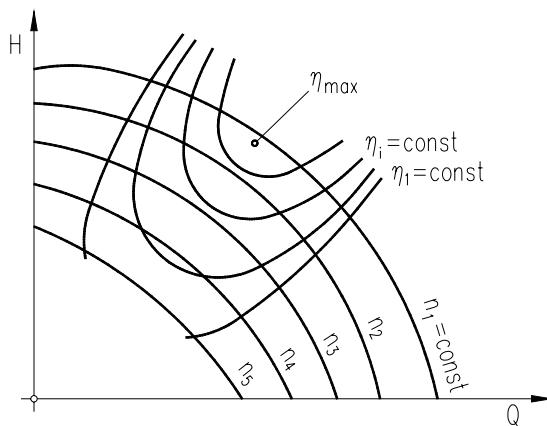
Сл. 3.9 Q - H крива на турбоумпа

Често пати со анализа може да се установи дека, наместо „нормална“ декадна поделба по координатните оски, може да се користи некоја друга (најчесто логаритамска). Типични примери на прикажување на определени резултати во декадна и соодветна логаритамско-декадна (log-dek), или логаритамско-логаритамска (log-log) распределба, можат да се видат на сл. 3.10 и сл. 3.11. Со цел да се поедностави внесувањето на точките во вакви дијаграми, постојат „готови“ хартии (слични на милиметарската хартија) во кои се испрафирани линии со соодветна логаритамска распределба.

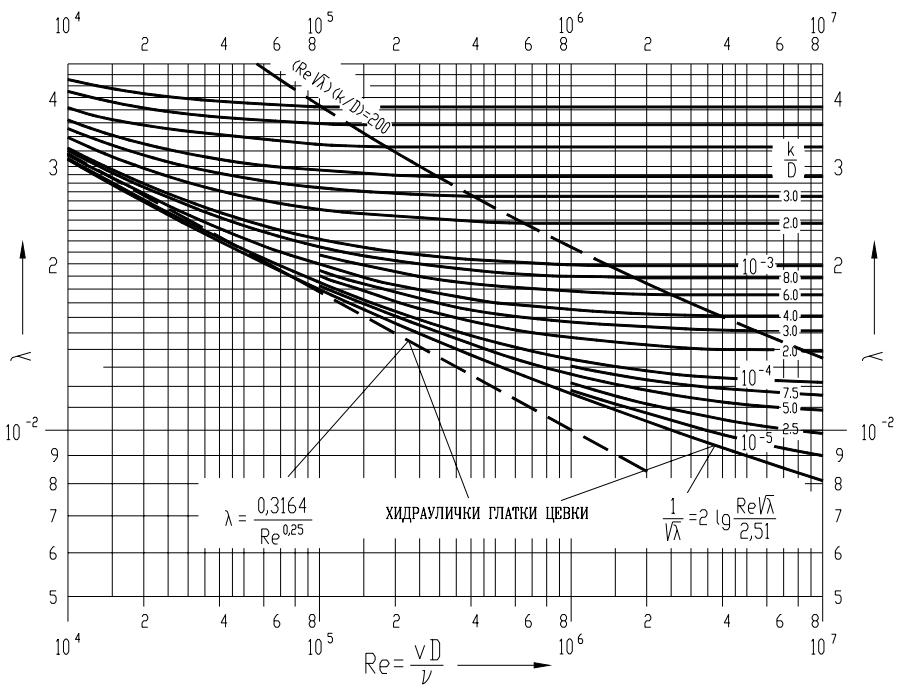
Сл. 3.10 Пример на *log-dek* подделбаСл. 3.11 Пример на *log-log* подделба

Обработката на прикажувањето на добиените резултати во дијаграмски облици како на сл. 3.10 и сл. 3.11, очигледно дека овозможува претставување на графици кои полесно можат да се опфатат со соодветна формула.

Во многу случаи определена функција зависи од повеќе независно променливи. Графичкиот приказ на промената на ваквата функција се дава во т.н. топографски дијаграми, во кои една од независно променливите се третира како аргумент, а другите како параметри. Типичен пример за ваков случај е топографскиот дијаграм на центрифугална пумпа $H = H(Q, n, \eta)$, види сл. 3.12. Овдека Q е претставен како аргумент, а n и η како параметри.



Сл. 3.12 Топографски дијаграм за центрифугална помпа



Сл. 3.13 Бездимензионални прикази

Групирањето на одделни големини во бездимензионални групи (види поглавје 1.4), со цел да се рационализира експерименталната работа, води и кон идејата за графичко презентирање на добиените резултати во бездимензионален облик (види сл. 3.13). Ваквиот приказ несомнено дека овозможува генерализација во примената на добиените резултати. Притоа, со примената на димензионалната анализа и теоријата на сличност се дефинираат соодветните бездимензионални броеви кои го карактеризираат струјниот процес.

в) Аналитички приказ

Тенденција во експерименталната анализа е добиените резултати да се прикажат, ако е можно, со општоважечка формула (емпириска формула). Најпогодно добиениот графички приказ се анализира и преку познавањата на теоријата на графови, се дефинира соодветен израз кој ќе ја следи промената на дијаграмски добиената функционална зависност.

Пример: Со обработка на резултатите од експерименталната работа добиен е дијаграм како на сл. 3.10. Овој log-dek приказ овозможува директно определување на функционалната зависност:

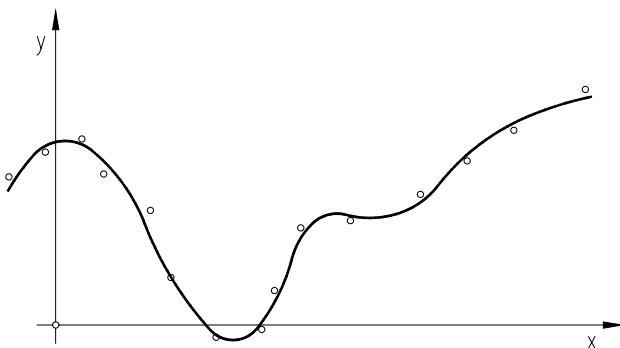
$$\log y = a + bx \quad (3-15)$$

За функционалната зависност ашто одговара на сл. 3.11 одговара изразот:

$$\log y = a + b \log x \quad (3-16)$$

Доколку резултатите беа прикажани дијаграмски, во форма како на сл. 3.14, очигледно дека промената на y би следела определен полином од најопшт опблик:

$$y = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + \cdots + a_{n+1} x^n \quad (3-17)$$



Сл. 3.14 Дијаграм на полиномска зависност

За определување на коефициентите a_i се користи некој од нумеричките методи за интерполяција (апроксимација на најмали квадрати, колокација и сл.). Најчесто се користат готови програми за оваа намена, кои, како потпрограми, се вклучуваат во главната програма за определување на коефициентите на полиномот. Притоа, како влезни податоци се внесуваат директно координатите на експериментално добиените точки.

Покрај полиномската зависност, во експерименталната анализа, многу често наоѓаат примена и облици на потенцијалните функции:

$$y = ax^b ; \quad y = ae^{bx} \quad (3-18)$$

што не значи дека е можна примена и на некоја друга функционална зависност.

При дефинирањето на функционалните зависности, секако, треба да се води сметка за што е можно поголема генерализација. Притоа, во голема мера помага примената на димензионалната анализа.

3.9 КОМПЈУТЕРИЗИРАНИ СИСТЕМИ ЗА ОБРАБОТКА И ПРЕЗЕНТАЦИЈА НА ПОДАТОЦИ

3.9.1 Аквизиција на податоци

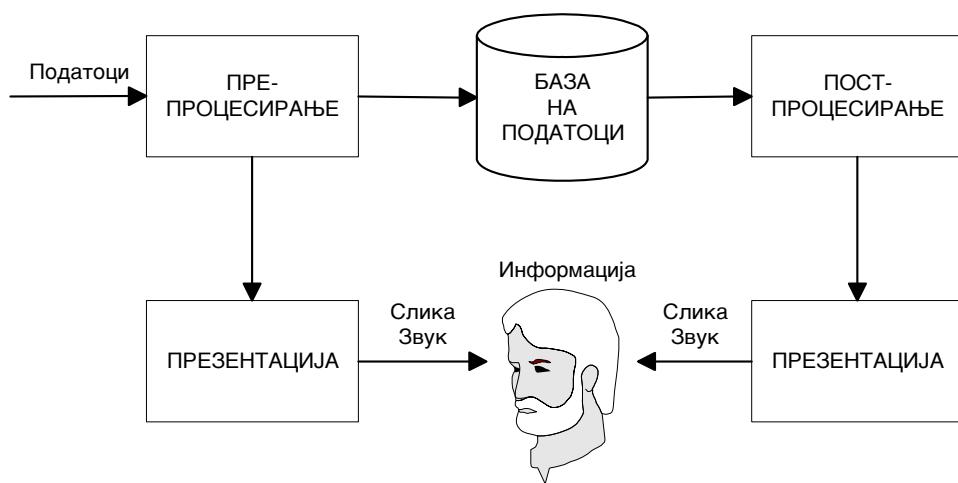
Аквизиција (лат. *Acquisitio*) во основа претставува поим што дефинира добивање, приирање или акумулирање на нешто. Според тоа, аквизицијата на податоци би можела да се дефинира како активност на приирање и обработка на податоци за процесот кој се анализира, со цел за негово запознавање и понатамошна употреба на добиените информации (резултати). Се среќава во сите три наведени општи начини на примена на мерната инструментација:

- предупредување на процеси и операции (мониторинг)
- контрола на процеси и операции
- експериментална инженерска анализа

Всушност аквизицијата на податоци ја претставува функцијата на еден мерен систем за автоматското приирање, обработка и архивирање на податоци.

3.9.2 Обработка и презентација на податоци

Системите за обработка и презентација на податоци (мониторинг на податоци) служат за следење на условите што владеат во процесите на некој систем. Според досега изложеното, за да можат добиените податоци да се претворат во корисна информација за човекот кој го следи процесот, потребно е тие да се обработат и презентираат на погоден начин (Сл. 3.15).



Сл. 3.15 Блок дијаграм на преобразување на податоците во корисна информација

Обработката и презентацијата на податоците може да се изведува во текот на приирањето на податоците (во реално време) и после архивирањето на податоците (по потреба).

Типичен пример претставува обработката (процесирањето) на податоците при електричните мерења, која се изведува со соодветни нумерички методи за:

- Дигитално филтрирање на сигналот,
- Корекција на податоците од грешки,
- Линеаризација на сигналот кој се добива од сензори со нелинеарна карактеристика,
- Компензација на условите во околината како што се температура и влажност,
- Компресија на податоците,
- Фрекфентна анализа на сигналот,
- Статистичка анализа на податоците.

Горе наведените обработки обично се прават во релно време. За посложени математички анализи (за кои е потребно повеќе процесорско време), како и информации кои не се потребни во текот на прибирање на податоците, обработката на податоци се изведува после архивирањето во базата на податоци (пост-процесирање).

Дефинираните основни облици за прикажување на мерните резултати и податоци (табеларно, графички и аналитички), види поглавје 3.8.3, можат да се презентираат на различни начини. Во основа, може да се констатира дека презентацијата на податоците може да се изведе со помош на звук или слика.

Звучните сигнали најчесто се користат за означување на алармантни состојби.

За приказ на поголем број податоци се користат техники за визуализација на податоците, со кои се прикажуваат нумеричките и статистичките податоци во графичка форма. Со прикажување на слика од податоците и нивните врски, визуелизацијата на податоци овозможува полесно разбирање на информацијата, која тешко се прима со приказ во нумерички облик, а исто така овозможува и понатамошна нивна обработка со цел да се дефинира соодветен емпириски израз (види поглавје 3.8.3).

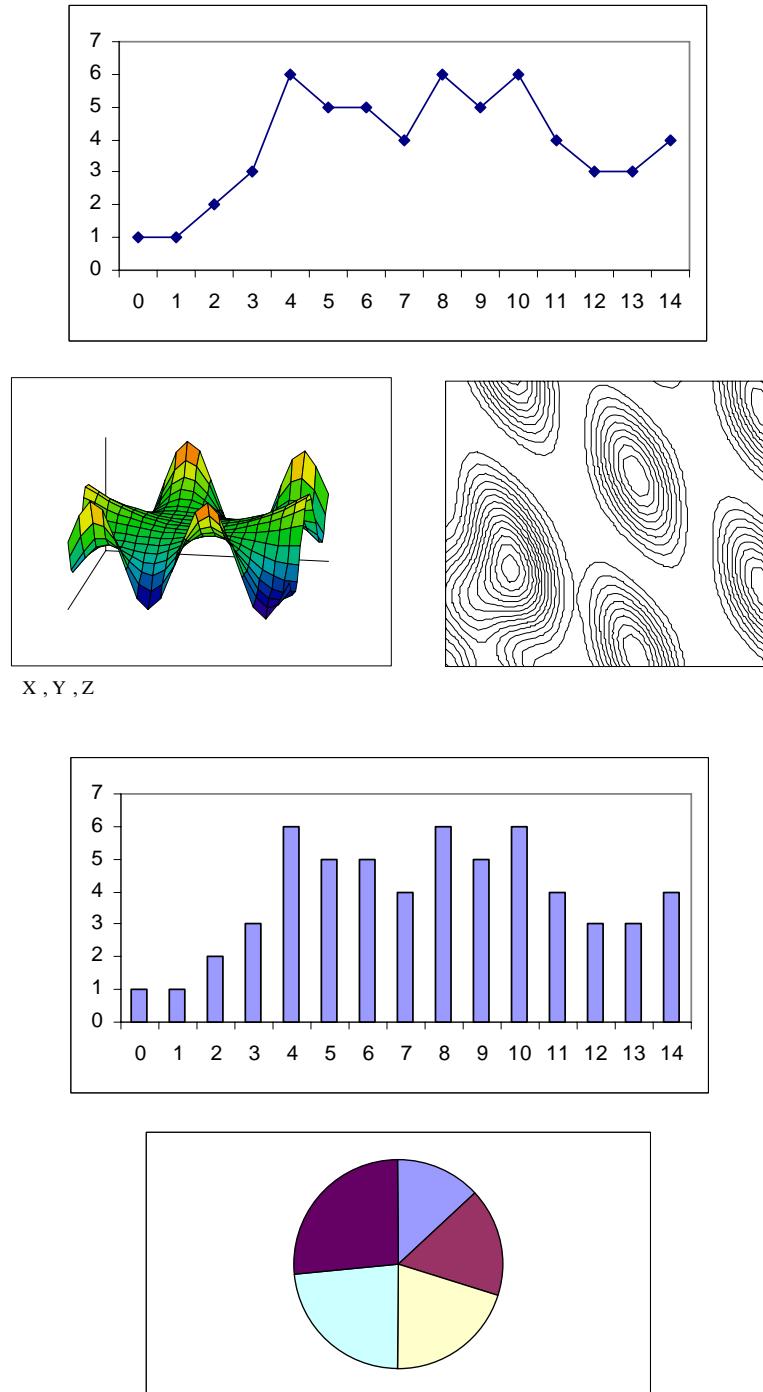
На Сл. 3.16 покажани се некои начини на визуелизација на податоци, содржани во стандардните компјутерски софтвери за обработка и презентација на податоци (на пример, Excel, MathLab, MathCad).

За презентација на поголем број параметри од некој процес и едноставно следење на целиот процес, се користат синоптички шеми. На синоптичката шема е прикажан процесот кој треба да се следи и соодветните прибрани и обработени параметри. Параметрите се прикажуваат на начин близок на човекот (со графички објекти од реалниот свет) и користење на визуелните техники со анимација, промена на боја, интензитет, звук и др. Синоптичката шема треба да обезбеди едноставно прикажување на тенденцијата на параметрите од системот и алармирање при гранични вредности на истите; значи во себе содржи презентација со звук и со слика.

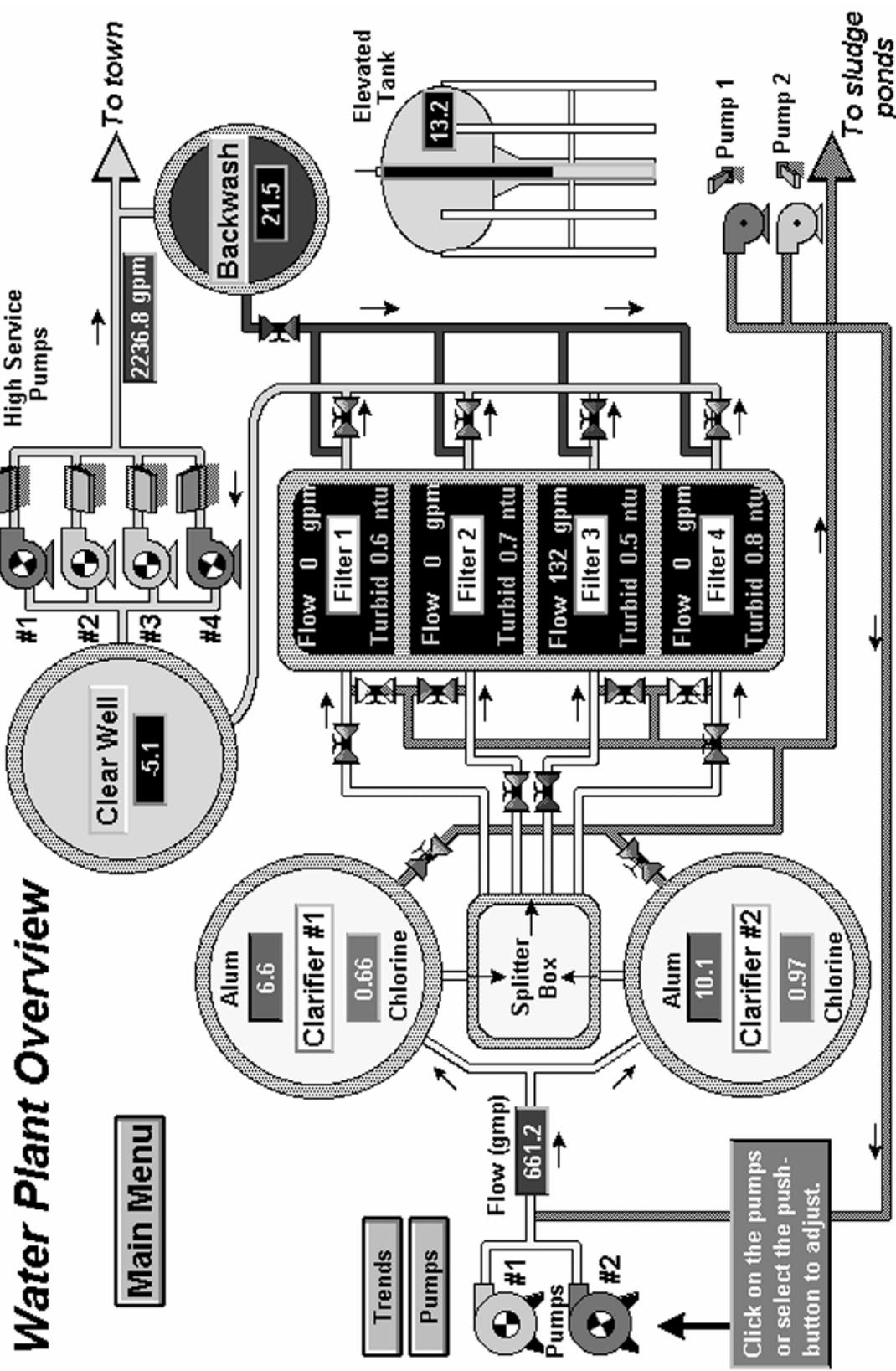
Наместо старите облици на гломазни и скапи синоптички табли, со развојот на компјутерската техника, како и софистицираните графички софтвери, реализирани се соодветни апликации, со кои покрај стандардната улога за презентација на промената на поедините големини, овозможена е контрола на процесот. За таа цел, се додаваат графички симболи за контрола, во облик препознатлив за човекот (прекинувачи, потенциометри и др.), со што се постигнува едноставно управување со процесот од едно место. Комуникацијата на човекот со графичките алати, претставени на компјутерскиот монитор и препознатливи од управувањето со соодветната управувана машина или процес, се нарекува HMI (Human Machine Interface). На Сл. 3.17 покажан е пример на визуелизација на податоците со синоптичка шема за водоводна

инсталација, врз основа на софтверот за индустриска автоматизација Lookout на фирмата National Instruments.

SCADA = *Supervisory Control And Data Acquisition* (Сл. 3.17).



Сл. 3.16 Облици на графички приказ на податоци



Сл. 3.17 Синоптичка шема на водоводна инсталација (Lookout SCADA)

Како што може да се види од Сл. 3.17, на синоптичката шема, која се добива на мониторот на компјутерот , прикажани се со соодветни симболи сите потребни составни елементи и уреди на една водоводна инсталација: пумпи, резервоари,

вентили, филтри, прекинувачи и т.н. Покрај секоја компонента, на посебни индикатори (display-и) дадени се вредностите на соодветната големина во дадениот момент; на пример: проток на чиста вода, ниво-а во резервоарите, количина на различни адитиви, состојби на филтрирање и друго. Со едноставно кликување со курсерот врз било која компонента, се добиваат дополнителни податоци за истата; на пример, за пумпата, основните параметри (проток, број на вртежи и слично), како и можностите за нивна регулација. Со кликување на соодветните копчиња за детална презентација на промената на определени големини (trends), се добиваат деталните дијаграми на промена на соодветните големини (на пример, протоците) во системот со текот на времето. На шемата прикажани се и симболи на соодветни прекинувачи; со едноставно кликување со курсерот, овозможено е нивно вклучување и исклучување. Функционирањето на овој софтвер, како и синоптичката шема добиена со него, може да се согледа од tutorial примерите за софтверот Lookout.

За да може да се реализира една таква синоптичка шема, како и управувањето на соодветниот процес преку неа, секако дека е потребно компјутерот да биде поврзан со сензорите/мерните инструменти за поедините мерни големини, преку адекватни хардвер-ски компоненти за аквизиција и процесирање на измерените податоци (види Сл. 3.18).

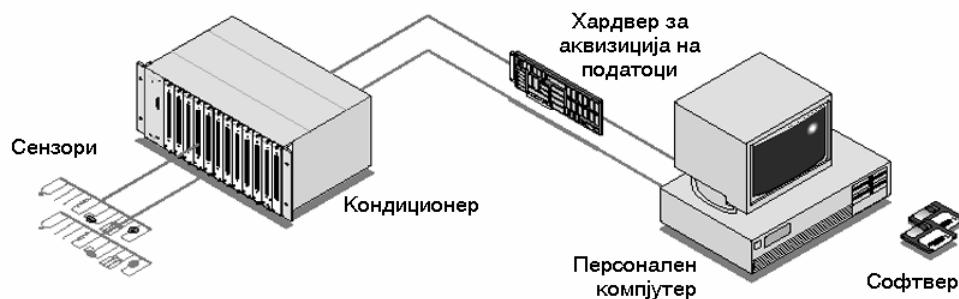
3.9.3 Компјутеризиран аквизиционен систем

Денес, повеќето научници и инженери користат компјутери поврзани со аквизиционен хардвер за аквизиција на податоци при разни лабораториски испитувања, мерни тестирања и автоматизација во индустриската. Овие системи може да бидат изведени како специјализирани за одредена област на примена, или како отворени системи со можност за примена во различни услови. Заради својата флексибилност во апликацијата за различни намени, отворените системи нашле поширока примена. Еден отворен компјутеризиран аквизиционен систем во основа се состои од следниве компоненти(Сл. 3.18):

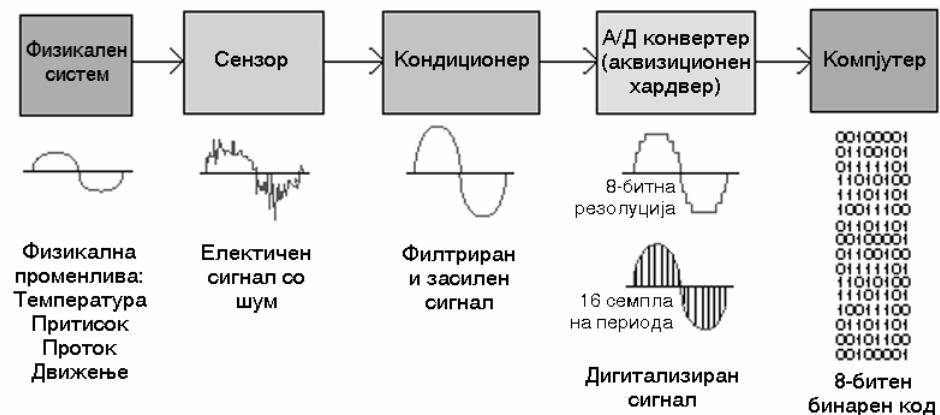
- Сензори
- Хардвер за кондиционирање на сигналот
- Аквизиционен хардвер
- Персонален компјутер
- Софтвер

Главната трансформација на сигналите, во отворениот компјутеризиран аквизиционен систем е прикажана на Сл. 3.19.

Поради широката прифатеност на овој пристап, во последната деветта глава, ќе бидат подетално објаснети компонентите и функциите на овој систем, откако претходно ќе бидат изложени мерните методи и инструменти за поедините струјни големини.



Сл. 3.18 Типичен компјутеризиран аквизиционен систем



Сл. 3.19 Трансформација на сигналите во отворен компјутеризиран аквизиционен систем

3.9.4 Софтвер за приирање и обработка на податоци

Со цел да се оствари што е можно поголема автоматизација при аквизицијата на податоците, издвоен е посебен сегмент во компјутерската индустриса кој се занимава со изработка на софтвери за автоматизирано приирање на податоци - софтвер за аквизиција на податоци или скратено аквизиционен софтвер (англиски, DAQ Software, односно - Data Acquisition Software).

Современите аквизициони софтвери претставуваат многу моќни алатки, кои без проблеми можат да ги употребуваат и луѓе кој не се експерти во оваа област. Најновите софтверски пакети можат симултано да обавуваат повеќе аквизициони функции и тоа со многу високи перформанси, дури и во опкружувања (на пример, оперативниот систем Windows) кои не се посебно погодни при инсистирање на брзина.

Аквизициониот софтвер се користи во апликации како што се: автоматизација на производни процеси, мониторинг и контрола на процеси, експериментална анализа итн. Аквизициониот софтвер мора да задоволи некои основни барања, за да може да се вброи во оваа софтверска категорија.

Пред се, потребно е да има можност за контрола на хардверот за аналогна/дигитална (A/D и D/A) конверзија во полна мерка. Односно да се обезбеди

висока флексибилност кај процедурите кои вршат идентификација и иницијализација на приклучениот хардвер. Цел е корисникот да не мора да се грижи за хардверот за конверзија на сигналот, туку своите напори да ги насочи на добивање на саканите податоци и заклучоци кои следат од нив.

Визуелизацијата на сигналот треба да овозможи приказ на сигналот на начин близок на корисникот, како и да биде погодна за прелиминарна проценка на квалитетот на прибраните податоци.

Срцето на секој интелегентен уред е алгоритмот кој дозволува издвојување на саканите информации од податоците добиени со аквизиција. Со тоа, процедурите, кои даваат можност за процесирање на сигналите добиени со аквизицијата, преставуваат основа на софтверските пакети за аквизиција на податоци.

Приказот на прибраните и обработени информации треба да се организира така, да бараната информација се стави брзо и јасно на корисникот на располагање. При тоа, се користат разни техники како што се алфанимерички приказ, графички приказ и сл.

Многу важна особина, што аквизициониот софтвер треба да ја има, е можноста за меморирање на прибраните податоци од соодветниот процес. Ваквиот пристап овозможува дополнително процесирање на сигналот (надвор од реалното време), што е неминовно за понатамошна опсежна анализа на податоците.

Треба да се спомене и важноста на постоење на интерактивен систем, со кој се овозможува едноставно користење на аквизициониот софтвер.

Во литературата од оваа област се среќаваат пет основни подкатегории на аквизиционен софтвер, од кои секоја има свои специфични корисници и ситуации во кои се применува: Turnkey, јазичен интерфејс, софтверските пакети со додатоци, софтверски контролни модули, изворен-код софтверски пакети, софтвер за виртуелна инструмента-ција.

Во деветта глава дадени се основните карактеристики на наведените подкатегории на DAQ софтер, а овдека накусо се претставени два преставника на често применувани аквизициони софтвери на фирмата National Instruments: Measure и LabView.

Measure – Софтвер за аквизиција на податоци и управување на инструменти со помош на Microsoft Excel

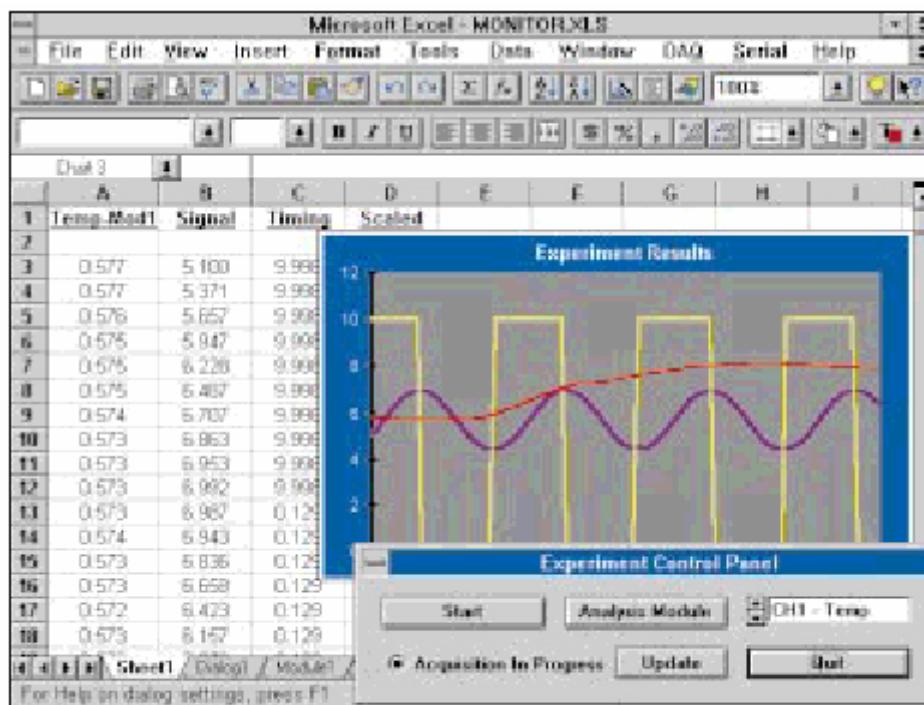
Софтверот Measure спаѓа во подкатегоријата "Софтверските пакети со додатоци", којшто е изведен да го дополнуваат познатиот софтвер од општа примена Excel со способност за аквизиција на податоци. Во овој случај, корисникот е поштеден од програмирање во некој програмски јазик, работи во познат програмски пакет од општа примена и при тоа има можност за обработка и презентирање на податоците добиени со аквизицијата.

Со овој софтвер се овозможува директна аквизиција на податоци и управување на инструменти со Microsoft Excel. При тоа, сензорите се поврзуваат со компјутерот (види Сл. 3.18) со употреба на стандарден DAQ хардвер, GPIB инструменти (инструменти со меѓуспојна магистрала за генерална намена - General Purpose Interface Bus Instruments) и сериски инструменти. Со тоа, овозможено е спроведување и обработка на аналогни I/O сигнали со директно вклучување (plug-in) DAQ картички, PCMCIA DAQCards, DAQ производи со паралелни приклучоци, било кој сериски или GPIB контролиран инструмент.

Excel табеларниот лист е еден од најшироко употребуваните софтвер пакети за архивирање на истражувачки податоци, анализа и обработка на експериментални резултати, цртање на дијаграми на трендовите на некој процес, проучување на проектни спецификации и друго.

Со користењето на софтерот Measure, научниците и инжењерите можат понатаму да ја зголемат својата продуктивност преку интегрирање на нивните захтеви, за прибирање и обработка на податоци, директно во Excel работните листови (табели), види *Сл. 3.20*.

Внесувањето на истражувачките резултати или процесирањето на податоците, во класичните Excel работни листови, може да биде тешка и скапа работа. Рачното внесување претставува операција поврзана со потребно време и грешки, како и познавања на соодветни програми за понатамошна обработка на податоците и резултатите.



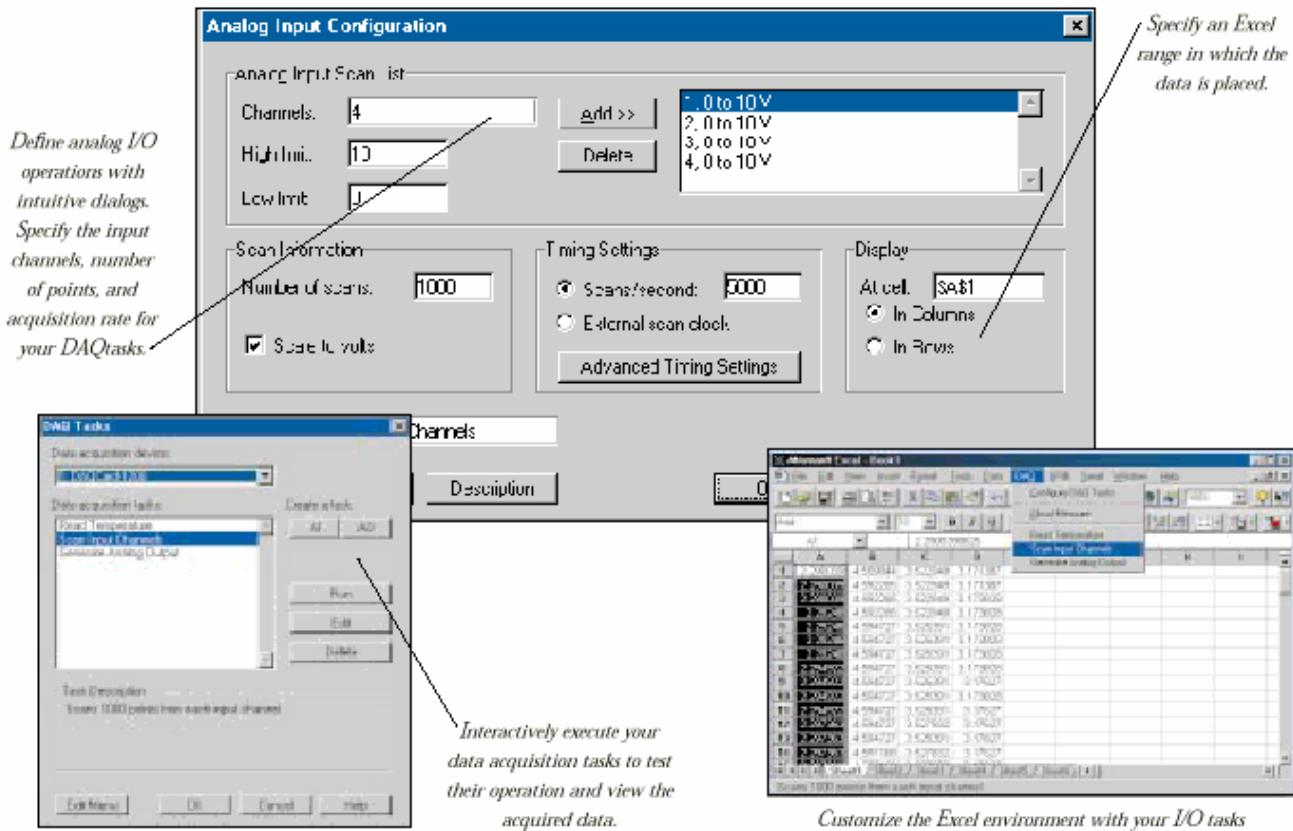
Acquire data and control instruments from Microsoft Excel using Measure.

Сл. 3.20 Обработкa на податоци и контролa на инструменти со Microsoft Excel и Measure софтверот

Measure ги заменува овие помалку ефикасни методи за внесување на податоци во работните листови со дополнителни menu-а ("копчиња") во лентата за алатки, види *Сл. 3.20*:

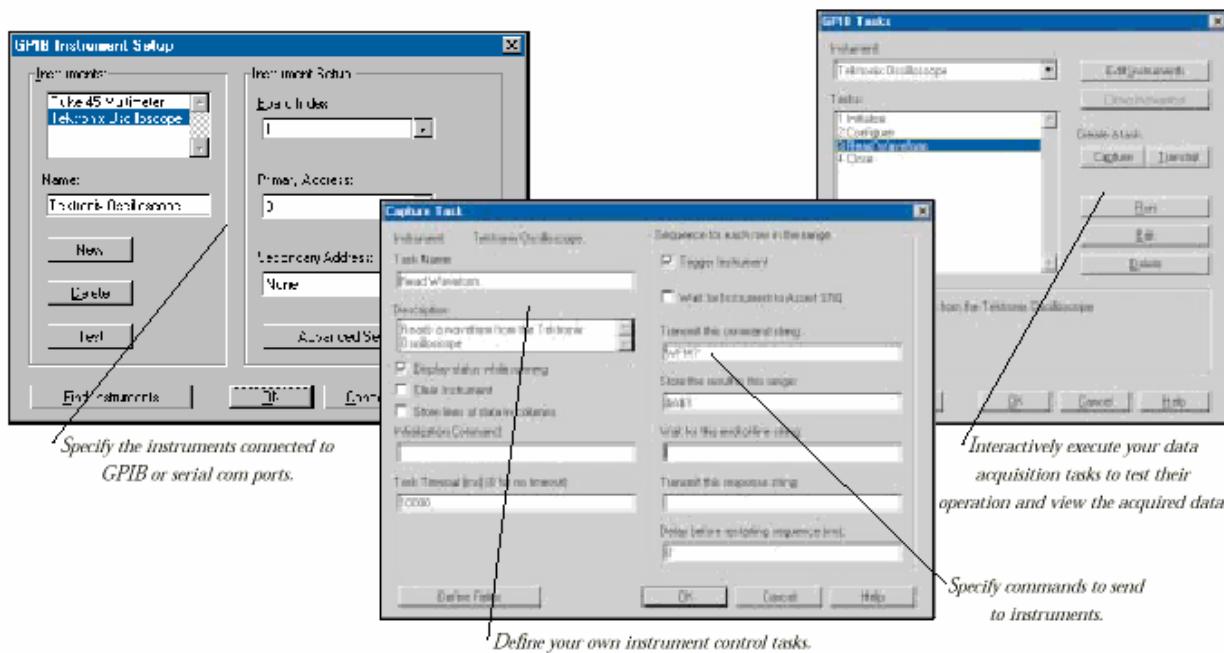
- DAQ Add-in (DAQ додаток) за обработка на аналогни сигнали, при што обработените податоци директно се сместуваат во специфицираните ќелии на Excel работниот лист. Конфигурирањето на аналогните I/O барања се реализира преку DAQ Menu-то. Со кликнување на DAQ додаток, се отвораат посебни "пенџерчиња" (dialog windows) во кои се внесуваат карактеристиките за влезната (input) и излезната (output) конфигурација - види *Сл. 3.21*; односно, податоци за вградениот DAQ хардвер и потребната обработка на податоците и презентација на

результатите. Откако Measure ќе ги смести податоците во работниот лист (Сл. 3.20), со помош на стандардната примена на Excel софтверот, може да се врши понатамошна презентација и анализа на добиените резултати и креирање на извештаи.



Сл. 3.21 Основни диалог прозорци на DAQ Menu

- Serial Add-in (Serial додаток) за контрола на инструменти и прибирање (обработка) на податоци добиени преку приклучениот хардвер во компјутерскиот комуникациски приклучок (port). На сличен начин како во претходно описаната употреба на DAQ Add-in, со кликнување на Serial Menu-то се отвораат dialog windows во кои се внесуваат потребните податоци за конфигурирање на соодветните инструменти, захтевите за прибирање и обработка на податоци, презентација на резултати и друго - види Сл. 3.22. Како и во претходниот случај, Measure ќе ги сместува податоците во работниот лист (Сл. 3.20), после што може да се пристапи кон стандардната примена на Excel софтверот за понатамошна презентација и анализа на добиените резултати и креирање на извештаи.



Сл. 3.22 Основни диалог јзозорци на *Serial Menu*

LabView за виртуелна инструментација

Софтверот за виртуелна инструментација дозволува развој на виртуелни инструменти кои најдобро се вклопуваат во специфичната апликација за прибирање на податоци. Хардверска подршка на оваа идеа се бројните аквизициони картички кои се монтираат во слотовите на персоналните компјутери.

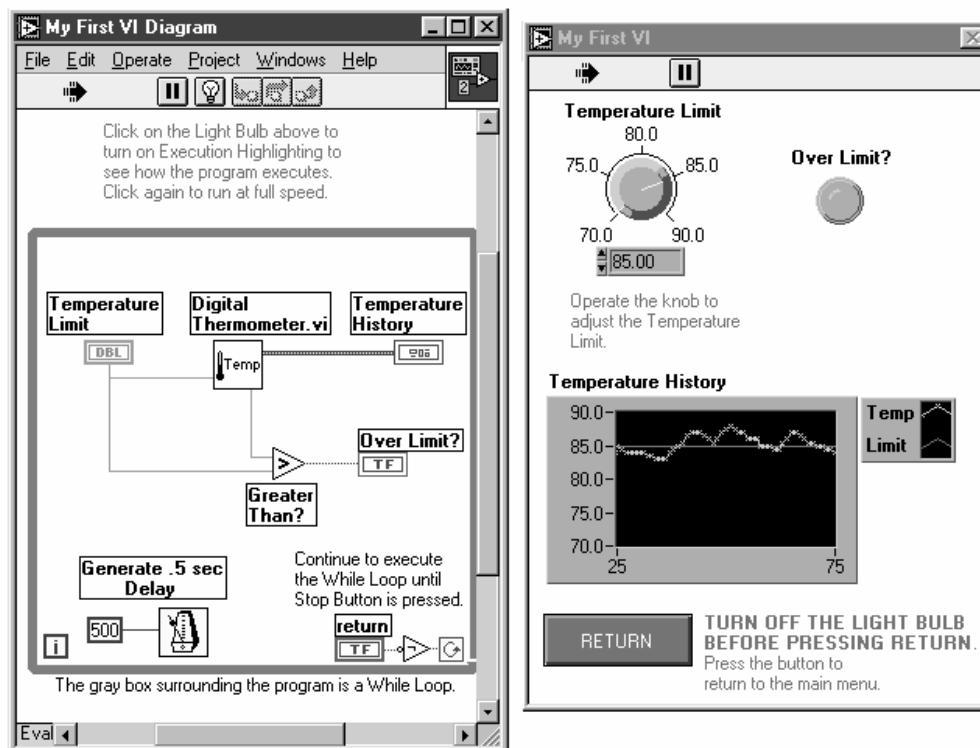
Традиционалните инструменти претставуваат посебни единици кои се одликуваат со можност за приклучување на влезно / излезни сигнали, имаат фиксен кориснички интерфејс, а внатре во уредот специјализирана аналогна и дигитална електроника ги прибира податоците од процесот, ги анализира и на крај ги презентира на корисникот во погодна форма. Проблемот е во тоа што уредот, кога еднаш ќе се направи, е неприлагодлив за различни потреби, иако тоа е често потребно.

Спротивно од традиционалните, виртуелните (замислени) уреди ја користат отворената архитектура на персоналните компјутери, која е прерасната во индустриски стандард, и во потполност ја заменува целата комплицирана електроника на класичните инструменти со електрониката на аквизиционите картички приклучени во слотовите од персоналните компјутери, додека процесорската моќ на специјализираните микроконтролери ја превзема централната процесорска единица (CPU) на персоналниот компјутер.

На тој начин, на располагање се мемориските ресурси на персоналниот компјутер, видео системот за презентација на корисничкиот интерфејс, магнетните дискови за трајно меморирање на прибериените информации и едноставно кажано се што денешните моќни персонални компјутери овозможуваат (мултимедиа, умрежување и др.). На овој начин се постига целта да функционалноста на инструментот и неговиот кориснички интерфејс бидат потполно подложни на контрола од проектантот на апликацијата, а да при тоа цената на ваков уред е многу поприфатлива од збирот на специјализираните инструменти кои треба да се набават за секоја засебна примена.

Типичен претставник на софтверите за вируелна инструментација е софтверот LabView на фирмата National Instruments. Програмирањето на виртуелните инструменти со овој софтвер, во основа, се врши со графички програмски јазици (во графичка околина). Вируелениот инструмент во основа се содржи од два основни дела: контролен панел и блок дијаграм (Сл. 3.23). Блок дијаграмот претставува изворен код, а предниот (контролниот) панел интерфејс на корисникот.

Се селектираат икони од библиотека на икони, каде секоја една икона претставува функција и се распоредуваат на работната површина која претставува блок дијаграм на виртуелниот инструмент (Сл. 3.23). Секоја икона (функционален елемент) има карактеристични параметри кои се подесуваат после поставување на иконата. Селектирањето на влезен канал се прави со едноставен избор на иконата "канали" и подесување на нејзините параметри на саканиот влез. Протокот на сигнали и податоци се прави едноставно со поврзување на иконите во саканиот логички ред. Овие врски се покажуваат визуелно на блок дијаграмот од виртуелниот инструмент.



Сл. 3.23 Креирање на виртуелен инструмент со софтверот LabView

Со креирањето на блок дијаграмот, содветно се креира и предниот панел, којшто се покажува на компјутерскиот монитор со сите функции за контрола, обработка и презентација на податоци/резултати како кај реален инструмент или мерниот систем.

На тој начин, со примената на LabView софтверот, компјутерот се претвора во комплетен мерен инструмент/систем, односно мониторот добива изглед на мерен инструмент/систем; а подесувањето на контролите и функциите се реализира со помош на "глувчето", тастатурата или со допир на еcranот.

Функционирањето на софтверите Measure и LabView може да се согледа од соодветните нагледни примери за обука (tutorials) кои ќе бидат објаснети на практичните вежби.

ГЛАВА ЧЕТВРТА

4. МЕРЕЊЕ НА ПРИТИСОК

При изнесувањето на основните поставки за примена на дименсиската анализа (глава 1.), во повеќето случаи беше истакнато дека притисокот не е фундаментална големина, односно претставува изведена големина од сила и површина, коишто, од своја страна, се изведуваат од масата, должината и времето (M,L,T) - како основни големини.

Основните дефиниции за притисокот можат да се извлечат од фундаменталните предмети, како што е механиката на флуидите, а овдека ќе бидат дадени само определени врски коишто претставуваат основа за подобро разбирање на соодветните мерни методи и инструменти. Притоа, поголемо внимание ќе биде дадено на мерење на притисок при струење на флуид, отколку на мерење на наметнат притисок врз флуид во мирување.

Методите на калибраирање на постојните инструменти, како и објаснувањето на најосновните „стандарди“ (еталони), ќе бидат изложени после разработката на одделните групи инструменти и методи на мерење.

Познати се димензионалните формули на притисокот во F,L,T,θ и M,L,T,θ системите на фундаментални димензии:

$$[p] = ML^{-1}T^{-2} = FL^{-2}$$
.

Во меѓународниот SI систем, како основна мерна единица за притисок е дефинирана е „Pascal“ (Pa):

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2,$$

а дозволена е и примената на мерната единица „bar“:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}.$$

Во литературата сè уште може да се сретне и стариот т.н. „технички систем“, во којшто за притисок се применуваат следниве мерни единици:

$$1 \text{ kp/m}^2 \approx 1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9,81 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2 = 0,981 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1,01325 \text{ bar}$$

$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$$

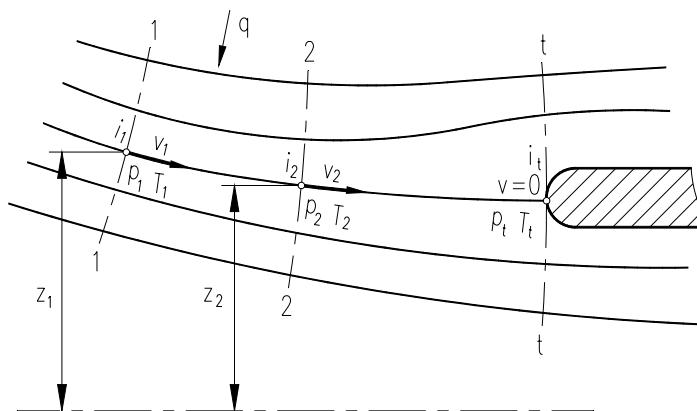
Во англосаксонскиот систем на мерни единици се среќаваат:

$$1 \text{ pound/sq.in. (p.s.i)} = 703,1 \text{ kp/m}^2 = 6,895 \text{ kN/m}^2$$

$$1 \text{ pound/sq.ft. (p.s.ft.)} = 4,882 \text{ kp/m}^2 = 47,88 \text{ N/m}^2$$

4.1 СТРУЕН И ТОТАЛЕН (ЗАПИРЕН) ПРИТИСОК

Струјниот притисок, или притисок при струење на флуид, претставува вистински притисок во некој струен медиум и обично се означува со p . Во практиката, често пати струјниот притисок се нарекува и „статички“, но пожелно е да се избегнува овој назив, за да не би се правело збрка со запирниот притисок, како и алузија на хидростатички феномен.



Сл. 4.1 Трансформација на кинетичка во притиска енергија

Запирен или тотален притисок p_t , претставува притисок кој одговара на притисок на флуид при целосно запирање на неговото струење без губиток на енергија, при што кинетичката енергија во целост се трансформира во притисна (види сл. 4.1).

Кинетичката енергија на флуидот, изразена во притисни единици, често се нарекува динамички притисок.

За струење на некомпресибilen флуид, доколку се занемарат хидрауличните загуби, познат е обликот на Бернулиевата (Bernoulli) равенка, за случај кога $z_1 = z_2$ (сл. 4.1):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_t}{\rho} \quad (4-1)$$

од која е очигледно дека за кој и да било пресек на струјниот ток важи зависноста:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \frac{p_t}{\rho},$$

односно:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = p_t \quad (4-2)$$

којашто покажува дека тоталниот (запирниот) притисок p_t , претставува збир на струјниот притисок p , и притисокот на кинетичката енергија (динамичкиот притисок), $\frac{\rho v^2}{2}$.

Доколку се работи за струење на компресибilen флуид, според законот за одржување на енергијата (Прв главен закон на термодинамиката), дефинирана е диференцијалната равенка:

$$dq = du + d(p/\rho) + vdv + gdz,$$

во која, dq е однадвор доведена топлина, која се искористува за: зголемување на внатрешната енергија du , механичката работа на потискување $d(p/\rho)$, промената на кинетичката енергија $d(v^2/2)$ и промената на потенцијалната енергија gdz .

Со воведување на енталпијата:

$$i = u + \frac{p}{\rho},$$

се добива диференцијалната равенка

$$dq = di + vdv + gdz ,$$

после чиешто интегрирање во однос на пресеките 1 и 2 од сл. 4.1, за случај на изентропски процес ($q_{12} = 0$) и $z_1 = z_2$, се добива:

$$i_1 - i_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = c_p(T_1 - T_2) . \quad (4-3)$$

Со воведување на изразот за специфична топлина c_p , за идеален гас и законитоста на изентропа:

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1}R ; \quad \frac{p}{\rho^\kappa} = const .$$

каде што се:

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ - однос на специфичните топлини при константен притисок и константен волумен,

$R = \frac{p}{\rho T}$ - гасна константа,

ρ и T - густина и температура на флуидот во посматраниот пресек,

изразот (4-3) се трансформира во:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa - 1}RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad (4-3a)$$

При целосно запирање на струењето без губење на енергија, на пример во пресекот 2 ($v_2 = 0$), енталпијата во тој пресек ќе се трансформира во тотална енталпија ($i_2 = i_t$), при тотални температура и притисок ($T_2 = T_t$; $p_2 = p_t$), односно според изразите (4-3) и (4-3a), за кој и да било пресек може да се дефинираат врските на струјните и запирните (тоталните) параметри:

$$i_t = i + \frac{v^2}{2}$$

$$T_t = T + \frac{v^2}{2c_p}$$

$$p_t = p \left(\frac{T_t}{T} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\frac{v^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} RT \left[\left(\frac{p_t}{p} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (4-4)$$

каде што се:

p, T, i - струен притисок, струјна температура и енталпија;

v - брзина на струењето во посматраниот пресек.

За изентропско струење на компресибilen флуид (без струјни загуби и без измена на топлината со околината), дефинирана е енергетска струјна равенка на сличен начин како Бернулиевата. Односно, со воведување на зависностите,

$$c_p = R\kappa/(\kappa-1) \quad \text{и} \quad RT = p/\rho ,$$

во изразот (4-3) се добива:

$$\frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_t}{\rho_t} = const . \quad (4-5)$$

Со воведување на Маховиот број, дефиниран како:

$$M = \frac{v}{c} = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_t}{p} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]} \quad (4-6)$$

каде што c претставува брзина на простирање на звук во флуидот кој струи со брзина v :

$$c = \left(\frac{E_v}{\rho} \right)^{1/2} = \left(\frac{\kappa p}{\rho} \right)^{1/2} = (\kappa RT)^{1/2} ,$$

и со соодветна трансформација на изразите (4-4), се добиваат зависностите на тоталната температура и притисок, како:

$$T_t = T \left(1 + \frac{v^2}{2T \frac{\kappa}{\kappa-1} R} \right) = T \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)$$

$$p_t = p \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (4-7)$$

Критичните вредности на T, p и ρ се добиваат за $M_{kp} = 1$:

$$T_{kr} = \frac{2T_t}{\kappa+1};$$

$$p_{kr} = p_t \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}};$$

$$\rho_{kr} = \rho_t \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}.$$

Од друга страна, со воведување на зависноста на притисокот

$$p = \frac{\frac{v^2 \rho}{2}}{\frac{\kappa M^2}{2}},$$

од (4-6), во изразот за p во (4-7), се добива:

$$\frac{p_t - p}{\frac{v^2 \rho}{2}} = \left[\left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} - 1 \right] \frac{2}{\kappa M^2} \quad (4-8)$$

Односно, со развибање на биномот во малите загради во ред, после соодветно средување, (4-8) се трансформира во:

$$\frac{p_t - p}{\frac{v^2 \rho}{2}} = 1 + \frac{M^2}{2 \cdot 2!} + \frac{2 - \kappa}{2^2 \cdot 3!} M^4 + \dots \quad (4-8a)$$

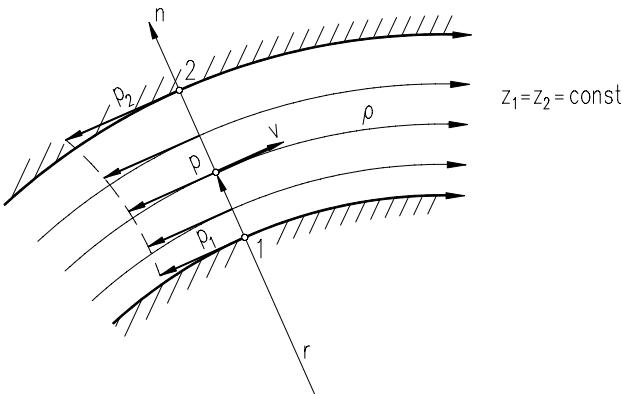
Ако се анализира изразот (4-8а), очигледно е дека за струење на некомпресибilen флуид, тој се трансформира во зависноста (4-2).

Во претходниот случај се изведени основните равенки за струење на компресибilen флуид по законот на изентропа (најчесто применуван). Секако дека, доколку струењето се одвива по некој друг закон, потребно е да се направи друга соодветна анализа.

Во практиката, струењата на компресибilen флуид со $M < 0.2$ можат да се третираат како „некомпресибили“, додека при струења со надзвучни брзини ($M > 1$) потребно е да се изврши корекција на изведените равенки, поради влијанието на т.н. компресиони удари.

4.2 МЕРЕЊЕ НА СТРУЕН ПРИТИСОК

Според Вториот Ќутнов (Newton) закон, во механиката на флуиди е изведена диференцијална равенка за распределба на притисокот нормално на закривени струјници, во хоризонтална рамнина ($z = \text{const}$).

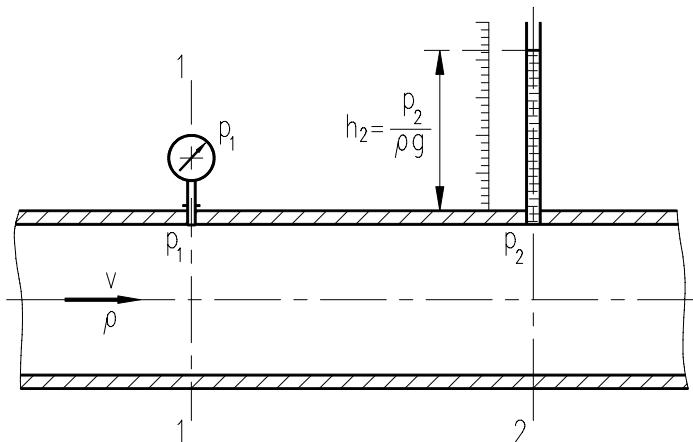


Сл. 4.2 Распределба на притисок во струјно јоле со закривени струјници

Спомнатата равенка гласи:

$$\frac{dp}{dn} = \rho \frac{v^2}{r} \quad (4-9)$$

Според градиентот на притисок (4-9), за случај на праволиниско струење ($r \rightarrow \infty$), струјниот притисок ќе биде константен ($p = const$) долж нормалата n без разлика на профилите на брзината и температурата. Ваквата состојба овозможува мерење на струен притисок при струење во прави цевки, на место на кое ќе биде најмало нарушувањето на струјното поле, најчесто преку отвор во самиот сид (сл. 4.3).

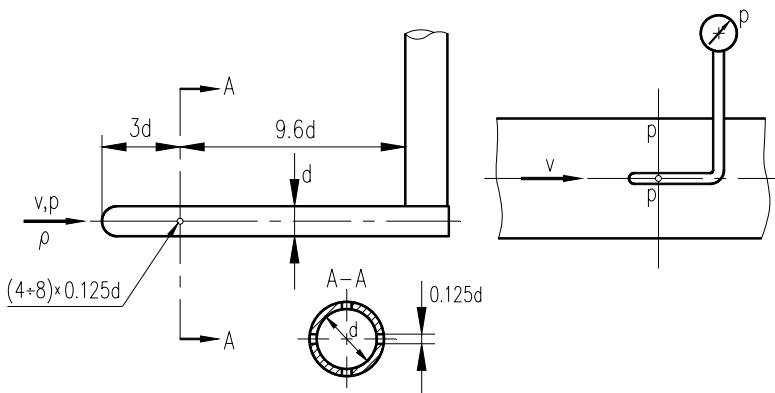


Сл. 4.3 Приклучни места за мерење на струен притисок во прави цевки

При мерење притисок во струења со закривени струјници се применуваат посебни, т.н. Прантл (Prandtl) сонди (сл. 4.4). Ваквата сонда претставува право цевче со што е можно помал дијаметар, коешто е затворено и заоблено на врвот, а на определено растојание од врвот (носот) се издупчени 4 до 8 мерни отвори, правилно распоредени по обемот на сондата (види сл. 4.4). Сондата се поставува во струјното поле паралелно на посматраната струјница, со поставување на мерните отвори на самото место каде што се врши мерењето на струјниот притисок. Прантл сондата, секако, дека може да се применува и за мерење на притисок во праволиниски струења.

При конструирањето на сондата, важно е правилно да се определат растојанијата од мерниот пресек (отвори) до носот и носачот на

сондата, со цел локалните пречки на струењето да се сведат на минимум. Основните соодноси на димензиите на стандардна Прантл сонда се дадени на сл. 4.4

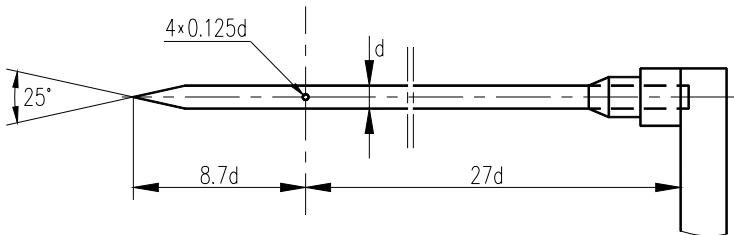


Сл. 4.4 Шема на стандардна Прандл сонда

Потребно е да се напомене дека мерните отвори (доколку не се правилно изведени) можат да предизвикаат локални пречки, особено за големи брзини. Од овие причини, важно е отворите да се изведат со исти димензии, правилно распоредени по обемот на сондата и да бидат поставени нормално на струјниот ток.

За Махови броеви во граници $M \leq 0.8$, Прантл сондата дава доста добри резултати, и во повеќе случаи може да се користи како секундарен еталон. Но, веќе во подрачје со $0.8 < M < 1$, доаѓа до локални компресиони удари на сондата и настапуваат грешки при мерењата на струјниот притисок до 6%. За вакви струења, со големи брзини, се применуваат т.н. „надзвучни“ сонди, кои се со поголема должина од стандардните, а носот на сондата е изведен во вид на конус, чијшто агол ја следи т.н. „лепеза“ на компресиониот удар (сл. 4.5).

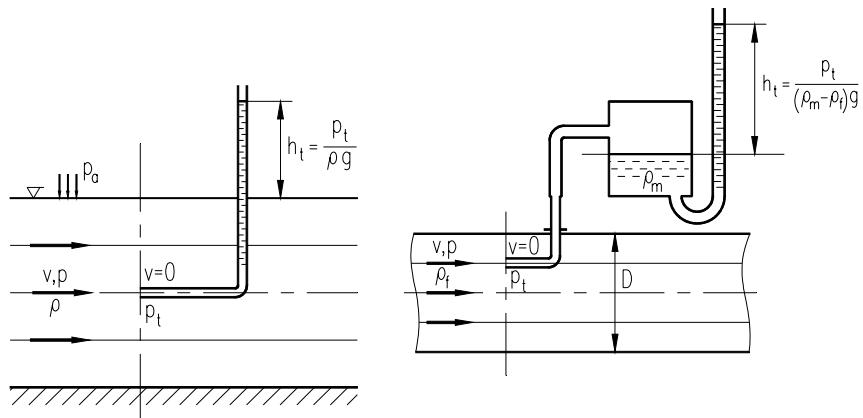
Мерните отвори кај надзвучната сонда треба да бидат доволно далеку од држачот на сондата, како би се избегнало влијанието на компресиониот удар.



Сл. 4.5 Шема на „надзвукчна“ сонда

4.3 МЕРЕЊЕ НА ТОТАЛЕН (ЗАПИРЕН) ПРИТИСОК

Наједноставен и најточен начин на мерење на запирниот (тоталниот) притисок е со помош на т.н. Пито (Pitot) цевка. Оваа сонда, во основа, претставува обично цилиндрично цевче, кое напред (на носот) е отворено, а се поставува паралелно на струјницата, на местото каде што е потребно мерење на брзината (види сл. 4.6).

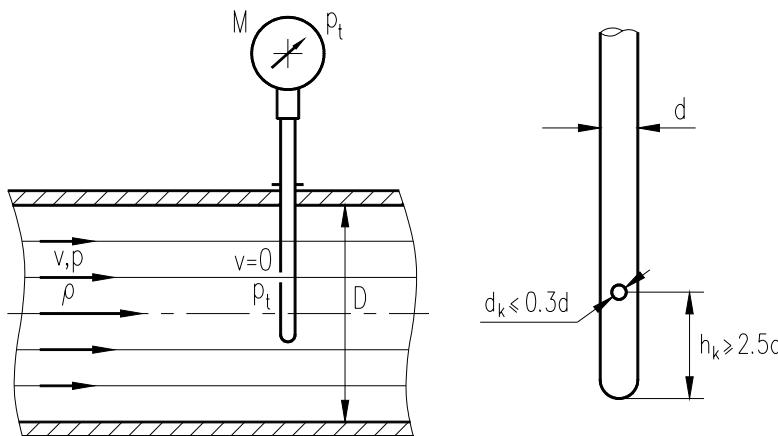


Сл. 4.6 Начин на постапување на Пито сонда

За мерење на p_t добра може да послужи и т.н. цилиндрична сонда со еден мерен отвор, изведен странично на цевчето (сл. 4.7).

Притоа, потребно е мерниот отвор да биде поставен точно наспроти насоката на струењето.

Бидејќи запирањето на струењето при носот на сондата (односно мерниот отвор) се изведува многу брзо, така што влијанието на триенето може да се занемари (доаѓа до целосна изентропска компресија без загуби), грешката при мерењето на тоталниот притисок со Pitot сонда е многу мала: $\epsilon_p \leq 0,2\%$ за струења со $M \leq 1$.



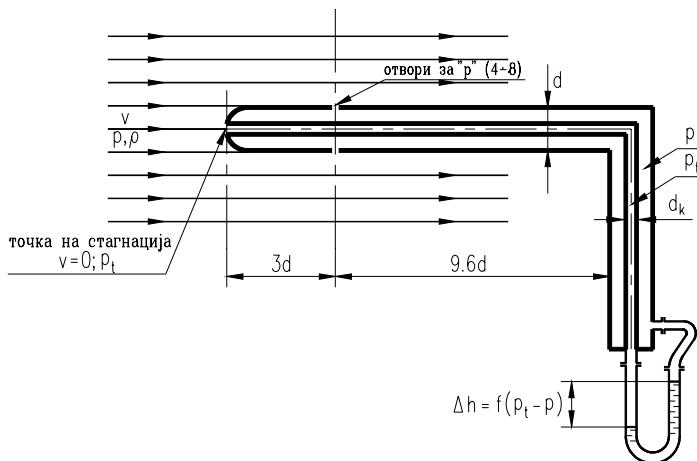
Сл. 4.7 Цилиндрична сонда со спираничен отвор замерење
тотален притисок

Пито сондата, може да се рече, дека е неосетлива на степенот на компресибилност при струења во области со $M < 1$, а исто така и обликот на цевчето многу малку влијае на точноста на мерењето. Меѓутоа, при струења со надзвучни брзини, $M > 1$, поради влијанието на фронталниот компресионен удар, кое предизвикува загуби, измерениот тотален притисок е помал од вистинскиот ($p_{ti} < p_t$). Во ваквите случаи, вистинскиот тотален притисок p_t се определува од измерениот со помош на изразот за директен удар:

$$\frac{p_t}{p_{ti}} = \left(\frac{2\kappa}{\kappa+1} M^2 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \left[\frac{(\kappa-1)M^2 + 2}{(\kappa+1)M^2} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (4-10)$$

4.4 КОМБИНИРАНА ПРАНТЛ-ПИТО СОНДА

Оваа сонда претставува комбинација на Прантл сонда за струен и Пито сонда за запирен притисок, односно со неа е овозможено истовремено мерење и на струјниот и на тоталниот питисок (сл. 4.8). Со комбинираната сонда се добиваат многу добри резултати при мерење на притисоци и брзини кај праволиниски струења, додека за мерење во струења со закривени струјници се применуваат посебни сонди за просторни струења (види поглавје за мерење на брзина).



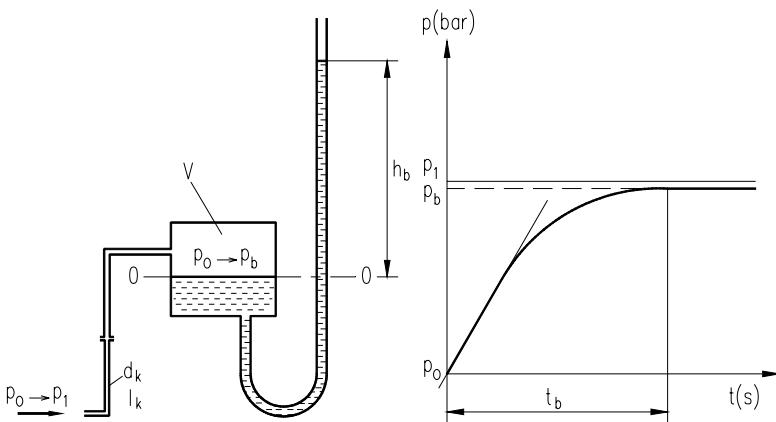
Сл. 4.8 Комбинирана Прантл-Пито сонда

4.5 ПРИКЛУЧНА ВРСКА СОНДА-МАНОМЕТАР

Врската помеѓу отворите на сондата за мерење на запирниот, односно струјниот притисок, и приклучоците за спојување со мерниот инструмент (манометарот) се изведуваат со тенки цевчиња, односно канали, изведени во самата сонда (види сл. 4.8). Дијаметарот на овие, во повеќе случаи, капиларни цевчиња зависи од дијаметарот на мерната сонда; за случаи кога се работи со сонди со мал дијаметар (со цел да се сведе нарушувањето на струјното поле на минимум), дијаметарот на овие капилари може да биде $d_k \leq 0,5$ mm.

Струењето на флуидот низ таквиот капилар, а и низ мерните отвори, е прилично придушен, поради што за секоја промена на притисокот е потребно извесно време за да се постигне определена постојана вредност. Притоа, ако и волуменот на мерниот инструмент, заедно со приклучниот вод, е значително поголем во однос на капиларот во сондата (што всушност е и реалност), тогаш и времето на воспоставување на постојаната вредност на мерената големина е релативно големо. Во таа смисла, аналогно како при електричните мерења, се воведува поимот на временска константа на инструментот, којашто одговара на времето на воспоставување на постојаната вредност на мерената големина.

На пример, за случај на мерење на тотален притисок со Пито сонда, со дијаметар на мерниот отвор и капиларната врска во сондата d_k и нејзина должина l_k , поврзана со т.н. манометар со сад како мерен инструмент, при нагла промена на притисокот во мерениот медиум од p_0 до p_1 , потребно е определено време за воспоставување на постојана висина на столбот на манометарската течност h_b (сл. 4.9).



Сл. 4.9 Временска константа на инструмент

Од прикажаниот дијаграм на сл. 4.9 се гледа дека во почетокот промената на притисокот е пропорционална со времето, додека по извесно време асимптотски се приближува кон вредноста на притисокот p_1 . Бидејќи времето за постигнување на p_1 е „бескрајно“ големо, времето

за воспоставување на мерната големина t_b се зема да одговара, со доволна точност, на постигнатата промена на притисокот:

$$(p_b - p_0) = 0,99(p_1 - p_0).$$

Очигледно дека времето на воспоставување t_b е меродавно за утврдување на времето на траење на експериментот и во најголема мера зависи од димензиите на мерните отвори и капиларната врска со приклучоците на сондата. За мерни отвори со $d_k \geq 0,6$, времето на воспоставување е занемарливо.

4.6 ХИДРОСТАТИЧКИ МАНОМЕТРИ

Хидростатичките манометри спаѓаат меѓу најстарите и најшироко применувани инструменти за мерење на притисок, а се базираат на познатите закони од хидростатиката:

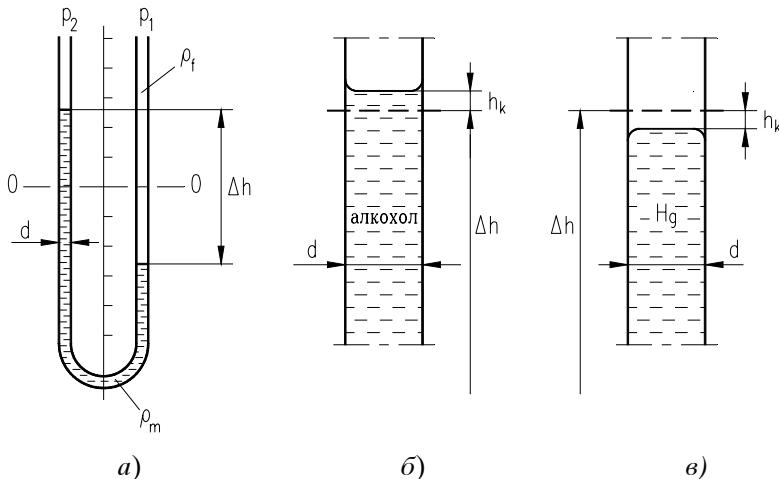
- притисокот, во некој флуид во мирување, е еднаков во сите еквипотенцијални рамнини;
- секоја промена на притисокот во која и да било точка, рамномерно се пренесува по волуменот на флуидот (Pascal-ов закон).

Како „индикатор“ на притисокот во хидростатичкиот манометар се јавува разликата на нивоата на една или повеќе манометарски течности (Δh), со кои е исполнет манометарот. Најдоставен хидростатички манометар е т.н. У цевка (сл. 4.10).

Врз столбот на манометарската течност, покрај силата на Земјината тежа и наметнатиот притисок, дејствуваат и површински напони и атхезиони сили помеѓу манометарската течност и цевката, односно промената на нивото Δh може да се прикаже со општата функционална зависност:

$$\Delta h = \Delta h(\Delta p, g, \rho, h_k)$$

каде што: h_k е дополнително подигање или спуштање на столбот на манометарската течност поради влијанието на атхезионите (капиларните) сили помеѓу сидовите на манометарската цевка и манометарската течност (види сл. 4.10 б, в).



Сл. 4.10 У цевка и влијание на капиларниите сили

Притоа, доколку дијаметарот на манометарската цевка, d , е релативно голем, влијанието на капиларните сили може да се занемари. Во спротивно, за манометарски цевки со мал пресек, се јавува дополнителното подигање или спуштање на столбот на течноста, h_k , кое во крајна линија зависи од дијаметарот на цевката и видот на манометарска течност:

$$h_k = \frac{k}{d} \text{ mm} \quad (4-11)$$

Коефициентот k зависи од видот на манометарската течност. Во *табелата 4.1* се дадени основните податоци за најчесто применуваните манометарски течности, како и вредностите за соодветниот коефициент k . Манометарските течности треба, по можност, да ги задоволуваат условите: слаба испарливост, да не се лепат за сидовите на цевката, нерастворливост во вода, неагресивност и неотровност.

Уочливо е дека, кај течности кои ги „навлажуваат“ сидовите на цевката, менискусот на нивото на течноста е конкавен, а капиларните сили го подигаат столбот на течност (сл. 4.10б); додека, кај течности коишто „суво“ ги допираат сидовите (на пример, жива), се јавува конвексен менискус, а течноста се спушта под влијание на капиларните сили (сл. 4.10в).

Табела 4.1

Карактеристики на манометарски течности					
Течност	Формула	ρ kg/m ³	$10^3\beta$ 1/°C	$10^6\mu$ Ns/m ²	k mm ²
метил алкохол	CH ₃ OH	792,7	1,10	588	11
толуол	C ₆ H ₅ CH ₃	865,6	1,08	579	13
вода	H ₂ O	997,6	0,18	1000	30
јагленов сулфид	C ₂ S	1260,4	1,18	373	-
хлороформ	CHCl ₃	1486,4	1,28	549	-
тетрабром-ацетилен	CHBr ₂ CHBr ₂	2962,8	-	-	-
жива	Hg	13539,4	0,181	3826	-14

4.6.1 Манометарска U цевка

U цевката се третира како основна форма на хидростатички манометар (сл. 4.10a). Обично е изработена од стакло и до половина е исполнета со соодветна манометарска течност. Во зависност од намената, се применуваат различни манометарски течности (види табела 4.1); од кои најчесто вода и алкохол за пониски притисоци, а жива за повисоки.

Со помош на U цевката може да се мери притисок во однос на атмосферскиот (надпритисок или подпритисок), доколку едниот крак е отворен ($p_2 = p_a$); или разлика на притисоци ($\Delta p = p_1 - p_2$), ако се работи за т.н. затворена U цевка.

Разликата на притисоците се определува од зависноста:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta h(\rho_m - \rho_f)g \quad (4-12)$$

каде што се:

- Δh во м - висинска разлика помеѓу двете нивоа на манометарската течност во U цевката (висина на столбот на манометарската течност);
- ρ_m и ρ_f во kg/m^3 - густини на манометарската течност и флуидот за кој се мери притисокот.

Со цел да се постигне што е можно поголема точност при мерењето притисок со ваков хидростатички манометар, потребо е да се обрне внимание на бројните услови кои влијаат врз отчитувањето (особено визуелно) и пресметувањето на соодветните големини: прецизно избаждарена скала за отчитување на Δh , по можност примена на уреди за отстранување на паралаксата (нониус, лека), влијание на температурската експанзија на манометарската течност, промена на ρ_m и ρ_f со промена на температурата, евентуалната невертикалност на U цевката, влијание на капиларните сили и др. Со обрнување внимание на наведените услови, можно е остварување точност при отчитувањето од 0,1 mm.

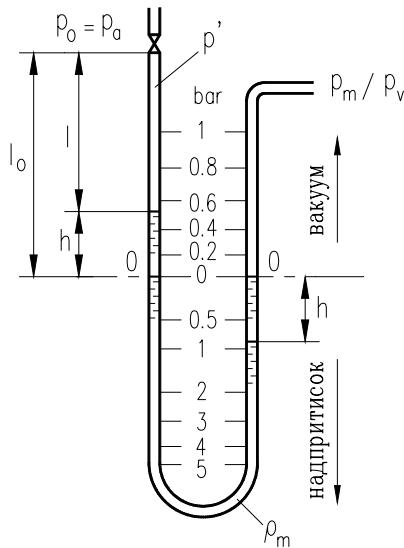
Многу висока точност на мерење со хидростатички манометри се постигнува со примена на соодветни методи за електрично мерење на столбот на манометарската течност, т.е. со примена на т.н. сервоманометри (за кои ќе стане збор во понатамошното излагање), со кои субјективната грешка се сведува на минимум.

4.6.2 У цевка со затворен крак

Карактеристичен пример на У цевка е т.н. У цевка со затворен крак, шематски прикажана на сл. 4.11. Кај овој хидростатички манометар мерната скала е нелинеарна и со него можат да се измерат апсолутните вредности на притисокот (надпритисок или подпритисок). За случај на мерење на надпритисок (улога на манометар, $p_m > p_a$), скалата се смалува; додека при мерење на подпритисок (улога на вакуумметар, $p_v < p_a$), скалата се зголемува (види сл. 4.11).

Определувањето на апсолутната вредност на притисокот е базирано на Бојл-Марјотовиот (Boyle-Mariott) закон ($pV = \text{const}$), преку кој се пресметува притисокот што владее во затворениот крак:

$$p' = p_0 \frac{l_0}{l} = p_0 \frac{l_0}{l_0 \pm h} \quad (4-13)$$



Сл. 4.11 У цевка со затворен крак

Големините во равенката (4-13) претставуваат:

- $p_0 = p_a$ - атмосферски притисок којшто владее во затворениот крак, пред да настапи промената на притисокот;
- l_0 - растојание од нултото (почетното) ниво на манометарската течност до вентилот, при атмосферски притисок p_0 ;
- p' - притисок во затворениот крак, после наметнувањето на p_m , односно p_v ;
- l - растојание од нивото на манометарската течност до вентилот при наметнат притисок ($l = l_0 - h$ при p_m , $l = l_0 + h$ при p_v).

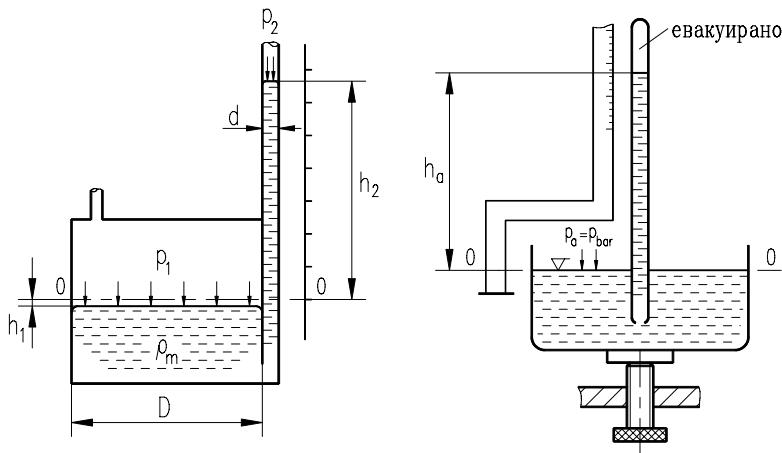
Според тоа, абсолютните вредности на надпритисокот ($p_{m,abs}$), или подпритисокот ($p_{v,abs}$), ќе бидат:

$$p_{m.ap} = p' + 2h\rho_m g = p_0 \frac{l_0}{l_0 - h} + 2h\rho_m g \quad (4-14)$$

$$p_{v.ap} = p' - 2h\rho_m g = p_0 \frac{l_0}{l_0 + h} - 2h\rho_m g \quad (4-14a)$$

4.6.3 Хидростатички еднокрак манометар

Еднокрациот манометар, или манометар со сад, нашол широка примена, особено при мерење на помали притисоци. Овој инструмент претставува модификација на класичната U цевка, при што единиот крак е трансформиран во сад со значително поголем волумен и површина во споредба со другиот крак. Ова овозможува занемарливо мало задвижување на „нултото“ ниво на манометарската течност во садот, односно нејзино значително задвижување во кракот, што создава погодност за отчитување само од скалата на кракот (види сл. 4.12a).



Сл. 4.12 Еднокрак манометар (а) и барометар (б)

Аналогно како кај U цевката, разликата на притисоците што владеат во садот и кракот се определува од врската:

$$p_1 - p_2 = \rho_m g(h_1 + h_2),$$

којашто со воведување на идентичноиста на истиснатите волуеми на манометарската течност, $h_2 d^2 = h_1 D^2$, се трансформира како:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_m g h_2 \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (4-15)$$

Односно, за случаи кога $d \ll D$ (обично $d/D \approx 1/500$), со доволна точност:

$$\Delta p = \rho_m g h_2 \quad (4-15a)$$

Доколку се мери разлика на притисоци во флуид со густина ρ_f , аналогно на изразот (4-12), несомнено дека треба да се земе во обсир влијанието на столбот на течноста:

$$\Delta p = (\rho_m - \rho_f) g h_2$$

Доколку се работи за мерење на разлика на притисоци во компресибилни флуиди, при кои $\rho_f \ll \rho_m$, со доволна точност може да се користи изразот (4-15).

Бидејќи со хидростатичките манометри во основа се мери разлика на притисоци помеѓу два краја на столб на течност, ако едниот крај (крак) се наоѓа при нула апсолутен притисок, тогаш висината $h_2 = h_a$ ќе биде индикатор за барометарскиот притисок, доколку во отворениот сад владее барометарски притисок. На овој принцип се базира барометарот прикажан на сл. 4.12б, од којшто барометарскиот (атмосферски) притисок се определува како:

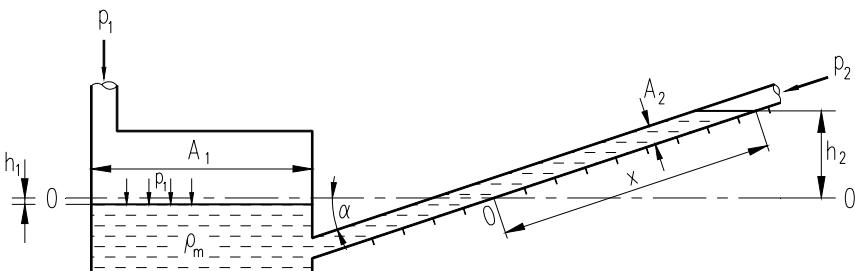
$$p_a = \rho_m g h_a .$$

Притоа, притисокот во барометарскиот крак од кој е евакуиран воздухот не е точно апсолутна нула, туку одговара на притисокот на пареата на манометарската течност (за жива околу $6,9 \cdot 10^{-4}$ kN/m² при 20°C), што обично е занемарливо како корекција.

Потребно е да се напомене дека, и покрај тоа што отчитувањето од еднокракиот манометар е значително олеснето, за да се оствари висока точност потребно е нултото ниво на садот да се прилагодува на нултото ниво на мерната скала пред секое отчитување.

4.6.4 Кос манометар

Со цел да се зголеми осетливоста, манометарскиот крак при еднокрациот манометар може да се закоси, со што се остварува поголемо задвижување на манометарската течност по должината на цевката x , при определена вертикална промена h (види сл. 4.13). Кај овој манометар, покрај зголемената точност на отчитување, калибрираната скала обично е корегирана за малите промени на нивото во садот, така што не е потребно дотерување на нултото ниво пред секое отчитување.



Сл. 4.13 Принциј на кос манометар

Аналогно како кај претходно објаснетиот еднокрак манометар, разликата на притисоците помеѓу садот и кракот се определува како:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (h_1 + h_2) \rho_m g ,$$

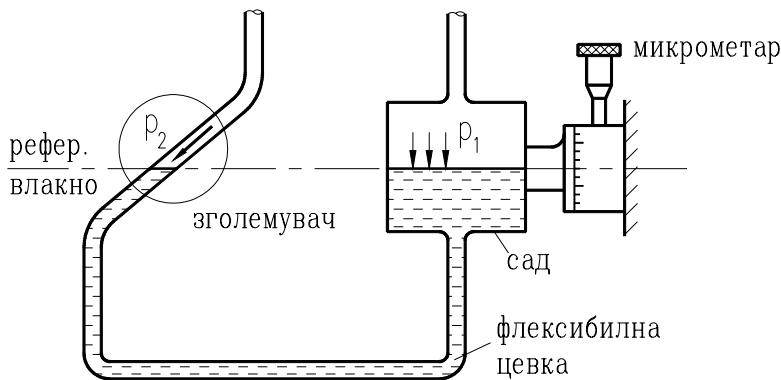
односно со замените: $h_1 A_1 = x A_2$ и $h_2 = x \sin \alpha$, се добива зависноста на разликата на притисоците од отчитувањето долж кракот x :

$$\Delta p = x \left(\sin \alpha + \frac{A_2}{A_1} \right) \rho_m g \quad (4-16)$$

4.6.5 Диференцијални манометри за мали притисоци - микроманометри

Точно мерење на многу мали разлики на притисок се остварува со т.н. микроманометри. Типичен пример на една конструкција на микроманометар е прикажан на сл. 4.14, која претставува варијација на

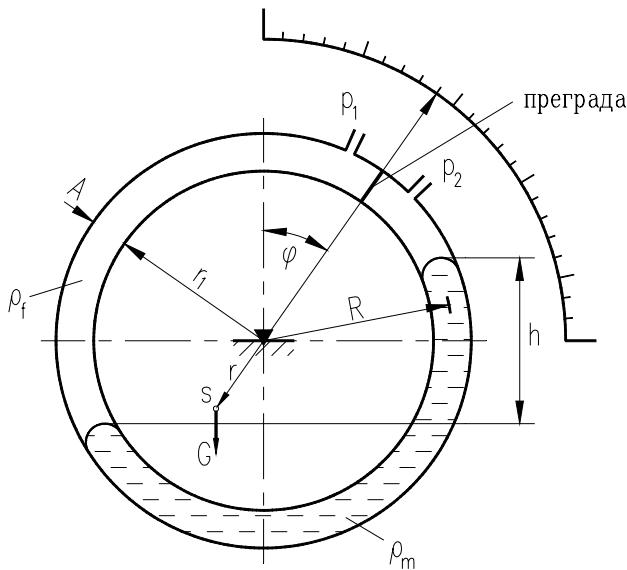
принципот на кос манометар. Кај овој инструмент, садот и косата манометарска цевка се одвоени и поврзани меѓу себе со флексибилна цевка. Отчитувањето од микрометарот, со кој се задвижува (дотерува) садот, го покажува отстапувањето на притисокот во однос на почетната (нулта) положба. Постојат конструкции при кои се задвижува кракот наместо садот.



Сл. 4.14 Шема на микроманометар

Инструментот (сл. 4.14) почетно се дотерува така што, кога е $p_1 = p_2$, нивото на кракот и садот да се наоѓаат во една линија (референтно влакно), при што се отчитува соодветната стартна (нулта) вредност од микрометарот. При постоење разлика на притисок Δp , се јавува задвижување на нивото на манометарската течност во кракот за соодветна висина Δh во однос на референтната (нулта) линија. Поместеното ниво се дотерува во однос на почетната положба со подигање или спуштање на садот со помош на микрометарот, при што разликата меѓу крајното и почетното отчитување од микрометарот одговара на промената на притисокот Δh .

Практичен диференцијален манометар за мерење на мали притиски и разлики на притисци во течности и гасови е т.н. прстенеста вага, чиј принцип на работа е прикажан на сл. 4.15. Овој инструмент особено нашол примена за мерење на мали разлики на притисоци при струења на флуиди со високи погонски притисоци (дури и повеќе од 200 bar).



Сл. 4.15 Принцијиелна шема на прстененасока вага

Според сл. 4.15, од условот за рамнотежа на силите на тежина на манометарската течност (Hg на пример), за мерење на разлика на притисоци во гасен флуид:

$$Grs \sin \varphi = RAh\rho_m g$$

разликата на притисоците ќе биде:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h\rho_m g = \frac{Grs \sin \varphi}{RA} \quad (4-17)$$

каде што се:

- G - позната тежина на мерниот систем со тежиште во точката S ;
- φ - агол на задвижување на цевковидниот прстен при наметнување на разлика на притисоци Δp ;
- A - површина на пресекот на манометарската прстенеста цевка;

- r - радиус на положба на тежиштето S;
 h - промена на нивото на манометарската течност поради разликата на притисокот Δp .

При мерење на разлика на притисок во течности, условот за рамнотежа на силите на тежина ќе биде:

$$Grsin \varphi = RAh(\rho_m - \rho_f)g$$

а разликата на притисокот:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h(\rho_m - \rho_f)g = \frac{Grsin \varphi}{RA} \quad (4-18)$$

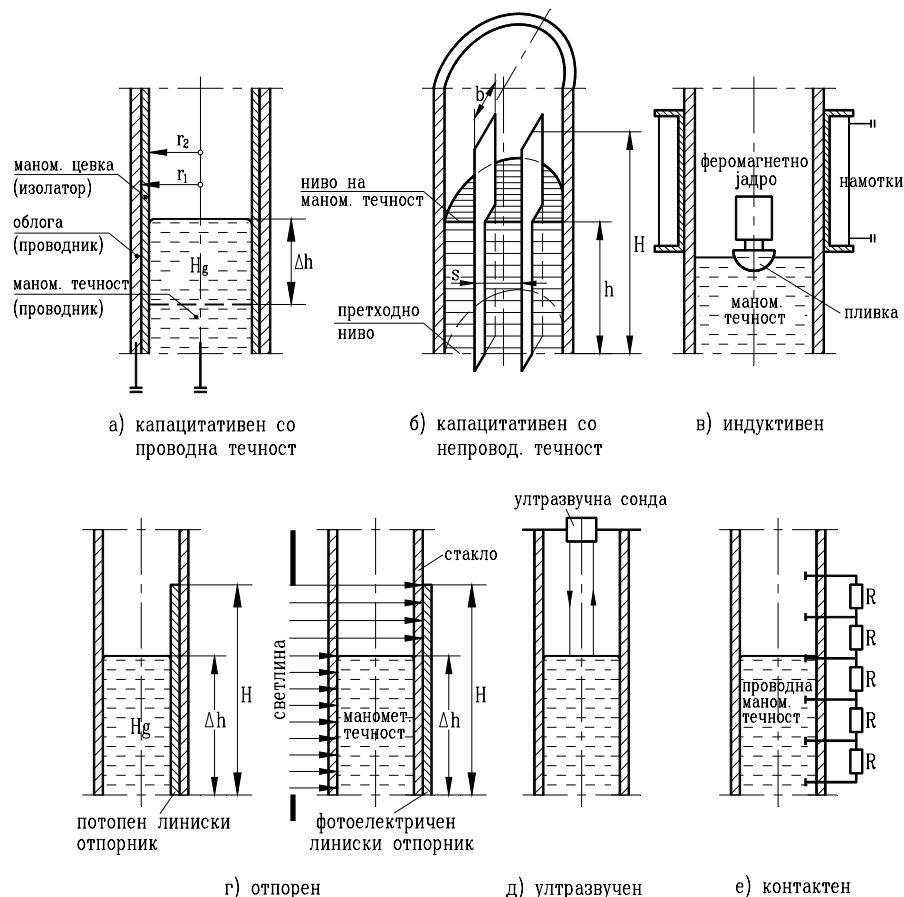
Ќај прстенестата вага е очигледно дека постои директна зависност на Δp од аголот на завртување φ , односно со неговото отчитување се добива и соодветната разлика на притисокот. Во таа смисла, може соодветно да биде избаждарена и скалата на инструментот.

4.6.6 Електрични методи за мерење на столбот на течност во диференцијалните манометри

Покрај тоа што диференцијалните манометри главно се отчитуваат визуелно, можно е да се конструираат сервосистеми коишто ќе го „ловат“ движењето на столбот на манометарската течност и ќе обезбедуваат механички или електричен сигнал, пропорционален на мерениот притисок. Ваквите дотерувања на хидростатичките манометри овозможуваат нивно користење за различни притисоци, регистрирањето на мерената големина е многу побрзо од визуелното отчитување, ја редуцираат субјективната грешка на истражувачот, обезбедуваат сигнали што можат да се користат во системи за контрола и пресметување и можат да обезбедат автоматски температурни корекции. Промената на нивото на манометарската течност може да се следи преку директни и индиректни методи.

1. Директни методи: Кај овие методи, промената на нивото на манометарската течност влијае врз промената на некоја физичка големина (најчесто електрична) којашто директно се мери. Типични примери на директни методи за следење на нивото на манометарската течност се прикажани на сл. 4.16.

Капацитативниот мерач (сл. 4.16 а, б) се базира на определување на промената на нивото на манометарската течност преку електричниот капацитет во соодветен кондензатор, формиран во зависност од видот на манометарската течност, којашто може да биде електрички спроводлива или неспроводлива.



Сл. 4.16 Примери на директни методи за мерење на стаполб на манометарска течност

Кај хидростатичките манометри со спроводлива манометарска течност често се применува капацитативен мерач, чиј принцип се базира на т.н. цилиндричен кондензатор (сл. 4.16a), во кој како проводници (облоги) се јавуваат манометарската течност (спроводлива) и соодветна обложна цевка. Меѓу нив се наоѓа манометарската цевка, којшто ја игра улогата на изолатор (диелектрик) на кондензаторот.

Зависноста на прирастот на капацитетот C (во pF) од промената на нивото на манометарската течност Δh (во см), за цилиндричен кондензатор формиран за хидростатички манометар со спроводлива течност (жива, вода и сл.), како на сл. 4.16a, обично е дадена како:

$$C = 0,56 \frac{\Delta h \varepsilon_r}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (4-19)$$

каде што се:

- ε_r - релативна диелектрична константа на материјалот од кој е направена манометарската цевка (изолатор);
- r_1 и r_2 - надворешен и внатрешен радиус на манометарската цевка.

За манометри со неспроводливи течности (масло, глицерин и сл.), капацитативниот давач се изведува со плочест кондензатор којшто е потопен во манометарската течност (сл. 4.16б). Во овој случај кондензаторот се состои од два дела, за кои како електролити се јавуваат течноста (потопениот дел) и воздухот (непотопениот дел). Зависноста помеѓу капацитетот C (во pF) и висината на нивото на манометарската течност во однос на долнот крај на кондензаторските плочки h (потопен дел) е претставена со изразот:

$$C = 0,088 \frac{b}{s} [h(\varepsilon_r - 1) + H] \quad (4-20)$$

каде што се:

- b - широчина на плочите во см;
- s - растојание помеѓу плочите во см;
- h - висина на делот од кондензаторот потопен во течноста во см;
- H - вкупна висина на кондензаторските площи во см.

Кај капацитативните давачи капацитетот на формираните кондензатори е релативно мал (околу 100 pF), поради што е потребно да се води сметка за евентуалните пречки. Од овие причини, кабелот помеѓу давачот и електронското мерно коло треба да биде со што е можно помала должина, треба да се води сметка за чистотата на манометарската течност и сл. Капацитетот најчесто се мери со наизменичен мерен мост, или врз основа на електронско осцилаторно мерно коло. Точноста на овие инструменти обично е околу 1%, а со посебна изведба (што ја зголемува и цената на чинење) се постигнува и 0,5%. Капацитативните манометри со неспроводлива течност поретко се применуваат, заради тешкотијата во одржување на неспроводливоста на течноста. Со тек на време манометарската течност многу брзо ја апсорбира влагата од околната, со што се зголемува нејзината спроводливост и смалува точноста на мерење.

Индуктивниот мерач (сл. 4.16 в) се применува за помали промени на нивото на манометарската течност, обично до 5 см. Се состои од: пливка (што плива на нивото од манометарската течност) на која е поставено феромагнетно јадро и калем намотан околу цевката. Индуктивноста на калемот директно зависи од положбата на јадрото. Точноста на ваквите инструменти, е исто така, околу 1%.

Кај **отпорните мерачи** (сл. 4.16 г) потребно е течноста да биде добар проводник (најчесто жива). Определувањето на промената на нивото на манометарска течност Δh се базира на зависноста од измерениот електричен отпор на делот од линискиот отпорник над течноста:

$$R = \rho_l (H - \Delta h) \quad (4-21)$$

каде што се:

- ρ_l - должинска отпорност на линискиот отпорник во Ω/cm ;
- H - вкупна должина на отпорникот во см;
- Δh - промена на нивото во см.

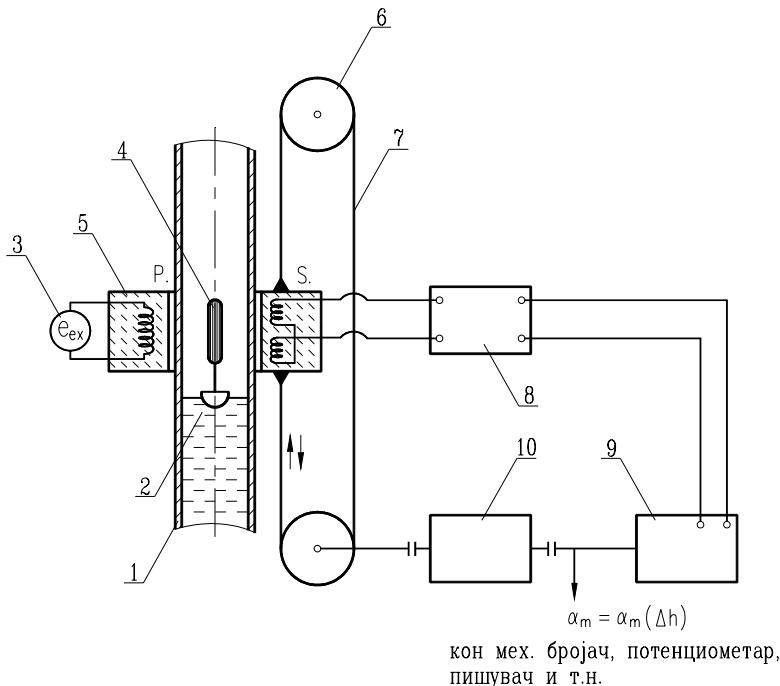
Овај метод покажал недостатоци поради тешкото одржување на чистотата на отпорникот и манометарската течност. Односно, доста брзо доаѓа до создавање слој на оксид или нечистотија на линискиот отпорник, што го смалува електричниот контакт помеѓу отпорникот и течноста. Во последно време се развиваат методи со фотоелектричен линиски отпорник инсталiran на надворешната страна од манометарската цевка (не е во контакт со течноста), кој е осветлен со соодветен светлосен извор и чиј отпор се менува со промена на нивото на манометарската течност.

Ултразвучните мерачи (сл. 4.16 д) се базираат на мерење на растојанието од давачот на ултразвук (пиезоелектрична глава) и нивото на манометарската течност. Врз основа на разликата во фази помеѓу емитираниот и примениот сигнал на ултразвук, многу прецизно се определува растојанието помеѓу ултразвучната глава и нивото на манометарската течност. Цената на чинење секако дека е диктирана од високата точност на ваквите инструменти.

За **контактниот мерач** (сл. 4.16 е) е потребна, исто така, проводлива манометарска течност. Во сидот на цевката инсталирани се повеќе контакти, со помош на кои се остварува електрична врска при нивно потопување од течноста. За контактите се поврзани отпорници со фиксни електрични отпори (види сл. 4.16 е), преку кои, со мерење на отпорот помеѓу првиот (или последниот) контакт и течноста, се добива податок за положбата на нивото на манометарската течност.

2. Индиректни методи: Кај овие методи, следењето на нивото на манометарската течност се остварува со помош на слаб извор на електрична енергија и фотокелија или т.н. диференцијален трансформатор, како составни делови на „сервисистемот“. Диференцијалниот трансформатор најчесто има предност, бидејќи овозможува примена на немагнетни челични манометарски цевки (наместо стаклени) за случаи на високи притисоци. Принципијалната шема на еден таков сервоманометар со диференцијален трансформатор е прикажана на сл. 4.17.

Според шемата на сл. 4.17, јадрото на диференцијалниот трансформатор е прицврстено на мала пливка, која плива на површината од манометарската течност. Намотките (примарни и секундарни) се концентрични со манометарската цевка и се позиционираат вертикално со перфорирана челична лента (каиш). За случај кога јадрото не е во нулта положба во однос на намотките, во секундарните намотки (S_2) се јавува напон кој, преку засилувачот (амплифаерот), го задвижува електромоторот, а овој, преку соодветен преносник, ги тера намотките кон нултата положба. За нулта положба на јадрото во однос на намотките (се наоѓаат во иста рамнина), во S_2 напонот е нула. На тој начин, намотките се стремат да го следат јадрото, а со тоа и нивото на манометарската течност. Како што се гледа, движењето на намотките е кинематички поврзано со ротацијата на моторот, односно аголното задвижување (ротацијата) на електромоторот е пропорционално на промената на нивото на манометарската течност (т.е. притисокот), $\alpha_m = \alpha_m(\Delta h)$. Притоа, со регистрирањето на сигналот за α_m , што може да се оствари на различни начини (механички бројач, потенциометар, пишувач и т.н.), се добива и информација за промената на притисокот $\Delta p(\Delta h)$.



Сл. 4.17 Принцијиелна шема на сервоманометар

1. манометарска стапакена или челична цевка,
2. манометарска ѕечност, 3. ел. извор,
4. јадро на диференцијален трансформатор, 5. намотки,
6. назабен кашник, 7. перфорирана челична лентица,
8. засилувач, 9. ел. мотор, 10. преносник.

Врз основа на калибрационата зависност $\alpha_m = \alpha_m(\Delta p)$, соодветно може да се избаждари и индикаторот на инструментот, со цел за директно отчитување на Δp .

Сервоманометарот може да биде применет за еднокрак манометар, но исто така и за U цевка. За U цевка потребни се два диференцијални трансформатори (сервопридржници), по еден за секој крак, како и диференцијален преносник. Манометрите со вакви сервосистеми, базирани на индиректните методи, се со многу висока точност, резолуција од 0,013 mm и скупупна точност од неколку стотини од милиметарот. Брзината на следењето на сервопридржниците е 2,5 m/min, па и повеќе, со можност за автоматска температурна компензација.

4.7 МАНОМЕТРИ СО МЕХАНИЧКИ (ЕЛАСТИЧНИ) ПРЕТВОРАЧИ

Во овие манометри силата на притисок предизвикува промена во соодветен еластичен сензор (претворач), кој може да има најразлични облици (Бурдонова цевна пружина, мембрана, набрана цевна пружина и сл.). Промената во еластичниот сензор се манифестира во задвижување на соодветен покажувач (најчесто стрелката на инструментот), или во претворање во потребен електричен сигнал, кој се користи во соодветен инструмент за електрично мерење на притисокот или за потребите на определен контролиран процес.

Некои видови манометри со еластични претворачи објаснети се во понатамошното излагање и шематски прикажани на сл. 4.18 до сл. 4.20.

4.7.1 Манометар со Бурдонова пружина

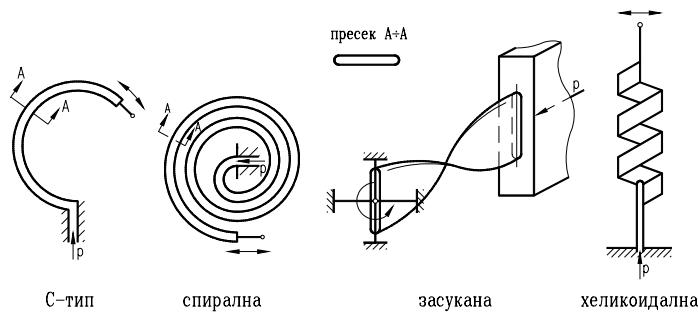
Кај овие манометри како еластичен сензор се користи т.н. Бурдонова (Bourdon) цевна пружина, којашто може да има најразлични облици („С“ тип, спирална, засукана, хеликоидална), види сл. 4.18a.

Најчесто се среќаваат манометри со цевна пружина од „С“ типот (сл.4.18б). Во совиената цевна пружина (со некружен пресек) навлегува флуидот и, под дејствие на притисок поголем од атмосферскиот, што владее на надворешната страна од цевката, истата се исправа. Притоа, оваа промена, преку запчест механизам ја задвижува стрелката на инструментот. Овој инструмент може да се користи и за мерење на вакуум, бидејќи во тој случај ($p_v < p_a$) пружината се свива навнатре, а стрелката на инструментот се задвижува во спротивна насока.

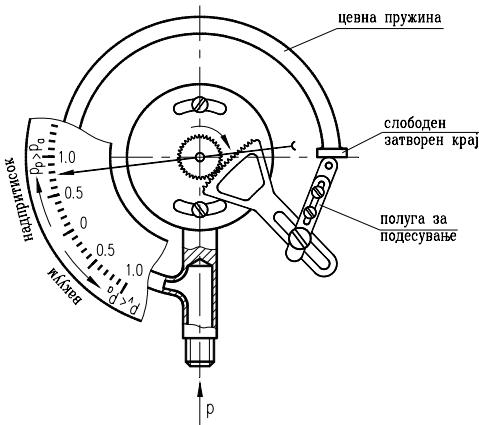
Бурдоновата цевка, исто така, нашла широка примена во електричните инструменти за мерење на притисок; при што, еластичната промена во сензорот предизвикува соодветна промена на електричната големина.

Спиралната и хеликоидалната компонуицација овозможуваат поголемо излезно задвижување на индикаторот (стрелката), поради што нашле примена за мерење на помали притисоци. Во зависност од квалитетот (со тоа и цената), може да се постигне висока точност, но во секој случај овие инструменти бараат повремено баждарење.

Засуканите цевки имаат стабилизирачки уред со вкрстени жици, кој е крут во сите радијални насоки, но обезбедува мекост при ротација, што ги смалува влијанијата на евентуалните додатни движење предизвикани од удари и вибрации.



а) видови на Bourdon-ови цевки



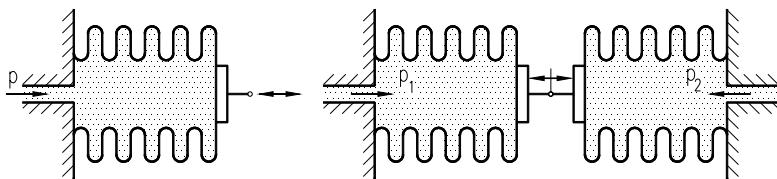
б) манометар со цевна пружина од "С" тип

Сл. 4.18 Шеми на манометар со Бурдонова цевна пружина

Манометарот со Бурдонаова цевна пружина од „С“ тип нашол примена при мерења на притисоци до 7000 bar, додека манометрите со спирална и хеликоидална конфигурација се користат ,главно, за притисоци помали од 70 bar.

4.7.2 Манометар со набрана цевна пружина

За мерење на релативно ниски притисоци (помали од 30 bar) често пати се применуваат манометри со еластични претворачи, во облик на набрана цевна пружина (сл. 4.19). Кај овие инструменти овозможено е создавање на поголеми задвижувачки сили на покажувачот, од кои причини нашле, исто така широка примена и како регистратори.



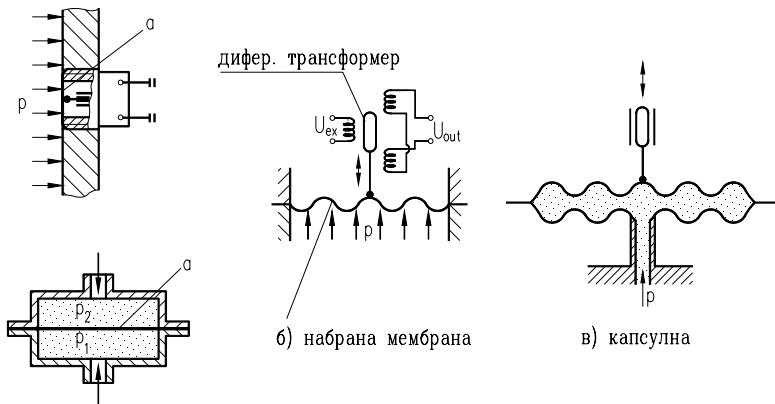
Сл. 4.19 Манометар со набрана цевна пружина

4.7.3 Манометар со мембранска пружина

Манометрите со менбранны пружини (дијафрагми) нашле широка примена при електричните мерења на притисокот. Најчесто применуваните мембрани во ваквите инструменти се прикажани на сл. 4.20.

Рамната мембра (сл. 4.20 и сл. 4.21) најчесто се применува во електричните сензори за притисок. Притоа, притисокот се определува главно преку:

- угибот на центарот на мембаната, регистриран со помош на сензор (transducer) за поместување (на пример: диференцијален трансформатор, потенциометар, капацитативен претворач и сл.; види поглавје 8.2), или со
- мерење на деформацијата на мембаната преку мерни ленти прилепени за неа (види сл. 4.21).



Сл. 4.20 Мембранны еластични преобразувачи

Зависноста на разликата на притисокот преку мемраната (p) од угибот на центарот (y_c) е дефинирана со формулата:

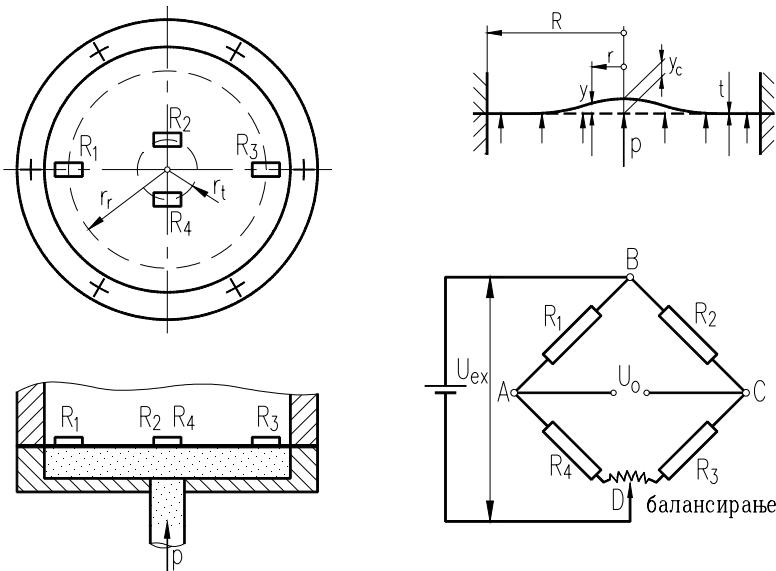
$$p = \frac{16Et^4}{3R^4(1-\mu^2)} \left[\frac{y_c}{t} + 0,48\left(\frac{y_c}{t}\right)^3 \right] \quad (4-22)$$

каде што се:

- E - модул на еластичност;
- R - радиус на мемраната (види сл. 4.21);
- μ - Поасонов (Poisson) коефициент
 $\mu = -(dD/D)/(dt/t) \approx 0,3$ за поголем број материјали;
- t - дебелина на мемраната.

За мали дефлекции, $(y_c/t)^3$ е занемарливо во споредба со y_c/t , и може да се очекува линеарно однесување бидејќи доминира напретањето на свивање.

Во современите електрични сензори за притисок многу често се применуваат рамни мембрани на кои се налепуваат т.н. мерни ленти, поврзани во електричен мерен мост, преку кои се мери деформацијата на мемраната (види сл. 4.21). Во ова поглавје се дадени само основните врски на зависност, додека подетални излагања во врска со мерењата со помош на мерни ленти дадени се во главата за мерење на механички големини (глава 8).



Сл. 4.21 Мембрана со мерни ленти

За да се илустрира генералниот концепт за сензори со мерни ленти, разгледувана е рамна дијафрагма која е вклештена на краевите и се наоѓа под разлика на притисок p . Според теоријата од јакост на материјалите, ваквата дијафрагма има дефлекција (угиб) во која и да било точка (сл. 4.21):

$$y = \frac{3p(1 - \mu^2)(R^2 - r^2)^2}{16Et^3} \quad (4-22)$$

Радијалното (σ_r) и тангенцијалното (σ_t) напретање се дефинирани со изразите:

$$\sigma_r = \frac{3pR^2\mu}{8t^2} \left[\left(\frac{1}{\mu} + 1 \right) - \left(\frac{3}{\mu} + 1 \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (4-24a)$$

$$\sigma_t = \frac{3pR^2\mu}{8t^2} \left[\left(\frac{1}{\mu} + 1 \right) - \left(\frac{1}{\mu} + 3 \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (4-24b)$$

Очигледно дека, доколку се познати напрекањата σ_r и σ_t од изразите (4-24), едноставно може да се определи притисокот p .

Во практика, притисокот се определува во зависност од напонот на грешка (U_o) на мерниот мост (види сл. 21) во чијшто гранки се приклучени мерните траки, односно со мерење на излезниот напон U_o се определува и притисокот преку општата зависност:

$$p = C_{pr} U_o \quad (4-25)$$

каде што е:

$$C_{pr} = f(E, t, \mu, R, r_r, r_t) \quad - \text{константа на сензорот.}$$

Мерните ленти претставуваат електрични отпорници чиј електричен отпор се менува со нивната деформација. Притоа, за случај на мерен мост, како на сл. 4.21 позната е зависноста на напонот на гршка на мостот U_o од напонот на напојување U_{ex} :

$$U_o = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) U_{ex}$$

каде што R_1 до R_4 се електрични отпори на мерните ленти.

При наметнување на униформен притисок p мерните траки ќе претрпат релативни промени на електричниот отпор:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = k_r \varepsilon_r = k_r \frac{\sigma_{r1} - \mu \sigma_{t1}}{E}$$

$$\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{\Delta R_2}{R_2} = k_t \varepsilon_t = k_r \frac{\sigma_{t4} - \mu \sigma_{r4}}{E}$$

При промена на одделните електрични отпори R_i за ΔR_i ($i = 1, 2, 3, 4$), напонот на грешка ќе биде:

$$U_o = \sum_1^4 \frac{\partial U_o}{\partial R_i} \Delta R_i$$

т.е.

$$U_o = \frac{R_1^2}{(R_1 + R_4)^2} \left[\frac{R_4}{R_1} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) + \frac{R_3}{R_2} \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \right] U_{ex} \quad (4-26)$$

Во овој случај се користи т.н. мерен мост со четири активни гранки кој обезбедува релативно голем излезен сигнал и температурна компензација. Мерните ленти 2 и 4 се залепуваат што е можно поблиску до центарот и се ориентирани за отчитување на тангенцијалниот напон σ_t , бидејќи истиот има максимална вредност (позитивна) при оваа точка. Лентите 1 и 3 се ориентирани за отчитување на радијалниот напон σ_r и се инсталираат што е можно поблиску до крајот на мембраната, каде е максималната (негативна) вредност на σ_r .

Доколку мерните ленти имаат исти отпори ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$), што во практика е и најчест случај, изразот (4-26) се трансформира во:

$$U_o = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_{ex} \quad (4-26a)$$

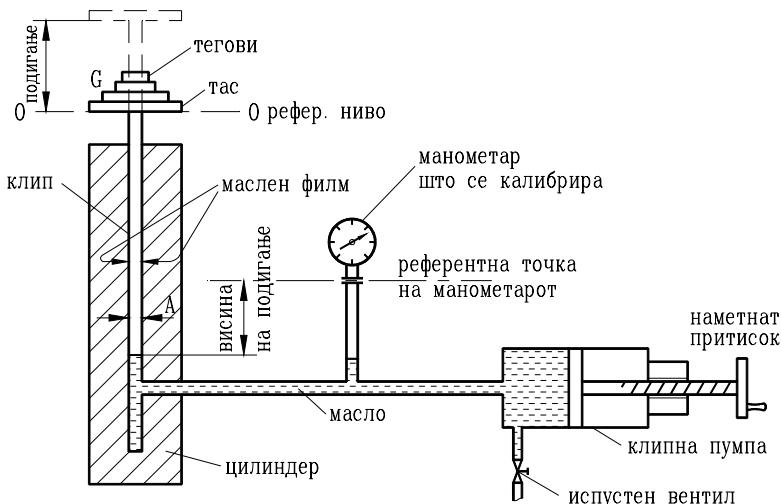
На тој начин, доколку се знаат отстапувањата на отпорите ΔR_i (додиени од факторите на мерниот мост), напонот на грешка U_o може да се определи со равенката на осетливост на мостот (4-26), односно (4-26a), или со негово директно мерење. Мерниот мост може, исто така, да се избаждари, преку зависноста (4-25), за директно отчитување на притисокот p .

4.8 КАЛИБРИРАЊЕ НА МАНОМЕТРИ

Инструментите што се користат за лабораториски мерења, како и други прецизни мерења, обично имаат т.н. класа на точност „0,6“, што одговара на грешка од $\pm 0,6\%$ во однос на крајната вредност на мерната скала. За мерења во кои се бара помала прецизност (обично погонски мерења) се применуваат манометри со класа на точност „1“ и „2“ (грешка $\pm 1\%$ и $\pm 2\%$ во однос на крајната вредност).

Точноста на манометрите од сериско производство, без разлика на нивната декларирана класа на точност, потребно е повремено да се проверува. За калибрирање (баждарење) на ваквите манометри (на пример, манометар со еластичен претворач) стојат на располагање „стандарди“, како доволно точни инструменти. Точноста на овие стандарди зависи од „фундаменталните стандарди“ што се применети во нив. При тоа, постојат повеќе видови на „стандарди“ (еталони) за притисок: прецизни диференцијални манометри, прецизни сонди, клипен манометар со тегови и слично.

Клипниот манометар со тегови (сл. 4.22) нашол широка примена како најточчен инструмент за калибрирање, особено на манометрите со еластични претворачи.



Сл. 4.22 Шема на уред за калибрирање со клипенманометар со тегови

Според сл. 4.22, манометарот што треба да се калибрира е поврзан со комора исполнета со флуид, чиј притисок може да биде дотеран со некој тип на пумпа (на пример, клипна) и испустен вентил. Комората, исто така, е поврзана со вертикален цилиндер со клип, врз кој се поставуваат стандардни тегови („фундаментални стандарди“ во овој случај). Притисокот постепено се зголемува, сè додека клипот и теговите не се доведат во состојба на „пливање“, т.е. кога надпритисокот (вистинскиот притисок) p_i е еднаков на тежината на теговите (G) поделена со површината на пресекот на клипот (A):

$$p_i = \frac{G}{A} \text{ kN/cm}^2$$

Притоа, манометарот што се калибрира покажува одредена вредност p_m , којашто треба да се прилагоди во однос на p_i , со соодветно баждарење на скалата на инструментот, или да се примени добиената калибрационна крива $p_m = ap_i + b$ (види поглавје 3.8.2 и сл. 3.5).

4.9 КАЛИБРИРАЊЕ НА ИНСТРУМЕНТИ ЗА НИСКИ ПРИТИСОЦИ - МАКЛИОДОВ ВАКУУММЕТАР

Некои од претходно прикажаните инструменти можат да се користат за мерење на многу ниски притисоци, па и за мерење на под-притисок (вакуумметри). Во ова поглавје е прикажан принципот на еден многу прецизен вакуумметар, кој може да се користи како стандард за калибрирање на помалку точни инструменти, бидејќи притисокот во овој случај може да се пресмета од познатите димензии на инструментот.

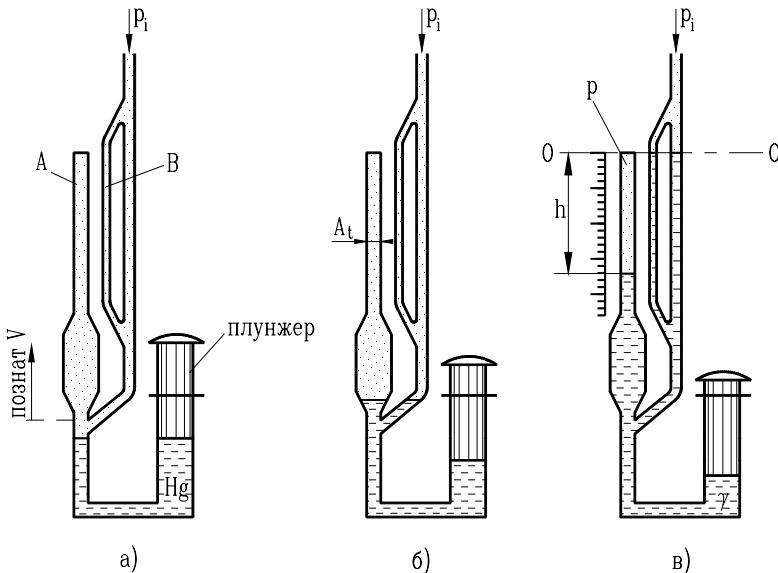
Принципот на функционирање на Маклиодовиот (McLeod) вакуумметар се базира на компресија на флуидот од низок притисок на повисок, кој може да се отчита со некој друг прецизен манометар (на пример, преку столб на жива во хидростатички манометар). На сл. 4.23 се прикажани 3 карактеристични состојби во вакуумметарот:

- плунжерот (клипчето) се повлекува нагоре, а нивото на живата се спушта до определена положба, при што во инструментот навлегува гас со непознатиот притисок p_i ;
- плунжерот се притиска надолу, при што нивото на живата се подига, а дел од гасот се затвора во садот и капиларната цевка со познат волумен V ;
- со компресија се продолжува сè додека во цевката „В“ не се постигне референтното ниво „0-0“. При тоа, во цевката „А“ ќе владее притисок p , кој може да се пресмета според Бојл-Марјотовиот (Boyle-Mariot) закон:

$$\begin{aligned} p_i V &= p A_i h \\ p &= p_i + \gamma h \end{aligned} \quad (4-27)$$

каде што се:

- V - познат волумен на инструментот;
- A_i - површина на пресекот на капиларната цевка „А“;
- h - висина на столбот на затворениот гас, односно висина на столбот на жива во однос на референтното ниво „0-0“;
- $\gamma = \rho g$ - специфична тежина на живата (манометарската течност, доколку се користи некоја друга).



Сл. 4.23 Принциј на Маклиодовиот вакуумметар

Од изразите (4-27) едноставно може да се определи непознатиот притисок p_i :

$$p_i = \frac{\gamma A_t h^2}{V - A_t h} \quad (4-28)$$

или, доколку е исполнет условот $V \gg A_t h$, што во суштина е и реалност, со доволна тачност p_i може да се пресмета од изразот:

$$p_i \approx \frac{\gamma A_t h^2}{V} \quad (4-28a)$$

При употребата на Маклиодовиот вакуумметар треба да се напомене дека, доколку во мерениот гас се појави пареа, како резултат на процесот на компресија, се манифестира соодветна грешка при определувањето на p_i .

ГЛАВА
ПЕТТА

5. МЕРЕЊЕ НА БРЗИНА И ПРАВЕЦ НА СТРУЕЊЕ

5.1 ГОЛЕМИНА НА ЛОКАЛНА БРЗИНА И ПРАВЕЦ НА СТРУЕЊЕ

Во многу експериментални изучувања на струјните феномени, потребно е да се определи големината и правецот на брзинскиот вектор во определена точка, како и промената на овие големини од точка до точка; т.е. потребно е да се даде опис на струјното поле. Бидејќи условите во „математичка точка“ не е можно да се измерат, со соодветни инструменти, со доволна точност, можат да се определат „средните услови“ преку мала површина или волумен.

За мерење на струјната брзина и нејзиниот правец во течни и гасни флуиди, можат да се применат воглавно следниве методи:

- 1) преку разлика на притисоци;
- 2) по механички пат, во зависност од аголната брзина на ротирачки лопатки;
- 3) со мерење на температурата, односно одведената топлина од претходно загреана жица;
- 4) преку доплерски ефект на растурена светлина од честици на флуидот, односно ласер-доплер анемометрија.

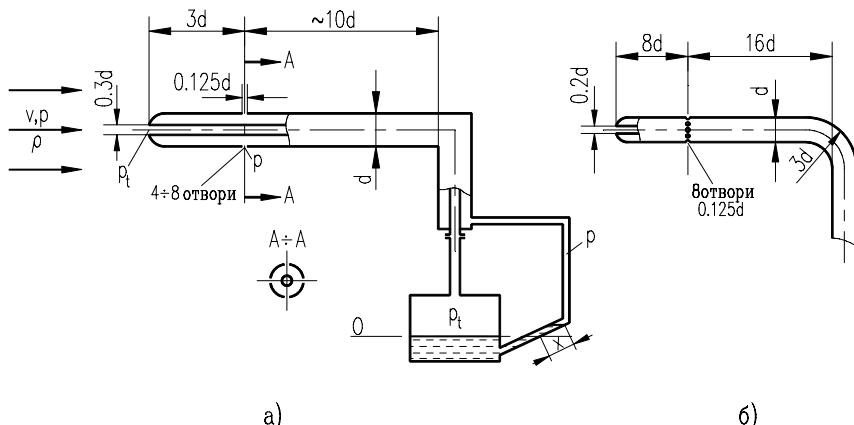
5.2 МЕРЕЊЕ НА БРЗИНА И ПРАВЕЦ НА СТРУЕЊЕ ПРЕКУ РАЗЛИКА НА ПРИТИСОЦИ СО ПРАНДЛ-ПИТО СОНДА

Во некои случаи правецот на векторот на брзината е познат со доволна точност и без да се вршат некои посебни мерења. Доколку правецот на брзината не е познат, тој може да се определи со посебни модифицирани сонди (види поглавје 5.3). Нека се претпостави дека правецот е познат, така што стандардната Прандл-Пито сонда може да се постави во правец на векторот на брзината со отворот при точката на стагнација спротивно на струењето (сл. 5.1). Притоа, за случај на стационарно еднодимензионално струење на некомпресибilen флуид, со занемарување на хидрауличните загуби, позната е врската (4-2) помеѓу тоталниот и струјниот притисок, односно:

$$\frac{p_t - p}{\frac{v^2 \rho}{2}} = 1$$

од каде брзината може да се изрази како:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p)}{\rho}} \quad (5-1)$$



Сл. 5.1 Мерење на брзина со Прандл-Пито сонда

Очигледно дека, доколку е измерена разликата на притисоците $p_t - p$, со изразот (5-1) едноставно може да се пресмета и брзината на флуидот во посматраната точка. За мерење на $p_t - p$ се приклучува соодветен манометар за диференцијален притисок (во зависност од мерното подрачје) на приклучните места на Прандл-Пито сондата.

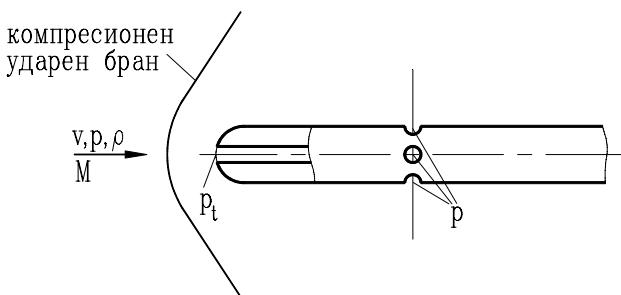
Изразот (5-1) со доволна точност може да се користи и за определување на брзина на струење на компресибilen флуид во подрачје со $M < 0,2$.

За струење на компресибilen флуид со $M > 0,2$, потребно е да се земе во обсир и неговото влијание, односно:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p)}{\rho \cdot f(M, \kappa)}} \quad (5-2)$$

каде што $f(M, \kappa)$ е зависност според изразот (4-8) или (4-8a).

За надзвучни струења ($M > 1$), секако дека треба да се земе предвид влијанието на компресиониот ударен бран што се јавува на челото на сондата (фронтален компресионен удар). Притоа, помеѓу овој ударен бран и носот на сондата брзината е подзвучна (сл. 5.2) и се смалува до нула (при точката на стагнација).



Сл. 5.2 *Формирање на компресионен ударен бран при надзвучно струење*

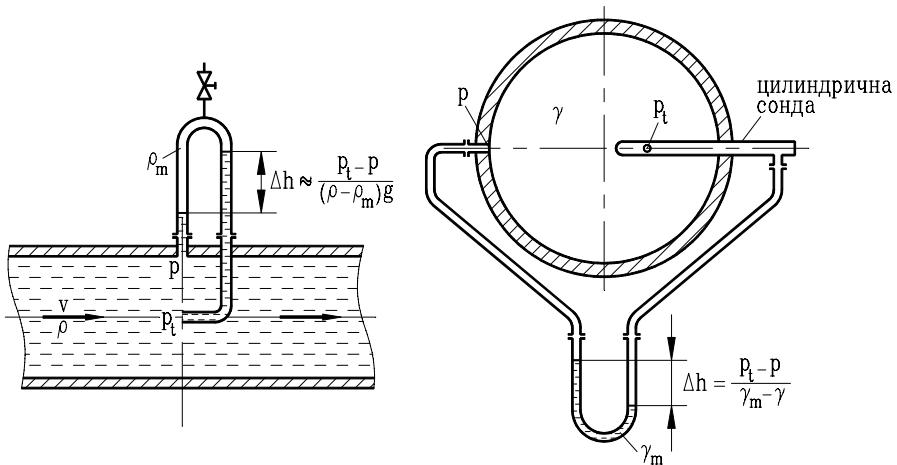
Од анализата на надзвучните струења е добиен израз на зависност помеѓу тоталниот и струјниот притисок, од којшто може да се пресмета брзината v :

$$\frac{p_t}{p} = M^2 \left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \left[\frac{2\kappa M - \kappa + 1}{M^2(\kappa + 1)} \right]^{1 - \frac{1}{\kappa - 1}} \quad (5-3)$$

Со понатамошно средување на изразот (5-3) и негово развивање во ред, за случај на надзвучко струење на воздух, со земање предвид дека $\kappa = 1,4$, се добива практичен израз за зависноста помеѓу измерените вредности на тоталниот и струјниот притисок p_{ti} и p_i и брзината на струење v (види, исто така, поглавја 4.1 и 4.3):

$$\frac{p_{ti} - p_i}{v^2 \rho} = 1,8394 - \frac{0,7717}{M^2} + \frac{0,1642}{M^4} + \frac{0,0352}{M^6} + \dots \quad (5-4)$$

Како што беше претходно истакнато, стандардната Прандл-Пито сонда нашла широка примена при мерења на брзини во струења со познат правец на векторот на брзината. Често пати, наместо стандардната изведба (сл. 5.1a), за случаи на нееднолични струења, подобри резултати покажала т.н. NPL американска сонда (сл. 5.1б), којашто предизвикува помало нарушување на струјното поле, поради поголемата оддалеченост на носот и носачот на сондата. За надзвучни струења, исто така, примена наоѓа и т.н. „надзвучна сонда“ (види сл. 4.5, поглавје 4.2).



Сл. 5.3 Мерење на брзина со посебна Пито сонда и отвор во сидот на цевковод

За мерење на брзината на стационарно еднодимензионално струење во цеководи, покрај комбинираната Прандл-Пито сонда, се-како дека може да се примени и методот на мерење на разликата на притисоците ($p_t - p$) со помош на посебна Питот сонда (за тоталниот притисок p_t) и отвор во сидот на цевката (за струјниот притисок p), види сл. 5.3.

Притоа, треба да се внимава, стагнационата точка на сондата и отворот за струен притисок да бидат во иста ортогонална рамнина.

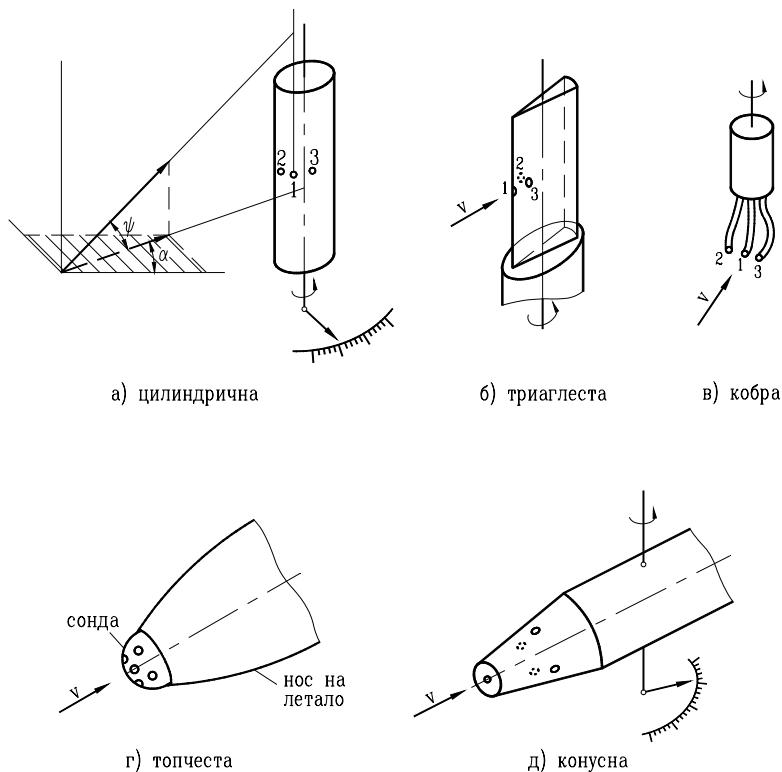
За определување на брзината на струења за кои не е познат правецот на векторот на брзината (рамнински и просторни струења), се употребуваат посебни, модифицирани сонди.

5.3 МЕРЕЊЕ МА БРЗИНА И ПРАВЕЦ НА СТРУЕЊЕ СО МОДИФИЦИРАНИ СОНДИ

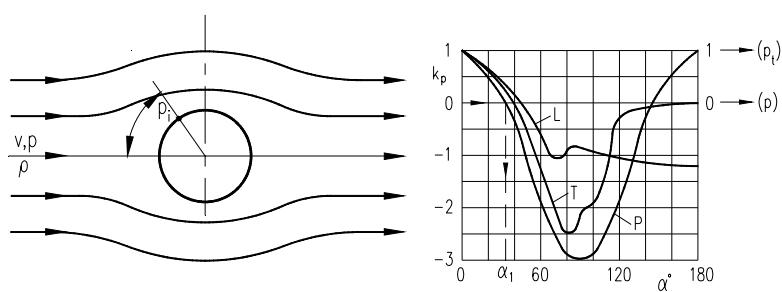
Во многу случаи на истражувања на струјни феномени, правецот на брзинскиот вектор не е однапред познат, а за неговото определување се користат посебни сонди кои претставуваат модификација на стандардните Прандл-Пито сонди. На сл. 5.4 се прикажани некои видови модифицирани сонди со кои може да се определи нападниот агол, како и притисокот и брзината на струењето. Овие сонди содржат еден отвор за тоталниот (стагнациониот) притисок и еден или повеќе отвори за струјниот притисок. Тие нашле широка примена при лабораториски и погонски истражувања на струјното поле во просторни струења, комплицирани канали, хидраулични и гасни машини, аеронаутиката и сл. Потребно е да се напомене дека модифицираните сонди задолжително се баждарат со нивно споредување со стандардни прецизни сонди и однапред познати струења.

Најголем број од модифицираните сонди се базираат на мерење на притисокот на површината на телото на сондата поставена во флуидот што струи. Притоа, потребно е да се познава распределбата на притисокот по површината на телото на соодветната сонда, при определен режим на струење (на пример: ламинарно, турбулентно), како би можело да се определат притисокот, брзината и правецот на струење.

Карактеристичен пример од механика на флуиди е опструиување на цилиндер, за кој случај распределбата на притисокот по неговата цилиндрична површина за ламинарно (L), турбулентно (T) и потенцијално (P) струење е прикажана на сл. 5.5.



Сл. 5.4 Видови модифицирани сонди



Сл. 5.5 Распределба на притисокот по цилиндрична површина

Во дијаграмот на сл. 5.5 е дадена промената на т.н. бездимензионален коефициент на притисокот k_p , дефиниран како:

$$k_p = \frac{\frac{p_i - p}{v^2 \rho}}{2} \quad (5-5)$$

каде се:

- p - струен притисок,
- p_i - притисок измерен во соодветната точка на површината на сондата (цилиндрична во овој случај).

Очигледно, согласно со распределбата на сл. 5.5, доколку мерните отвори се изведат на определени позиции на цилиндричната сонда, можно е да се измерат струјниот и тоталниот притисок, а со тоа да се определат и правецот и брзината на струењето. На пример, отвори на површината на сондата за кои:

$$k_p = \frac{\frac{p_i - p}{v^2 \rho}}{2} = 0 \quad (5-6)$$

даваат можност за директно мерење на струјниот притисок; од (5-6) следи: $p_i = p$ при агол на положба на мерниот отвор $\alpha = \alpha_1$.

Отвори за кои:

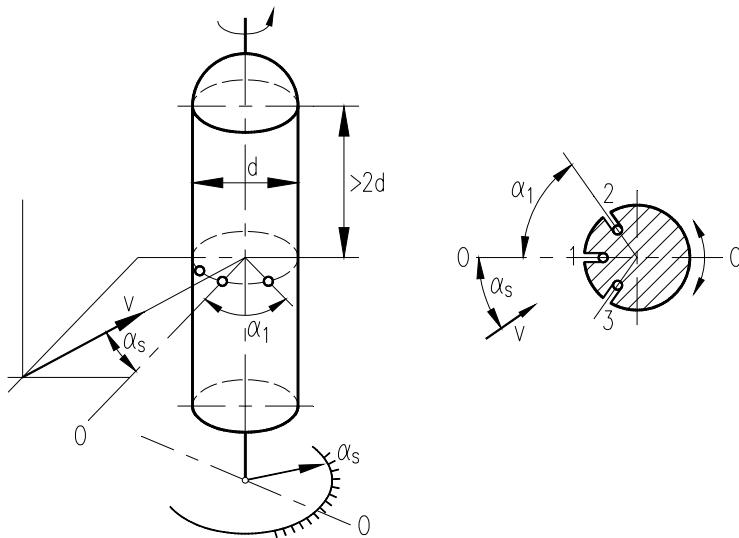
$$k_p = \frac{\frac{p_i - p}{v^2 \rho}}{2} = 1 \quad (5-7)$$

даваат можност за директно мерење на тоталниот притисок; во овој случај, од изразот (5-7) следи:

$$p_i = p_t = p + \frac{v^2 \rho}{2}$$

при агол на положба на мерниот отвор $\alpha = 0$.

Врз основа на овој принцип изведена е и цилиндричната сонда (види сл. 5.4а и сл. 5.6), која воглавно се користи за мерења при дводимензионални (рамнински) струења.

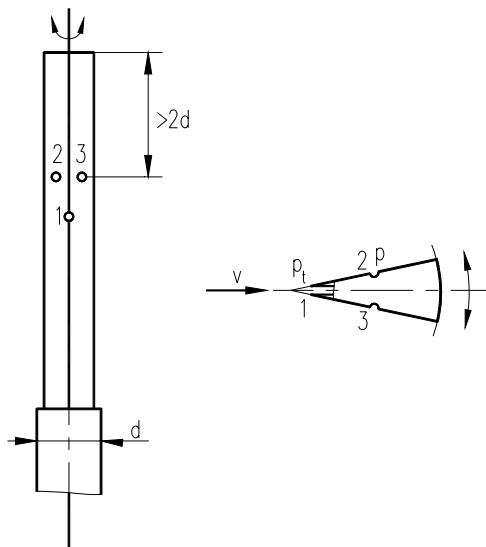


Сл. 5.6 Цилиндрична сонда за дводимензионално струење

Во овој случај средниот мерен отвор 1 служи за мерење на тоталниот притисок p_t , доколку притисоците измерени преку мерните отвори 2 и 3 се исти меѓу себе ($p_2 = p_3$). Во конкретен случај, потопената сонда во флуидот што струи се завртува околу нејзината оска се додека не се постигне состојбата $p_2 = p_3$ (нулта состојба); притоа, аголот на завртување во однос на стартната положба α_s , се отчитуваа од соодветниот агломер и го дефинира правецот на струењето во однос на стартната - референтна положба. При нултата состојба ($p_2 = p_3$), преку мерниот отвор 1 се добива сигнал за тоталниот притисок p_t , додека преку мерниот отвор 2 или 3 информација за струјниот притисок p . Со мерење (или пресметување) на разликата $p_t - p$, преку изразите (5-1) или (5-2), лесно може да се пресмета и интензитетот на брзината на струењето.

Цилиндричната сонда се применува со доволна точност за струења со Махов број $M < 0,55$. За поголеми Махови броеви, веќе се јавува нарушување при мерењето на струјниот притисок предизвикано од влијанието на компресиониот удар.

За струења со поголеми брзини, подобри резултати покажала т.н. триаглеста сонда (сл. 5.4б. и сл. 5.7), која е помалку осетлива на Re - от и M - от број.

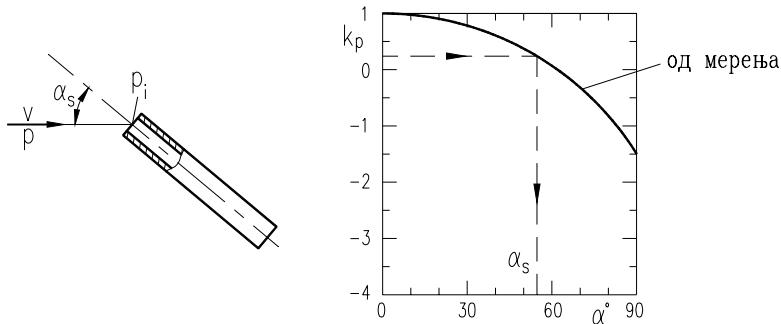


Сл. 5.7 Триаглесита сонда

Кај триаглестата сонда, страничните отвори 2 и 3 се изведени на места при кои е задоволен условот (5-6), односно $k_p = 0$. На тој начин, оваа сонда може да се користи исто како и цилиндричната; со помош на мерниот отвор на носот на сондата се мери тоталниот притисок ($p_1 = p_t$), при поставување на сондата во положба при која $p_2 = p_3 = p$. На ист начин како и во претходниот случај се определуваат и правецот и интензитетот на брзинскиот вектор.

За определување на струјните параметри, со помала точност, може да се употреби и стандардната Питот сонда, доколку стои на располагање соодветниот баждарен дијаграм (сл. 5.8). За познат струен притисок p , со мерење на притисокот p_i и со пресметување на коефициентот k_p , изразот (5-5), од дијаграмот на сл. 5.8 се определува и аголот на струење α_s .

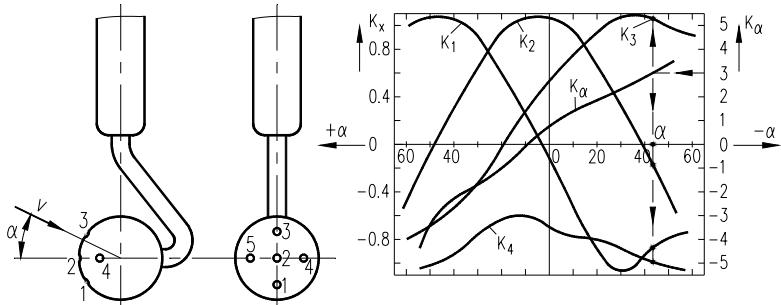
За определување на притисокот, брзината и правецот во просторни струења се применуваат т.н. тродимензионални сонди (види сл. 5.4 $\dot{\gamma}$ и сл. 5.4 δ). Овие сонди содржат повеќе мерни отвори (најчесто 5), од кои единиот служи за тоталниот притисок, а другите за определување на притисокот, правецот и брзината на струењето. Просторните сонди нашле широка примена и во аеронаутиката, за определување на параметрите на летот на авионот (брзина, правец на летање, висина и слично).



Сл. 5.8 Определување правец со Пито сонда

Карактеристичен пример на просторна сонда е топчестата сонда (сл. 5.4 \bar{e} и сл. 5.9). Функционирањето на оваа сонда обично се базира на нултиот метод; со ротирање околу нејзината оска се балансираат притисоците во мерните отвори 4 и 5 ($p_4 = p_5$), после што, со мерење на притисоците во 1 и 3 и со користење на калибрациониот дијаграм (сл. 5.9) се определуваат брзината и аголот на струење.

Топчестата сонда е осетлива на влијанието на граничниот слој, особено за случај на премин од ламинарен граничен слој во турбулентен. Често пати околу телото на сондата се јавува асиметрично струење, поради побрзото одлепување на струењето на едната страна од површината отколку на другата. Покрај тоа, топчестата сонда е осетлива и на влијанието на Маховиот број, како и на влијание на сидни површини во близина на истата. Оваа сонда наоѓа примена за струења во област $3,5 \cdot 10^3 < Re < 10^5$. За струења со поголеми Махови броеви, најчесто се применува конусната сонда (сл. 5.4 d), чие функционирање е слично на топчестата.



Сл. 5.9 Баждарен дијаграм на топчестата сонда

Дијаграмот на сл. 5.9 ги содржи баждарните криви за топчестата сонда, кои ги даваат промените на соодветните коефициенти k_x :

$$k_x = \frac{\frac{p_x - p}{v^2 \rho}}{2} \quad (5-8)$$

во зависност од нападниот агол во нормалната рамнина α , кајшто p_x е измерен притисок во соодветниот мерен отвор ($x = 1,2,3,4,5$). Аголот α се определува со помош на коефициентот k_α , дефиниран како:

$$k_\alpha = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_4} = \frac{k_3 - k_1}{k_2 - k_4} \quad (5-9)$$

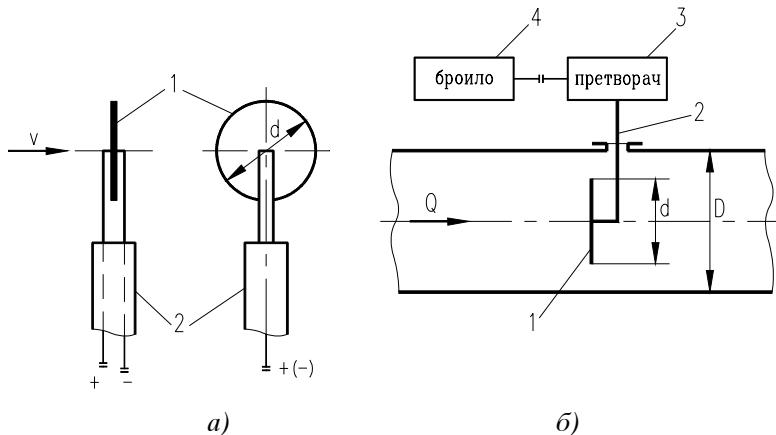
За пресметаниот коефициент k_α (преку измерените притисоци p_1 до p_4), од баждарниот дијаграм се добива аголот α , како и соодветните коефициенти k_x , со кои можат да се определат брзината и притисокот на струењето со помош на изразите:

$$\frac{v^2 \rho}{2} = \frac{p_2 - p_1}{k_2 - k_1} = \frac{p_2 - p_3}{k_2 - k_3} = \frac{p_2 - p_4}{k_2 - k_4} \quad (5-9)$$

$$p = p_1 - k_1 \frac{v^2 \rho}{2} = p_2 - k_2 \frac{v^2 \rho}{2} \quad (5-10)$$

5.4 ПЛОЧЕСТА СОНДА - ДИНАМОМЕТРИЧКО МЕРИЛО

Оваа сонда може да служи за мерење на локална брзина ако се изведе со мали димензии, а исто така доста често се користи за мерење на проток низ цевководи. Притоа, и во двата случаја брзината (т.е. протокот) се определува преку силата со која флуидот дејствува врз дискот (1), кој е поврзан преку носачот (флексибилна шипка 2) со пневматски или електричен претворач (3), види сл. 5.10.



Сл. 5.10 Динамометричко мерило за мерење на
а) локална брзина
б) проток

Силата со која флуидот дејствува врз дискот на сондата, според познатата врска од механика на флуиди, се определува како:

$$F_d = K_d \rho A_d \frac{v^2}{2} \quad (5-11)$$

Со тоа, разликата на притисоците на предната и задната страна на дискот, $\Delta p = p_1 - p_2$, е дефинирана со зависноста:

$$\Delta p = \frac{F_d}{A_d} = K_d \rho \frac{v^2}{2} \quad (5-11a)$$

Од изразот (5-11), односно (5-11a), може да се определи брзината на струење во посматраната точка:

$$v = \sqrt{\frac{2F_d}{K_d \rho A_d}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{K_d \rho}} \quad (5-12)$$

Коефициентот на силата K_d , за овој вид сонди, обично е $K_d \approx 1,43$.

Средниот проток низ цевовод во којшто е инсталирана ваквата сонда (сл. 5.10б), се определува преку проточната површина A_0 :

$$Q = A_0 \sqrt{\frac{2}{K_d}} \sqrt{\frac{F_d}{\rho A_d}} = C_d A_0 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (5-13)$$

каде што се:

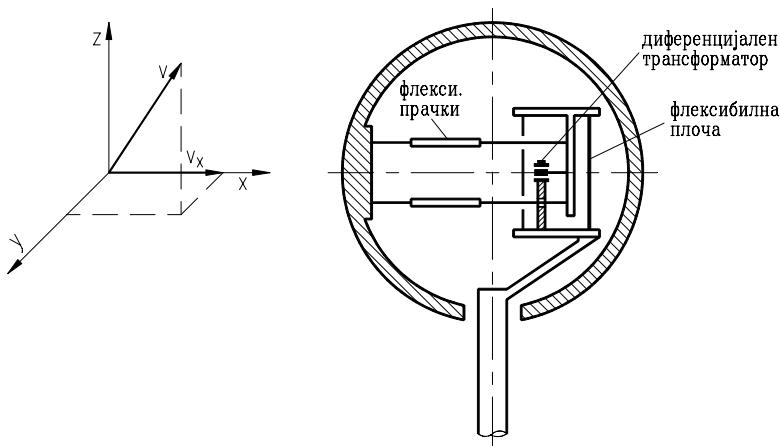
$$C_d = \sqrt{\frac{2}{K_d}} ;$$

$$A_0 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} ;$$

$$A_d = \frac{\pi d^4}{4} ;$$

D и d - дијаметри на цевката и сондата.

За мерења брзини во просторни струења, во последно време, развиена е динамометричка методологија со топчеста сонда. Притоа, во топчето на сондата се изведени системи за мерење на силата од флуидот врз топката во секоја насока посебно (F_{dx} , F_{dy} , F_{dz}).



Сл. 5.11 Динамометричка топчеста сонда

На сл .5.11 шематски е прикажан соодветниот механизам во x насоката, во кој компонентата на силата F_{dx} се пренесува на флексибилната плоча, чие задвижување се мери со соодветен електричен претворувач (со диференцијални трансформатори или мерни ленти); идентични механизми се инсталирани во топчето и за другите две насоки y и z . На тој начин, со мерење на компонентите на дејствувачката сила во сите три меѓу себе нормални насоки, со изразот:

$$F_{di} = \frac{K_d \rho A_{di} v_i^2}{2} \quad (5-14)$$

се определуваат и соодветните компоненти на брзинскиот вектор v_i .

каде што се:

- i - соодветните координати x, y, z ;
- A_{di} - проектирана површина нормално на соодветната брзинска компонента v_i ;
- $K_d \approx 0,567$ - коефициент на сила за ваквиот тип на сонди.

5.5 МЕРЕЊЕ НА БРЗИНА ПРЕКУ АГОЛНА БРЗИНА НА РОТИРАЧКИ ЛОПАТКИ

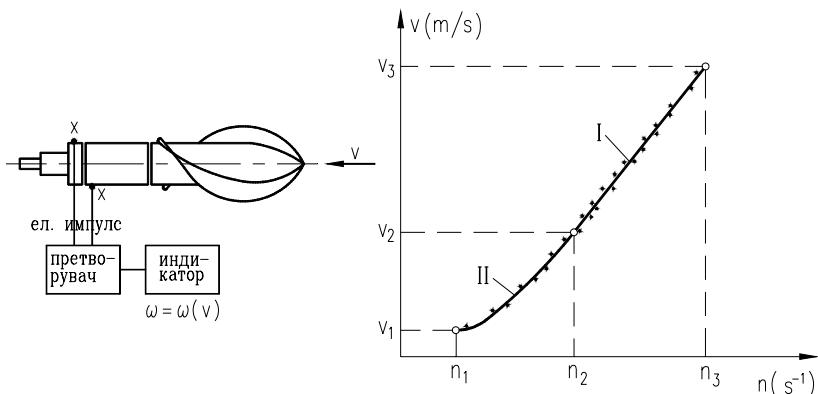
Ќај овие инструменти, брзината се определува како зависност од аголната брзина (или бројот на вртежи) на соодветното мерило. При тоа, потребно е да се определи калибрационата крива, односно зависноста од аголната брзина $v = v(\omega)$.

Треба да се напомене дека, со овие инструменти се мери средната брзина на флуидот којшто приструјува низ проточната површина на инструментот, од која причина успешно се користат при мерења во релативно големи проточни површини.

Основен составен елемент на еден инструмент, кој работи на наведениот принцип, е посебен ротор со ротирачки лопатки (крилца). Во ова поглавје се дадени основните принципи на некои од најчесто применуваните инструменти со ротирачки лопатки.

5.5.1 Хидрометриско крило - турбински мерач

Хидрометриското крило е инструмент кој најчесто се применува за мерење на брзина на вода во реки, канали, турбински цевоводи и слично. Роторот е изведен со 2 до 3 лопатки со завојна површина (види сл. 5.12). Најчесто крилцата се изливат со главчината во едно парче, а дијаметарот на ротирното коло обично е $d = 150 \div 200$ mm, или помал ако брзината се мери во близина на сидот на каналот или цевководот. Бројот на вртежи зависи од брзината на аксијалното струење, а се мери преку електричните контакти (x) на соодветниот електричен генератор.



Сл. 5.12 Инструмент со хидрометриско крило и баздарен дијаграм

Зависноста на брзината од бројот на вртежи е приближно праволиниска:

$$v = an + b \quad (5-15)$$

во широк дијапазон на промена (подрачје I на дијаграмот). Меѓутоа, при мали брзини, за кои е значително влијанието на граничниот слој, зависноста е параболична (подрачје II):

$$v = an^2 + bn + c \quad (5-16)$$

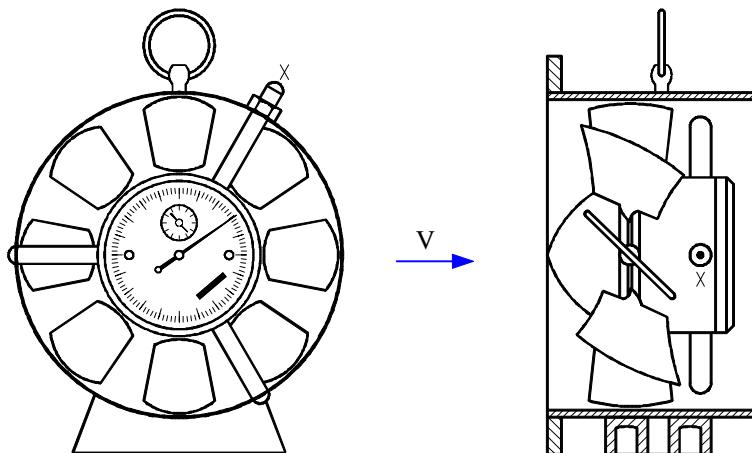
Обично, кривата на баждарење се поделува на неколку сектори на брзината, и за секој сектор посебно се опредлуваат константите a , b и c . Калибрирањето се препорачува да се врши пред и по мерењето (точноста обично е $\pm 2\%$ од брзината).

На сличен принцип функционира и т.н. турбински мерач на проток во цевководи (види поглавје за мерење на проток).

5.5.2 Анемометри со крилца

Во литературата често се среќава поимот анемометар, како инструмент за мерење на брзини при струење на гасови; меѓутоа, сè почесто со овој назив се именуваат воопшто инструментите за мерење на брзина на кој и да било флуид.

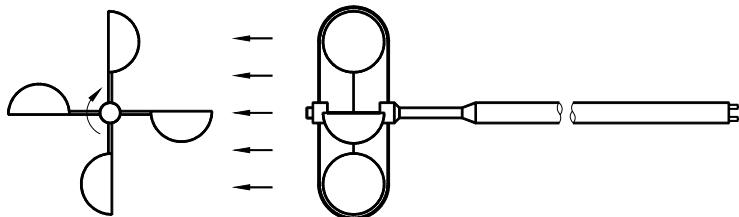
Анемометарот со крилца има сличен принцип на функционирање како хидрометриското крило, а се применува за мерење на брзина на воздух: ветар, струење во аеротунели и слично. На сл. 5.13 е прикажан анемометар од овој тип со вообичаена изведба.



Сл. 5.13 Анемометар со крилца

Најпознат анемометар со крилца е т.н. Волтманово (Woltman) крило, при кој, периферната брзина на ротирното коло (u) е усогласена со аксијалната брзина на струењето на воздухот (v). На скалата на инструментот обично се отчитува изминатиот пат во m , кој, ако се подели со времето на мерење во s (отчитано од вградениот саатен механизам), ја дава соодветната вредност на брзината. Овој инструмент е снабден и со посебен бројач (најчесто вграден во самата главчина на ротирното коло) со кој се мери и бројот на вртеки. Брзината на аксијалното струење може да се измери и преку електричните контакти (x), на ист принцип како кај хидрометриското крило. Главно се мерат брзини на воздух во дијапазон од $0,1 < v < 10 \text{ m/s}$.

За мерење на поголеми брзини при струење на воздух (во дијапазон: $1 < v < 50 \text{ m/s}$) се применува анемометарот со лопатки, прикажан на сл. 5.14.



Сл. 5.14 Анемометар со лопатки

Ваквите анемометри (сл. 5.14) се прилично осетливи на нестационарни струења, особено во близина на сидови. Од тие причини, успешна примена нашле при мерења на отворени струења на воздух (метеоролошки мерења). Со анемометарот со лопатки успешно се мерат сите ветрови нормални на неговата оска, за разлика од обичниот анемометар (Волтмановиот) кај којшто оската мора да биде во правец на струењето.

Баждарењето на анемометрите со крилца најдобро се врши во aerотунели, со дијаметар на млазникот $D \geq 800 \text{ mm}$.

5.6 АНЕМОМЕТРИ СО ЗАГРЕАНА ЖИЦА И ЗАГРЕАН ФИЛМ

Примената на претходно изложените методи за мерење на брзина е прилично ограничена за случаи на нестационарно струење. Причини за тоа, на пример при мерење на брзина преку разлика на притисоци, се: временското доцнење во самата сонда, приклучната врска и манометарот; резонантните осцилации во столбот на флуид во сондата и опремата за мерење на притисок (У цевка и слично).

Големината на грешката, и кај најосетливите инструменти за мерење на брзина врз принципот на разлика на притисоци, зависи од фреквенцијата и амплитудата на осцилациите на брзината, како и од карактеристиките на сондата, покажувачот и другата опрема. Притоа, искуството покажало дека методот на мерење на v преку $\Delta p = p_t - p$ е применлив со доволна точност само за струења со фреквенција од неколку херци.

Меѓутоа, во струјната техника многу често се јавува потреба за мерење на струјното поле во нестационарни струења; како што се истражувања на турбулентни струења, граничен слој и слично. За вакви случаи широка примена нашле анемометрите со загреана жица и филм, со кои е овозможено мерење на брзини при струења на гасови и течности и тоа, од подрачја на стационарни струења па сè до многу брзи промени на брзината, дури до фреквенции од неколку kHz. Поради многу малите димензии на сондата, овој вид анемометар овозможува мерење на брзина практично во точка.

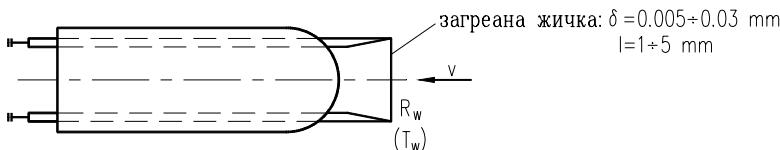
Подрачјето на примена на анемометарот со загреана жица(hot-wire anemometer), како и анемометарот со загреан филм (hot-film), е доста широко; како на пример: струења во млазни мотори, случаи каде Питот сондата не може да се употреби поради својата големина, виорни и други турбулентни струења, испитувања при струења со високи и променливи температури, мерења во акустиката, истражувања на гранични слоеви, истражувања на компресиони удари, мерења на правец и промена на правец на струење, истражување на суперсонични струења и друго.

5.6.1 Принцип на функционирање на анемометарот со загреана жица

Анемометарот со загреана жица работи на принципот на врска помеѓу одведената топлина од претходно загреана жица со електрична

енергија и брзината на струењето на флуидот, кој ја опструјува загреаната жица. Теоретската анализа на функционирањето на овие мерни уреди е прилично сложена, па во оваа прилика ќе бидат изложени само основните поими.

Сондата на анемометарот со загреана жица се состои од многу тенка жица (дебелина $\delta = 0,005 \div 0,03 \text{ mm}$ и должина $l = 1 \div 5 \text{ mm}$), заварена или тврдо залемена меѓу два танки носача (види сл. 5.15). Најчесто се употребуваат жици од волфрам (тунгsten), легура на платина или некој друг погоден метал.



Сл. 5.15 Сонда на анемометар со загреана жица

Анемометрите со загреана жица обично се изведуваат во два основи типа: а) анемометри со константна струја и б) анемометри со константна температура.

а) **Анемометри со константна струја.** Кај овој тип, низ сондата (со фин електричен отпор) струи константна еднонасочна струја (DC), којашто соодветно ја загрева жичката. Во зависност од големината на брзината на флуидот којшто ја обструјува жицата, v , доаѓа до различно одведување на топлина од загреаната жица, односно доаѓа до промена на температурата на жицата T_w . Промената на температурата T_w предизвикува соодветна промена на електричниот отпор на жицата R_w . Според тоа, постои функционална зависност на брзината и електричниот отпор:

$$R_w = R_w(v).$$

Податокот за брзината v во овој случај најдобро се добива со мерење на електричниот напон на сондата:

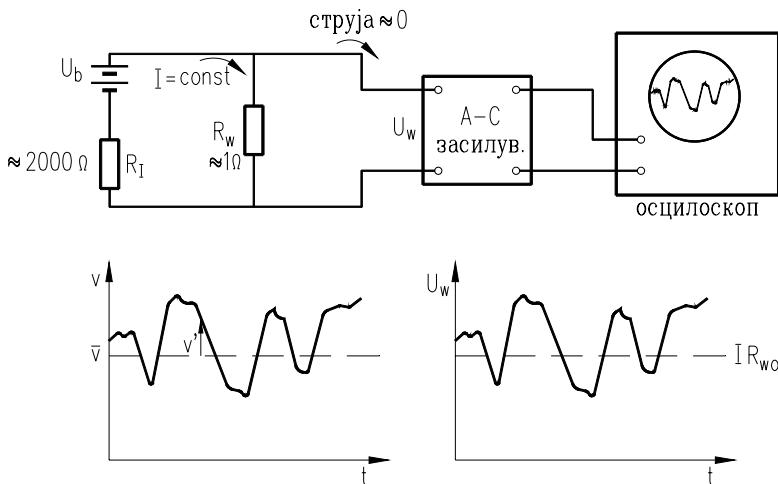
$$U_w = R_w I \quad (5-17)$$

кој при $I = const$, преку зависноста $R_w(v)$, е исто така зависен од брзината:

$$U_w = U_w(v).$$

Зависноста $v(U_w)$ е нелинеарна и се добива со калибрирање со познати струења.

На сл. 5.16 е прикажано основното електрично коло на анемометар со загреана жица и константна струја.



Сл. 5.16 Електрично коло на анемометар со загреана жица и константна струја

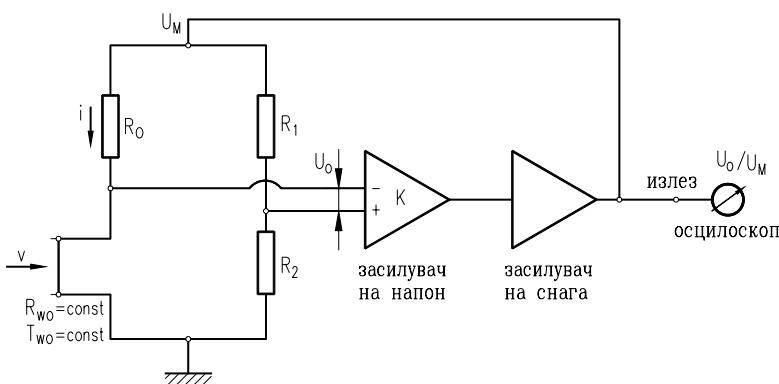
Во овој случај, со доволна точност се зема дека е $I = \text{const}$. и покрај промената на R_w , бидејќи $R_I \gg R_w$ ($R_I \approx 2000 \Omega$, $R_w \approx 1 \Omega$). Прикажаното коло е доволно осетливо за да можат да се мерат и флукутациите на брзината при турбулентни струења. На пример, при брзина $v = \bar{v} + v'$ (каде што се: \bar{v} - просечна вредност, v' - флукутирачка компонента) отпорот ќе биде $R_w = R_{w0} + R'_w$, а од осцилоскопот се отчитува соодветниот напон U_w , како и неговите флукутации со тек на времето, со што преку соодветната калибрација, се определува брзината v , односно \bar{v} и v' . Прикажаното коло може да биде директно приклучено и на соодветен пишувач или на компјутер за презентирање и понатамошна обработка на податоците.

Кај анемометарот со константна струја, струјата треба да има доволен интензитет за да обезбеди соодветно загревање на жицата над температурата на флуидот при определена просечна брзина. Меѓутоа, ако струењето наеднаш се смали или целосно запри, жицата ќе изгори,

бидејќи конвективното одведување на топлина од истата не го следи генерирањето на топлина пред да се постигне точката на топење на жицата. Типот на анемометар со константна температура го нема овој недостаток, бидејќи соодветната повратна врска, во електричното мерно коло, автоматски ја дотерува струјата на загреаната жица за да ја обезбеди бараната (сигурна) температура за која и да било брзина на струење. Друга предност на анемометарот со константна температура лежи во природата за динамичка компензација; додека кај типот со константна струја, компензационата мрежа мора да биде дотерувана по секоја значајна промена на брзината, повратната врска кај анемометарот со константна температура обезбедува точна компензација за флукутации на брзината од секаква големина.

б) **Анемометри со константна температура.** Поради горе наведените предности за температурна и динамичка компензација, анемометрите со константна температура наоѓаат поширока примена од анемометрите со константна струја. Како недостаток на анемометарот со константна температура се јавува повисокото ниво на бучава во електрониката (што спречува мерење на многу мали брзински флукутации) и евентуалните тешкотии во конструирањето на доволно силни DC засилувачи.

Анемометарот со константна температура функционира на принципот на одржување постојана температура $T_w = const$ (односно електричен отпор $R_w = const$) на загреаната жица. Симплифицирана функционална шема на електричното коло на ваквиот анемометар е прикажана на сл. 5.17.



Сл. 5.17 Функционална шема на анемометар со константна температура

Сондата на анемометарот со загреана жица обично се приклучува во една од гранките на електричен „мерен мост“, Витстонов (Wheatston) и слично. Една од можните комбинации е дадена на сл. 5.17. Во останатите гранки на мерниот мост се инсталирани фиксни отпорници R_0 , R_1 и R_2 со голема стабилност (отпорност од 1 до 20Ω). Кога мостот е во рамнотежа, загреаната жица има отпор R_{w0} и се наоѓа на работна температура T_{w0} . При рамнотежа на мостот исполнет е условот:

$$R_{w0} R_1 = R_0 R_2 \quad (5-18)$$

и тогаш низ сондата тече соодветна струја i која при дадени услови врши загревање на жицата на температура T_{w0} , а излезниот напон (напон на грешка) е $U_o = 0$.

Ако настане промена на брзината на флуидот v , се менува и количината на одведена топлина од жицата, што предизвикува промена на температурата на жицата ($T_{w0} \rightarrow T_w$) и нејзиниот отпор ($R_{w0} \rightarrow R_w$). Како резултат на оваа промена се јавува дебаланс на мостот:

$$R_w R_1 \neq R_0 R_2 \quad (5-19)$$

што предизвикува зголемување на напонот на грешка U_o ($U_o > 0$).

Напонот U_o се засилува во засилувачите за напон и моќност и предизвикува промена на напонот на напојување на мостот U_M . Со промената на U_M се менува и електричната струја низ сондата i , на вредност која повторно го доведува мостот во рамнотежна состојба (5-18), односно ги враќа температурата и отпорот на почетните работни вредности ($T_w \rightarrow T_{w0}$; $R_w \rightarrow R_{w0}$). На тој начин се одржуваат константани температура и отпор на сондата ($T_{w0} = \text{const}$ и $R_{w0} = \text{const}$), а брзината v може да се определи преку струјата i , односно напонот на напојување на мостот U_M .

Врската помеѓу напонот на напојување и брзината на флуидот е нелинеарна и има облик:

$$U_M^2 = A + Bv^n \quad (5-20)$$

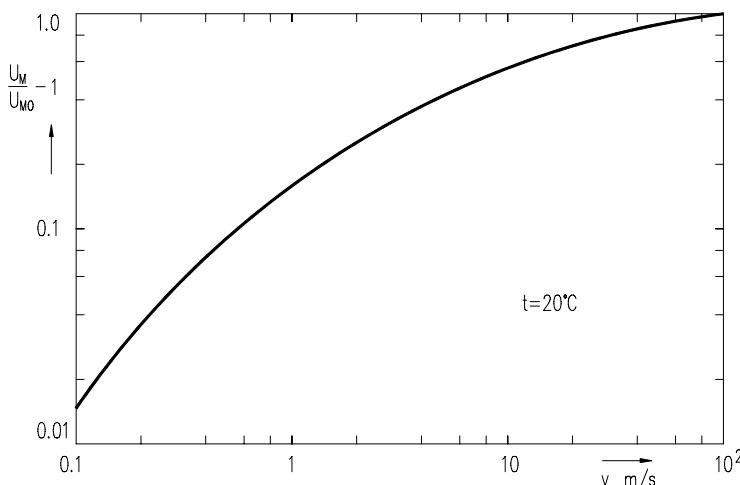
каде што се:

A и B - константи,

n - експонент со вредност од $\approx 0,5$.

На сл. 5.18 е прикажана калибрационата крива, односно зависноста $U_M = U_M(v)$, добиена со баждарење на конкретна сонда со загреана жица ($\delta = 0,005 \text{ mm}$). На дијаграмот е прикажана релативната промена на напонот $(U_M / U_{M0} - 1)$, при што U_{M0} е напон при брзина $v = 0$.

Често пати, со електронски линеаризатори, се врши линеаризација на излезниот напон, со што се добива линеарна врска помеѓу брзината и напонот.



Сл. 5.18 Калибрационен дијаграм на анемометар со заѓреана жица

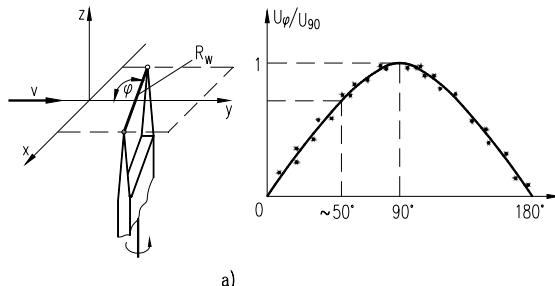
Преносот на топлина од флуидот што струи на загреаната жица (и обратно) е поврзан со загуби предизвикани од: виорното струење околу жицата, компресибилноста на флуидот, кондуктивноста и зрачењето на сондата и нејзиниот носач, цврстината на напнатата жица, појавата на вибрации, промената на карактеристиките на материјалот на жицата и слично. Сите овие влијанија треба да се земат предвид при дефинирањето на зависноста $v = v(U_M)$, односно да се елиминираат со соодветно баждарење на сондата со воведување на струења со познати брзини (види сл. 5.18) и со определување на областа на нејзината применливост.

Анемометрите со загреана жица се користат воглавно за мерења на брзини на компресибилни флуиди во широк дијапазон, од многу мали

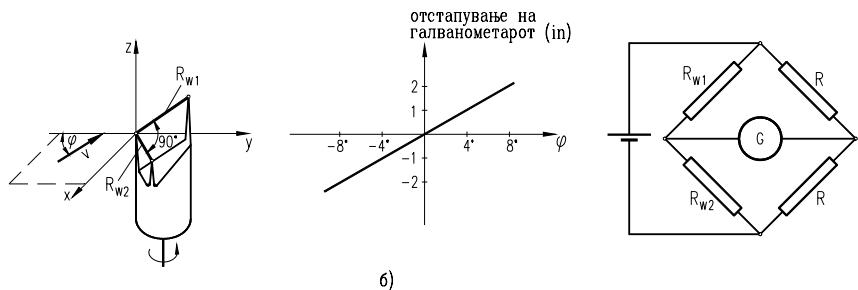
($v < 1 \text{ m/s}$) до брзини со вредности од 100 m/s. Со прописно баждарени сонди може да се постигне точност од $1\text{--}2\%$.

5.6.2 Мерење на правец на струење со анемометар со загреана жица

Анемометарот со загреана жица може да се применува за мерење на правецот на брзина на некое струење на повеќе начини. На сл. 5.19 се прикажани два основни метода на определување на нападниот агол на брзината, со помош на единечна загреана жица (а) и со т.н. V сонда на загреани жици (б).



a)



б)

Сл. 5.19 Можности за мерење на правец на брзина на струење со анемометар со загреана жица

Во првиот случај (сл. 5.19a), е установено дека единичната загреана жица во суштина дава одговор на компонентата на брзината нормална на неа, ако аголот помеѓу жицата и брзинскиот вектор е помеѓу 90° и околу 25° . За овој дијапазон, v може да се замени во изведувањата со $v \sin \varphi$. За $\varphi < 25^\circ$ загубата на топлина е поголема отколку предвидената со $v \sin \varphi$; за $\varphi = 0$ таа е околу 55% од топлинската загуба при $\varphi = 90^\circ$. За решението како на сл. 5.19a, аголот на струењето (во рамнината на сондта) може да се најде со определување на аголот на заротирање на сондата којшто дава максимална вредност на струјата I (или со примена на баждарниот дијаграм). Меѓутоа, овој метод може да даде прилична неточност, бидејќи $v \sin \varphi$ се менува многу бавно кога φ е близу 90° .

Подобра процедура за определување на нападниот агол на брзината со помош на единечна жица (ако правецот на струење е грубо познат) се постигнува на следниов начин: жицата се поставува на приближно 50° од претпоставениот правец на струење и се мери интензитетот на електричната струја I со која се загрева жицата. Сондата потоа се заротира во спротивна насока, сè додека не се изнајде агол при кој се постигнува истата I како во претходниот случај. Притоа, половината од аголот помеѓу двете локации на сондата со иста I го детерминира правецот на струење на флуидот (процедурата е слична на нултиот метод за определување на агол на струење со помош на цилиндрична или триаглеста сонда за притисок, сл. 5.6 и сл. 5.7). Објаснетата процедура е поточна, бидејќи стапката на промена на I со φ е најголема при 50° (сондата е најосетлива при оваа локација).

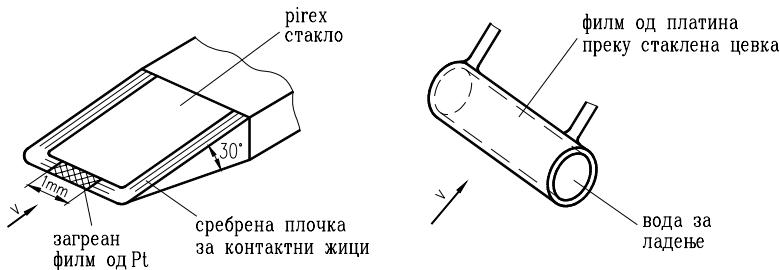
Уште поголема точност при определувањето на правецот на струење се постигнува со т.н. V сонда со загреани жици (сл. 5.19б). Во овој случај, двете загреани жици R_{w1} и R_{w2} се претпоставени да бидат идентични и ја формираат буквата V меѓусебно, најчесто со агол од 90° . Тие се поврзани во мерен мост како на сл. 5.19б. При ротација на сондата, мостот е во рамнотежа (напонот на грешка е 0) кога брзинскиот вектор е во ист правец со половината од аголот на исечокот на V. Осетливоста на овој начин е доволна за определување на правецот на брзината со гршка до $0,5^\circ$.

Практични проблеми во примената на анемометрите со загреана жица можат да се јават заради ограничната јакост на тенката жичка и промената на калибрационата карактеристика предизвикана од нечистотии содржани во флуидот. Доколку флуидот што струи не е доволно чист, промени на калибрацијата се јавуваат по неколку минути од применувањето на сондата. Од друга страна, поголеми парчиња од нечистотија можат да предизвикаат и кинење на жицата. При мерења на

големи брзини може да се појават и значителни вибрации на жицата. Од горенаведените причини анемометарот со загреана жица најчесто се применува за мерење на брзини при струење на гасови. Недостатоците на анемометарот со загреана жица можат да се надминат со т.н. анемометар со загреан филм, со кој се мерат брзини при струење на гасови и течности.

5.6.3 Анемометар со загреан филм

Во овој случај отпорничкиот елемент на сондата претставува тенок филм (слој) од платина нанесен на квартна основа (сл. 5.20). Филмот ја игра улогата на загреаната жица (како во претходниот случај), а потребното електрично мерно коло во основа е слично на приодот за анемометар со константна температура (види сл. 5.17).



Сл. 5.20 Анемометар со загреан филм

Сензорите со загреан филм имаат значително поголема механичка јакост од соодветните со загреана жица, а можат да се користат, меѓу другото, и за мерење на брзини на струења со многу високи температури, при што се изведува конструкција со внатрешно ладење на сондата. Постојат различни конфигурации на сензори со загреан филм, од кои две се прикажани на сл. 5.20.

Покрај мерењата на брзината и правецот на струење, анемометрите со загреана жица и загреан филм можат да бидат адаптирани за мерења на температурата на флуидот, турбулентните напони, и концентрацијата на одделни гасови во гасни мешавини.

5.7 ЛАСЕР-ДОПЛЕР АНЕМОМЕТАР

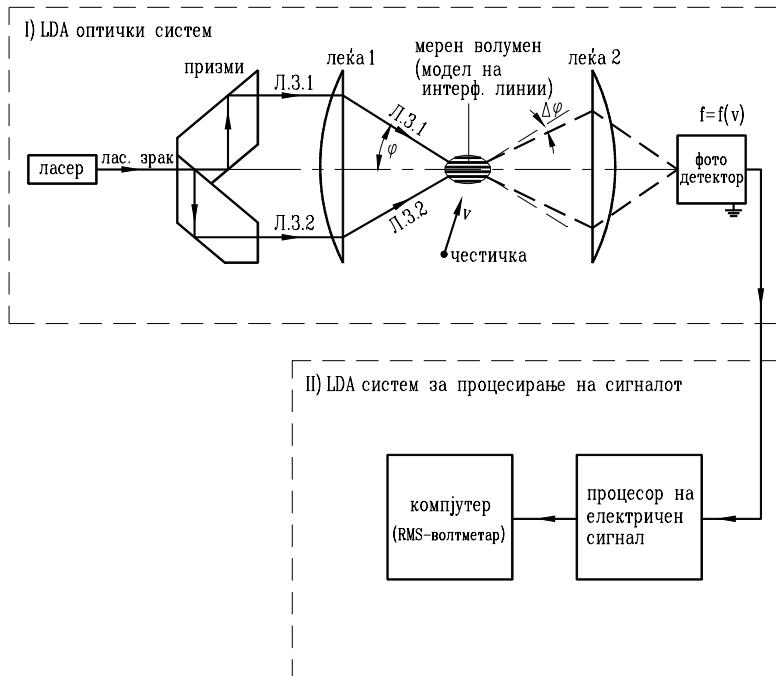
Во областа на струјните мерења, како најважен напредок, во последно време може да се смета примената на ласер-доплер (laser-doppler) анемометарот. Со овој инструмент се мери локалната брзина на струење и поради тоа е во компетиција со Прандл-Питот сондите и анемометрите со загреана жица и филм. Ги има следниве предности во однос на претходно објаснетите релативно добро развиени техники на мерења:

1. директно мерење на брзината; за разлика од Прандл-Питот сондите и комбинираните сонди, со кои мерењата се вршат преку разликата на притисоците, или кај анемометарот со загреана жица/филм - преку коефициентот на одведената топлина;
2. нема потреба некој „физички објект“ да биде потопен во струењето; на тој начин струјното поле не е нарушуено со мерењето;
3. „мерниот волумен“ може да биде многу мал (помал и од коцка со страна од 0,2 mm), што резултира во мерење на брзина, практично, во точка;
4. можен е одговор со многу висока фреквенција (ред од неколку MHz); за мерења во турбулентни и стационарни струења;
5. не е потребно калибрирање;
6. широк дијапазон на големини на брзина (од многу мали до струења со $M > 8$).

Како недостатоци можат да се наведат: потребата од транспарентен дел од каналот на местото каде што се мери брзината, комплексност на конструкцијата и цената на чинење. Но, во последно време, оваа техника се има развиено во таа мера што се постигнуваат одлични резултати за различни услови при мерење на брзини на струења на различни флуиди (течности и гасови од различна природа).

Накусо, според сл. 5.21, принципот на функционирање се сведува на фокусирање на ласерските зраци Л.З.1 и Л.З.2 во точката во која се мери брзината, а потоа со фотодетектор се регистрира растурената светлина од страна на малите честички (кои се носени со флуидот) кога поминуваат низ ласерската фокална точка (т.е. мерниот волумен). Притоа, брзината на честичките (претпоставено дека е иста со брзината на струењето) предизвикува доплерска промена на фреквенцијата на растурената светлина и произведува во фотодетекторот сигнал кој е директно поврзан со брзината.

Честиците секогаш ги има во флуидот чија брзина се мери (меурчиња, прашинки и сл.), така што најчесто не е потребно нивно додатно уфрлање

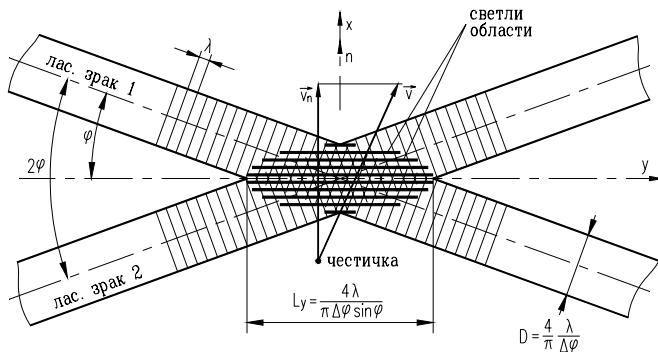


Сл. 5.21 Шема на ласер-дојлер анемометар

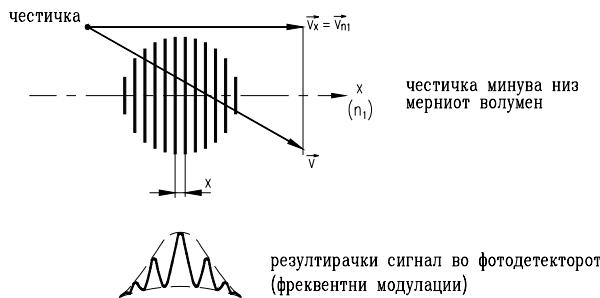
На сл. 5.21 е прикажана една од можните конфигурации на лазер-доплер анемометарот (LDA), којашто во основа содржи два системи:

- I) LDA оптички систем: извор на монохроматска кохерентна светлина (лазер - гасен или рубински), оптика за пренесувања на зраците (призми и леќи) и фотодетектор;
- II) Електронски систем (опрема) за процесирање на сигналот: LDA процесор на оптичкиот сигнал и интеграционен волтметар (или процесен компјутер).

Моделот на интерферентни линии (површини) којшто се формира во „мерниот волумен“ (елипсоид), каде што се сечат двата лазерски зрака (сл. 5.22), е основа на овој метод. Големината на мерниот волумен зависи од дијаметарот на фокусираниите лазерски зраци.



a) модел на интерферентни линии



б) резултирачки сигнал во фотодетекторот (модулации)

Сл. 5.22 *Модел на интерферентни линии (а) и LDA сигнал во фотодетекторот (б)*

Честичката, кога минува низ мерниот волумен, најдува на темни и светли области (сл. 5.22 а и б). Поминувајќи низ светлите области, таа ја одбива светлината, додека низ темните области нема одбивање. Како резултат, фотодетекторот регистрира интензитет на електричен сигнал кој е фреквентно модулиран. Фреквенцијата на модулациите (види сл. 5.22 б) зависи од компонентата на брзината на честичката (v_n) нормална на интерферентните линии, и се изразува како:

$$f_s = \frac{v_n}{\Delta x} \quad (5-21)$$

при што сепарацијата на интерферентните линии (Δx) изнесува:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} \quad (5-22)$$

каде што се:

λ - бранова должина на ласерската светлина,

φ - агол на ласерскиот зрак (види сл. 5.22a).

На тој начин, преку фреквенцијата се определува компонентата на брзината во x насоката: $v_{n1} = v_x$.

За ласерска светлина со бранова должина $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см и агол на ласерскиот зрак $\varphi = 15^\circ$ (типичен случај), се добива: $f = 10340 \cdot v_n$, каде што v_n е во см/с.

Горните изрази се однесуваат за случај кога ласерските зраци се со исти фреквенции, и притоа моделот на интерферентните линии е фиксен во просторот. Доколку постои разлика на фреквенциите на ласерските зраци f_{sh} , ќе се добие модел на интерферентни линии кој се движи во мерниот волумен, а нормалната компонента се изразува како:

$$v_n = \Delta x (f_s \pm f_{sh}) = \Delta x \cdot f_{so} \quad (5-21a)$$

Во фотодетекторот, оптичкиот сигнал се трансформира во електричен (вистинскиот сигнал е покомплициран), а LDA процесорот дава аналогна или дигитална информација за f_s т.е. f_{so} . Од дигиталниот волтметар (или компјутер) се добиваат податоците за средната брзина, интензитетот на турбуленцијата и слично во назначената насока n , нормално на интерферентните линии.

Со ротација на моделот на интерферентните линии за 90° се овозможува на ист начин мерење на другата компонента на брзината, $v_{n2} = v_y$, со што во целост е определен дводимензионалниот вектор на брзината v .

Со помош на ласер-доплер методологијата се овозможуваат мерења во: турбулентни струења, струења во хемиски реактори, полифазни струења, нестабилности и пулсации при струења, многу мали и многу големи брзини, мерење на димензии на многу мали честички (молекуларни и атомски) и слично.

ГЛАВА ШЕСТА

6. МЕРЕЊЕ НА ПРОТОК

Во повеќе примери во претходните излагања беа дадени почетни идеи за мерење на вкупната промена на волуменот или масата на флуид во определен пресек за единица време, односно волуменскиот и масениот проток на флуидот што струи низ посматраниот пресек на соодветниот цевковод или канал. Уште во примерите за примена на димензиската анализа беа наведени можности за мерење на протокот со Вентури-метар. Со прикажаните методи за мерење на брзина на струење, т.е. со познавањето на профилот на брзините во определен пресек, овозможено е да се определи и протокот низ тој пресек (види методи прикажани во глава 5.).

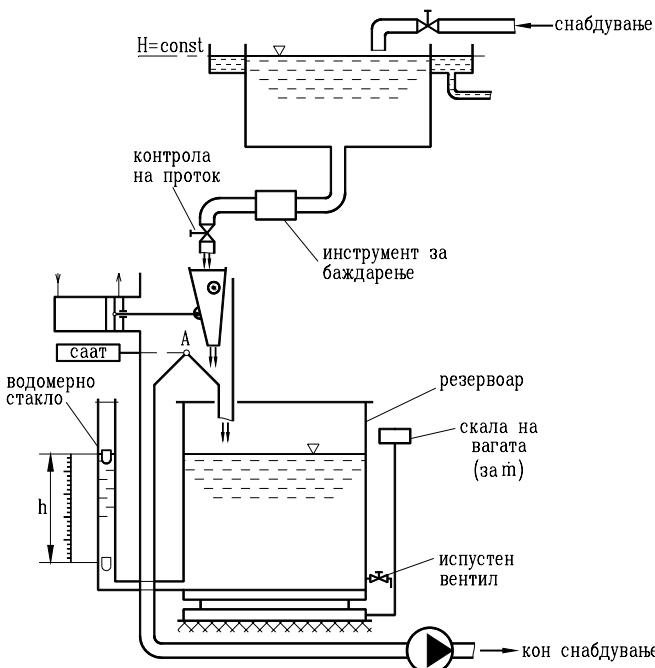
Често пати е потребно да се измери или да се контролира протокот на флуид низ соодветен цевковод или канал, за кои цели се развиени посебни инструменти (протокомери). Протокомерите можат да се класифицираат во зависност од применетиот метод на мерење: волуметрички, со придушување, со прелив, ротирачки (турбински и волуменски), електромагнетни, ултразвучни и др. Општа класификација може да се направи во поглед на измерената големина: инструменти за волуменски проток (во m^3/s) и инструменти за масен проток (во kg/s).

Овдека ќе бидат прикажани методи за мерење на проток во цевководи и канали што најчесто се применуваат или се основа за поусовршени инструменти.

6.1 МЕРЕЊЕ НА ПРОТОК СО ВАГА. ВОЛУМЕТРИСКИ МЕТОД

Согласно димензионалната формула за волуменски проток $L^3 T^{-1}$, калибрацијата на протокомерите зависи од соодветните еталони за волумен (должина) и време, односно од еталоните за маса и време при баждарење на инструменти за масен проток (MT^{-1}). Примарната калибрација воглавно се базира на воспоставување на стационарно струење низ протокомерот што се калибрира и последователно мерење на волуменот или масата на флуидот што струи низ него во точен временски интервал.

Типична постројка за прецизна примарна калибрација на протокомери за течности, преку наведениот волуметрички метод, прикажана е на сл. 6.1. Принципот на мерење се состои во определување на масата, односно волуменот на течноста, која во определен временски интервал исполнува соодветен резервоар до некое ниво.



Сл. 6.1 Волуметрички метод за мерење на проток на течност. Калибрациони постројка.

Секој стабилен и прецизен протокомер, калибриран со ваков примарен метод, претставува понатаму секундарен стандард (еталон) со кој можат соодветно да се калибираат други (помалку точни) инструменти за мерење на проток. Како и при секоја друга калибрација, значителните девијации на условите при употреба на инструментот, од соодветните услови при баждарењето, можат во голема мера да ја пореметат калибрационата карактеристика.

Посебни извори на грешки во протокомерите можат да бидат: промени на особините на флуидот (густина, вискозност, температура), ориентацијата на мерачот (соосност и сл.), нивото на притисок и, освен тоа, нарушување на струењето (колена, рачви, вентили и т.н.) пред и после (во помала мера) протокомерот.

Ако се определува маса (тежина) за определен интервал на време, резервоарот се поставува врз соодветна вага (види сл. 6.1), преку која, се мери масата на течност што го исполнела резервоарот за определено време, односно масениот проток \dot{m} во kg/s. За позната густина на течноста ρ , се определува и волуменскиот проток $Q = \dot{m}/\rho$ во m³/s.

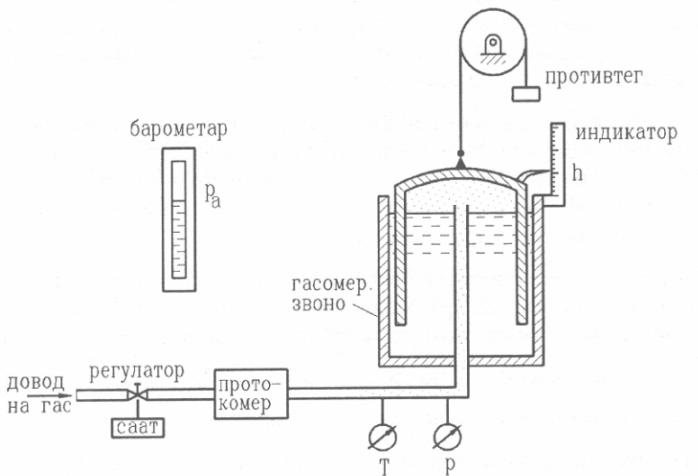
Во вториот случај, волуменскот protok Q (m³/s) се определува со мерење на волуменот на течноста со која е исполнет резервоарот за определено време, што најдобро се постигнува со мерење на висинската разлика h , на течноста со помош на водомерно стакло.

Во двета случаја многу е важно точно да се определи временскиот интервал за кој се исполнил резервоарот до соодветното ниво. За таа цел се применува автоматизирана клацкалка со инка, којашто може да се задвижи во две положби (полнење на резервоарот или негово мерење, односно празнење). Во моментот кога инката поминува преку граничникот A, се вклучува или исклучува електронски дигитален саат, со кој се определува времето на полнење на резервоарот.

На шемата е прикажан и резервоар за снабдување со течност со константно ниво, со што се обезбедува и константен влезен притисок за инструментот што се калибрира. Алтернативно, наместо резервоар со константно ниво, може да се примени затворен систем со пумпа која обезбедува константен притисок.

Калибрацијата на протокмери кои се користат за струења на гасови често се спроведува со течност, сè додека се одржува соодветниот закон за сличност (Рејнолдсов критериум) и се применуваат соодветните теоретски корекции за густина и експанзија. Доколку ваквата процедура не покажува доволна точност, директна калибрација со актуелниот гас што се користи може да се спроведе со примена на гасомерен систем,

како на сл. 6.2. Во овој случај, гасот што струи низ протокомерот, што се калибрира за определен временски интервал, се затвора во гасомерното своно и неговиот волумен се мери преку соодветниот индикатор.



Сл. 6.2 Калибрациона постројка за гасни пропорционери

Измерените температура и притисок овозможуваат пресметка на масениот проток на гасот и конверзија на волуменскиот при кои и да било стандардни услови. Со целосно исполнување на своното со гас, со негово подигање до врвната положба и додавање на соодветни тегови (контратегови), ваквиот систем може да се користи, исто така, и за снабдување со гас кој се води низ протокомерот, со постапно спуштање на своното на определена рата (висина), види сл. 6.2.

6.2 МЕРЕЊЕ НА ПРОТОК СО ПРИДУШУВАЊЕ

Инструментите за мерење на проток со придушување претставуваат можеби најшироко применувани мерачи на проток, воглавно поради нивната едноставност, ниската цена на чинење и големиот број на расположливи истражувачки податоци за предикција на нивното однесување. Кај нив се користи принципот на поставување на фиксирано ограничување (стеснување) од одреден тип на пресекот од цевката, или

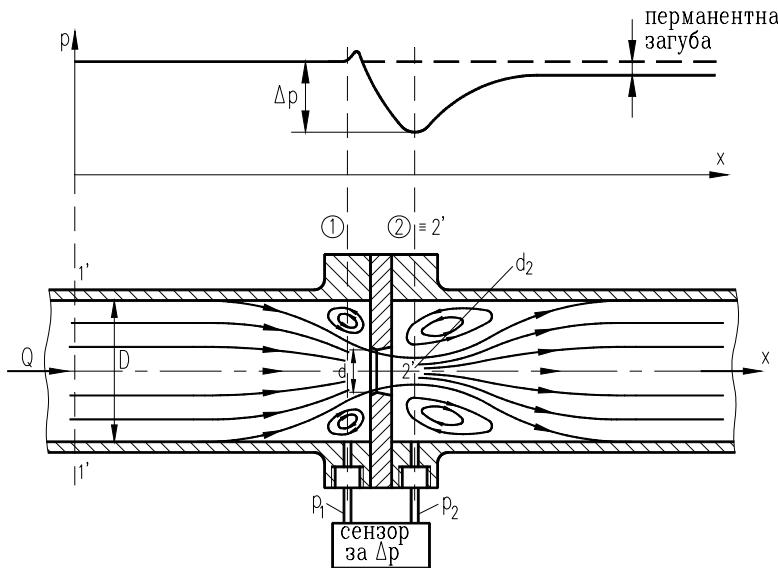
каналот, низ кој струи соодветниот флуид. Ова ограничување на пресекот (а со тоа и на струењето) предизвикува пад на притисокот, кој варира со промената на протокот; на тој начин, со мерење на падот на притисокот, овозможено е и определување на протокот на флуидот што струи низ соодветниот цевковод (или канал).

Во ова поглавје ќе бидат разгледани најчесто применуваните мерачи на проток коишто се базираат на наведениот принцип на придушување: бленди (дијафрагми), млазници и Вентури-мерачи.

6.2.1 Основен теоретски период за мерење на проток со придушување, односно со пад на притисок

Во главата за примена на димензиската анализа, преку примерот за Вентури-мерачот на проток, беше покажан основниот принцип на функционирање на овој тип инструменти.

На сл. 6.3 се прикажани типични примери на бленда поставена во цевковод, како и дијаграмот на промена на притисокот при придушеното струење.



Сл. 6.3 Придушување со бленда

Овдека ќе биде дадена подетална анализа, за случај на инсталирање на т.н. бленда во цевковод, со цел да се дефинираат изразите на зависност за практична примена. Истиот теоретски приод може да се примени и за млазниците и Вентури-мерачите.

Ако се постави Бернулиевата равенка помеѓу пресеците 1' и 2' (овдека пресекот на приклучокот 2 се совпаѓа со 2', што не мора да биде), за идеално струење на невискозен некомпресиблен флуид:

$$\frac{p_{1'}}{\rho} + \frac{v_{1'}^2}{2} = \frac{p_{2'}}{\rho} + \frac{v_{2'}^2}{2} \quad (6-1)$$

каде што $v_{1'}$ и $v_{2'}$ се средни брзини, а $p_{1'}$ и $p_{2'}$ струјни притисоци во пресеците 1' и 2', и со изразување на брзината $v_{1'}$ од равенката за континуитет како:

$$v_{1'} = v_{2'} \frac{A_2}{A_1} = \mu m v_{2'} \quad (6-2)$$

при што се извршени замените:

$$\mu = \frac{A_2}{A_1} \quad - \text{кофициент на контракција,}$$

$$m = \frac{A}{A_1} = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad - \text{кофициент на отворот на придушувачот,}$$

$$A_1 = \frac{D^2 \pi}{4} \quad - \text{површина на пресекот на цевководот 1',}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} \quad - \text{површина на отворот на блендата,}$$

$$A_2 = \frac{d_2^2 \pi}{4} \quad - \text{површина на најмалиот пресек 2',}$$

се добива изразот за брзината во 2' како:

$$v_{2'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_{1'} - p_{2'})}{\rho}} \quad (6-3)$$

Меѓутоа, вистинската средна брзина во пресекот $2'$, $v_{2'}$, се разликува од пресметаната со изразот (6-3), односно поточно е таа да се изрази како:

$$v_2 = \varphi v_{2'} = \frac{\varphi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (6-4)$$

Коефициентот за корекција на брзината φ го зема во обзир влијајето на триењето, нерамномерната распределба на брзината во пресекот $2'$, како и отстапувањето на мерените притисоци p_1 и p_2 од $p_{1'}$ и $p_{2'}$ (обично приклучоците за притисок, поради едноставност, најчесто се непосредно пред и после самата бленда).

Преку определената средна брзина v_2 едноставно се добива и волуменскиот проток за некомпресибilen флуид:

$$Q = v_2 A_2 = v_2 \mu A = \frac{\mu \varphi A}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (6-5)$$

односно:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (6-5a)$$

Притоа, коефициентот на протокот C_d (според германските VDI норми, се користи ознаката α) е дефиниран како:

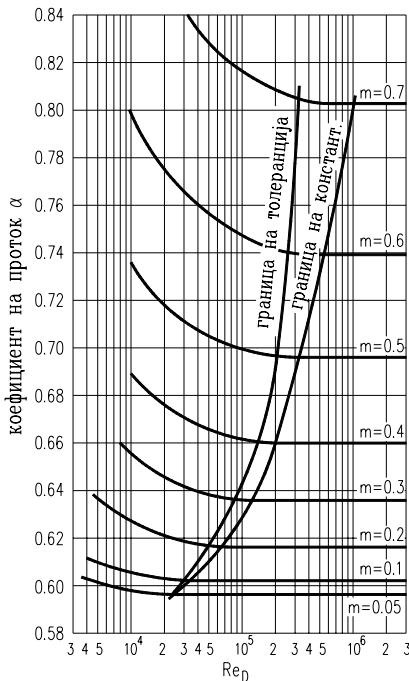
$$C_d = \alpha = \frac{\mu \varphi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \quad (6-6)$$

Знаејќи ги основите на примена на дименционалната анализа (пример за Вентури-метар во поглавие 1.3), се доаѓа до заклучок дека коефициентот на проток C_d се определува со експеримент како функција од коефициентот на отворот на придушувачот и Рейнолдсовиот број:

$$C_d = f_1(d/D, Re) = f(m, Re) = \alpha \quad (6-7)$$

Со калибраирање (види поглавие 6.1), за секоја бленда се добиваат соодветни таблици или дијаграми на зависноста $\alpha = \alpha(m, Re)$. Типичен

дијаграм е прикажан на сл. 6.4, а табелите од баждарење на стандардни придушувачи според VDI нормите дадени се во поглавјето 6.2.2.



Сл. 6.4 Кофициент на прток $\alpha = \alpha(m, Re)$ за стандардна бленда, според DIN 1952 и ISO TK 30

Доколку се знае волуменскиот проток, израз (6-5), лесно може да се определи и масениот проток во kg/s, како:

$$\dot{m} = Q\rho = \alpha A \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)} \quad (6-8)$$

При мерење на проток на компресибилни флуиди, изразите (6-5) и (6-8) не одговараат. Со претпоставка на изентропски процес при струењето помеѓу пресеџите 1 и 2 (види сл. 6.3), следниов израз за масен проток на компресибilen флуид може да се изведе:

$$\dot{m} = \varphi A_2 \sqrt{\frac{2\kappa \rho_1 p_1}{(\kappa - 1)}} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(\kappa+1)}{\kappa}}}{1 - m^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}}}} \quad (6-9)$$

каде што се:

$$\kappa = c_p / c_{V^-} \quad (\approx 1,4 \text{ за воздух}),$$

ρ_1 - густина на флуидот пред блендата,

\dot{m} - во kg/s.

Анализите на струењата низ Вентури-метарот и млазницата покажале дека струјните процеси се доволно блиски до изентропските, односно изразот (6-9) би дал задоволувачки резултати. Меѓутоа, кај придушните бленди отстапувањето од изентропските услови е значајно (заради поголемата турбуленција), поради што изразот (6-9) не дава доволно точни резултати за масениот проток. Од овие причини, а со цел да можат да се користат истите баждарни податоци за коефициентот на проток α и за компресибилно струење (т.е. за однос на притисоците $p_2/p_1 < 0,99$), во практиката се користи изразот:

$$\dot{m} = \varepsilon \alpha A \sqrt{2 \rho_1 (p_1 - p_2)} \quad (6-10)$$

во којшто компресибилноста е земена во обзир преку експериментално добиениот коефициент на експанзија ε .

За мерни бленди со приклучоци непосредно пред и зад блендата (сл. 6.3 и сл. 6.5), за определување на ε , со доволна точност може да се користи емпириската формила:

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35m^2) \frac{p_1 - p_2}{p_1} \frac{1}{\kappa} \quad (6-11)$$

Изразот (6-11) дава резултати со точност од $\pm 0,5\%$, ако е $0,8 < p_2/p_1 < 1,0$ за струење на гасови или пареи различни од водена пареа; додека за водена пареа точноста е околу $\pm 1,0\%$.

Во практиката, многу често за определување на ε се користат експериментални податоци за придушувачи според германските VDI норми (види табели и процедура во наредното поглавје 6.2.2).

Волуменскиот проток на компресибилниот флуид (Q во m^3/s) може да се определи од изразот (6-10) како:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_1} = \varepsilon \alpha A \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_1}} \quad (6-12)$$

Изразите (6-10) и (6-12) можат да се третираат како општи, односно да важат за струења на компресибилни и некомпресибилни флуиди. За некомпресибилни флуиди, или компресибилни флуиди за кои $p_2/p_1 \geq 0,99$, експанзиониот коефициент изнесува $\varepsilon = 1$, а изразите (6-10) и (6-12) се трансформираат во изразите заprotoци на некомпресиблен флуид (6-8) и (6-5).

Прикажаниот теоретски приод за мерење на проток со придушување, со т.н. мерна бленда во потполност може да се примени и за другите видови на придушувачи (Вентури-метар, млазница и слично). Притоа, се користат истите добиени изрази, со разлика во определувањето на коефициентите α и ε од соодветните табели или дијаграми за употребуваниот придушувач.

Изразите за масен и волуменски проток (6-10) и (6-12) се ограничени на примена за дозвучни струења ($M < 1$), односно за параметри според сл. 6.3:

$$v_2 < \sqrt{\kappa RT} \quad \text{и} \quad \frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{krit.} .$$

За случај на надзвучко струење ($M > 1$), кога брzinата на струењето ја достигнала бзината на звукот, односно кога:

$$\frac{p_2}{p_{1t}} \leq \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{krit.} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

важат односите:

$$\frac{p_{kr}}{p_t} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} ; \quad \frac{\rho_{kr}}{\rho_t} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}$$

Во случај на надзвучко струење, брzinата v_2 ја постигнала максимално можната вредност, односно брzinата на звукот c ($v_2 = c$),

којашто зависи само од критичниот притисок и температурата (види поглавје 4.1 и 4.3). Во овој случај масениот проток се определува како:

$$\dot{m} = \alpha_{kr} c A \rho_{kr} = \alpha_{kr} A \sqrt{\kappa p_{kr} \rho_{kr}} = \alpha_{kr} \beta A \sqrt{p_t \rho_t} \quad (6-13)$$

каде што е:

$$\beta = \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}$$

Во практика се покажало дека за мерење на проток во надзвучната област, примена може да најде само млазницата (види поглавје 6.2.2), кај којашто коефициентот на контракција може да се смета за $\mu \approx 1$. Во овој случај масениот проток се определува преку:

$$\dot{m} = \alpha_{kr} \beta A \sqrt{p_1 \rho_1} \quad (6-13a)$$

Со експерименти е установено дека за млазници со $m \leq 0,4$ одговараат производи:

$$\alpha_{kr} \beta = 0,662 \quad \text{за } \kappa = 1,31$$

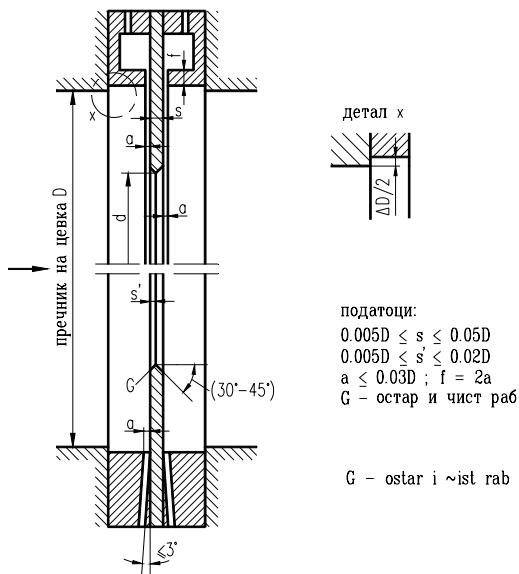
$$\alpha_{kr} \beta = 0,680 \quad \text{за } \kappa = 1,41$$

6.2.2 Практична примена на мерна бленда, млазница и Вентури-метар

Нормираната бленда (сл. 6.5) според германските VDI норми нашла широка примена поради својата едноставност, цената на чинење и големиот расположлив број експериментални податоци:

Нормираната бленда се применува воглавно за мерење на проток низ цевководи со дијаметри во дијапазон $50 \leq D \leq 1000$ mm и коефициент на отворот $0,05 \leq m \leq 0,64$. Во табелата 6.1 се дадени вредностите за коефициентот на проток за мазна цевка α_0 , во зависност од отворот на блендата $m = (d/D)^2$ и Рейнолдсовиот број Re . Доколку блендата се вградува во рапава цевка, што е најчест случај, потребно е да се изврши корекција на коефициентот на проток:

$$\alpha = \alpha_0 k_{tr} \quad (6-14)$$



Сл. 6.5 Нормирана бленда

Поправката на α според изразот (6-14) треба да се спроведе само тогаш кога релативната рапавост на цевката k_c/D ја поминува соодветната гранична вредност според *табелата 6.2*.

Коефициентот на поправка k_{tr} може да се определи според насоките на VDI, како:

$$k_{tr} = 1 + \frac{r_0 m^2}{100} \left[1 + \frac{(\log Re - 6)^2}{4} \right] \quad (6-15)$$

за $10^4 < Re < 10^6$ и

$$k_{tr} = 1 + \frac{r_0 m^2}{100} \quad (6-15a)$$

за $Re \geq 10^6$.

Коефициентот r_0 , според споменатите германски норми даден е како зависност од релативната рапавост k_c/D со изразот:

$$r_0 = 7 \log\left(\frac{10^4 k_c}{D}\right) - 4 \quad (6-16)$$

Ориентациони вредности за апсолутната рапавост k_c во mm дадени се во *табела 6.3.*

За да се изведат што е можно поточни мерења според прикажаната методологија, потребно е придушувачот и неговите мерни приклучоци да бидат точно изведени според дадените норми (сл. 6.5), а блендата да биде правилно вградена (центрирана) во правиот дел на цевката. Во спротивно, неопходни се дополнителни корекции на проточниот коефициент α_0 .

За да се обезбеди ненарушено струјно поле пред и зад придушувачот, односно прав дел на цевководот, нормите поставуваат прилично строги услови. За таа цел, релативната должина на целосно правата цевка $l_{r,pred}$ пред придушувачот, мерено од него до соодветната локална пречка (колено или рачва), се зема да биде:

$$l_{r,pred} = l/D \approx 10 \quad \text{за } m = 0,1 \quad \text{до} \quad l_{r,pred} \approx 40 \quad \text{за } m = 0,6.$$

Соодветната релативна должина на правиот дел од цевката зад придушувачот (кога локалната пречка се наоѓа зад него) обично се зема:

$$l_{r,zad} = l/D \approx 5 \quad \text{за } m = 0,1 \quad \text{до} \quad l_{r,zad} \approx 8 \quad \text{за } m = 0,6.$$

Доколку горенаведените релативни должини се намалат на половина, се јавува грешка од околу $\pm 0,5\%$ при мерење на пртокот врз основа на проточниот коефициент α_0 .

При мерење на масен и волуменски прток на компресибилен флуид, во изразите (6-10) и (6-12) проточниот коефициент α се определува на ист начин според дадената процедура, а коефициентот на експанзија ε се зема од *табела 6.4* во зависност од односот на измерените притисоци p_2/p_1 , коефициентот на отвор m и изентропскиот експонент κ .

Нормираната мазница, чиишто основни димензии се прикажани на сл. 6.6, се применува за мерење на прток на некомпресибилни и компресибилни флуиди низ цевководи, главно со дијаметри во дијапазон $50 \leq D \leq 500$ mm и коефициент на отворот $0,1 \leq m \leq 0,64$. Коефициентот на

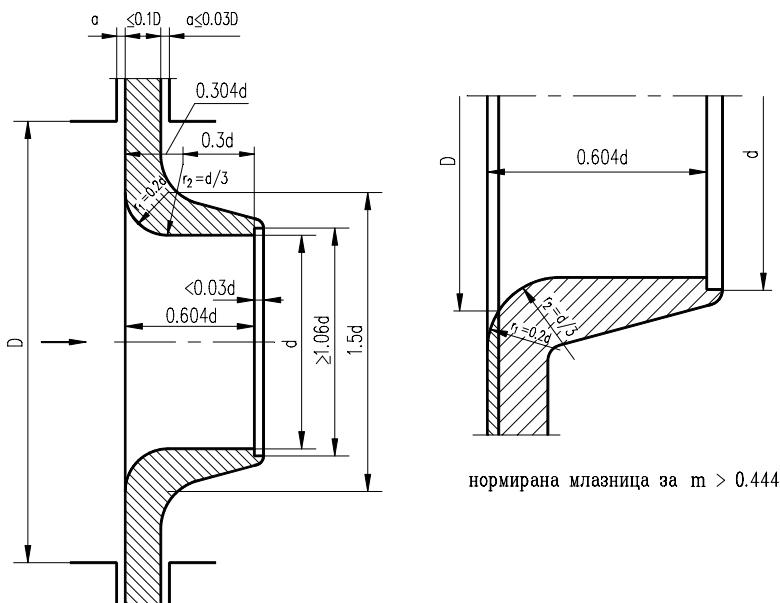
проток за рапава цевка, α , се опредлува на ист начин како за мерната бленда, според изразот (6-14), односно:

$$\alpha = \alpha_0 k_{tr}$$

Проточниот коефициент за нормирани млазници во мазни цевки, α_0 , се определува од табелата 6.5, во зависност од m и Re , а за коефициентот на поправка (според наведените норми) се користат истите изрази (6-15) или (6-15a), во кои коефициентот r_0 во овој случај се пресметува преку емпириската зависност:

$$r_0 = 4,5 \log\left(\frac{10^4 k_c}{D}\right) - 2,5 \quad (6-17)$$

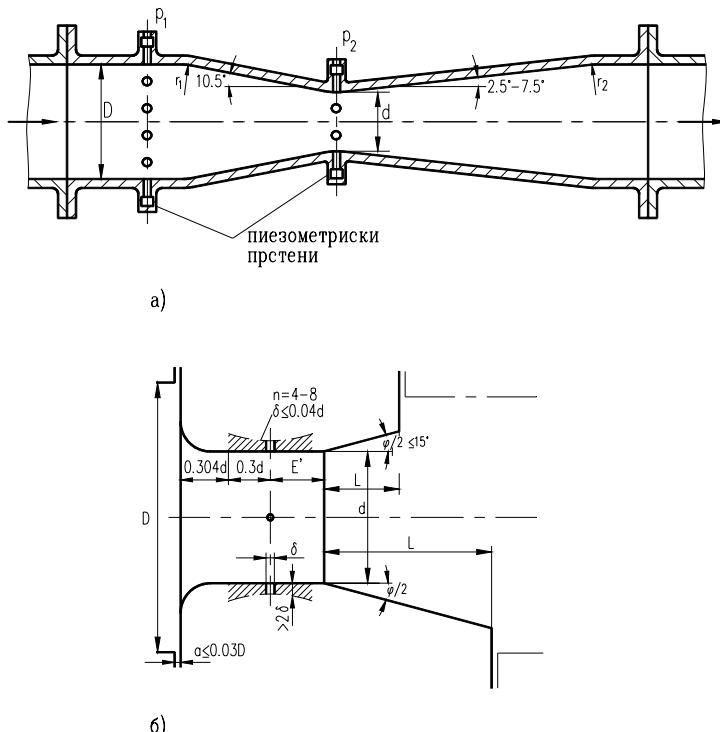
При струење на компресибilen флуид, коефициентот на експанзија ε за млазница се добива од табелата 6.6 за соодветен однос на измерените притисоци p_2/p_1 и коефициент на отворот на придушувацот m .



Сл. 6.6 Нормирана млазница

Нормираниот вентури (сл. 6.7б) претставува модификација на класичниот Вентури-метар (сл. 6.7а). Се применува за мерење на проток низ цевководи со дијаметри во дијапазон $65 \leq D \leq 500$ mm и отвор на придушувачот $0,1 \leq m \leq 0,6$, за случаи кога е потребно да се постигнат помали загуби на притисокот предизвикани со инсталирањето на придушувачот. Основните димензии се дадени на сл. 6.7б, влезниот дел е изведен на ист начин како кај млазницата, а дифузорскиот дел се прилагодува на цевката, односно на дозволената загуба на притисокот.

Коефициентот на проток за рапави цевки α се добива на ист начин како во претходните два случаја, односно со изразот (6-14). Проточниот коефициент за мазни цевки α_0 е даден во табела 6.7, во зависност од коефициентот на отвор m и Рейнолдсовиот број во област $1,5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$. Вредностите за коефициентот на поправка k_{tr} се земаат исто како за нормирана млазница, а коефициентот на експанзија за компресибилни флуиди, исто така, од табелата 6.6.



Сл. 6.7 Класичен Вентури-метар (а)
и нормиран Вентури (б)

Мерењето на проток со придушување пропратено е со перманентна загуба на енергијата на притисокот (види сл. 6.3), што, секако, е помала кај млазницата и вентури во споредба со мерната бленда. Но, притоа, и цената на чинење е значително поголема, заради комплексноста и потребниот квалитет на изработка. Загубата на притисок предизвикана со инсталирање на придушувачот може да се определи преку разликата на измерените притисоци со изразот:

$$\Delta p_{zag.} = \varphi_z (p_1 - p_2) \quad (6-18)$$

Податоци за коефициентот на загуба φ_z се дадени во *табела 6.8.*

••

На следните страници се дадени *табели* од 6.1 до 6.8, потребни при практичната примена на мерна бленда, млазница и Вентури-метар.

Табела 6.1

<i>Проточен коефициент α_0 за нормирани бленди во мазни цевки</i>		Re	$5 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	10^5	10^6	10^7
m	m^2		α_0							
0,0500	0,0025		0,6024	0,6005	0,5993	0,5989	0,5985	0,5981	0,5978	0,5977
0,0548	0,003		0,6032	0,6011	0,5998	0,5993	0,5988	0,5985	0,5981	0,5980
0,0632	0,004		0,6045	0,6022	0,6007	0,6001	0,5995	0,5991	0,5986	0,5986
0,0707	0,005		0,6058	0,6031	0,6015	0,6008	0,6002	0,5997	0,5992	0,5991
0,1000	0,01		0,6110	0,6073	0,6050	0,6039	0,6031	0,6025	0,6018	0,6016
0,1414	0,02		0,6194	0,6142	0,6108	0,6094	0,6081	0,6073	0,6062	0,6061
0,1732	0,03		0,6268	0,6203	0,6161	0,6143	0,6129	0,6117	0,6105	0,6103
0,2000	0,04		0,6335	0,6260	0,6212	0,6190	0,6173	0,6160	0,6146	0,6144
0,2236	0,05		0,6399	0,6315	0,6260	0,6236	0,6217	0,6202	0,6186	0,6184
0,2449	0,06			0,6370	0,608	0,6281	0,6260	0,6245	0,6226	0,6223
0,2646	0,07			0,6422	0,6355	0,6327	0,6302	0,6284	0,6265	0,6262
0,2828	0,08			0,6474	0,6403	0,6371	0,6343	0,6324	0,6303	0,6300
0,3000	0,09			0,6526	0,6450	0,6415	0,6385	0,6362	0,6341	0,6338
0,3162	0,10			0,6577	0,6497	0,6459	0,6425	0,6401	0,6378	0,6375
0,3317	0,11			0,6630	0,6542	0,6500	0,6465	0,6439	0,6115	0,6412
0,3464	0,12			0,6682	0,6588	0,6544	0,6507	0,6478	0,6452	0,6449
0,3606	0,13			0,6734	0,6633	0,6587	0,6547	0,6516	0,6489	0,6486
0,3742	0,14			0,6786	0,6679	0,6629	0,6587	0,6555	0,6526	0,6522
0,3873	0,15			0,6839	0,6724	0,6672	0,6627	0,6594	0,6563	0,6559
0,4000	0,16			0,6890	0,6769	0,6715	0,6667	0,6633	0,6600	0,6596
0,4123	0,17			0,6943	0,6815	0,6759	0,6708	0,6671	0,6638	0,6633
0,4243	0,18			0,6995	0,6861	0,6802	0,6749	0,6711	0,6675	0,6670
0,4359	0,19			0,7047	0,6908	0,6846	0,6791	0,6751	0,6713	0,6708
0,4472	0,20			0,7099	0,6954	0,6890	0,6832	0,6791	0,6751	0,6746

Табела 6.1 (продолжение)

Re		$5 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	10^5	10^6	10^7
m	m^2	α_0							
0,4583	0,21		0,7153	0,7000	0,6934	0,6874	0,6830	0,6789	0,6784
0,4690	0,22		0,7206	0,7047	0,6979	0,6917	0,6871	0,6828	0,6823
0,4796	0,23		0,7259	0,7094	0,7024	0,6960	0,6911	0,6867	0,6861
0,4899	0,24		0,7312	0,7142	0,7069	0,7003	0,6952	0,6906	0,6899
0,5000	0,25		0,7366	0,7189	0,7114	0,7046	0,6994	0,6945	0,6938
0,5099	0,26		0,7419	0,7237	0,7160	0,7090	0,7035	0,6984	0,6977
0,5196	0,27		0,7472	0,7286	0,7207	0,7136	0,7078	0,7025	0,7017
0,5292	0,28		0,7526	0,7336	0,7255	0,7180	0,7121	0,7065	0,7057
0,5385	0,29		0,7580	0,7385	0,7301	0,7225	0,7163	0,7105	0,7096
0,5477	0,30		0,7635	0,7436	0,7349	0,7269	0,7206	0,7145	0,7136
0,5568	0,31		0,7690	0,7487	0,7398	0,7317	0,7250	0,7187	0,7177
0,5657	0,32		0,7745	0,7538	0,7446	0,7363	0,7294	0,7228	0,7218
0,5745	0,33		0,7802	0,7591	0,7495	0,7410	0,7339	0,7269	0,7259
0,5831	0,34		0,7859	0,7646	0,7547	0,7459	0,7385	0,7312	0,7301
0,5916	0,35		0,7917	0,7699	0,7597	0,7508	0,7432	0,7354	0,7343
0,6000	0,36		0,7976	0,7754	0,7648	0,7554	0,7476	0,7396	0,7384
0,6083	0,37			0,7809	0,7699	0,7605	0,7523	0,7439	0,7426
0,6164	0,38			0,7866	0,7752	0,7656	0,7571	0,7483	0,7470
0,6245	0,39			0,7924	0,7805	0,7706	0,7619	0,7527	0,7513
0,6325	0,40			0,7986	0,7864	0,7763	0,7673	0,7576	0,7561
0,6403	0,41			0,8046	0,7924	0,7819	0,7726	0,7624	0,7609

Вредностите за m^2 овозможуваат линеарна интерполяција.

Табела 6.2

<i>Максимална релативна ратавосија k_c/D за мазни цевки</i>			
<i>m</i>	<i>m²</i>	$10^4 \cdot k_c/D$ за бленда	$10^4 \cdot k_c/D$ за млазница
0,063	0,004	55,0	-
0,071	0,005	42,0	-
0,100	0,01	20,0	31,0
0,15	0,0225	8,7	12,2
0,20	0,04	6,3	7,7
0,30	0,09	4,7	5,3
0,40	0,16	4,2	4,6
0,50	0,25	4,0	4,2
0,60	0,36	3,9	3,9
0,64	0,41	3,9	3,9

Табела 6.3

<i>Аисолуција внатрешна ратавосија k_c за цевки</i>		
<i>материјал</i>	<i>Состојба на внатрешната површина</i>	<i>k_c mm</i>
челик	безшавна: - влечена	< 0,03
	" - нова валана	0,05
	" - заварена	0,1 до 0,2
	почеток на јрѓа	0,1 до 0,2
	кородирана	0,2 до 0,3
	со кородирани гнезда	0,5 до 2,0
	многу кородирана	> 2,0
	битумирана, норм. состојба	0,1 до 0,2
	битумирана, нова	0,05
	поцинкована	0,13
леено железо	нова	0,25
	зајргана	1,0 до 1,5
	со кородидрани гнезда	> 1,5
	битумирана, нова	0,1 до 0,15
азбестен цемент	неизолирана, нормална состојба	0,05

Табела 6.4

Експанзионен коефицијент ε за бленди										
p_2/p_1		1,0	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75
m	m^2	за $\kappa=1,2$								
0,0000	0,00	1,0	0,9919	0,9845	0,9774	0,9703	0,9634	0,9463	0,9294	0,9126
0,3162	0,10	1,0	0,9912	0,9832	0,9754	0,9678	0,9603	0,9417	0,9233	0,9051
0,4472	0,20	1,0	0,9905	0,9819	0,9735	0,9652	0,9571	0,9371	0,9173	0,8976
0,5477	0,30	1,0	0,9898	0,9806	0,9715	0,9627	0,9540	0,9325	0,9112	0,8901
0,6325	0,40	1,0	0,9892	0,9792	0,9696	0,9602	0,9508	0,9278	0,9052	0,8826
0,6403	0,41	1,0	0,9891	0,9791	0,9694	0,9599	0,9505	0,9274	0,9046	0,8819
за $\kappa=1,30$										
0,0000	0,00	1,0	0,9925	0,9856	0,9790	0,9724	0,9659	0,9499	0,9341	0,9183
0,3162	0,10	1,0	0,9919	0,9844	0,9772	0,9700	0,9630	0,9456	0,9284	0,9112
0,4472	0,20	1,0	0,9912	0,9832	0,9754	0,9677	0,9601	0,9413	0,9227	0,9042
0,5477	0,30	1,0	0,9906	0,9819	0,9735	0,9653	0,9572	0,9370	0,9171	0,8972
0,6325	0,40	1,0	0,9899	0,9807	0,9717	0,9629	0,9542	0,9327	0,9114	0,8902
0,6403	0,41	1,0	0,9899	0,9806	0,9716	0,9627	0,9539	0,9323	0,9109	0,8895
за $\kappa=1,40$										
0,0000	0,00	1,0	0,9930	0,9866	0,9803	0,9742	0,9681	0,9531	0,9381	0,9232
0,3162	0,10	1,0	0,9924	0,9854	0,9787	0,9720	0,9654	0,9491	0,9328	0,9166
0,4472	0,20	1,0	0,9918	0,9843	0,9770	0,9698	0,9627	0,9450	0,9275	0,9100
0,5477	0,30	1,0	0,9912	0,9831	0,9753	0,9676	0,9599	0,9410	0,9222	0,9034
0,6325	0,40	1,0	0,9906	0,9820	0,9736	0,9653	0,9572	0,9370	0,9169	0,8968
0,6403	0,41	1,0	0,9905	0,9819	0,9734	0,9651	0,9569	0,9366	0,9164	0,8961
за $\kappa=1,66$										
0,0000	0,00	1,0	0,9940	0,9885	0,9832	0,9779	0,9727	0,9597	0,9466	0,9335
0,3162	0,10	1,0	0,9935	0,9875	0,9817	0,9760	0,9703	0,9562	0,9421	0,9278
0,4472	0,20	1,0	0,9930	0,9866	0,9803	0,9741	0,9680	0,9527	0,9375	0,9221
0,5477	0,30	1,0	0,9925	0,9856	0,9788	0,9722	0,9656	0,9493	0,9329	0,9164
0,6325	0,40	1,0	0,9920	0,9846	0,9774	0,9703	0,9633	0,9458	0,9383	0,9107
0,6403	0,41	1,0	0,9919	0,9845	0,9773	0,9701	0,9630	0,9455	0,9279	0,9101

Табела 6.5

Прошочен коефициент α_0 за нормирани мазници за мазни цевки										
Re		$2 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
m	m^2	α_0								
0,1000	0,01						0,9892	0,9895	0,9895	0,9896
0,1414	0,02						0,9917	0,9924	0,9927	0,9928
0,1732	0,03						0,9945	0,9954	0,9959	0,9960
0,2000	0,04	0,9798	0,9849	0,9883	0,9926	0,9951	0,9973	0,9984	0,9992	0,9994
0,2236	0,05	0,9822	0,9871	0,9906	0,9951	0,9977	1,0002	1,0015	1,0026	1,0027
0,2449	0,06	0,9849	0,9895	0,9930	0,9976	1,0005	1,0033	1,0047	1,0059	1,0061
0,2646	0,07	0,9876	0,9921	0,9956	1,0002	1,0033	1,0064	1,0080	1,0093	1,0095
0,2828	0,08	0,9907	0,9951	0,9984	1,0031	1,0063	1,0096	1,0113	1,0128	1,0130
0,3000	0,09	0,9939	0,9982	1,0014	1,0060	1,0093	1,0128	1,0147	1,0163	1,0166
0,3162	0,10	0,9973	1,0015	1,0046	1,0092	1,0125	1,0162	1,0182	1,0199	1,0202
0,3317	0,11	1,0009	1,0050	1,0080	1,0126	1,0159	1,0196	1,0217	1,0235	1,0238
0,3464	0,12	1,0048	1,0086	1,0116	1,0160	1,0194	1,0230	1,0253	1,0272	1,0275
0,3606	0,13	1,0088	1,0123	1,0153	1,0197	1,0230	1,0266	1,0290	1,0309	1,0312
0,3742	0,14	1,0129	1,0163	1,0192	1,0235	1,0267	1,0303	1,0328	1,0347	1,0350
0,3873	0,15	1,0173	1,0206	1,0234	1,0274	1,0305	1,0341	1,0366	1,0385	1,0388
0,4000	0,16	1,0219	1,0251	1,0276	1,0316	1,0345	1,0380	1,0405	1,0424	1,0427
0,4123	0,17	1,0266	1,0297	1,0321	1,0358	1,0386	1,0420	1,0445	1,0463	1,0467
0,4243	0,18	1,0315	1,0344	1,0367	1,0402	1,0428	1,0461	1,0486	1,0504	1,0507
0,4359	0,19	1,0366	1,0393	1,0415	1,0447	1,0472	1,0503	1,0527	1,0546	1,0547
0,4472	0,20	1,0418	1,0444	1,0464	1,0494	1,0517	1,0546	1,0569	1,0586	1,0589
0,4583	0,21	1,0472	1,0496	1,0515	1,0553	1,0563	1,0590	1,0612	1,0628	1,0631
0,4690	0,22	1,0528	1,0550	1,0567	1,0593	1,0611	1,0636	1,0656	1,0671	1,0674
0,4796	0,23	1,0586	1,0606	1,0621	1,0644	1,0660	1,0682	1,0701	1,0715	1,0718
0,4899	0,24	1,0645	1,0662	1,0677	1,0697	1,0710	1,0730	1,0746	1,0760	1,0762
0,5000	0,25	1,0706	1,0721	1,0734	1,0751	1,0763	1,0779	1,0793	1,0805	1,0807

Табела 6.5 (продолжение)

Re		$2 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
m	m^2	α_0								
0,5099	0,26	1,0769	1,0782	1,0792	1,0806	1,0816	1,0830	1,0841	1,0852	1,0854
0,5196	0,27	1,0833	1,0844	1,0853	1,0864	1,0871	1,0881	1,0890	1,0899	1,0901
0,5292	0,28	1,0899	1,0908	1,0914	1,0923	1,0928	1,0934	1,0941	1,0948	1,0949
0,5385	0,29	1,0966	1,0972	1,0976	1,0982	1,0985	1,0989	1,0993	1,0998	1,0999
0,5477	0,30	1,1035	1,1037	1,1039	1,1042	1,1043	1,1045	1,1046	1,1049	1,1049
0,5568	0,31	1,1106	1,1106	1,1105	1,1104	1,1102	1,1101	1,1101	1,1101	1,1101
0,5657	0,32	1,1179	1,1176	1,1173	1,1168	1,1164	1,1159	1,1156	1,1155	1,1154
0,5745	0,33	1,1253	1,1246	1,1241	1,1233	1,1225	1,1218	1,1214	1,1209	1,1208
0,5831	0,34	1,1329	1,1320	1,1312	1,1300	1,1290	1,1279	1,1272	1,1266	1,1264
0,5916	0,35	1,1407	1,1394	1,1384	1,1368	1,1355	1,1341	1,1332	1,1324	1,1321
0,6000	0,36	1,1486	1,1470	1,1457	1,1438	1,1423	1,1406	1,1394	1,1383	1,1379
0,6083	0,37	1,1568	1,1548	1,1532	1,1510	1,1493	1,1472	1,1457	1,1445	1,1439
0,6164	0,38	1,1650	1,1627	1,1609	1,1583	1,1564	1,1540	1,1523	1,1508	1,1501
0,6245	0,39	1,1734	1,1709	1,1688	1,1658	1,1636	1,1609	1,1590	1,1573	1,1565
0,6325	0,40	1,1821	1,1793	1,1768	1,1735	1,1711	1,1680	1,1660	1,1641	1,1630
0,6403	0,41	1,1909	1,1877	1,1851	1,1813	1,1788	1,1754	1,1732	1,1710	1,1698

Табела 6.6

Екситационен коефициент ε за мазници										
p_2/p_1		1,0	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75
m	m^2	за $\kappa=1,2$								
0	0	1,0	0,9874	0,9748	0,9620	0,9491	0,9361	0,9029	0,8689	0,8340
0,3162	0,1	1,0	0,9856	0,9712	0,9568	0,9423	0,9278	0,8913	0,8543	0,8169
0,4472	0,2	1,0	0,9834	0,9669	0,9504	0,9341	0,9178	0,8773	0,9371	0,7970
0,5477	0,3	1,0	0,9805	0,9613	0,9424	0,9238	0,9053	0,8602	0,8163	0,7733
0,6325	0,4	1,0	0,9767	0,9541	0,9320	0,9105	0,8895	0,8390	0,7909	0,7448
0,6403	0,41	1,0	0,9763	0,9532	0,9308	0,9090	0,8877	0,8366	0,7881	0,7416
за $\kappa=1,3$										
0	0	1,0	0,9884	0,9767	0,9649	0,9529	0,9408	0,9100	0,8783	0,8457
0,3162	0,1	1,0	0,9867	0,9734	0,9600	0,9466	0,9331	0,8990	0,8645	0,8294
0,4472	0,2	1,0	0,9846	0,9693	0,9541	0,9389	0,9237	0,8859	0,8481	0,8102
0,5477	0,3	1,0	0,9820	0,9642	0,9466	0,9292	0,9120	0,8697	0,8283	0,7875
0,6325	0,4	1,0	0,9785	0,9575	0,9369	0,9168	0,8971	0,8495	0,8039	0,7599
0,6403	0,41	1,0	0,9781	0,9567	0,9358	0,9154	0,8954	0,8472	0,8012	0,7569
за $\kappa=1,4$										
0	0	1,0	0,9892	0,9783	0,9673	0,9562	0,9449	0,9162	0,8865	0,8558
0,3162	0,1	1,0	0,9877	0,9753	0,9628	0,9503	0,9377	0,9058	0,8733	0,8402
0,4472	0,2	1,0	0,9857	0,9715	0,9573	0,9430	0,9288	0,8933	0,8577	0,8219
0,5477	0,3	1,0	0,9833	0,9667	0,9503	0,9340	0,9178	0,8780	0,8388	0,8000
0,6325	0,4	1,0	0,9800	0,9604	0,9412	0,9223	0,9038	0,8588	0,8154	0,7733
0,6403	0,41	1,0	0,9796	0,9596	0,9401	0,9209	0,9021	0,8566	0,8127	0,7704
за $\kappa=1,66$										
0	0	1,0	0,9909	0,9817	0,9724	0,9629	0,9533	0,9288	0,9033	0,8768
0,3162	0,1	1,0	0,9896	0,9791	0,9685	0,9578	0,9471	0,9197	0,8917	0,8629
0,4472	0,2	1,0	0,9879	0,9759	0,9637	0,9516	0,9394	0,9088	0,8778	0,8464
0,5477	0,3	1,0	0,9858	0,9718	0,9577	0,9438	0,9299	0,8953	0,8609	0,8265
0,6325	0,4	1,0	0,9831	0,9664	0,9499	0,9336	0,9176	0,8782	0,8397	0,8020
0,6403	0,41	1,0	0,9827	0,9657	0,9400	0,9324	0,9161	0,8762	0,8373	0,7993

Табела 6.7

<i>Проточен коефициент a_0 за нормиран венцури во мазни цевки</i>					
m	m^2	α_0	m	m^2	α_0
0,1000	0,01	0,9893	0,4583	0,21	1,0706
0,1414	0,02	0,9933	0,4690	0,22	1,0754
0,1732	0,03	0,9972	0,4796	0,23	1,0894
0,2000	0,04	1,0010	0,4890	0,24	1,0854
0,2236	0,05	1,0047	0,5000	0,25	1,0906
0,2449	0,06	1,0084	0,5099	0,26	1,0959
0,2646	0,07	1,0122	0,5196	0,27	1,1013
0,2828	0,08	1,0159	0,5292	0,28	1,1068
0,3000	0,09	1,0197	0,5385	0,29	1,1124
0,3162	0,10	1,0235	0,5477	0,30	1,1182
0,3317	0,11	1,0274	0,5568	0,31	1,1241
0,3464	0,12	1,0314	0,5657	0,32	1,1301
0,3606	0,13	1,0354	0,5745	0,33	1,1363
0,3742	0,14	1,0395	0,5831	0,34	1,1425
0,3873	0,15	1,0437	0,5916	0,35	1,1489
0,4000	0,16	1,0479	0,6000	0,36	1,1554
0,4123	0,17	1,0523			
0,4243	0,18	1,0567			
0,4359	0,19	1,0612			
0,4472	0,20	1,0659			

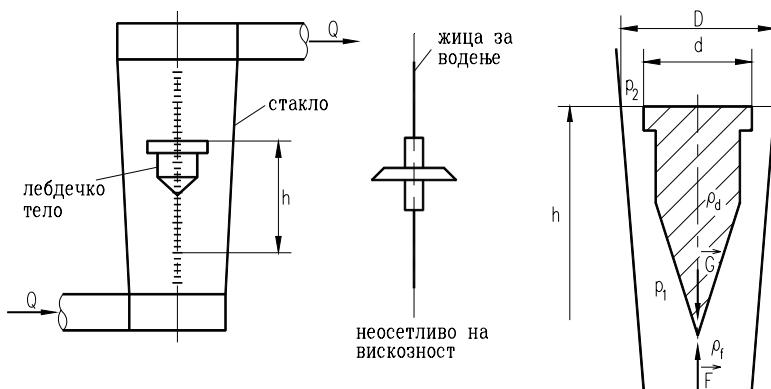
Табела 6.8

<i>m</i>	Бленда	Млазница	Вентури	
			$\varphi = 7 \div 8^0$	$\varphi = 14 \div 15^0$
0,1	0,89	0,82	0,13	0,23
0,2	0,78	0,66	0,11	0,18
0,3	0,68	0,51	0,09	0,16
0,4	0,58	0,39	0,075	0,125
0,5	0,475	0,28	0,065	0,10
0,6	0,375	0,20	0,06	0,08
0,7	0,27			
0,78	0,20			

6.3 МЕРАЧИ СО ЛЕБДЕЧКО ТЕЛО (РОТАМЕТРИ)

Овие инструменти се применуваат за мерење на проток на гасови и течности низ цевководи. Најчесто наоѓаат примена како погонски инструменти во хемиската индустрија, петрохемијата, водоводите, грејните системи и т.н. Работат со голема точност, а можно е и набљудување на мерачот низ стакленото кукиште на инструментот.

Според принципијелната шема на сл. 6.8, ротаметарот се состои од вертикална стаклена цевка со мала конусност, во којашто лебдечкото тело задржува соодветна вертикална положба во зависност од протокот низ цевката. Според тоа, принципот на функционирање се сведува на придушувач со променлив пресек. Како придушувач се јавува проточната површина помеѓу лебдечкото тело со соодветна тежина (може да има и додатен тег) и сидот на конусната цевка, односно мерачот може да се третира како бленда со променлива проточна површина.



Сл. 6.8 Шематички приказ на ротаметар

Според шемата на сл. 6.8, силата на подигање (узгонска сила F) е урамнотежена со силата на тежина на телото (G) при негова стационарна положба, при што за определен проток на флуидот одговара соодветна висина на положба на лебдечкото тело h . Со зголемување на протокот, телото се подига и го зголемува зјајот (проточната површина) помеѓу телото и цевката, сè додека повторно не се постигне состојбата $F = G$.

Од условот за рамнотежа на узгонската сила и тежината, $F=G$, следи равенката:

$$g V_d (\rho_d - \rho_f) = C_y A_d (p_1 - p_2) \quad (6-19)$$

односно:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{g V_d}{C_y A_d} (\rho_d - \rho_f) \quad (6-19a)$$

Ако се претпостави дека низ проточната прстенеста површина $A_0 = A_D - A_d$ се јавува средна брзина:

$$v_{sr} = \varphi \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_f}} \quad (6-20)$$

за волуменскиот проток се добива изразот:

$$Q = \varphi (A_D - A_d) \sqrt{\frac{2 g V_d}{\rho_f C_y A_d} (\rho_d - \rho_f)}$$

односно:

$$Q = C_d (A_D - A_d) \sqrt{\frac{2 g V_d}{\rho_f A_d} (\rho_d - \rho_f)} \quad (6-21)$$

Масениот проток се определува од зависноста:

$$\dot{m} = Q \rho_f = C_d (A_D - A_d) \sqrt{\frac{2 g \rho_f V_d}{A_d} (\rho_d - \rho_f)} \quad (6-22)$$

каде што се:

$$C_d = \frac{\varphi}{\sqrt{C_y}}$$

$$A_D = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_d = \frac{\pi d^2}{4}$$

Како што се гледа од изразите (6-21) и (6-22), протокот може да се смета дека има приближно пропорционална зависност од промената на проточната површина ($A_D - A_d$), бидејќи коефициентот на проток C_d се менува многу малку со промената на висината на положба h .

Според тоа, со доволна точност волуменскиот и масениот проток можат да се изразат како:

$$Q = K_Q (A_D - A_d) = f_Q(h) \quad (6-23)$$

$$\dot{m} = K_m (A_D - A_d) = f_m(h) \quad (6-24)$$

Функционалната зависност $f(h)$ се определува со калибраирање, а скалата на мерачот, во зависност од конусот на цевката, може да биде линеарна или некоја друга.

Лебдечкото тело на ротаметерот може да биде направено од различни материјали, а со цел да се обезбеди потребната разлика на густини ($\rho_d - \rho_f$) за мерење проток на определен гас или течност. Исто така, во зависност од намената, телото може да има различен облик; на пример, некои тела се изведуваат во облик на диск со посебно водење (види сл. 6.8), за да се намалат вискозните ефекти на флуидот. Конусната цевка најчесто се изведува од специјално отпорно стакло, што овозможува директно следење на телото. Кога е потребна поголема јакост, може да се примени метална цевка, а позицијата на телото се регистрира електромагнетно низ сидот на цевката. Доколку е потребен пнеуматски или електричен сигнал, пропорционален на протокот, движењето на лебдечкото тело може да се мери со погоден давач за поместување.

6.4 ПРЕЛИВИ

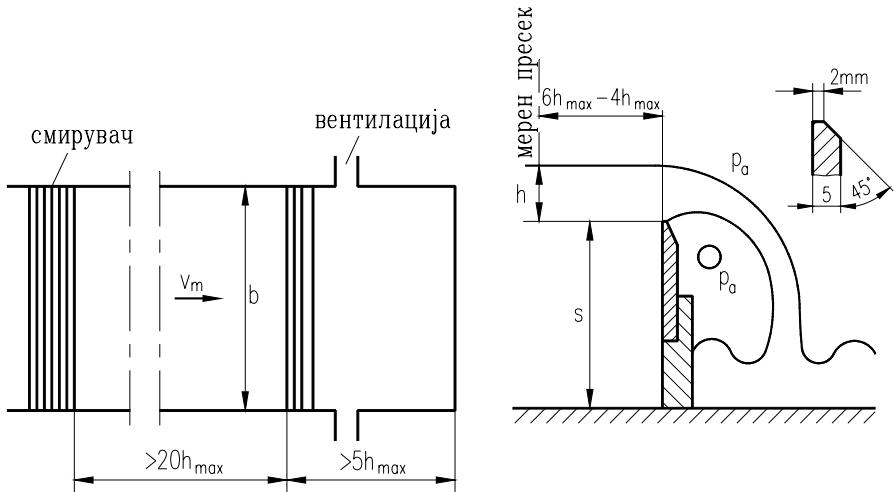
Преливите се применуваат за мерење на поголеми протоци на течности при истражувања во хидраулични лаборатории. Исто така, нашле примена и при мерење на проток на вода во отворени канали.

Преливот претставува мерен уред (брана) со слободна површина на протекување, фиксно вграден во соодветен канал. Постојат различни видови преливи, од кои овдека се објаснети два типа кои најчесто наоѓаат примена.

6.4.1 Правоаголен прелив

Правоаголниот прелив (Reybock-ов) претставува мерна брана со хоризонтален остат преливен раб, инсталрирана во правоаголен канал со што е можно помазни сидови (види сл. 6.9). Овој прелив обично се користи за мерење на поголеми протоци.

Преливниот раб треба да биде наполно хоризонтален и правоаголен, а обично се изработува од не'рѓосувачки челик или месинг.



Сл. 6.9 Шема на правоаголен прелив

Преливниот млаз треба да биде наполно вентилиран, односно да биде обезбеден атмосферски притисок p_a од горната и од долната страна на млазот. За таа цел се изведуваат вентилациони цевки за довод на воздух во страничните сидови на каналот (види сл. 6.9). На сликата се означени и минималните должини пред и зад преливниот раб, во која зона каналот мора да биде изведен со наполно паралелни вертикални странични сидови и хоризонтално рамно дно, без какви и да било нерамнини или други пречки. Доводот на вода во мерниот канал треба да биде доволно оддалечен од правиот дел, при што, за да се обезбеди доволно мирно ниво на слободната површина, се вградуваат смирувачи (најчесто решеткастии), на определено растојание од преливната брана.

За лабораториски истражувања обично се користат правоаголни преливи со следниве гранични димензии:

$b > 0,25 \text{ m}$ - ширина на каналот

$s > 0,30 \text{ m}$ - висина на преливната преграда

$h < 0,75 \text{ m}$ - преливна висина

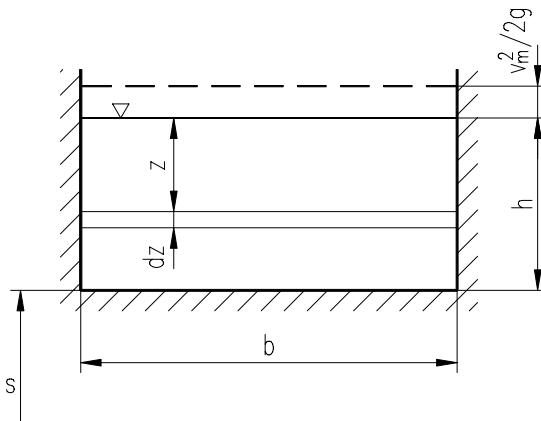
$v_m < 0,45 \text{ m/s}$ - средна брзина на доток на вода

Изразот на зависност на протокот од преливната висина може да се определи преку промената на брзината во мерниот пресек.

Според сл. 6.10, за мерниот пресек на преливот на длабочина z под слободната површина, теоретската брзина изнесува:

$$v_z = \sqrt{2g \left(z + \frac{v_m^2}{2g} \right)}$$

каде што $\frac{v_m^2}{2g}$ претставува претпоставеното зголемување на преливната висина заради кинетичката енергија на водата во каналот.



Сл. 6.10 Мерен пресек на правоаголен прелив

Теоретскиот елементарен проток dQ_T низ површината (dzb) ќе биде:

$$dQ_T = b\sqrt{2g} \sqrt{z + \frac{v_m^2}{2g}} dz$$

односно теоретскиот проток низ целиот преливен пресек:

$$\begin{aligned} Q_T &= b\sqrt{2g} \int_0^h \sqrt{z + \frac{v_m^2}{2g}} dz = \\ &= \frac{2}{3} b\sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{v_m^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_m^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \end{aligned} \quad (6-25)$$

За брзини при лабораториски истражувања $v_m < 0,45$ m/s, кинетичката енергија $\frac{v_m^2}{2g}$ може да се занемари, а вистинскиот проток да се изрази како :

$$Q = \frac{2}{3} \mu b\sqrt{2g} h^{3/2} \quad (6-26)$$

Во изразот (6-26), преливниот коефициент μ ја зема во обзир вистинската распределба на брзината во мерниот пресек и контракцијата на млазот. Тој се определува експериментално, со баждарење со познати струења, и претставува зависност од висината на мерната брана и преливната висина $\mu = \mu(s,h)$. Според швајцарските стандарди, се користи емпириската формула:

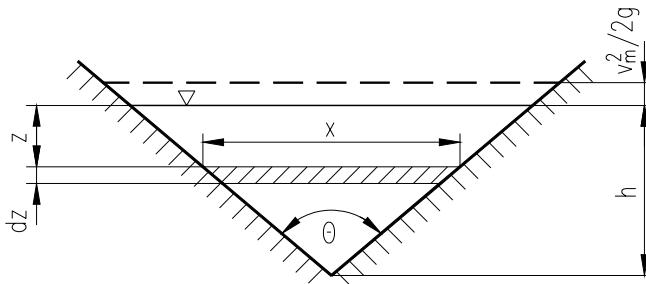
$$C = \frac{2}{3} \mu = 0,4 \left[1 + \frac{1}{1000h + 1,6} \right] \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+s} \right)^2 \right]$$

при што важат следниве вредностни дијапазони на h и s :

$$0,025 < h < 0,80 \text{ m} ; \quad s > 0,3 \text{ m} ; \quad \frac{h}{s} < 1 .$$

6.4.2 Триаголен прелив

Триаголниот прелив (види сл. 6.11) се применува за помали протоци. Мерниот канал се изведува на ист начин како прикажаниот на сл. 6.9, а разликата е во обликов на мерната брана. Притоа, потребно е да бидат исполнети истите барања за квалитетот на изработката: смиреност на слободната површина при мерниот пресек, вентилираност на преливниот млаз и др. Аголот на преливот θ зависи од односот помеѓу висината на преливот и протокот, од кои причини максималниот проток што може да се мери е ограничен.



Сл. 6.11 Мерен пресек на триаголен прелив

Аналогно како во претходниот случај, теоретскиот елементарен проток низ проточната површин ($x dz$) ќе биде:

$$dQ_T = x \sqrt{2g} \sqrt{\left(z + \frac{v_m^2}{2g} \right)} dz$$

каде што е:

$$x = 2(h - z) \tan \frac{\theta}{2} .$$

Според тоа, теоретскиот проток низ целиот преливен пресек се добива како:

$$Q_T = 2 \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} \int_0^h (h - z) \sqrt{z + \frac{v_m^2}{2g}} dz \quad (6-27)$$

Со занемарување на кинетичката енергија $\frac{v_m^2}{2g}$ за случај кога е $v_m < 0,45$ m/s и со воведување на преливниот коефициент μ , вистинскиот проток може да се изрази како:

$$Q = \frac{8}{15} \mu \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} h^{5/2} \quad (6-28)$$

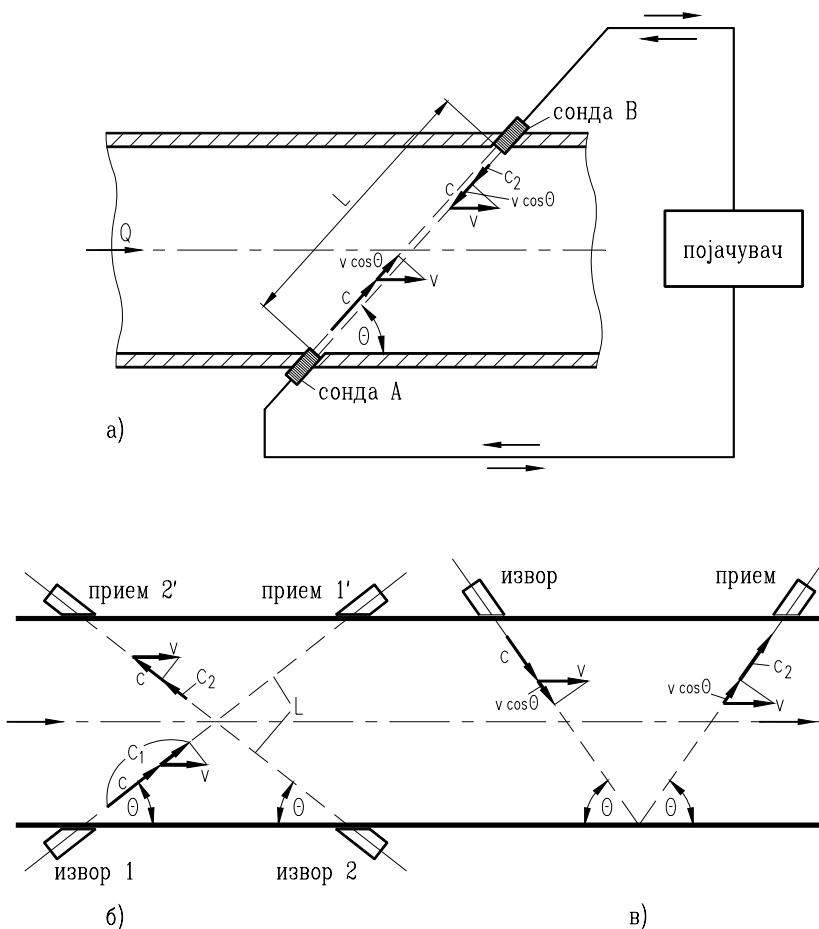
Коефициентот μ се добива со баждарење, а за лабораториски мерни брани обично изнесува $\mu \approx 0,58$.

6.5 УЛТРАЗВУЧНИ МЕРАЧИ НА ПРОТОК

Доколку низ флуид што струи со брзина v пропагира и звук со брзина c , апсолутната брзина на пропагирање на звукот ќе претставува алгебарска сума на брзината на звукот во флуидот и компонентата на брзината на флуидот во правецот на пропагирање на звучниот бран. Овој ефект претставува основа на функционирањето на ултразвучниот мерач на проток.

Постојните методи на примена на наведениот феномен зависат од постоењето на извори (трансмитери) и приемници на акустична енергија. Најчест случај е примената на пиезоелектрични кристални давачи како извори и приемници на ултразвук. Типични примери на мерење на проток со помош на ултразвучни давачи се прикажани на сл. 6.12.

На сл. 6.12a е прикажан пример на мерење на проток со две ултразвучни сонди, кои наизменично ја имаат улогата на извор и приемник на ултразвук: А-извор и В-приемник, В-извор и А-приемник. Истиот ефект се постигнува и со 4 сонди, најчесто изведени во т.н. X конфигурација (сл. 6.12б). Доста добри резултати се добиваат и со поевтиниот V метод (сл. 6.12в).



Сл. 6.12 Примери на мерење на проток со ултразвучни сонди

Според тоа, за случај на припагирање на ултразвучниот бран од сондата А према сондата В (сл. 6. 12.а), односно од изворот 1 према приемникот 1' (сл. 6.12б), абсолютната брзина на пропагирање ќе биде:

$$c_1 = c + v \cos \theta,$$

а соодветната фреквенција на ултразвучните пулсации:

$$f_1 = \frac{c + v \cos \theta}{L}$$

При пропагирањето на ултразвучниот бран од **B** кон **A**:

$$c_2 = c - v \cos \theta \quad \text{и} \quad f_2 = \frac{c - v \cos \theta}{L}$$

каде што се:

c -брзина на пропагирање на ултразвукот во флуидот (на пример, во вода $c \approx 1524$ m/s),

L -расстояние помеѓу изворот и приемникот,

v -брзина на флуидот што струи.

Како резултат, разликата на фреквенциите при пропагирање на ултразвукот во едната и другата насока ќе изнесува:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2v \cos \theta}{L} \quad (6-29)$$

Како што се гледа од изразот (6-29), разликата на фреквенциите не зависи од брзината на звукот c и со тоа не е предмет на грешки поради нејзината промена. На тој начин, со мерење на Δf , се добива информација за големината на брзината v , којашто може да се пресмета од изразот (6-29).

Наместо преку разликата на фреквенциите, брзината v може да се определи преку соодветните времиња на пропагирање на ултразвукот од **A** кон **B** и од **B** кон **A**:

$$T_1 = \frac{L}{c_1} = \frac{1}{f_1} \quad \text{и} \quad T_2 = \frac{L}{c_2} = \frac{1}{f_2}$$

Односно, преку разликата на времињата на пропагирање

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

се добива зависноста за v како:

$$v = \frac{L}{2 \cos \theta} \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \quad (6-30)$$

Горната анализа се базира на претпоставен квадратен профил на брзината на флуидот, што во практиката не е случај. За стварни профили на v , брзината може да биде заменета со нејзината средна вредност v_{sr} , сè додека профилот е симетричен во однос на оската на цевководот. Комерцијалните мерни системи од овој тип имаат релативна грешка од $\pm 2\%$ од полната скала на промена на протокот.

Ултрасоничните мерачи, главно, се применуваат за мерења на протоци во течности. Практичните верзии се релативно неосетливи на промената на вискозноста, температурата и густината на работната течност.

6.6 РОТИРАЧКИ ПРОТОКОМЕРИ

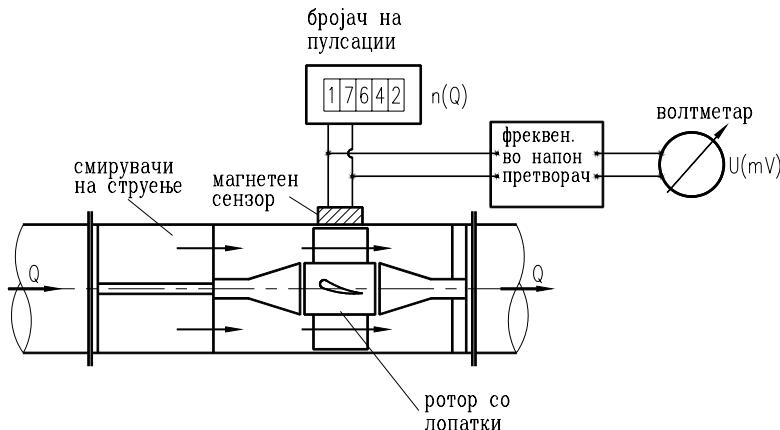
Методологијата за мерење на проток со овие инструменти се согледува од веќе објаснетите инструменти со ротирачки лопатки за мерење на брзина на струење (поглавје 5.5 - Хидрометрички крила).

Ротирачкиот мерач на проток, во основа, претставува мала хидраулична турбина или волуменски хидромотор, што се инсталира во цевка низ која струи флуид. Притоа, протокот се определува како зависност од аголната брзина (т.е. бројот на вртежи) на роторот на инструментот:

$$Q = Q(n)$$

На сл. 6.13 е прикажана шема за мерење на проток со помош на турбински мерач. Во овој случај, турбинскиот ротор, со $m \geq 4$ лопатки, е инсталiran во цевка низ која струи флуид со проток Q . Со сведување на механичките и хидрауличките загуби на минимум (квалитетна изработка), можно е да се конструира турбина, чија аголна брзина е со линеарна зависност во однос на протокот, за определено подрачје на негова примена; види изрази (5-15) и (5-16).

Во прикажаната конструкција на сл. 6.13, аголната брзина (бројот на вртежи) може да се измери едноставно, и со голема точност, со одбројување на интервалите за кои турбинските лопатки поминуваат покрај некоја точка, во која е инсталiran магнетен сензор. Во магнетниот сензор се произведува електричен импулс (пулсирање) при секое поминување на една лопатка покрај него. Овие пулсации се доведуваат до електронскиот мерач на пулсации, преку кој се добива информација за аголната брзина, односно протокот.



Сл .6.13 Турбински мерач на проток

Со акумулирање на вкупниот број на електрични пулсирања, за определен временски интервал (на пример, 1s), се добива податок за вкупниот проток. Во бројачот се бројат пулсациите за определен точен временски интервал и се дава резултат на дигиталниот дисплеј, како средна вредност (од сите лопатки) за време од неколку секунди. Доколку е потребен аналоген напонски сигнал, пулсациите се доведуваат прво до соодветен „фреквенција во напон“ претворач.

Со помош на димензионална анализа на турбинскиот мерач на проток, може да се дојде до следнава функционална зависност:

$$\frac{Q}{\pi D^3} = f \left(\frac{nD^2}{\nu} \right) \quad (6-31)$$

каде што се:

Q -проток,

D -дијаметар на отворот на протокомерот,

n -број на вртежи,

ν -кинематска вискозност.

Во стварност, ефектот на вискозноста е битен за мали протоци, додека за големи протоци (турбулентен режим) влијанието на вискозноста е второстепено и со доволна точност се применува линеарна зависност:

$$Q = K \cdot n \quad (6-32)$$

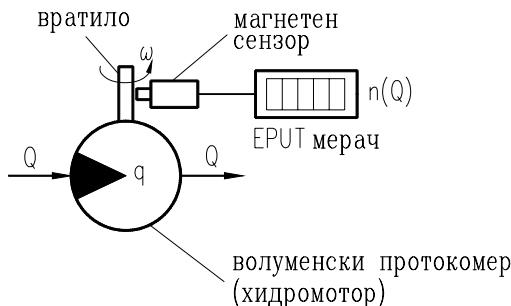
каде K е константа за даден протокомер и не зависи од особините на флуидот.

При мали брзини (протоци), влијанието на вискозноста (границниот слој) е значајно, и зависноста $Q = Q(n)$ не е линеарна, види дијаграм 5.12, што претпоставува соодветна корекција. Меѓутоа, турбинските мерачи се изведуваат со различни големини, при што, секој од нив покажува линеарна зависност во определено подрачје; во таа насока, се избира калибриран протокомер предвиден за мерење на проток во определен дијапазон на промена.

Комерцијалните турбински протокомери се произведуваат за мерење на протоци на течности во дијапазон од околу $0,3 \text{ l/min}$ до $2 \text{ m}^3/\text{s}$, а за гасови од $0,05 \text{ l/s}$ до 7000 l/s . Излезниот напон на магнетниот сензор е обично во дијапазон од 10 до 100 mV . Падот на притисокот низ протокомерот ($\Delta p = \xi \rho v^2 / 2$) е околу $0,2$ до $0,7 \text{ bar}$, при максимален проток.

Турбинските протокомери наоѓаат широка примена при мерења на проток на стационарни и нестационарни струења во цевководи, а нивната точност е од ред 1 до 1,5 %. Електронскиот бројач на пулсации може да биде избаждарен за директно покажување на протокот во l/min или l/s .

Во групата на ротирачки протокомери спаѓаат и волуменските ротирачки мерачи на проток. Тие, всушност, претставуваат волуменски хидраулични мотори, чиишто механички и инерцијални загуби се сведени на минимум. Кај овие протокомери, протокот на флуидот Q низ работните комори на хидромоторот (цилиндри, меѓузабија и слично), со познат работен волумен q , произведува ротација на излезното вратило (види сл. 6.14).



Сл. 6.14 Шема на волуменски пропорционер

За познат работен волумен ($q = const.$), зависноста на протокот од бројот на вртежи е изразена како:

$$Q = \frac{Q_T}{\eta_v} = \frac{qn}{\eta_v} = k \cdot n \quad (6-33)$$

каде што се:

- Q_T - среден пресметковен (геометрички) проток;
- q - работен волумен во m^3 за еден вртеж (познат од геометријата на работните комори на хидромоторот);
- η_v - волуменски коефициент на корисно действие, којшто ги зема во обзир волуменските загуби во хидромоторот.

На тој начин, со податокот за бројот на вртежи n , добиен од мерачот на пулсации (событија) за единица време - ЕPUT мерач, може да се определи соодветниот проток. Овој тип на протокомери, обично, се применува за мерење на тотален проток, а поретко за моментални протоци. Со прецизна изработка ($\eta_v = 0,97 \div 0,99$) се постигнува и релативно висока точност (грешка од околу 1,5%). Падот на притисокот во волуменските протокомери е околу 0,3 bar. Волуменските протокомери наоѓаат примена за мерење на протоци во водоводи и други хидраулични инсталации.

ГЛАВА СЕДМА

7. МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРА

7.1 ОПШТИ ПОИМИ

Во глава 1. е уочено дека температурата θ е земена како фундаментална големина во двата назначени мерни система (M,L,T,θ) и (F,L,T,θ) . Природата на температурата како физичка големина детално е разработена во елементарните курсеви по термодинамика, а овдека се назначени само некои врски кои се потребни при нејзиното мерење, како и за објаснување на особеностите на соодветните инструменти.

Според меѓународниот систем на мерки SI, температурната скала се базира на определување на фиксни температури, помеѓу кои, со помош на интерполациони методи, се утврдува температурната скала за целата температурна област. Наведените фиксни температури ги означуваат температурите на топење, оцврстување или вриење на некои материјали, при атмосферски притисок од 760 Тогт, односно 1013,25 mbar (види *табела 7.1*).

Според SI системот како основна единица за мерење на температурата е усвоен Kelvin (K), а соодветната Келвинова температурна скала започнува од т.н. „апсолутна нула“, која одговара на температура при која внатрешната енергија на гасот е нула ($u = 0$) и престанало какво и да било движење на молекулите (со ладење на гас при константен волумен, за температура од $-273,16^{\circ}\text{C}$, притисокот на гасот би морал да падне на нула, под претпоставка дека гасот не се претворил во течност). За температура изразена во K е усвоена ознаката T .

Табела 7.1

Фиксни температури за некои материјали		
состојба на материјалот		фиксна температура во $^{\circ}\text{C}$
вриење на азот	N_2	-195,81
вриење на кислород	O_2	-182,97
топење на жива	Hg	-38,87
топење на мраз	H_2O	0,00
вриење на вода	H_2O	100,00
вриење на нафталин		217,96
оцврст. на олово	Pb	327,30
оцврст. на цинк	Zn	419,50
вриење на сулфур	S	444,60
оцврст. на антимон	Sb	630,50
оцврст. на сребро	Ag	960,80
оцврст. на злато	Au	1063,00
топење на никел	Ni	1453,00
топење на платина	Pt	1769,00
топење на родиум	Rh	1960,00
топење на иридиум	Ir	2443,00
топење на волфрам	W	3380,00

Температурната скала се определува со интерполација помеѓу наведените фиксни температури, најчесто со следниве методи:

- помеѓу температурата на вриење на кислород и температурата на оцврствување на антимон, со помош на платински отпорен термометар,
- помеѓу температурите на оцврствување на антимон и злато, со термоелемент Pt-PtRh,
- над температурата на топење на златото, со помош на пирометар врз основа на законот на зрачење на црно тело и со контрола на горенаведените фиксни температури.

Во техниката температурата често се изразува и се мери во $^{\circ}\text{C}$ (степени Celzius-ови). Целзиусовата температурна скала (поделена на 100 $^{\circ}\text{C}$) претставува температурно подрачје помеѓу температурите на замрзнување ($0\ ^{\circ}\text{C}$) и вриење ($100\ ^{\circ}\text{C}$) на водата, при притисок од 760 Torr. Притоа, обично се користи ознаката t .

Врз основа на дефинициите за Келвиновата и Целзиусовата скала позната е врската:

$$K = 273,16 + [{}^{\circ}\text{C}] \quad (7-1)$$

Во англо-саксонската литература се среќава температурна скала во $^{\circ}\text{F}$ (степени Fahrenheit-ови), поделена на $180\ ^{\circ}\text{F}$, при што се применуваат следниве изрази за пресметување на $^{\circ}\text{C}$ во $^{\circ}\text{F}$ и обратно:

$$[{}^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \{ [{}^{\circ}\text{F}] - 32 \}$$

$$[{}^{\circ}\text{F}] = \frac{9}{5} [{}^{\circ}\text{C}] + 32 \quad (7-2)$$

Калибрирањето на определен инструмент за мерење на температура (термометар) воглавно се остварува со негово споредување со определени фиксни температури на околината, како што се температурите на топење и вриење на стандардни супстанци (види *табела 7.1*), или со споредување на отчитувањата од него со отчитувања од поточни, претходно калибрирани температурни сензори (секундарни стандарди). Последново обично се остварува со поставување на двета термометра во непосреден температурен контакт во баждарна када со константна контролирана температура. Точни отпорни термометри, термопарови, или живини стаклени термометри, се користат многу често како секундарни стандарди. Исто така, на располагање стојат и стандарди базирани на точките на топење на различни метали, како и точките на замрзнување и вриење на водата.

7.2 МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРА ПРИ СТРУЕЊЕ НА ФЛУИД

Аналогно како за притисокот, и во овој случај може да се разликува струјна (по некои автори статичка) температура, T , и стагнационата или тотална температура T_t .

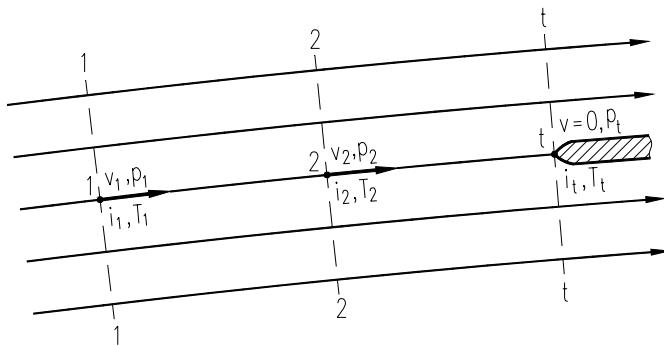
Многу често е потребно да се определи струјната температура на флуид што струи, бидејќи голем број од неговите физички особини и параметри зависат од неа. Струјната температура е дефинирана како температура на тело (честичка) кое се движи заедно со флуидот со иста брзина, без да постојат загуби на топлина од зрачење. Според тоа, за да се измери струјната температура T , сондата треба да се движи заедно со флуидот (што е многу тешко остварливо) и да не постои промена на температурата околу сондата (што не е можно). Од овие причини, може да се рече дека во практиката не е можно директно мерење на струјната температура. Затоа T се определува индиректно, преку промената на други физички големини, а најчесто преку тоталната температура T_t .

Тоталната или стагнационата температура T_t се добива со изентропско запирање на струењето на флуидот од брзина v на брзина $v = 0$. Доколку флуидот струи под адијабатски (изентропски) услови, од енергетската равенка за стационарно струење (види поглавје 4.1) се добива:

$$i_2 + \frac{v_2^2}{2} = i_1 + \frac{v_1^2}{2} \quad (7-3)$$

Со изентропска стагнација на носот на сондата (види сл. 7.1), за $v_2 = 0$, и $v_1 = v$, равенката (7-3) се трансформира во:

$$i_2 = i_1 + \frac{v^2}{2}, \quad \text{односно} \quad i_t = i + \frac{v^2}{2} \quad (7-4)$$



Сл. 7.1 Параметри при изентрописко стационарно струење

За идеален гас, кој фактички може да следи адијабатска промена, разликата на енталпиите може да се изрази како:

$$\Delta i = c_p \Delta T$$

односно во конкретниот случај

$$i_t - i = c_p (T_t - T) \quad (7-5)$$

Ако вака изразената разлика на енталпии се замени во изразот (7-4), при константна специфична топлина c_p , се добива зависност на тоталната температура од струјната температура и брзината на струење:

$$T_t = T + \frac{v^2}{2c_p} \quad (7-6)$$

Очигледно, доколку се работи за флуид во мирување ($v = 0$), струјната и тоталната температура се исти, $T = T_t$.

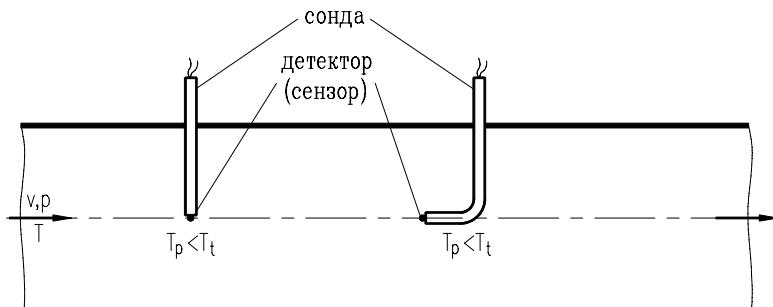
Од друга страна, при струења на компресибилни флуиди со поголеми брзини, односот на тоталната и струјната температура може да се изрази како зависност од Маховиот број (види поглавје 4.1):

$$\frac{T_t}{T} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \quad (7-7)$$

каде што е:

$$M = \frac{v}{c} = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}.$$

Тоталната температура T_t може да се мери со т.н. сонда за стагнацијона температура. Принципот се сведува како при мерење на тотален притисок со Пито сонда, односно детекторот (сензорот) за мерење на T_t се поставува во точката на стагнација (види сл. 7.2).



Сл. 7.2 Пример на сонда за стагнацијона температура

Во претходните излагања беше истакнато дека присуството на сондата во струјното поле создава локални пречки, кои предизвикуваат негово поголемо или помало нарушување, а особено во близина на мерната сонда. Од овие причини, и измерената температура со сондата е помала од вистинската тотална температура: $T_p < T_t$. Причините за ваквото отстапување можат да се сумираат како:

- влијание на граничниот слој при обстранивањето на сондата, односно пренос на топлина со конвекција од флуидот на детекторот,
- кондукција на топлината низ држачот на сондата,
- пренос на топлина со зрачење од сондата на околната или обратно.

Зависноста на T_p од T_t практично е неможно да се изведе по аналитички пат, од кои причини со експериментална калибрација обично се определува корекционен фактор, дефиниран како:

$$r = \frac{T_p - T}{T_t - T} \quad (7-8)$$

Ако се претпостави дека факторот r е познат за конкретна сонда, со комбинација на изразот (7-6) со (7-8) се добиваат следниве зависности:

$$T = T_p - r \frac{v^2}{2c_p} \quad (7-9)$$

$$T_t = T_p + (1 - r) \frac{v^2}{2c_p} \quad (7-10)$$

од кои можат да се определат тоталната и струјната температура, преку измерените T_p и v .

Доколку зависноста на T_t и T е изразена преку Маховиот број, со комбинација на изразот (7-7) со (7-8) се добива:

$$T = \frac{T_p}{1 + r(\kappa - 1) \frac{M^2}{2}} \quad (7-11)$$

$$\frac{(1 - r)T_t}{T_p - rT_t} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \quad (7-12)$$

Бидејќи $T_p < T_t$, од горните изрази очигледно е дека $r < 1$. Вредноста на r може да се подобри, т.е. да се доведе што е можно поблиску до вредността 1, со изведување на посебна заштита на сензорот (детекторот).

Во зависност од температурата што се мери, како и од брзината на струење на флуидот, можат да се согледаат три области на мерење на температурата, според кои се изведува и соодветната заштита:

◆ Мерење на ниски температури

$$(t < 200 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Во овој случај може да се занемари загубата на топлина со кондукција низ носачот на сондата, како и загубите со зрачење (претходно наведените причини под б) и в)). Притоа, со доволна точност може да се примени отворен (гол) детектор, без некоја посебна заштита (види сл. 7.2); на пример: обичен живин термометар, термопар, термистор и сл.

Доколку се применува живин стаклен термометар, корекциониот фактор обично изнесува $r \approx 0,5$; односно, $r = 0,3$ до $0,7$, во зависност од големината и обликот на живиниот резервоар.

За топчест спој на термопар или термистор без заштита, обично се зема $r \approx 0,65$. Наведените вредности за r можат да се усвојат за струења со мали и големи брзини, бидејќи се занемарува загубата на топлина поради кондукција низ држачот на сондата.

◆ Мерење на средни температури при големи брзини

$$(200 \text{ } ^\circ\text{C} < t < 600 \text{ } ^\circ\text{C})$$

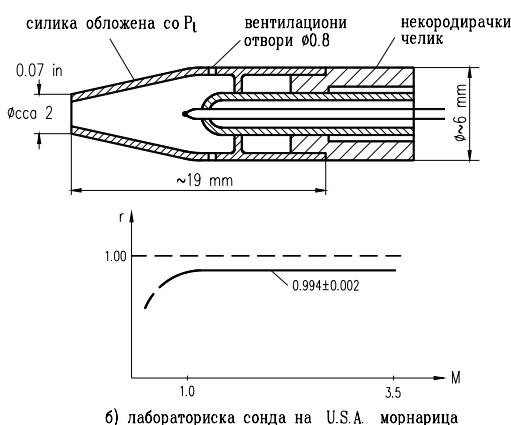
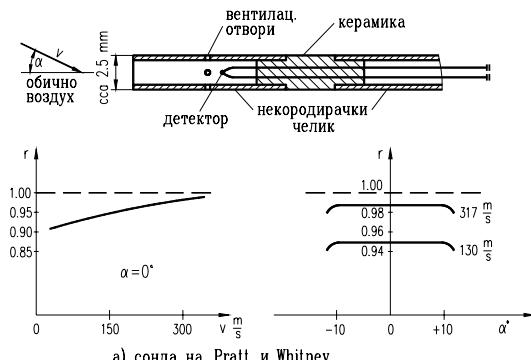
При мали брзини, преносот на топлина со конвекција од флуидот што струи на детекторот е занемарлив, поради дебелиот граничен слој околу сензорот. Во тој случај, преовладува загубата на топлина со кондукција низ држачот и зрачење од сондата на оклонината, што се манифестира во паѓање на корекциониот фактор (види дијаграми на сл. 7.3).

При поголеми брзини се манифестираат загуби на топлина поради конвекција (а) и кондукција (б), а корекциониот фактор r се приближува кон константна вредност. Со посебна заштита за водење на флуидот во близина на детекторот, а со цел да се постигнат услови што е можно поблиски до целосна стагнација (влијанието на членот $v^2/2g$ во равенката (7-10) да се сведе на минимум), се остваруваат вредности за r близки до единица. На пример, со заштита каква што е прикажана на сл. 7.3a, при големи брзини се постигнуваат вредности до $r \approx 0,99$; а за заштита како на сл. 7.3b корекциониот фактор задржува константна вредност за широко подречје на Маховиот број.

◆ Мерење на високи температури

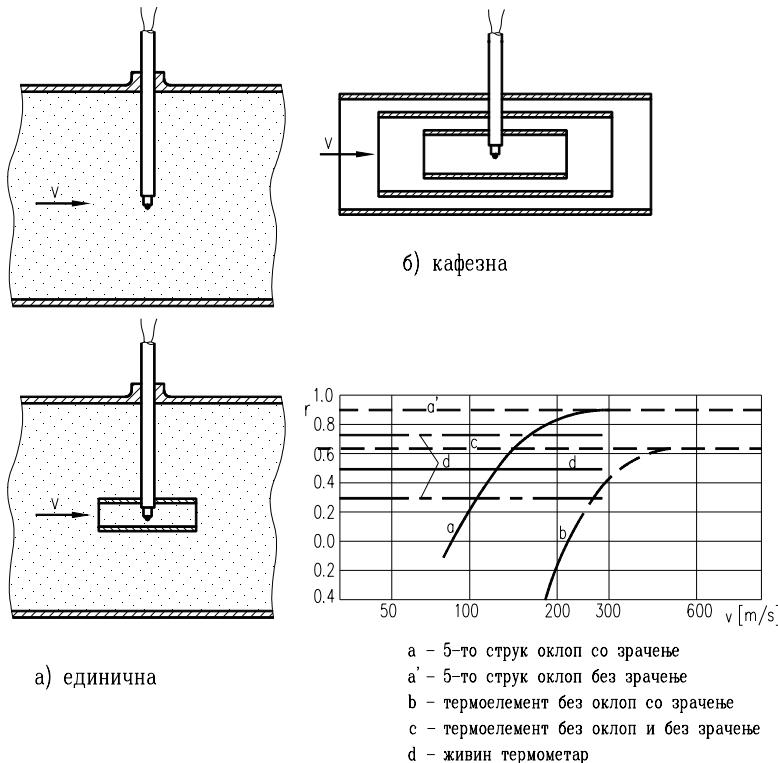
$$(t > 600^{\circ}\text{C})$$

Во овој случај е интензивна загубата на топлина со зрачење (причина под в)), поради што е потребна дополнителна заштита која ќе овозможи зголемување на брzinата околу детекторот, со што би се смалил граничниот слој на минимум и би се подобрил преносот на топлина со конвекција. Покрај посебната заштита (види сл. 7.4), за да се сведе загубата со зрачење на најмала можна мерка, потребно е димензиите на сензорот да бидат што е можно помали, како и примена на соодветни материјали за сондата и нејзината заштита.



Сл. 7.3 Спагнациони температурни сонди со соодветна заштита

На сл. 7.4а е прикажана сонда со вообичаена заштита за смалување на грешката поради радијација, со примена на единичен заштитен оклоп. Принципот се сведува на поставување тело (оклоп), чијашто температура е поблиска до температурата на струјниот флуид, отколку што е температурата на сидот на каналот.



Сл. 7.4 Защитата на сонда од радијација

Со примена на прикажаната единична заштита, загубата на топлина со радијација ќе се смили на половина од загубата при незаштитена сонда. За кафезна заштита со n оклопи (сл. 7.4б), загубата на топлина се редуцира на $1/(n + 1)$ од вредноста за случај без заштита. Кафезната заштита од радијација обично се изведува најчесто со четири оклопа, а односот дужина/дијаметар на оклопот не поминува вредност

4:1 (преку овој сооднос занемарливо е влијанието на смалување на загубата). Исто така, растојанието помеѓу оклопите треба да биде доволно големо ($> 1 \text{ mm}$), за да се спречи кондуктивниот пренос на топлина помеѓу заштитните оклопи.

Со воведување на заштита од радијација, корекциониот фактор може да се доведе до вредност $r = 0,9$, а вредноста на грешката на мерената температура, во споредба со незаштитена сонда, да се смали за осум пати.

7.3 ТЕРМОМЕТРИ НА ПРИНЦИП НА ТОПЛОТНО ШИРЕЊЕ

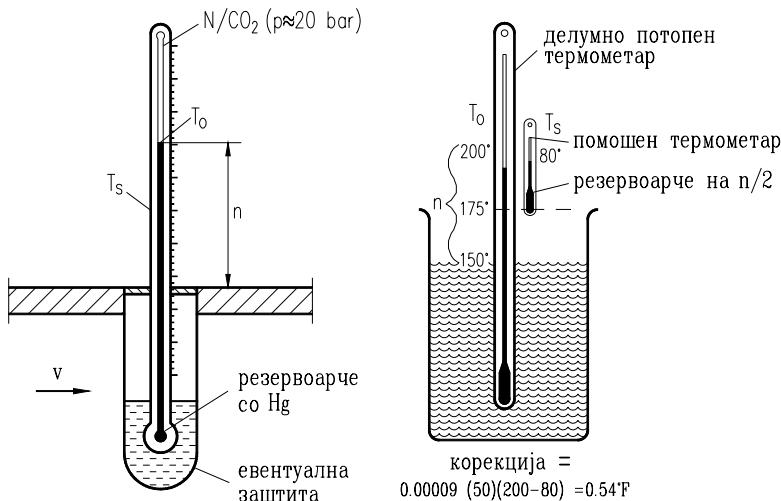
Кај овој тип на температурни сензори се користи феноменот на топлотно ширење во една или друга насока на метал, течност или гас, при промена на температурата. Ширењето на металите е применето воглавно во биметалните елементи, со користење на диференцијалното ширење на ленти од два метала. Ширењето на течност, во основа при константен притисок, е основа на стаклените термометри со течност. Ограничена експанзија на течности, гасови, или пареа резултира во зголемување на притисокот, што ја дава идејата за притисните термометри.

7.3.1 Стаклени термометри

Стаклениот термометар со течност или жива многу често се среќава во практиката. Живиниот термометар (сл. 7.5) нашол широка примена во практиката, при мерење на пониски температури, а со посебна изведба најмногу до 630°C . Квалитетните термометри со жива за повисоки температури се изработуваат од посебно Jena стакло. Принципот на функционирање се базира на ширење на термометарската течност во капиларната цевка, при зголемување на температурата. Покрај основното резервоарче за жива, кое е поврзано со капиларната цевка, термометарот обично содржи и проширување на крајот од капиларната цевка, во кое може да навлезе живата при зголемување на температурата над максималната вредност на мерната скала.

Стандардните изведби на живините термометри обично се за температури до 300°C , бидејќи веќе при 360°C се постигнува вриење на

живата. За $t > 300^{\circ}\text{C}$, просторот над живата се полни со инертен гас (N или CO_2) под притисок (20 bar или повеќе), со цел да се зголеми точката на вриење на живата. Притоа, потребна е изработка на термометарот од специјално стакло, за да го издржи високиот притисок. Сепак, стаклените живини термометри не се применуваат за температури поголеми од 630°C .



Сл. 7.5 Живин термометар

Покрај живиниот термометар, за мерење на пониски температури во употреба се и стаклени термометри со други течности. Најчесто применуваните течности ги имаат следниве температурни подрачја: -70 до $+100^{\circ}\text{C}$ за толуол, -110 до $+50^{\circ}\text{C}$ за етилалкохол, -200 до $+20^{\circ}\text{C}$ за пентан и т.н.

При многу точни мерења, доколку скалата на термометарот е надвор од мерното место (види сл. 7.5), потребно е да се изврши корекција на отчитаната температура, заради различното ширење на течноста и стаклото. Според најчесто применуваната корекција, вистинската температура се добива како:

$$T = T_0 + \varepsilon n(T_0 - T_s) \quad (7-13)$$

каде што се:

T_0 - прочитана температура на скалата;

n - број на степени на скалата што се наоѓаат надвор од мерното место;

T_s - температура на скалата, којашто се мери со посебен термометар на половина од висината од скалата $n/2$ (види сл. 7.5б);

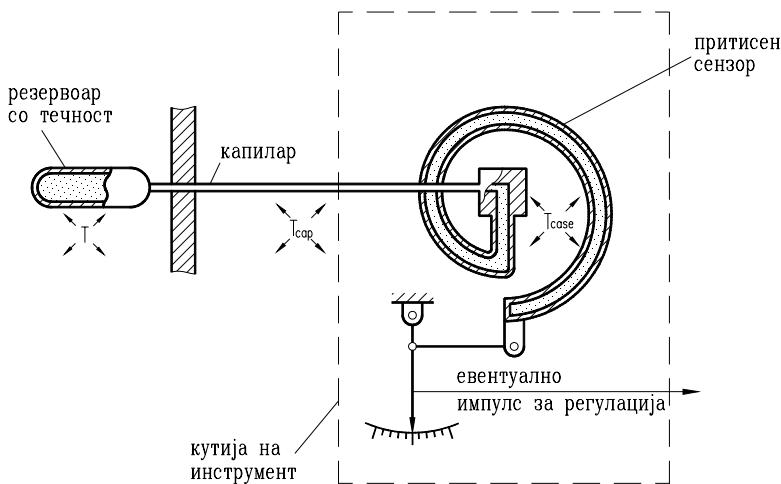
ε - коефициент на истегнување,

$\varepsilon = 1/6000$ за стаклен термометар со жива,

$\varepsilon = 1/600$ за стаклен термометар со пентан и алкохол.

7.3.2 Притисни термометри

Притисниот термометар во основа се состои од осетливо резервоарче како сензор, капиларна цевка за спојување и еластичен претворач за мерење на притисок, како што е Бурдоновата цевна пружина и слично (види сл. 7.6).



Сл. 7.6 Шема на притисен термометар

Кога системот е потполно исполнет со термометарска течност (жива, на пример) под определен иницијален притисок, компресибил-

носта на течноста е доволно мала во однос на релативната промена на притисокот ($\Delta V/\Delta p$), така што промената на температурата директно зависи од промената на волуменот на течноста. За гасни или парни системи важи обратното, па основниот ефект е промената на притисокот при константен волумен. На тој начин, спречената експанзија на термометарскиот флуид резултира во промена на притисокот, којашто се регистрира со соодветниот еластичен притисен сензор, така што ваквите термометри го добиле називот притисни термометри.

Притисните термометри се изведуваат во различни конструкции, а поради својата едноставност, робустност и погонска сигурност нашле широка примена во индустриската, а се применуваат и во системите за автоматска регулација. Должината на капиларната цевка се приспособува према монтажните услови, што овозможува далечинско мерење на температурата; но притоа, потребно е да се внимава на потребата од температурна компензација (заради промената на температурата долж капиларната цевка). Температурната компензација се остварува со посебна конструкција на притисниот термометар, што содржи помошен притисен сензор.

Во оваа класа на термометри спаѓа и притисниот термометар со пареа од манометарска течност (мано-термометар). Кај него течноста само делумно го исполнува резервоарчето, така што со промена на температурата над точката на вриење на термометарската течност се менува и притисокот на создадената пареа, кој се регистрира со соодветниот еластичен притисен претворач. Во овој случај не е потребна температурна компензација, бидејќи притисокот зависи од температурата при слободната површина на течноста во резервоарчето.

Во зависност од термометарскиот флуид, се покриваат мерења на различни температурни дијапазони: за жива, $-35^{\circ}\text{C} < t < +350^{\circ}\text{C}$; за толуол, $-30^{\circ}\text{C} < t < +350^{\circ}\text{C}$ и т.н. За мерење на ниски температури, се скреќаваат притисни термометри со инертен гас како работен флуид. На пример, за азот $t_{min} = -147^{\circ}\text{C}$, за хелиум $t_{min} = -268^{\circ}\text{C}$.

Точноста на притисните термометри при најповолни услови е $\pm 0,5\%$ од мерната скала.

7.3.3 Термометри на принцип на термално ширење на метали

Ширењето на металниот сензор во една или друга насока, при промена на температурата, е основа на функционирањето на овие термометри. Најчесто во примена се биметалните температурни сензори.

Биметалниот елемент (сл. 7.7a) се состои од две ленти од метали А и В со различни коефициенти на термално ширење, најчесто $\alpha_A > \alpha_B$. Лентите се цврсто споени меѓу себе (најчесто со валање) и, при определена температура T_1 , биметалниот елемент има соодветна недеформирана состојба. Промената на температурата од T_1 на T_2 предизвикува диференцијално ширење на лентите, а елементот ќе се свие навнатре за $T_2 > T_1$, односно во спротивна насока за $T_2 < T_1$ (види сл. 7.7a). Радиусот на закривеност ρ , во овој случај може да се изрази како:

$$\rho = \frac{t \left[3(1+m)^2 + (1+mn) \left(m^2 + \frac{1}{mn} \right) \right]}{6(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2} \quad (7-14)$$

каде што се:

t - вкупна дебелина на биметалниот елемент,
во практика $t = 0,01 \div 3$ mm;

$n = E_B/E_A$ - однос на модулите на еластичност на соодветните метали;

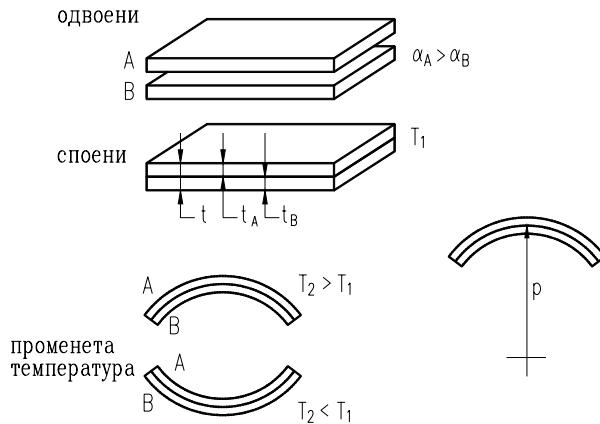
$m = t_B/t_A$ - однос на дебелините на лентите А и В;

$T_2 - T_1 = \Delta T$ - пораст на температурата.

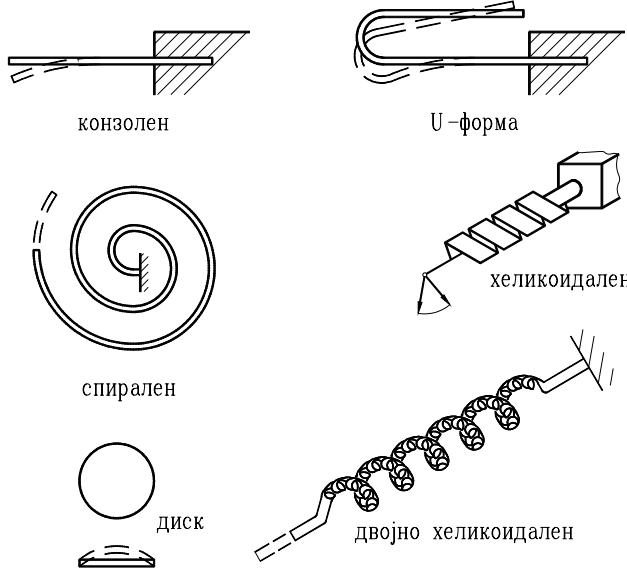
Во најголем број на случаи, се користат биметални ленти со однос на дебелини $t_B/t_A \approx 1$ и однос на модули на еластичност $E_B/E_A + E_A/E_B \approx 2$, при што радијусот на закривеност се изразува со доволна точност преку изразот:

$$\rho = \frac{2t}{3(\alpha_A - \alpha_B)\Delta T} \quad (7-15)$$

Комбинацијата на равенката (7-15) со соодветните врски од јакост на материјалите овозможува пресметка на свивањата на различни видови биметални елементи.



a)



б)

Сл. 7.7 Биметални сензори

За што е можно поточни резултати, потребна е примена на експериментално определени фактори, дефинирани од производителите на биметални елементи.

Биметалните термометри се користат за температурни мерења, а исто така и како комбинирани сензорски и контролни елементи (термосвати) во системите за контрола на температурата. Многу честа е нивната примена и како прекинувачи во разни електрични апарати и системи. Притоа, колку е биметалната лента по долга, толку е и поголемо биметалното свивање. Од овие причини, широк дојапазон на конфигурации се развиени за да одговорат на барањата на примената (види сл. 7.7б). Во зависност од примената, биметалниот сензор се вградува во соодветна сонда на температурниот мерен уред, аналогно како и електричните отпорни давачи. Притоа, лентата В најчесто е од легура на никел и челик, со многу мал коефициент на експанзија $\alpha \approx 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}/(\text{cm}^0\text{C})$, а лентата А од бакарни легури со голем коефициент α , во зависност од бараните карактеристики.

Работното подрачје е обично од -70 до $+600^0\text{C}$, а грешката кај висококвалитетните биметални термометри е од 0,5 до 1% од целата мерна скала.

7.4 ЕЛЕКТРИЧНИ ОТПОРНИ ТЕРМОМЕТРИ

Електричниот отпор на различни материјали се менува со промена на температурата, што ја дава основата на електричните отпорни температурни сензори. Материјалите, што воглавно, се користат можат да се поделат на две основни класи: а) проводници (метали) и б) полупроводници.

Проводничките сензори се појавиле како први и традиционално се именуваат како отпорни термометри, додека сензорите од типот на полупроводници се јавуваат релативно во поново време и воглавно носат општи назив термистори.

Ќој и да било од постојните методи за мерење на електричен отпор може да се примени за определување на отпорот на сензорот (а со тоа и соодветната температура). Најчесто во примена се различни конфигурации на Витстоновиот мерен мост.

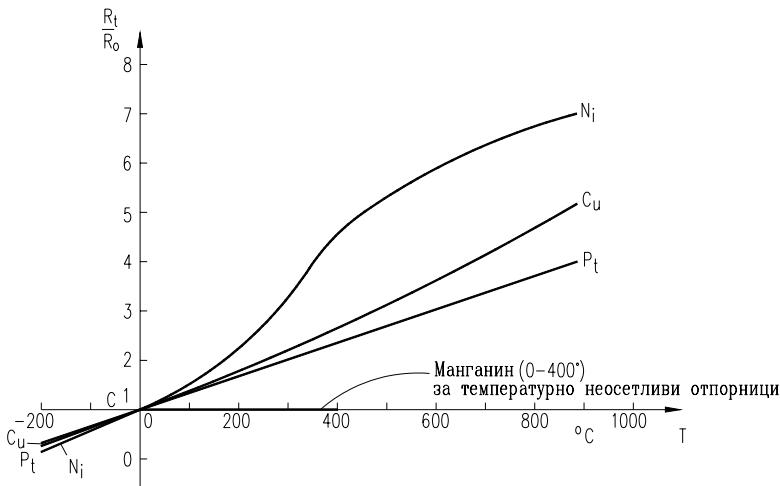
7.4.1 Проводнички сензори (отпорни термометри)

Промената на отпорот R_t со температурата T за повеќето метални материјали може да се претстави преку полиномска зависност:

$$R_t = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n) \quad (7-16)$$

каде што R_0 претставува отпор при температура $T = 0^{\circ}\text{C}$.

На сл. 7.8 се дадени дијаграми на промената на R_t/R_0 во зависност од T , за сензори од најчесто употребувани метали (платина, никел и бакар). Покрај наведените метали, како сензорски метали се употребуваат, исто така, волфрам (тунгстен) и легури никел/железо.



Сл. 7.8 Зависност на електричен отпор од температура

Како што се гледа од прикажаните дијаграми, најчесто употребуваните метали имаат позитивен температурски коефициент, односно со порастот на температурата се зголемува и отпорот. Исто така, за определени подрачја на промена на T , со доволна точност може да се користи линеарна зависност:

$$\frac{R_t}{R_0} = 1 + \alpha T \quad (7-16a)$$

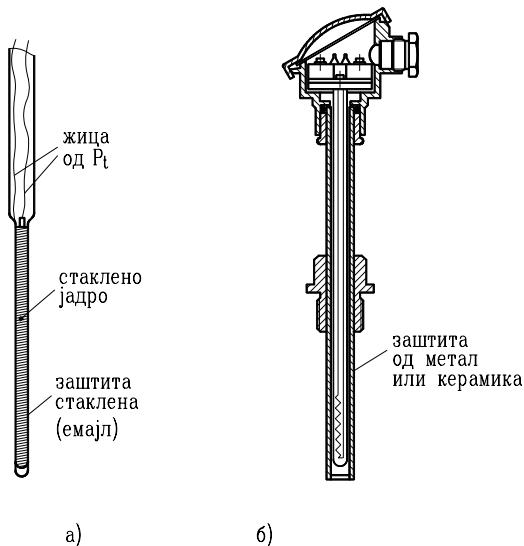
При тоа, коефициентот α има различни вредности за разни метали и соодветни подрачја на промена на температурата.

Така, на пример, за сензори од платина, во зависност од температурното подрачје (-200 до -70°C ; -70 до 150°C ; 150 до 250°C ; 250 до 800°C), коефициентот α може да се земе во гранците помеѓу 0,00385 и 0,003925 $1/\text{ }^{\circ}\text{C}$. За номинален отпор $R_0 = 100 \Omega$ при 0°C , во табелата 7.2 се дадени отпорите при соодветни температури за електрични отпорни сензори од најчесто применувани метали.

Сензорите кај овие термометри, во зависност од намената, се изведуваат во различни форми. За мерење на температури во флуиди, како сензор се користи танка жица од соодветен метал (Pt или Ni) намотана околу јадро од тврдо стакло или глимер (види сл. 7.9a). Сензорите од отворен тип ја изложуваат отпорната намотка директно во флуидот (кој мора да биде некорозивен) и обезбедуваат побрз одговор на промената на температурата. Меѓутоа, најчесто, детекторот се заштитува со истопено стакло, емајл или керамичка маса, во зависност од намената. Многу често вака изведените детектор се поставува во посебна заштитна метална или керамичка цевка (сл. 7.9б). Номиналниот отпор на ваквиот сензор при температура од 0°C или 20°C обично изнесува $R_0 = 100 \Omega$. Платинските отпорни термометри се применуваат нормално во температурно подрачје од -200 до 550°C (специјална изведба до 1100°C), од никел -150 до 300°C , а од бакар -200 до 120°C .

Табела 7.2

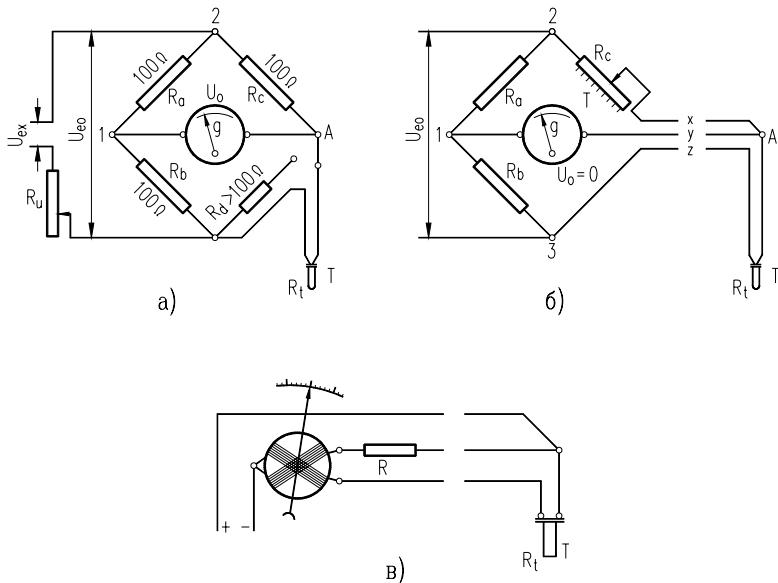
Отпори на проводнички сензори			
$t ({}^{\circ}\text{C})$	$R_t (\Omega)$		
	Pt	Ni	Cu
-200	18,5		11,7
-100	60,2		55,7
0	100,0	100	100,0
100	138,5	167	143,1
200	175,9	253	186,2
300	212,1		
400	247,1		
500	280,9		
600	313,4		



Сл. 7.9 Типични електрични отпорни сонди

За мерење на површински температури на цврсти тела се применуваат сензори со мрежа од рамна намотка, или танок филм од платина (аналогно на концептот на мерни ленти, види глава 8.).

За мерење на промената на отпорот, односно температурата, најчесто се користат соодветни електрични мерни мостови, како што е Витстоновиот мост (види сл. 7.10а и сл. 7.10б), или преку т.н. инструмент со вкрстени калеми (сл. 7.10в).



Сл. 7.10 Мерни кола за електрично-отпорни термометри

Во конфигурацијата на сл. 7.10a покажувач на температурата претставува галванометарот кој го мери напонот на грешка на мерниот мост U_o , односно може да биде избаждарен за директно отчитување на температурата T . Во една од гранките на мерниот мост е приклучена сондата на електричниот отпорен термометар R_t , а во останатите три гранки температурски неосетливи отпорници R_a , R_b и R_c (најчесто со ист отпор од 100Ω). Отпорникот R_d служи за контрола на инструментот, односно нултиот напон на грешка, со споредување на сондата при номинална температура (0°C или 20°C). При номинална температура, мерниот мост е во рамнотежа, а напонот на грешка е $U_o = 0$. Со промена на температурата од T_0 на T (отпорот од R_{t0} на R) настапува дебаланс на мостот, односно:

$$U_o \neq 0 \quad \text{т.е.} \quad R_a R_t \neq R_b R_c .$$

На тој начин, постои директна зависност $R_t = R_t (U_o)$, односно со мерење на U_o е определена и температурата T .

На сл. 7.10б е прикажана мерна шема којашто се базира на т.н. нулти метод. Во овој случај, со отпорникот R_c се регулира рамнотежата на мерниот мост, односно се обезбедува, без разлика на промената на температурата T (отпорот R_t), напонот на грешка да биде $U_o = 0$. На тој начин, постои директна зависност на отпорот R_c од промената на температурата T , $R_c = R_c(T)$, односно отпорникот R_c може да биде избаждарен директно да ја покажува T .

Наместо Витстоновиот мерен мост, мерењето на температура со отпорен термометар може да се изведе и со инструментот со вкрстени калеми (сл. 7.10в). Ваквиот инструмент го покажува односот на струите во двете вкрстени намотки, при определена температура T (односно отпор R_t), без обзир на напонот на напојување. Отпорникот R е термално неосетлив, така што промената на температурата T , односно отпорот на сензорот на отпорниот термометар R_t , директно ја нарушува рамнотежата на задвижувачките моменти на двета калема, кои, во зависност од температурата, завземаат нова положба.

7.4.2 Полупроводнички сензори (термистори)

Во последните дваесет години, широка употреба за температурни мерења нашле сензорите од електрични полупроводници, кои добиле општ назив термистори. Тие се изработуваат од тврди полукристали на определен полупроводник; најчесто оксиди на манган, никел и кобалт, измелени и помешани во соодветни пропорции со некое врзивно средство и пресувани и синтерувани во потребниот облик (види сл. 7.12).

Најголем број од термисторите што се во употреба имаат негативен температурски коефициент (NTC), односно со зголемување на температурата се смалува електричниот отпор, за разлика од проводничките сензори кои имаат позитивен температурски коефициент(PTC). Притоа, зависноста $R_t = R_t(T)$ покажува значителна нелинеарност во споредба со отпорните сензори (види сл. 7.11). Температурната зависност на отпорот на термисторот општо е дадена во облик:

$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (7-17)$$

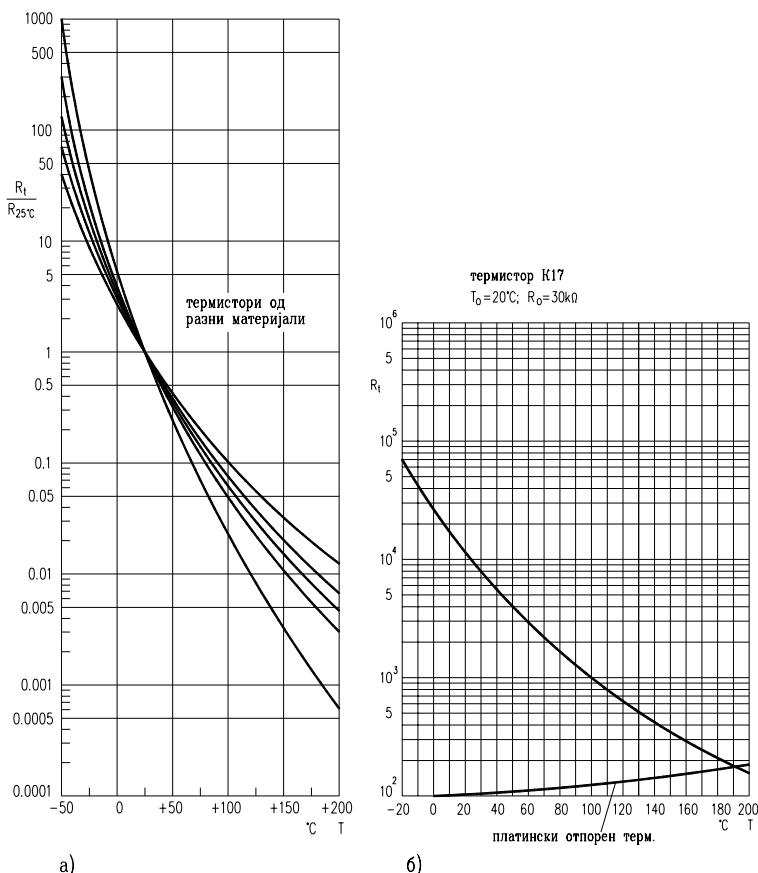
каде што се:

R_t во Ω - отпор на сензорот при температура T во K;

R_0 - отпор при номинална температура T_0
(најчесто при $T_0 = 20$ до 25°C);

β во К - константа карактеристична за термисторскиот материјал, $1500 \text{ K} \leq \beta \leq 7200 \text{ K}$.

На сл. 7.11 а се прикажани општите облици на криви на зависност $R_t = R_t(T)$ за различни материјали на термисторски сензори односно за различен коефициент β ; точната зависност секако дека зависи од видот на материјалот и обликот на сензорот.



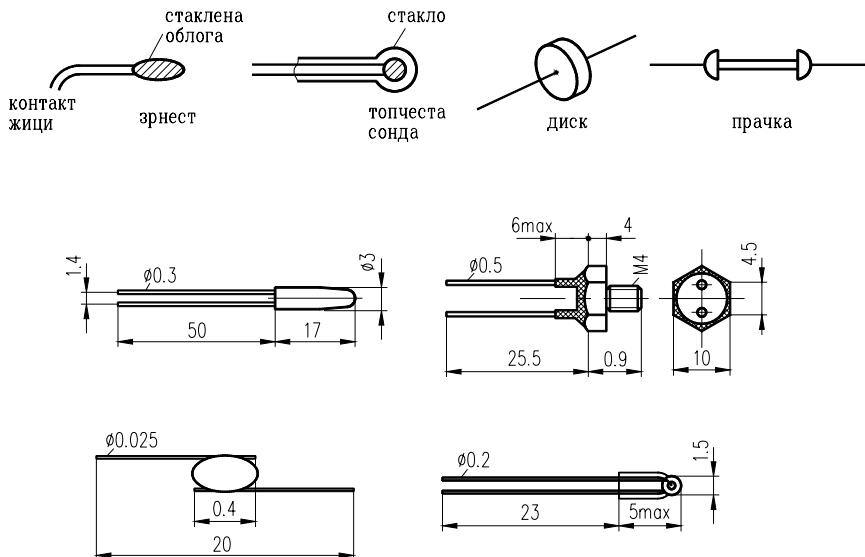
Сл. 7.11 Просечни карактеристики на термистори

Како што се гледа од сл. 7.11б, на која за споредба, е прикажана промената на отпорот во зависност од температурата за конкретен

термистор (K17 со $R_0 = 30 \text{ k}\Omega$ при $T_0 = 20^\circ\text{C}$) и отпорен сензор од платина, релативните промени на отпорот (R/R_0) се значително поголеми кај термисторот (со NTC). Ова претставува и основна предност на термисторските сензори, односно тие имаат многу голема брзина на реагирање и при мали промени на температурата. Од овие причини термисторите нашле широка примена во мерната техника и системите за автоматско управување. Всеки се применуваат за температурски дијапазон од -100 до 350°C , а со посебна изведба, и до 1000°C .

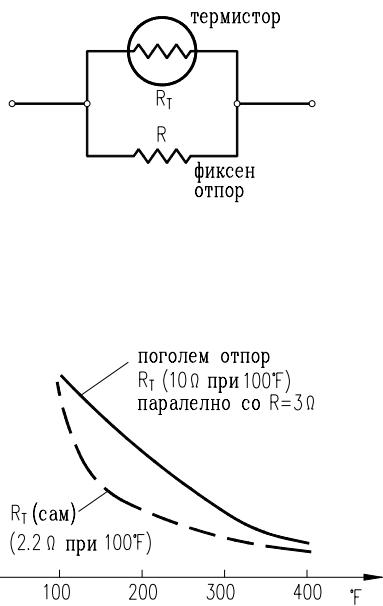
Во зависност од намената, термисторските сензори се изработуваат во различни форми (види сл. 7.12). За мерење на температура во флуиди најчесто се користат термистори во облик на капка и топче, додека формите на диск и прачка се вообичаени како температурни компензациони елементи и во системите за автоматска контрола и управување. Се изработуваат со многу мали димензии, што обезбедува многу мало нарушување на струјното поле. Сензорот најчесто има посебна стаклена заштита, односно се обложува со стакло.

Како недостатоци на термисторите можат да се наведат: нелинеарноста на карактеристиката, нееднаквост на карактеристиката за два термистора од ист тип, релативно ниската максимална температура.



Сл. 7.12 Форми на термисторски сензори

Мерните кола за примена на различни типови термисторски сензори за мерење на температура, за контрола и разрешување на компензациони проблеми, во основа се исти како кај отпорните термометри (види сл. 7.10). Поголемата нелинеарност на карактеристиката на термисторските сензори често пати може да создаде проблеми при мерење на температури во пошироки дијапазони. Меѓутоа, со посебна електронска линеаризација во самото мерно коло, се настојува овој недостаток да се сведе на минимум. Една од техниките за редуцирање на нелинеарноста е со помош на обичен отпорник со фиксна отпорност, како што е прикажано на сл. 7.13.



Сл. 7.13 Линеаризација на термистор

Потребно е да се напомене дека стабилноста (промената на карактеристиката отпор/температура со времето) на полупроводничките сензори е послаба во однос на проводничките, особено во споредба со платинските отпорни термометри. Меѓутоа, модерните термисторски давачи имаат прилично прифатлива стабилност за голем број на примени, што се постигнува со посебни технологии на стареене на

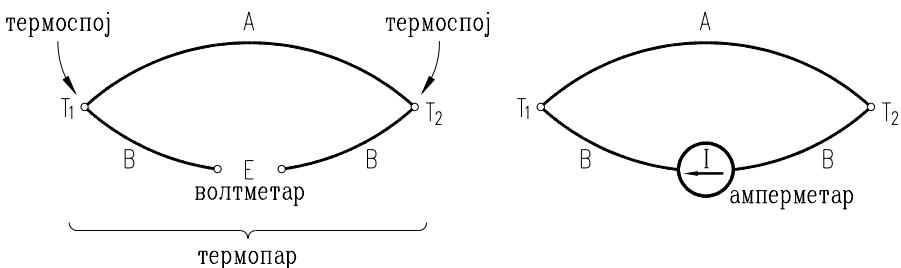
термисторите и постојано усовршување на конструкциите на сензорите и мерните сонди, нивната заштита и производната технологија.

Точните податоци за различни видови термисторски сензори, нивните баждарни карактеристики, како и можностите за нивна примена со различни конфигурации на мерни кола, ги обезбедуваат нивните производители и испорачатели.

7.5 ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИ СЕНЗОРИ (ТЕРМОПАРОВИ)

Една од најчесто применуваните методи за електрични мерења на температурата е со т.н. термоелектрични сензори или, едноставно, термопарови. Овој метод нашол широка примена како во индустриските, така и во истражувачките температурни мерења, поради големата прецизност, едноставност и ниската цена на чинење.

Еден ваков основен „термопар“ се состои од два проводника од различни метали А и В, коишто се споени во точките 1 и 2 (види сл. 7.14). Уште во 1821, Сибек (Seebeck) покажал дека во такво коло се создава електрична струја, ако спојните точки се наоѓаат на различни температури T_1 и T_2 (познат како Сибеков ефект).

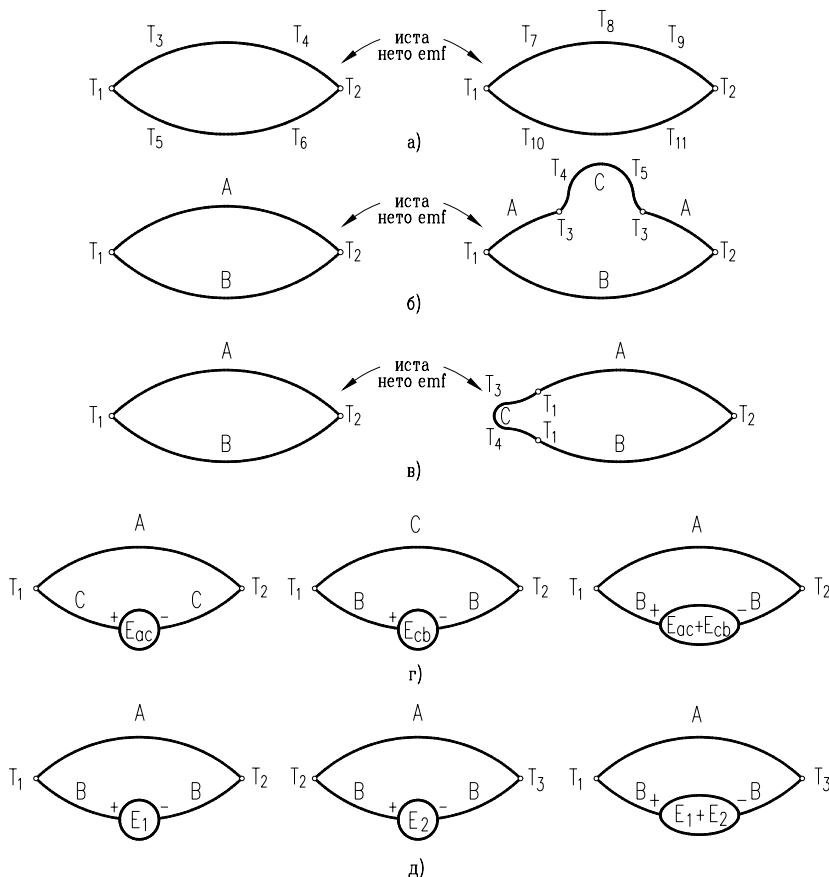


Сл. 7.14 Основен термопар

Во термоелектротехниката дефинирани се следниве закони за термопаровите, за кои илustrација на соодветните електрични кола е прикажана на сл. 7.15:

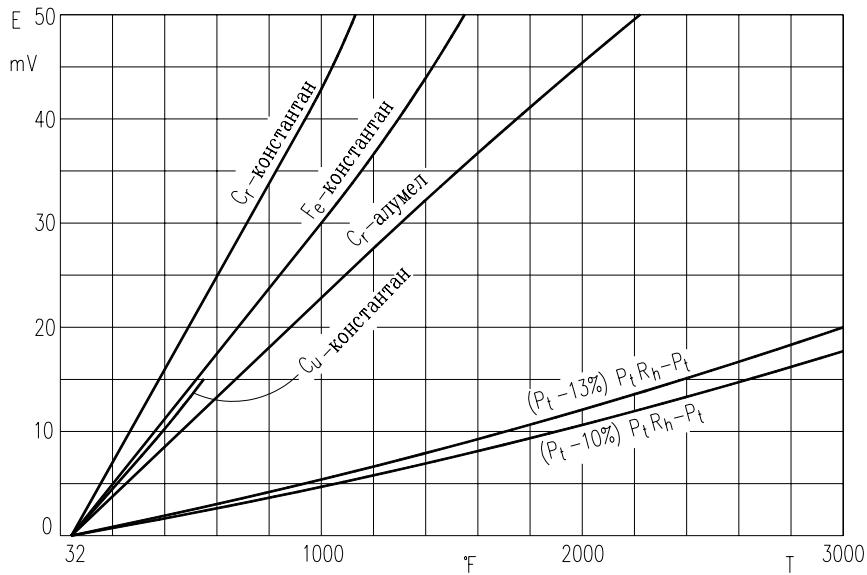
1. термалната електромоторна сила (emf) на термопар со споеви при температури T_1 и T_2 останува непроменета при каква и да било промена на температурата на други места на колото, доколку секој од двата користени метала A и B е хомоген (сл. 7.15a);
2. ако трет хомоген метал C се вметне во A или B (сл. 7.15б), нето emf не се менува сè додека новите термоспоеви на C се при иста температура T_3 , без разлика на температурата вон споевите;
3. ако металот C е вметнат помеѓу A и B при еден од споевите, температурата на C во која и да било точка вон споевите AC и BC е без влијание. Односно, сè додека двата термоспоја AC и BC се при иста температура T_1 , нето emf ќе биде иста како и без постоењето на C (сл. 7.15в);
4. ако термалната електромоторна сила на металите A и C е E_{AC} , а emf на B и C е E_{CB} , термалната emf на A и B ќе биде ($E_{AC} + E_{CB}$) (сл. 7.15г);
5. ако термопарот произведува emf E_1 кога споевите се при температури T_1 и T_2 , а E_2 при T_2 и T_3 , истиот ќе произведе електромоторна сила ($E_1 + E_2$) кога термоспоевите се при температури T_1 и T_3 (сл. 7.15д).

Овие закони се од голема важност во практичната примена на термопаровите. Првиот закон кажува дека жиците кои ги спојуваат двата термоспоја можат да бидат слободно изложени на непозната и/или променлива температура на околината без какви и да било влијание на произведениот напон. Законите 2. и 3. овозможуваат вградување на инструмент кој ќе ја мери вистинската emf; односно, металот C го претставува внатрешното електрично коло (обично од бакар) помеѓу контактите на волтметарот или потенциометарот. Четвртиот закон покажува дека сите можни парови на метали нема потреба да се калибрираат, бидејќи секој посебен метал може да биде во пар со некој стандарден (платина најчесто) и калибриран притоа. На тој начин, која и да било комбинација може да се оствари без потреба од калибрација.



Сл. 7.15 Илустрација на законите за термојарови

При разгледувањето на петтиот закон се констатира дека, при примената на определен термопар за мерење на непозната температура T , температурата на еден од трермоспоевите $T_2 = T_0$ (наречен референтен спој) мора да биде позната со некој независен начин. На тој начин, мерењето на волтажата овозможува определување на температурата на другиот (мерен) спој $T_1 = T$, преку соодветни калибрациони табели или дијаграми. На сл. 7.16 и во табелата 7.3 се дадени податоци за напоните на emf за различни температури на мерниот спој T , за случаи кога референтниот спој е при температура $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$, за најчесто применувани термопарови.



Сл. 7.16 Зависноста на температура/напон кај термопарови

Табела 7.3

Основни податоци за напони на етф на термопарови (референтна $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$)				
Термопар	Cu-Konst	Fe-Konst	NiCr-Ni	PtRh-Pt
+ пол - пол	бакар – константан	железо – константан	никелхром – никел	платинродиум – платина
Мерна темп. $^{\circ}\text{C}$		Терм. напон во мВ		
- 200	- 5,70	- 8,15		
- 100	- 3,40	- 4,60		
0	0	0	0	0
100	4,25	5,37	4,04	0,64
200	9,20	10,95	8,14	1,44
300	14,89	16,55	12,24	2,32

Табела 7.3 (продолжение)

°C	Cu-Konst	Fe-Konst	NiCr-Ni	PtRh-Pt
400	20,99	22,15	16,38	3,26
500	27,40	27,84	20,64	4,22
600	34,30	33,66	24,94	5,23
700		39,72	29,15	6,27
800		46,23	33,27	7,34
900		53,15	37,32	8,45
1000			41,32	9,60
1100			45,22	10,77
1200			49,02	11,97
1300				13,17
1400				14,38
1500				15,58
1600				16,76

Константан е легура од 46% Cu и 54% Ni .

Основните закони за термопаровите даваат можности за формирање на различни конфигурации и овозможуваат широк дијапазон на температурни мерења. Термоелектричните сензори се применуваат во-главно за мерење на температури до 1600 °C, при што за различни температурни подрачја постојат различни термопарови. Во табелата 7.3 се дадени податоци за термопарови кои најчесто се применуваат. Во табелата, со хоризонтална линија, е означена границата до која е дозволена трајна примена на соодветниот термопар за мерење на температура во воздух. За многу високи температури (до 2600 °C), кога не е можна примена на друг метод, може да се употреби термопар од молибден - волфрам.

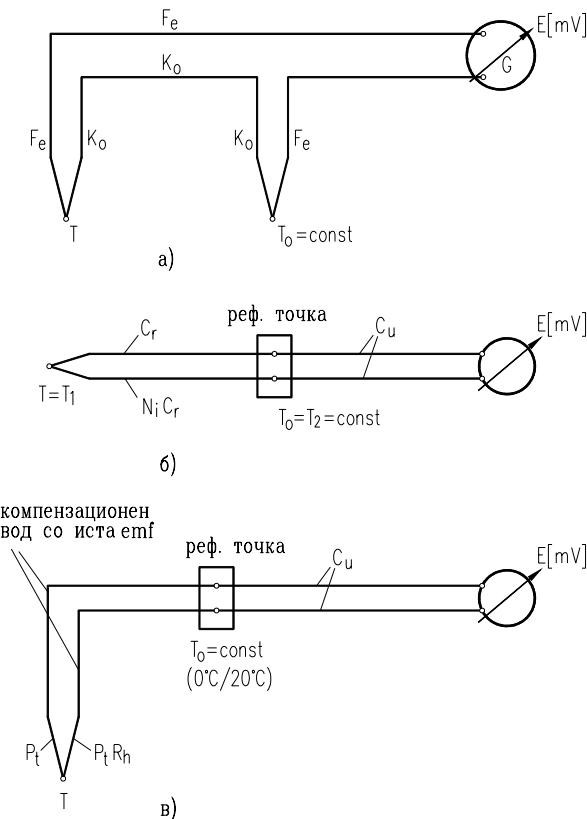
Интерполацијата на податоците за напонот на електромоторната сила во mV може да се изведе според параболична зависност:

$$E = a + bT + cT^2 \quad (7-18)$$

Притоа, константите a , b и c се определуваат посебно за секој вид термопар. И покрај тоа што производителите ги гарантираат податоците

добиени врз основа на баждарење, се препорачува калибрирање на термопаровите пред нивната употреба, со цел да се добие точната зависност $T = T(E)$, бидејќи емф во голема мера зависи од чистотата на легурите, појавата на корозија (особено за термопар со Fe) изведувањето на споевите и слично. Во зависност од примената, многу често е потребна посебна заштита на термопарот, којашто се остварува со негово поставување во посебна заштитна сонда, слично како електричните отпорни термометри.

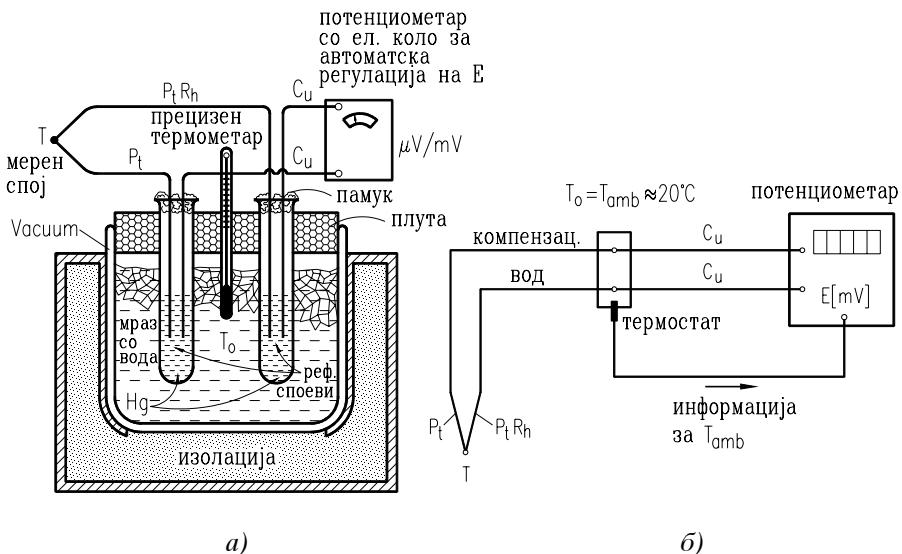
Покажувачките инструменти (волтметар или потенциометар) наједноставно е да се вклучат директно во електричното коло на термопарот, како што е прикажано на сл. 7.17.



Сл. 7.17 Можни мерни кола на термопарови

Мерното коло под а) се применува за покуси растојанија на инструментот од мерното место и за термопарови кои не се скапи. Инструментот ја мери emf во mV, која одговара на разликата на температури $T - T_0$. Како температура T_0 на референтниот спој („ладно место“) се зема температурата на некој константен топлотен извор, како што е мразот ($T_0 = 0^{\circ}\text{C}$), или термостат кој е регулациона компонента за константна температура ($T_0 = 20^{\circ}\text{C}$, на пример). За поголеми растојанија или скап термопар се применуваат мерни кола како на сл. 7.17б и сл. 7.17в, при што како компензационен вод се користи кабел кој има иста emf (види закони за термопарови 2. и 3.).

За многу прецизна работа, референтниот спој треба да се постави во посебен апарат во кој се одржува константна температура на ладниот спој од $T_0 = 0,01 \pm 0,0005^{\circ}\text{C}$. Меѓутоа, ваквата точност многу ретко е потребна, па затоа со доволна точност најчесто се користи „када“ со мраз (види сл. 7.18а), која, доколку е внимателно изведена, обезбедува температура на ладниот спој од $T_0 = 0,001^{\circ}\text{C}$.



Сл. 7.18 Референтен спој со „када“ со мраз а) и корекција на нешто мерниот напон б)

Во некои случаи референтниот спој е дозволено да се изведе при амбиентна температура ($T_0 = T_{amb}$). Податокот за амбиентната температура потоа овозможува корекција на нето мерениот напон, којашто се обавува во посебен инструмент (потенциометар) изведен за специфичниот тип на термопар. Во овој случај податокот за амбиентната температура се добива од биметален елемент или осетлив отпорен термо-метар (види сл. 7.18б и сл. 7.17а), кој е поврзан со соодветно електрично коло, изведено во инструментот за покажување, во кое се врши компензација на emf, така што напонот покажуван од инструментот е ист како референтниот спој да е при 0°C , што овозможува директно отчитување на температурата при мерниот спој T . Производителите на термоелектричните сензори препорачуваат соодветни комбинации на мерни кола за различни случаи на примена на термопаровите. Податоците за напоните на emf за различни температури, добиени со баждарење од производителот, најчесто се даваат за $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ и $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$.

7.6 ИНСТРУМЕНТИ ЗА ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ – ПИРОМЕТРИ

Сите претходно прикажани методи за мерења на температура се базираат на физичкиот контакт на мерниот давач со телото/медиумот чијашто температура е потребно да се измери. На тој начин, во најголем број од проучените начини, температурскиот сензор е предодреден да ја претпоставува истата температура како и медиумот, односно телото. Ова значи дека термометарот треба да биде способен да ја издржи соодветната температура, што во случаи на многу високи температури е тешко остварливо и може да предизвика топење на сензорот, како и други дополнителни проблеми.

За да се разрешат овие проблеми, за мерење на високи температури (над 1000°C) се применуваат инструменти кои се базираат на регистрирање на зрачењето од топлинскиот извор чијашто температура е потребно да се определи. Овие инструменти, во зависност од нивниот принцип на функционирање, обично се нарекуваат радиациони пирометри, радиациони термометри, оптички пирометри и т.н. Основна предност над претходно проучените термометри е во тоа што детекторот не мора да биде поставен во просторот чијашто температура се определува.

Според основите во термодинамиката, секое зрачење може да се дефинира преку енергијата на зрачење и брановата должина.

Според Планковиот закон (Planck), односно Веновата равенка (Wien), енергијата на зрачење на некое црно тело E_λ (во W/m^3) се изразува како зависност од брановата должина на зрачењето λ и неговата апсолутна температура T :

$$E_\lambda = a \lambda^{-5} e^{-\frac{b}{\lambda T}} \quad (7-19)$$

каде што a и b се соодветни константи, при што равенката (7-19) важи до $3500 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Од изразот (7-19) јасно се согледува можноста за индиректно мерење на температурата, преку определување на интензитетот на светлосното зрачење, односно зрачењето на топлина.

Во основа, можат да се разликуваат два основни типа на пиromетри: **оптички пирометар**, во кој за мерење на температурата се користи видливото зрачење, што одговара на бранови должини на светлосен спектар од $0,4$ до $0,8 \text{ } \mu\text{m}$, и **радиационен пирометар**, кој го опфаќа целиот спектар на светлина (од инфрацрвени до ултравиолетови зраци). Во првиот случај се користи светлосната енергија при определувањето на температурата, додека во вториот топлината.

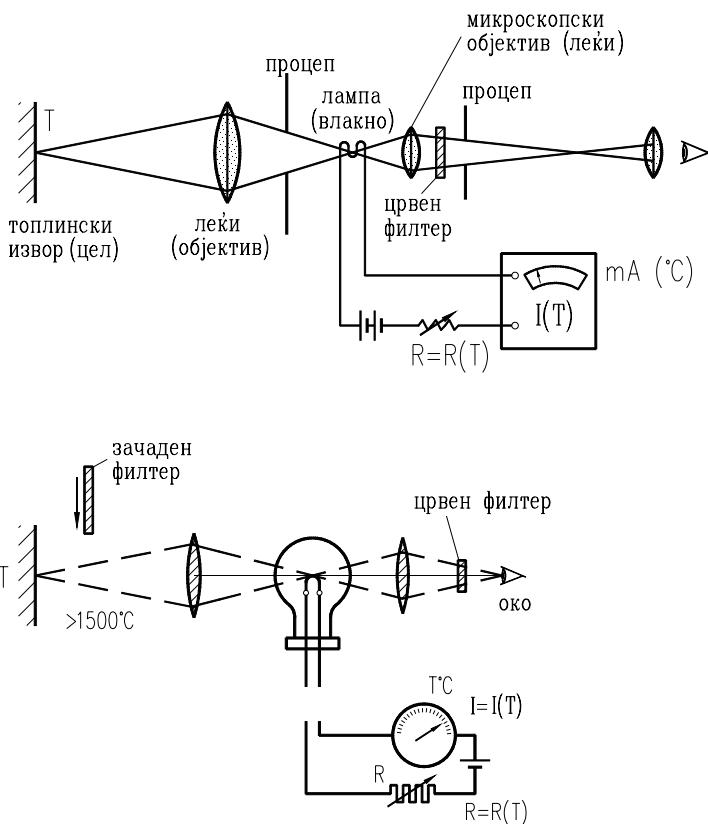
7.6.1 Оптички пирометар

Бидејќи кај оптичкиот пирометар се користи само тесно подрачје на светлинскиот спектар, коешто со дополнителен црвен филтер уште повеќе се стеснува на $\lambda = 0,65 \text{ } \mu\text{m}$, за него може да се рече дека е „единобоен“ (монохроматски). Во тој случај, според изразот (7-19), при зададена бранова должина λ , со определување на интензитетот на зрачењето (светлината во овој случај) се определува и температурата на топлинскиот извор.

Оптичкиот пирометар функционира на принцип на споредување на интензитетот на светлосното зрачење од топлинскиот извор со некој познат извор на светлина (на пример, претходно избаждарена стабилна волфрамска сијалица). На сл. 7.19 е прикажана шема на типичен оптички пирометар. Пирометарот се визира на површината чијашто температура треба да се определи, така што во оптиката на апаратот се гледаат сликата на светлината од топлинскиот извор и сликата на зажарената жичка на сијалицата. Притоа, јачината на светлината на сијалицата може да се регулира со отпорникот R . Двете светлосни слики се споредуваат, сè додека двата интензитета на светлина не бидат изедначени. На тој

начин, интензитетот на светлината, а со тоа и температурата можат да се отчитаат од положбата на отпорникот со променлив отпор. Односно, отпорникот R може да биде избаждарен за директно отчитување на T .

За мерење на температури над 1500°C се вградува уште еден дополнителен зачаден филтер (види сл. 7.19).



Сл. 7.19 Шема на оптички пирометар

Очигледно е дека точноста на отчитување кај оптичкиот пирометар има субјективна природа, односно зависи од точноста со која истражувачот го врши споредувањето на интензитетот на светлосното зрачење, за разлика од радиациониот пирометар, кај кој определувањето на температурата е објективно, врз основа на преносот на топлината од зрачењето на посебен температурски сензор во инструментот.

7.6.2 Радиационен пиromетар

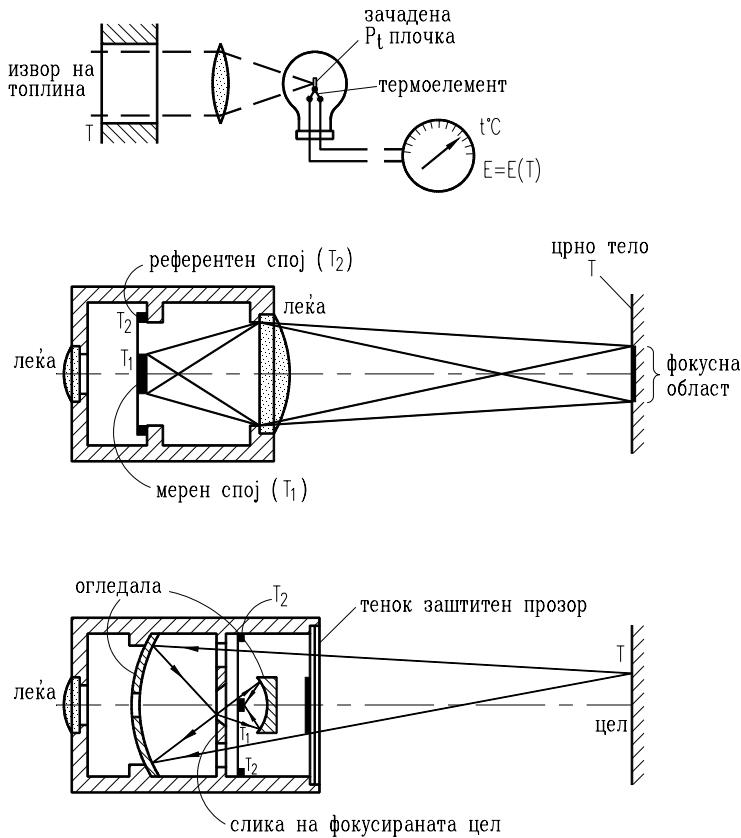
Со радиациониот пиromетар е опфатен целиот спектар на светлосно зрачење. На сл. 7.20 е даден шематски приказ на ваквиот пирометар, при кој се користи термопар со зачадена платинска плочка како детектор. Зрачењето од топлинскиот извор, чијашто температура T е потребно да се определи, се фокусира со помош на леки (или огледала) на зачадената платинска плочка, а температурата на нејзиното загревање T_1 се мери со помош на термопарот чиј топол спој е заварен за плочката. Со отчитување од скалата на галванометарот се определува директно оваа температура, односно со соодветно баждарење температурата T .

Во основа, за дадена температура на топлинскиот извор T , зрачењето (радиациониот топлински инпут) го загрева мерниот спој сè додека топлинските загуби (од кондукција, конвекција и радијација) не се избалансираат со топлинскиот инпут. Со користење на познатиот Стефан-Болцманов закон (Stefan-Boltzmann) од термодинамиката (изведен од Веновата равенка), може по теоретски пат да се определи температурската скала на пиromетарот. Меѓутоа, ваквото определување на температурската скала е недоволно точно, заради загубите на зраци низ оптиката на инструментот, поради што е најдобро да се изведе директно баждарење на инструментот со помош на еталон.

Преку поедноставена анализа, според гореизложеното, со изедначување на топлинските загуби со влезната радиациона топлина се добива зависноста на температурите на термопарот и температурата на топлинскиот извор:

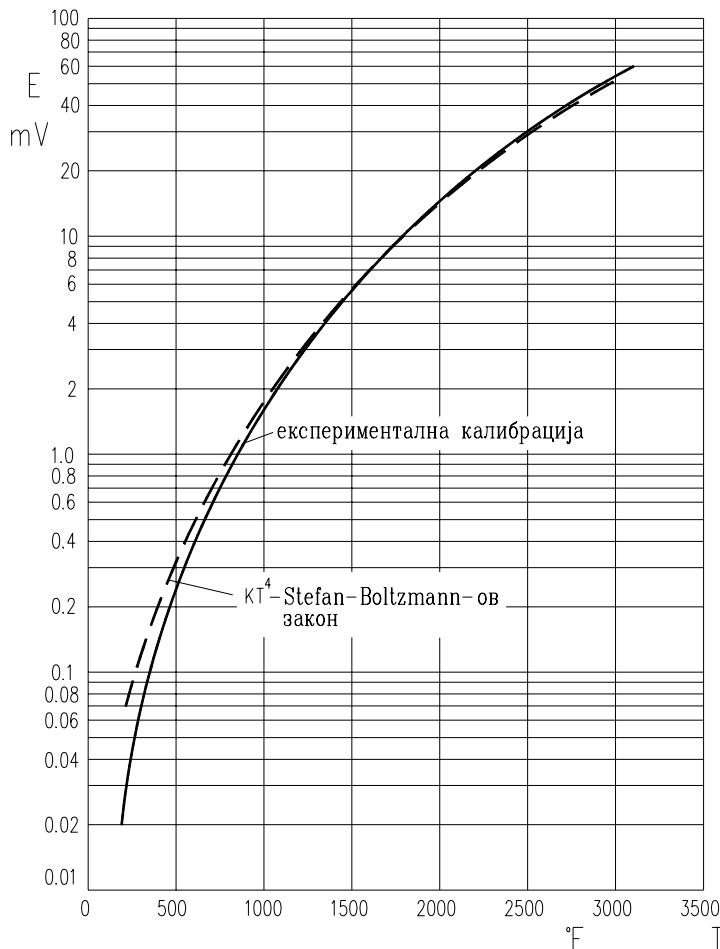
$$K_1 (T_1 - T_2) = K_2 T^4 \quad (7-20)$$

Според тоа, доколку напонот на термопарот е пропорционален со $(T_1 - T_2)$, излезниот напон ќе биде исто така пропорционален со T^4 .



Сл. 7.20 Шеми на радијациони пирометри

На сл. 7.21 е прикажана стварната калибрациона крива за еден радијационен пиromетар, заедно со идеалната зависност. За високи температури се согледуваат прилично добри совпаѓања. Притоа, температурите T_1 и T_2 се под влијание на температурата на околината, од кои причини вовгавно е потребно да се обезбеди соодветна температурна компензација, особено при мерење на ниски температури.



Сл. 7.21 Калибрациони криви за радијационен јиromетар

ГЛАВА О СМА

8. МЕРЕЊЕ НА ДВИЖЕЊЕ, СИЛА И МОЌНОСТ

8.1 ОПШТИ ПОИМИ ЗА МЕРЕЊЕ НА ДВИЖЕЊЕ

Голем број физички големини како што се притисокот, температурата, силата, и т.н., многу често се мерат со нивно претворање во движење, а потоа со мерење на резултирачкото движење. Типични примери на примена на сензори за мерење на одделни големини во струјната техника, кои се базираат на мерење на движење, можат да се согледаат од претходните поглавја. Исто така, за да се добие покомплексна презентација на струјнотехничките мерења во машинството, несомнено дека е потребно да се запознаат и основните методи за мерење на вртежниот момент и моќноста кај хидрауличните машини, за кои меѓу другото, во голем број случаи мерењето на движење (брзина, аголна брзина, поместување) претставува еден од основните параметри за нивно определување.

Како што е познато, движењето е директно зависно од двете фундаментални големини: должина и време (L, T), па со нивното соодветно мерење се определува големината која го карактеризира движењето што е предмет на истражувањето. Притоа, најчесто се применуваат електромеханички претворачи, кои ги преобразуваат големините на посмартаното движење во соодветни електрични, чијашто промена едноставно се регистрира со погодна електрична инструментација.

8.2 РЕЛАТИВНО ПОМЕСТУВАЊЕ, ТРАНСЛАЦИЈА И РОТАЦИЈА

Во струјнотехничките мерења најчесто се среќаваат случаи на примена на мерни инструменти, во кои мерењата на линеарна транслација на една точка во однос на друга и мерењата на рамнинска ротација околу оска на една линија во однос на друга играат важна улога. Ваквите мерења на поместувања во многу случаи претставуваат основа за разни видови на сензори за мерења на притисок, сила, температура итн. Во таа насока, овдека се покажани типични примери на инструменти за мерење на трансляторни и ротациони движења.

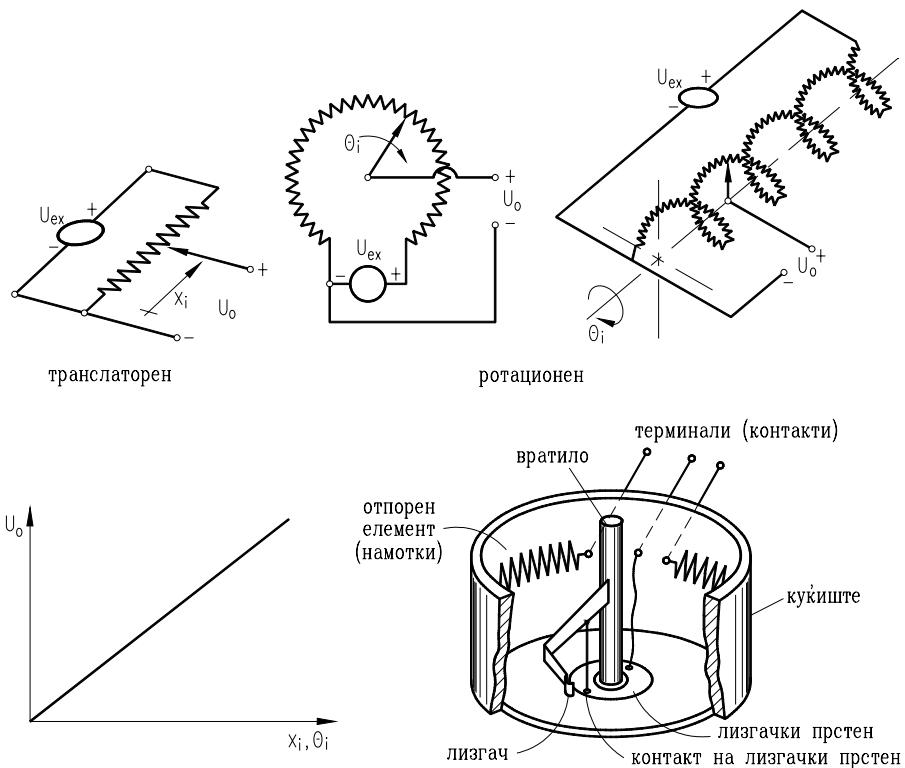
Во зависност од тоа која физичка големина се менува во претворачот, се среќаваат различни сензори за поместување: отпорни потенциометри, сензори со мерни ленти, диференцијални трансформатори, капацитативни давачи, синхрони и индукциони потенциометри, детектори со променлива индуктивност, пиезоелектрични сензори, електрооптички инструменти, сензори на принцип младник-плоча и др.

Во ова поглавје се дадени основните описи и принципи на некои од најчесто применуваните претворачи, без да се навлегува во детали, од причини што во овој случај истите се третирани како основа за сензорите и мерната инstrumentација што се користи во струјнотехничките мерења.

8.2.1 Отпорни потенциометри

Во основа, отпорниот потенциометар се состои од електричен отпорен елемент снабден со подвижен контакт. Движењето на контактот може да биде транслација, ротација, или комбинација на овие две (хеликоидално движење), со што се овозможува мерење на ротационите или трансляторните поместувања (види сл. 8.1).

Трансляторните уреди од овој тип обично имаат задвижување од 2 до 500 mm, а ротационите од околу 10^0 до 60 полни вртења. Отпорниот елемент се возбудува било со права (d-c) или со наизменична (a-c) струја. Излезниот напон U_o е функција од поместувањето x_i , односно со мерење на U_o се добива информација за x_i . На сл. 8.1 се прикажани шеми на типични примери на потенциометарски претворачи за поместување (движење). Отпорните елементи што се во општа употреба можат да бидат со жичани намотки, јагленов филм или проводлива пластика.



Сл. 8.1 Шеми на потенциометарски преобразувачи за измерување

Во вообичаеното мерно коло, во кое се приклучува потенциометарот, излезниот напон U_o претставува влез за мерниот инструмент или пишувачот (види сл. 8.2). Од анализата на ваквото реалистично мерно коло се добива односот на излезниот (U_o) и влезниот напон (U_{ex}) на потенциометарот како:

$$\frac{U_o}{U_{ex}} = \frac{1}{\frac{1}{(x_i/x_t)} + \frac{R_p}{R_m} \left(1 - \frac{x_i}{x_t}\right)} \quad (8-1)$$

каде што се:

R_p - отпор на потенциометарот,

R_m - отпор на инструментот,

x_t - вкупна расположива должина на потенциометарот,

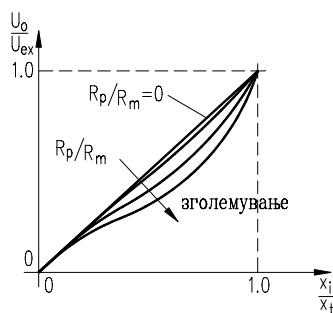
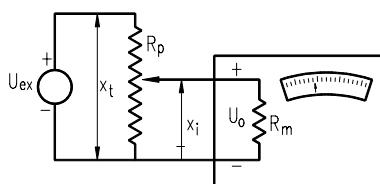
x_i - соодветно поместување (позиција на подвижниот контакт).

Од изразот (8-1) е очигледно дека за идеални услови, т.е. $R_p/R_m = 0$ за отворено мерно коло, се добива:

$$\frac{U_o}{U_{ex}} = \frac{x_i}{x_t} \quad (8-2)$$

а соодветната крива на зависност ќе биде права линија (види дијаграм на сл. 8.2).

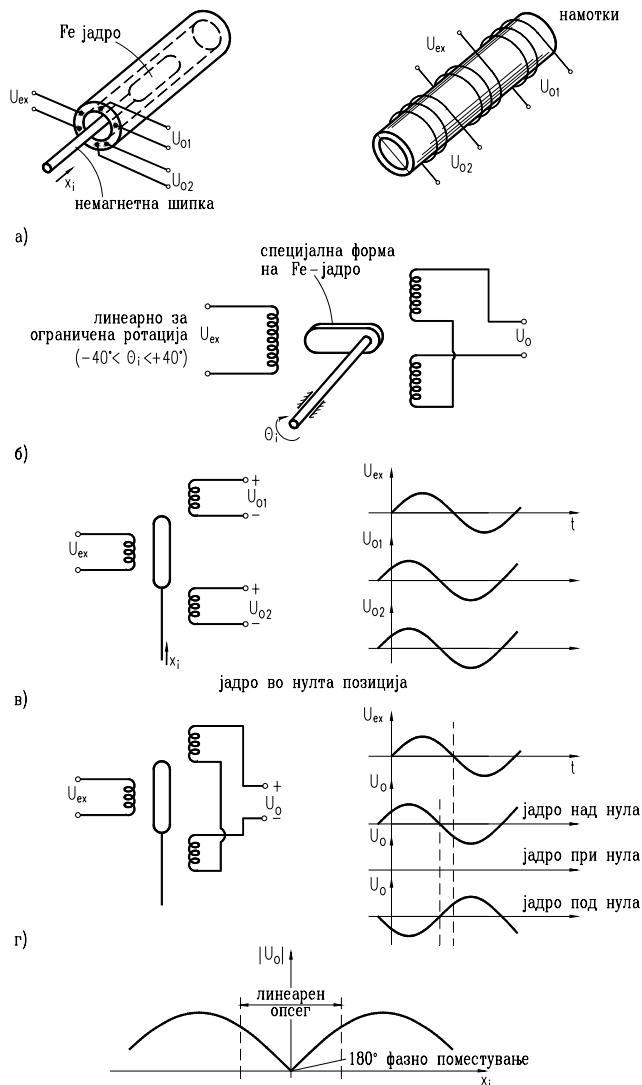
Во стварност, $R_m \neq \infty$ и изразот (8-1) покажува нелинеарна врска помеѓу U_o и x_i (види дијаграм на сл. 8.2). Очигледно е дека, за да се добие состојба блиска до „идеалната“, за зададен отпор на инструментот R_m , отпорот на потенциометарот треба да биде што е можно помал од R_m ($R_p \ll R_m$), но притоа да се обезбеди доволна осетливост на инструментот. Во практика, за однос на отпорите $R_p/R_m = 0,1$ максималната грешка е околу 1,5 %, додека за $R_p/R_m < 0,1$ максималната грешка може да се определи апроксимативно како $\varepsilon_p = 15 (R_p/R_m)$.



Сл. 8.2 Мерно коло за јойтенциометар и дијаграм на оизповарување

8.2.2 Диференцијални трансформатори

На сл. 8.3 се прикажани шеми и дијаграми на промената на напоните за линеарните варијабилни-диференцијални трансформатори (LVDT) како претворачи за движење (транслаторно и ротационо).



Сл. 8.3 Шеми на диференцијален трансформатор

Напонот на возбуда на ваквиот LVDT сензор (U_{ex}) е синусоидален, со амплитуда 3 до 15 V и со широк дијапазон на фреквенции (60 до 20000 Hz). Во двете идентични секундарни намотки се индуцира синусоидален напон со иста фреквенција како возбудата, но амплитудата на напонот се менува во зависност од положбата на железното јадро на трансформаторот.

За најчест случај на сериско поврзување на секундарните намотки, нултата позиција на јадрото $x_i = 0$ се јавува кога нето излезниот напон е нула ($U_o = 0$), т.е. при нулта положба на јадрото во секундарните намотки не се индуцира струја (види дијаграми на сл. 8.3 \bar{z}). Со задвижување на јадрото од нултата позиција, во секундарните намотки се индуцира струја, при што со мерење на излезниот напон U_o се добива информација за поместувањето x_i . Со соодветно баждарење се добива точната функционална зависност $U_o = U_o(x_i)$. Притоа, задвижувањето на јадрото од нултата позиција предизвикува поголема меѓусебна индукција за едната намотка и помала за другата, а амплитудата на U_o постапнува приближно линеарна функција од поместувањето на јадрото x_i за релативно голем опсег на едната или другата страна на „нулата“ (види дијаграм на сл. 8.3 \bar{z}). Напонот U_o претрпнува фазно поместување од 180° при поминување низ нултата позиција.

Овдека се прикажани најосновните мерни кола за диференцијални трансформатори. Производителите нудат најразлични усовршени мерни кола со кои се постигнува прецизно дотерување на нулата и соодветна демодулација и филтрација на излезниот сигнал.

8.2.3 Капацитативни давачи

Овие сензори се базираат на фактот дека движењето, на различни начини, може да предизвика промена на капацитативноста кај променлив кондензатор. Притоа, резултантната промена на капацитетот може да се преобрази во соодветен употреблив електричен сигнал, преку најразлични електрични мерни кола. Овдека се прикажани само едноставни типични апликации. Придружната електроника за капацитативните давачи, на одреден начин, е покомплицирана во споредба со другите најчесто применувани сензори. Меѓутоа, механичката едноставност, многу малите ефекти на механичко оптоварување и големата осетливост ги прави капацитативните давачи атрактивни во голем број апликации.

Наједноставна форма на кондензатор со променлив капацитет, што може да се користи како сензор за движење, е кондензаторот со паралелни плочи и променлив воздушен зјај меѓу нив (сл. 8.4a). За овој случај, од теоријата во електротехниката се согледува изразот за капацитативноста:

$$C = \frac{0.0886 \cdot A}{x} \quad (8-3)$$

каде што се:

C - капацитативност во pF,

A - површина на плочата во cm^2 ,

x - растојание меѓу плочите во см.

Од изразот (8-3) е очигледно дека со промената на x се менува и капацитативноста C по законот на хипербола.

Во едноставното мерно коло на сл. 8.4a, доколку плочите на кондензаторот се стационарни, со меѓусебно растојание (одвојување) x_0 , излезниот напон ќе биде ист со напонот на батеријата, $U_o = U_b$. Доколку се јави релативно поместување x_1 од позицијата x_0 , тогаш се произведува напон U_1 , зависен од релативното поместување x_1 :

$$U_1 = f(x_1) = U_o - E_b \quad (8-4)$$

$$x_1 = x - x_0$$

Очигледно дека, со мерење на излезниот напон U_o може да се определи и поместувањето x_1 , односно позицијата x .

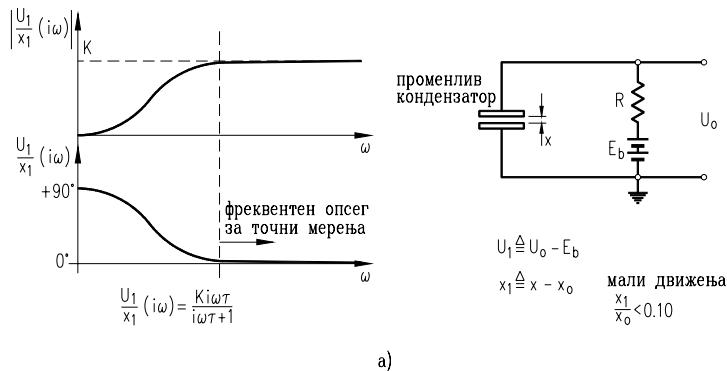
Прикажаното едноставно коло наоѓа, меѓу другото, широка примена во капацитативните микрофони.

За мерења на диференцијален притисок честа примена наоѓа променливиот диференцијален (3-контактен) капацитативен сензор, приклучен во соодветен мерен мост. Овој тип е познат како Equibar сензор за диференцијален притисок и неговата шема е прикажана на сл. 8.4б. Диференцијалниот кондензатор се состои од две фиксни сферни плочи (обложени со злато сферни површини, вдлабнати во стаклени дискови). Помеѓу двета стаклени диска цврсто е оптегната тенка дијафрагма од нергосувачки челик, која служи како подвижна плоча на вака формираниот двоен кондензатор, чиишто контакти (a,b,c) соодветно се приклучуваат во соседните гранки на мерниот мост. При

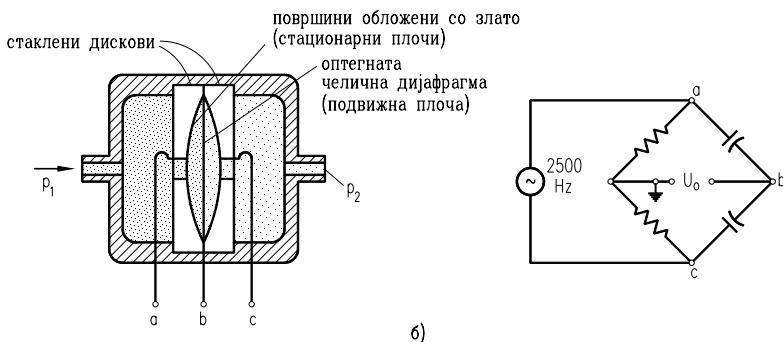
исти притисоци во двата притисни приклучока, $p_1 = p_2$, дијафрагмата е во неутрална положба, а мерниот мост е во рамнотежа, односно $U_o = 0$. Доколку постои притиска разлика, $\Delta p = p_1 - p_2$, дијафрагмата се повива пропорционално на едната страна, предизвикувајќи излезен напон $U_o \neq 0$, којшто е во функционална зависност од Δp :

$$U_o = U_o (\Delta p)$$

За спротивна притиска разлика, $\Delta p = p_2 - p_1$, напонот U_o покажува фазна промена од 180° . На тој начин е можно мерење како на различни диференцијални притисоци, надпритисок и вакуум.



a)



б)

Сл. 8.4 Едносоставно мерно коло на капацитетивен давач (а) и диференцијален капацитетивен сензор за притисок (б)

Во двете прикажани апликации карактеристично е високото ниво на импеданца, што може да предизвика несакани проблеми од аспект на шум на излезниот напон, осетливост на должината и позицијата на поврзувачките кабли и т.н. Од овие причини, многу често се потребни соодветни електронски засилувачи, демодулатори и филтри. За разлика од методот според сл. 8.4a, диференцијалниот капацитативен давач овозможува мерење на статички дефлекции, а исто така покажува осетно поголема линеарност отколку во првиот случај.

8.2.4 Пиезоелектрични сензори

Познато е дека при деформирање на некои цврсти материјали, во нив се генерира соодветно количество електрицитет. Овој ефект е реверзилен, т.е. ако се доведе некое количство електрицитет, материјалот ќе претрпи соодветна деформација како одговор. Оваа појава е позната како пиезоелектричен ефект.

Овој принцип на конверзија на електромеханичката енергија корисно е применет во двете наведени насоки. Насоката на примена механички влез – електричен излез е основа за многу инструменти за мерење на поместување, забрзување, сила и притисок. Овој пиезоелектричен принцип, исто така, нашол примена како начин за генерирање на електрична моќност со висок напон а со слаба струја, како што е случајот во системите на палење при моторите со внатрешно согорување и електростатичките филтри за прашина. Принципот електричен влез - механички излез е применет во вибратори со мали вибрации, сонарни системи за акустична детекција и лоцирање на подводни објекти, како и во индустриската ултразвучна опрема за разни испитувања.

Материјалите кои покажуваат значаен и корисен пиезоелектричен ефект можат да се сврстат во две групи:

1. природни (кварц, камена сол) и синтетички (литиум сулфат, амониум дихидроген фосфат) кристали и
2. поларизирани фероелектрични керамики (на пример, бариум титанит).

Пиезоелектричниот ефект може да се направи да одговара на механички деформации на материјалот на повеќе начини: експанзија на дебелината, напречна експанзија, тангенцијални деформации на дебе-

лината и површината. Начинот на предизвиканото движење зависи од обликот и ориентацијата на телото (кристалот) во однос на оските на кристалот и локацијата на електродите.

Металните електроди се обложуваат на одбрани површини на пиезоелектричниот материјал (види сл. 8.5), така што контактните жици можат соодветно да се приклучват за одведување (или доведување) на количеството електрицитет. Бидејќи пиезоелектричниот материјал е изолатор, електродите играат улога на облоги на плочест кондензатор. На тој начин пиезоелектричниот елемент, употребен за претворање на механичко движење во електричен сигнал, може да се смета како генератор на електрицитет и кондензатор. Механичката деформација генерира соодветно количество електрицитет, кое резултира во определен напон помеѓу електродите, согласно со вообичаениот закон за кондензатори:

$$U = \frac{Q}{C}$$

каде што се:

Q - количество електрицитет,

C - капацитативност.

Како пример, овдека се илустрирани главните карактеристики на пиезоелектрични претворачи од типот движење - напон, за најопшт случај на експанзија на дебелината (види сл. 8.5а и б).

За пиезоелектричните сензори дефинирани се две константи g и d , како односи на соодветните електрични и механички големини во посматраната насока:

$$g = \frac{\text{произведено електрично поле}}{\text{механичко напрегање}}$$

$$d = \frac{\text{генерирано количество електрицитет}}{\text{воведена сила}}$$

односно :

$$g = \frac{\frac{U_o}{t}}{\frac{F_i}{wl}} \quad (8-5a)$$

$$d = \frac{Q}{F_i} \quad (8-5b)$$

според сл. 8.5:

t - дебелина,

w - широчина,

l - должина на елементот,

U_o - излезен напон,

F_i - воведена сила.

На тој начин, доколку е позната вредноста на g за даден материјал, преку измерениот излезен напон U_o може да се определи силата F_i . Типични вредности за оваа константа се:

$$g = 12 \cdot 10^{-3} \text{ (V/m)/(N/m}^2\text{)} \text{ за бариум титанит и}$$

$$g = 50 \cdot 10^{-3} \text{ (V/m)/(N/m}^2\text{)} \text{ за кварц.}$$

Од друга страна, константата d може да се пресмета од константата g ако е позната диелектричната константа на материјалот ε , односно:

$$g = \frac{U_o wl}{t F_i} = \frac{U_o C}{\varepsilon F_i} = \frac{Q}{\varepsilon F_i} = \frac{d}{\varepsilon} \quad (8-6)$$

знаејќи притоа дека се:

$$C = \frac{\varepsilon wl}{t} \quad - \text{ капацитативност,}$$

$$\varepsilon \approx 4,06 \cdot 10^{-11} \frac{F}{m} \quad - \text{ диелектричната константа за кварц,}$$

$$\varepsilon \approx 1,250 \cdot 10^{-11} \frac{F}{m} \quad - \text{ диелектричната константа за бариум титанит.}$$

Врз база на презентираните основни врски и дефиниции, пиеゾелектричниот сензор може да се разгледа и како давач за помес-

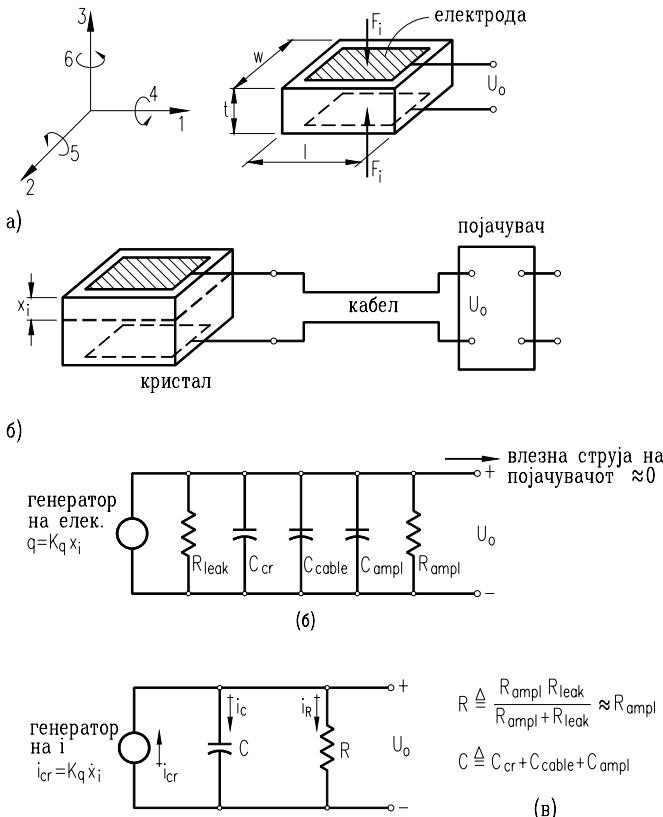
тевање. Согласно со еквивалентното електрично коло на сл. 8.5б, количеството електрицитет генерирано од кристалот ќе биде:

$$q = K_q x_i \quad (8-7)$$

каде што се:

x_i - воведена дефлекција (поместување) која се одржува за определено време;

K_q - константа во C/m.



Сл. 8.5 Основен принцип на пиезоелектричен сензор и еквивалентно електрично коло

Од познатите законитости во електротехниката:

$$i_{cr} = \frac{dq}{dt} \quad \text{- за генерирана струја}$$

и

$$U_o = \frac{\int (i_{cr} - i_R) dt}{C} \quad \text{- за напон,}$$

се добива соодветна диференцијална равенка, чие решение ја дава зависноста:

$$U_o = Kx \quad (8-8)$$

Параметрите во горните изрази ги имаат следните значења:

$i_{cr} = i_C - i_R$ - струја низ генераторот на струја (кристалот),

i_R - струја низ еквивалентниот отпор R , при што:

$$R = (R_{amp} R_{leak}) / (R_{amp} + R_{leak}) \approx R_{amp} ;$$

$$C = C_{cr} + C_{cab} + C_{amp}$$

(индексите amp , $leak$, cab , и cr одговараат на соодветниот отпор и соодветната капацитативност на засилувачот, пропуштањето, кабелот и кристалот).

Во изразот (8-8) x е поместување кое се задржува во определен временски период $0 < t < T$, а K е т.н. сензитивност определена со решавање на диференцијалната равенка, односно:

$$K = \frac{K_q}{C} \quad \text{за} \quad t = 0$$

$$K = \frac{K_q}{C} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{за} \quad 0 < t < T$$

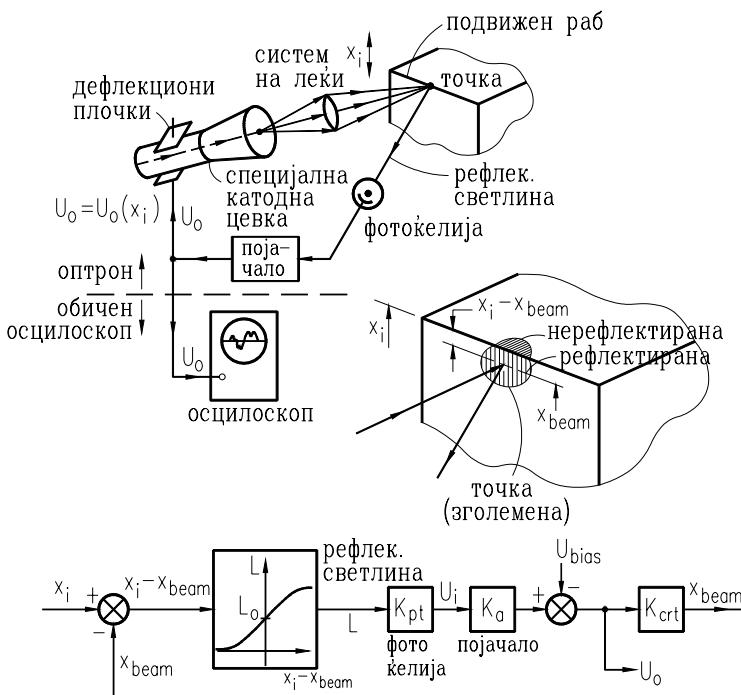
$$K = \frac{K_q}{C} \left(e^{-\frac{T}{\tau}} - 1 \right) e^{-\frac{t-T}{\tau}} \quad \text{за} \quad T < t < \infty$$

$$\tau = RC \quad \text{- временска константа во секунди.}$$

Меѓутоа, како и во многу други случаи, сензитивноста најдобро се верифицира со баждарење од производителот на опремата.

8.2.5 Електрооптички инструменти

Комбинацијата на класичните оптички принципи со модерната електроника довела до развој на најразлични електрооптички инструменти за мерење на релативни поместувања и брзини. Мерењата со ваквите инструменти воглавно се базираат на определување на соодносот на емитуваната светлина, фокусирана на точката која е во движење, и рефлектираната од неа светлина, чијшто интензитет е регистриран и процесиран преку фотокелија и соодветна електроника. Типичен пример на ваков електрооптички систем за мерење на поместување (според американската фирмa Optron) е прикажан на сл. 8.6.



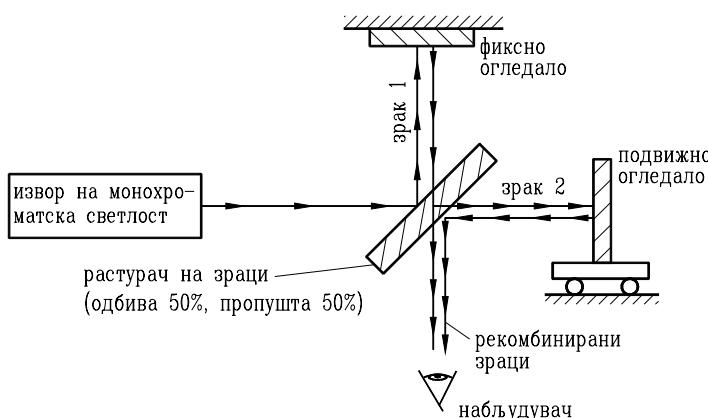
Сл. 8.6 Електрооптички мерен систем според фирмата Optron

Во овој случај (сл. 8.6), рефлектираната светлина се користи како сигнал на повратна врска за фокусирање на емитуваната светлина на работ (точката) што се движи, со што се овозможува фокусната светлосна точка постојано да го следи движечкиот раб. На тој начин се постигнува состојба, задвижувањето на емитуваниот зрак x_b да биде приближно исто со поместувањето на работ x_i , ($x_{beam} \approx x_i$).

Во тој случај, напонот на напојување на дефлекционите (насочувачки) плочки на специјалната катодна цевка е воспоставен да зависи од поместувањето, $U_o = U_o(x_i)$, односно со негово мерење се добива и поместувањето x_i .

Во последно време, со развојот на ласерската техника, како многу прецизни се јавуваат инструменти за мерење на движење кои се базираат на принципите на интерференција на светлината.

Основа на современите ласерски интерферометри претставува Микелсоновиот (Michelson) оптички мерен систем, развиен уште во 1890 година. Според сл. 8.7, со примена на бранов модел на светлина, посматрачот ќе гледа циклуси на светли и темни ликови, како што движењето на подвижното огледало ја менува фазата на зракот 2 во однос на фиксираните зрак 1, предизвикувајќи алтернативно засилување и интерференција на двета зрака. Ако е позната брановата должина на светлината, на пример $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, тогаш секое задвижување на огледалото за $0,25 \cdot 10^{-6}$ м одговара на еден комплетен циклус на илуминација (светло-темно-светло). На тој начин, со определување на бројот на илуминациони циклуси, може да се пресмета растојанието помеѓу две положби на подвижното огледало.



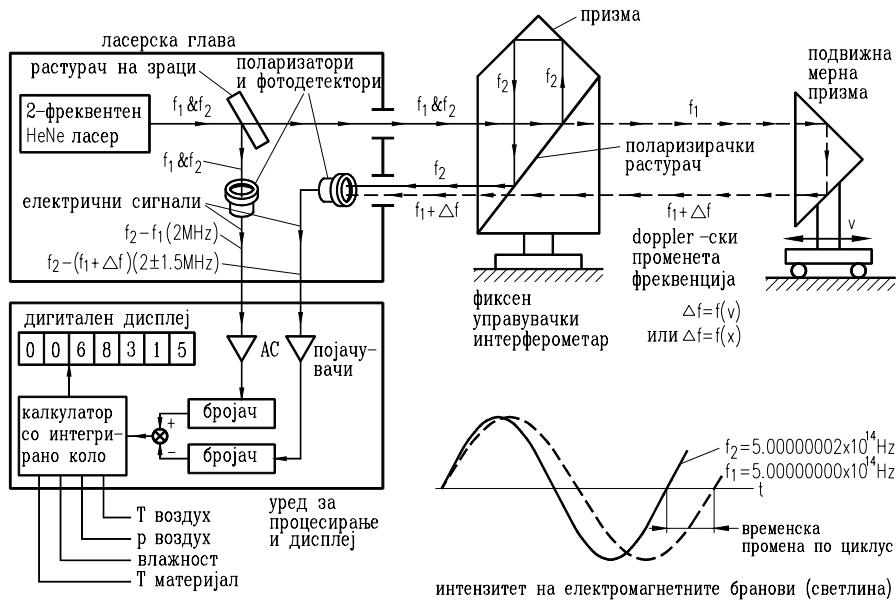
Сл. 8.7 Шема на Микелсоновиот интерферометар

Овој навидум едноставен принцип е придружен со многу потешкотии и до скоро наоѓал примена само за ограничен број на апликации (првенствено поради долгата и макотрпна процедура). Меѓутоа, со развојот на современите ласери е овозможена широка примена на оптичко-електронски уреди кои во основа го имаат објаснетиот интерферентен принцип. Ласерот обезбедува многу поквалитетна монохроматска (еднофреквентна) светлина во однос на поранешните „ламби“. Ласерската светлина е кохерентна (останува во фаза со самата себе) преку многу поголеми растојанија и нејзината фреквенција е многу стабилна и прецизно позната. При поминување низ воздух, фреквенцијата не се менува, а брановата должина претрпнува занемарливи промени со промената на притисокот, температурата или влажноста на воздухот (во современите ласерски интерферометри се врши континуална корекција за исклучително прецизни мерења).

На сл. 8.8 е прикажан принципот на ласерскиот интерферометар (според фирмата Hewlett-Packard). Хелиум-неонскиот ласер произведува, во овој случај, ласерска светлина со две посебни оптички фреквенции f_1 и f_2 , двете во околина на $5 \cdot 10^{14}$ Hz, но фреквентно одвоени со околу 2 MHz. Зракот што го напушта ласерот се поделува на две половини. Едната половина се носи директно кон еден поларизатор и фотодетектор за да создаде електричен референтен (споредувачки) сигнал, додека другата половина продолжува кон надворешната оптика. Поларизаторот на референтниот зрак им дава на двете фреквенции исти поларизации, така што тие можат да покажат вообичаена конструктивна и деструктивна интерференција (види дијаграм прикажан на сл. 8.8).

Другата половина на ласерскиот зрак го претставува т.н. мерен зрак и прво се среќава со фиксниот управувачки интерферометар, во кој се рефлектира компонентата f_2 , а компонентата f_1 се пропушта кон мерната призма. Притоа, ако таа не се движи, не се ни јавува фреквентна промена на f_1 помеѓу зракот што настапува и рефлектиранот од неа зрак. Меѓутоа, доколку мерната призма се движи, рефлектиранот зрак покажува доплерска промена на фреквенцијата, пропорционална на брзината на движење на мерната призма (околу 3,3 MHz/(m/s)), односно $\Delta f = \Delta f(v)$. Кога овој зрак со фреквенција $f_1 + \Delta f$ ќе се рекомбинира со f_2 -зракот во фиксниот управувачки интерферометар и потоа ќе се спроведе кон соодветниот фотодетектор, повторно се добиваат интерферентни ефекти кои произведуваат електричен сигнал со фреквенција од 0,5 до 3,5 MHz, зависна од брзината v . Рефлектираните и мерните сигнали се засилуваат со а-с засилувач и се доведуваат до бројачот во кој се врши нивно одземање. Бројачот ќе покажува нула, доколку нема движење ($v = 0$), а ќе ги акумулира одбројувањата пропорционално на поминатото растојание од некоја референтна положба ако постои движење ($v \neq 0$).

На пример, движење при $v = 1 \text{ cm/s}$ за $t = 1 \text{ s}$ (вкупно поместување $x = 1 \text{ cm}$) дава 33000 одбројувања, и со тоа резолуција од околу $3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Секако дека инструментот може да биде избаждарен за директно отчитување на брзината во m/s или поместувањето во m .



Сл. 8.8 Лазерски интерферометар

Описаните а-с лазерски интерферометри покажуваат повеќе предности над другите оптички инструменти за оваа намена. Доплерската техника овозможува употреба на понадежни а-с (отколку д-с) засилувачи, дава прецизна индикација на насоката на движење, и овозможува мерење на брзината покрај поместувањето. Со воведување на различен надворешен оптички хардвер, системот може да се адаптира за мерење на различни геометриски и механички големини (брзина, пат, должина, хоризонталност, глаткост и слично) со многу голема прецизност.

8.2.6 Сензори на принцип млазник-плоча

Принципот млазник-плоча нашол широка примена во прецизната мерна инструментација, а особено ваквиот сензор се среќава како основна компонента во пневматските и хидрауличните мерни и контролни уреди. На сл. 8.9a е прикажана општа шема на типичен сензор од овој вид. Флуидот со регулиран притисок и температура ($p_s = \text{const}$ и $T_s = \text{const.}$) се доведува до фиксно ограничување (калибриран придушувач) и променливо ограничување на струењето поврзани во серија. Променливото ограничување на струењето се менува со задвижување на плочата (перото) при определена промена на растојанието x_i (поместувањето). Ова предизвикува промена на излезниот притисок p_o , кој за ограничено подрачје на движење е скоро пропорционален на x_i (види дијаграм од сл. 8.9c) и е многу осетлив на него. На тој начин, добиената информација за p_o овозможува определување на поместувањето x_i . Односно, инструментот за мерење на p_o може да биде калибриран за директно отчитување на x_i . Идеално (наполно некомпресибilen флуид и цврсти сидови), наглата промена на x_i ќе предизвика моментална промена на p_o . Во стварност, динамиката одговара на линеарен систем од прв ред за мали промени на x_i . Временската константа е дефинирана за гасови со компресибилноста, а за течности со еластичната деформација на сензорот за притисок p_o .

Корисен апроксимативен израз за статичката осетливост на сензорот може едноставно да се добие со претпоставување дека флуидот е некомпресибilen. Резултатите во овој случај се точни за течности и со занемарливи грешки за гасови, со мали промени на притисокот. Во тој случај, масениот проток низ фиксиот придушувач ќе биде:

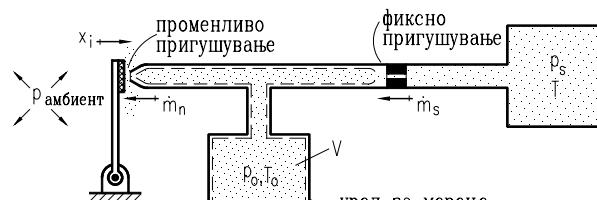
$$\dot{m}_s = \frac{C_d \pi d_s^2}{4} \sqrt{2 \rho (p_s - p_o)} \quad (8-9)$$

каде што се:

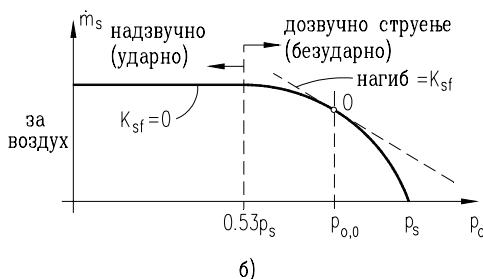
C_d - коефициент на проток,

d_s - дијаметар на придушувачот,

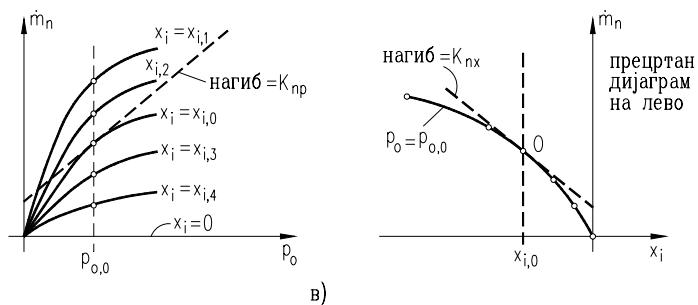
ρ - густина на флуидот.



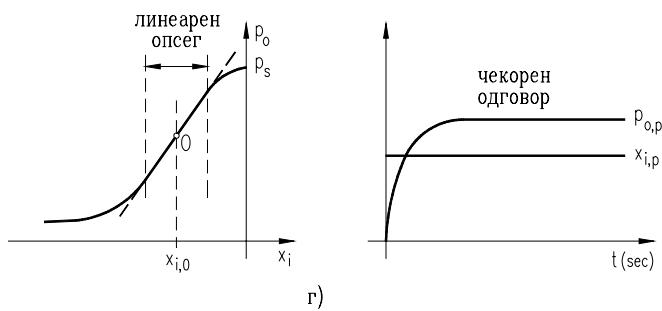
a)



б)



в)



г)

Сл. 8.9 Сензор млазник - јлоча

За мали вредности на x_i , проточната површина на млазникот може да се земе како периферна површина на цилиндер со висина x_i и дијаметар на млазникот d_n . Масениот проток низ млазникот во тој случај може да се определи со изразот:

$$\dot{m}_n = C_d \pi d_n x_i \sqrt{2 \rho (p_o - p_{amb})} \quad (8-10)$$

За стационарна состојба, $\dot{m}_n = \dot{m}_s$, и со земање дека притисокот на околината е $p_{amb} = 0$, се добива зависноста на p_o од поместувањето x_i како:

$$p_o = \frac{p_s}{1 + 16 \frac{d_n^2 x_i^2}{d_s^4}} \quad (8-11)$$

Во стварност, за компресибilen медиум, функционалната зависност $\dot{m}_s(p_o)$ може да се определи теоретски од основните равенки од механиката на флуиди и термодинамиката, или целосно со експеримент за определен придушувач. Општата зависност $\dot{m}_s(p_o)$ е прикажана дијаграмски на сл. 8.9б. Истото се однесува и за функционалната зависност на масениот проток низ млазникот, $\dot{m}_n(p_o, x_i)$, што е прикажана на дијаграмот на сл. 8.9в.

Од конзервацијата за маса за временски интервал dt :

$$\dot{m}_s dt - \dot{m}_n dt = \frac{V}{RT_o} dp_o$$

се добива диференцијална равенка чие решение ја дава зависноста $p_o(x_i)$, чиј општ облик е прикажан на сл. 8.9г.

8.3 РЕЛАТИВНА БРЗИНА, ТРАНСЛАЦИЈА И РОТАЦИЈА

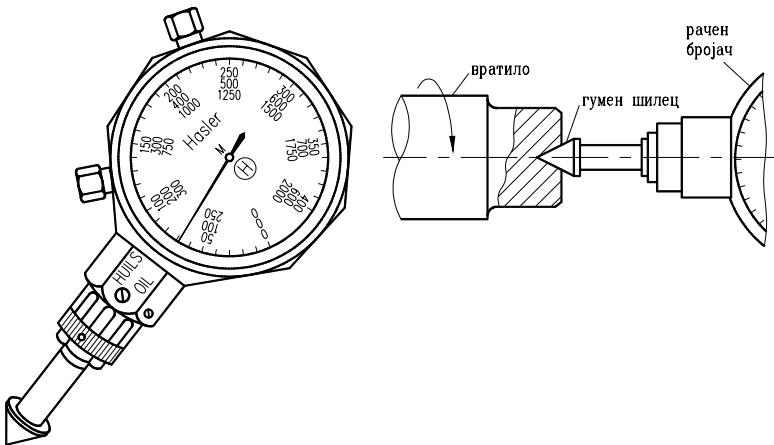
Во овој случај се разгледувани инструменти за мерење на брзина на транслаторно движење (долж линија) на една точка во однос на друга, како и брзина на рамнинско ротационо движење (околу една оска) на една линија во однос на друга. Притоа, поголемо внимание е обратено на мерење на ротациона (аголна) брзина, бидејќи во многу случаи транслаторното движење може да се добие од ротационо, со соодветна трансформација на ротацијата преку назабен пренос или криваен механизам. Исто така, при мерење на моќност на хидрауличните машини (или која било друга енергетска или работна машина), многу често се користи методологија за нејзино определување преку вртежниот (торзиониот) момент и аголната брзина.

За мерење на аголната брзина постојат многу точни механички и електрични инструменти, кои воглавно се базираат на одборојување на бројот на вртежи во некој определен временски интервал. Овие инструменти често се среќаваат под називот тахометри. Исто така, на располагање се и инструменти за мерење на брзина на транслаторно и ротационо движење, во кои излезната големина (механичка или електрична) континуирано се менува со промената на брзината и служи за управувачка функција или за понатамошна обработка на податоците.

8.3.1 Механички инструменти за аголна брзина

За случаи кога не е потребно континуално отчитување и електричен сигнал за обработка на податоците или за управувачка функција, многу често се применуваат различни видови на механички бројачи на броеви на вртежи. Типичен претставник на овие инструменти е рачниот бројач на вртежи, кој во себе содржи прецизен саатен механизам што ги одборојува вртежите за некое време (на пример 3s) и преку посебен тајмер го сведува бројот на вртежи во минута или секунда. На сл. 8.10 е прикажан шематски рачен механички бројач од типот Хеслер (Hesler). Овие бројачи се снабдени со различни гумени тркалаца, преку кои со триенje се пренесува движењето (чијашто аголна брзина треба да се измери) на влезното вратило на бројачот. На сл. 8.10 е прикажан пренос на ротационото движење преку гумен конусен шилец инсталiran на вратилото на инструментот. Квалитетните рачни бројачи се изведени со многу прецизни саатни механизми и многу често се користат и како

калибрациони стандарди. Со посебно дотерување можно е мерење на бројот на вртежи во различни подрачја (види сл. 8.10).

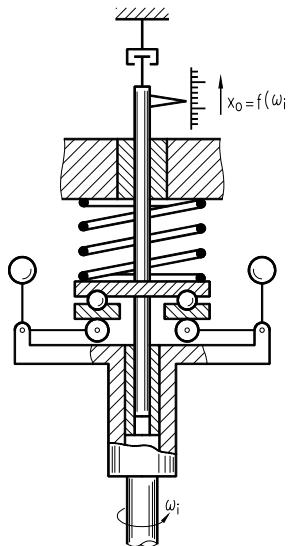


Сл .8.10 Рачен механички бројач на вртежи

Класичен инструмент за мерење на ротационо движење, кој е сè уште во широка примена (особено како мерен елемент на индустриските системи за контрола на брзината кај турбините, работните машини и слично) е механичкиот центрифугален сензор за аголна брзина. На сл. 8.11 е прикажана генерална шема на еден ваков центрифугален тахометар.

Во овој случај, бидејќи центрифугалната сила зависи од квадратот на влезната аголна брзина ($F_c = K_c \omega_i^2$), излезното поместување x_o нема да се менува линеарно со промената на ω_i , доколку се користи обична линеарна пружина (со сила $F_s = K_s x_o$), што е најчесто прифатливо при големи промени на брзината. Во тој случај:

$$x_o = \frac{K_c}{K_s} \omega_i^2 \quad (8-12)$$



Сл. 8.11 Центрифугален сензор за азолна брзина

Доколку не се работи за големи промени на ω , нелинеарна пружина со сила $F_s = K_s x_o^2$ може да се примени, за да се добие линеарна севкупна карактеристика; при што од балансот на силите ($F_c = F_s$) се добива линеарната зависност:

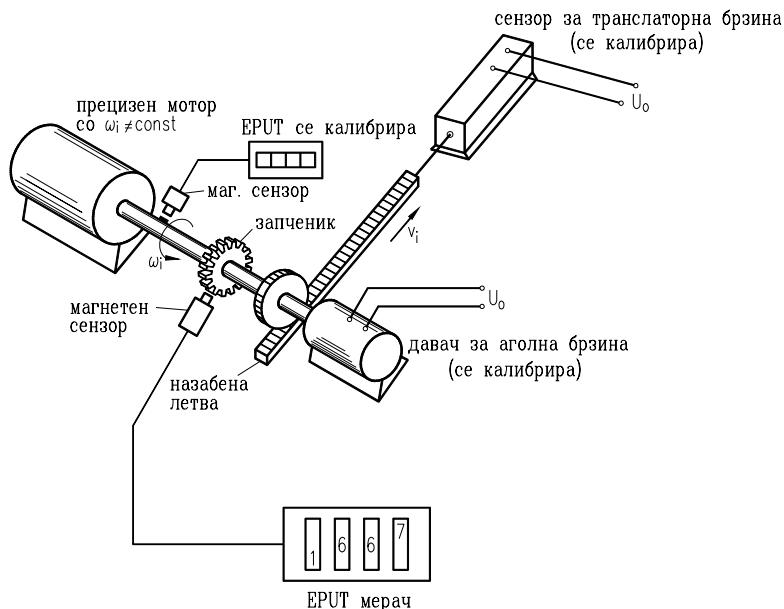
$$x_o = \sqrt{\frac{K_c}{K_s}} \cdot \omega_i^2 \quad (8-13)$$

Постојат конструкции на овој принцип, во кои се користи пневматски систем за балансирање на силата, кој ја заменува пружината и произведува стандарден притисен сигнал пропорционален на ω_i^2 и погоден за користење во систем за автоматско управување. Во оваа класа спаѓа и т.н. рачен тахометар кој работи на наведениот принцип на центрифугален сензор, во комбинација со пружина и запченици (по надворешен облик е сличен на рачниот бројач).

8.3.2 Електрични методи и сензори

Електричниот излезен напон од кој било сензор за поместување (види поглавје 8.2) може да се аплицира во влезот на соодветно диференцирачко електрично коло, во кое, преку електрично диференцирање на сигналот во однос на времето, се добива напон пропорционален на брзината ($v = dx/dt$). Во зависност од физичката природа на сигналот од сензорот, се применуваат разновидни уреди погодни за конкретната апликација. Меѓутоа, треба да се напомене дека во овие случаи многу често се јавуваат проблеми при добивањето на прецизно диференцирање, особено при присуство на шумови (со ниска амплитуда и висока фреквенција) во сигналот од сензорот за поместување.

Можеби како најпогодни електрични шеми за мерење на аголна брзина одговараат методите со *магнетни и фотоелектрични бројачи на импулси* (или т.н. *електронски дигитални бројачи*). На сл. 8.12 е прикажана типична шема од овој вид за мерење на аголна и линеарна брзина, којашто може да се користи и за калибрирање на помалку точни инструменти.



Сл. 8.12 Шема на магнетен електронски бројач

Прикажаниот електронски дигитален бројач претставува комбинација на запченик, електромагнетен сензор и електронски бројач на збиднувања за единица време (EPUT - мерач). Во магнетниот сензор се произведува електричен импулс (пулсирање), секогаш кога еден заб поминува покрај него. EPUT мерачот ги брои пулсациите за определен точен временски период (1,00000 sec) и дава резултат на дигиталниот дисплеј како средна вредност (од повеќе заби) за време од неколку секунди; понатаму процесот се повторува.

Точноста на мерењето на аголната брзина зависи од стабилноста на изворот на движење (за калибрациона намена се користи стабилен регулационен мотор, види сл. 8.12) и од бројот и квалитетот на изработка на забите (и меѓузабијата) на запченикот. Обично, релативната грешка кај овие инструменти е од ранг 0,06% за 1000 вр/мин, при што за помали аголни брзини грешката се зголемува, а за поголеми се смалува.

Електронскиот дигитален тахометар може да се изведе и со фотокелија (наместо магнетен сензор) во комбинација со светлосен извор и диск со процепи (наместо запченик) или црно-бел „нишан“. Исто така, повеќе фирмии произведуваат тахометри од овој тип, при кои електро магнетната сонда регистрира пулсации само со поминување на една ознака (точка) фиксирана на ротирачкиот дел (види сл. 8.12); овие тахометри, секако, треба да се избаждарат со претходно објаснетата поточна методологија.

При примената на електронскиот дигитален бројач, доколку е потребен аналоген сигнал (d - c напон пропорционален на аголната брзина), на излезните терминали на сензорот се приклучува посебен електронски уред наречен фреквентнонапонски конвертор. Меѓутоа, ваквото дотерување не дава секогаш толку висока точност како стандардната техника за броење на пулсации.

За мерење на аголната брзина може да се употреби и *шахометар на јринцијой на вртложни струи*, во кој со ротација на прстенест магнет (обично со 6 пола) се индуцираат вртложни струи кои настојуваат да задвижат посебен алуумиумки диск со пружина (која се спротивставува на дејството на вртложните струи). Како резултат се добива определено задвижување на дискот пропорционално на ω .

Ротационата брзина може погодно да се мери и со примена на *електронски стробоскопски ламби* кои блескаат со позната брзина на промена (фреквенција што може да се дотерува). Светлината се насочува на ротирачкиот дел кој, обично, има соодветни карактеристични елементи (заби од запченик, крила на компресор или пумпа, или некоја друга карактеристична ознака) кои овозможуваат „заробување“ на светлината. Често пати, доколку не постои некој од наведените елементи

(„нишани“), доволно е да се залепи парче од црно-бела хартија на ротирачкиот дел. Фреквенцијата на стробоскопската ламба се дотерува сè додека „нишанот“ не се појави како да е неподвижен. При ова дотерување, фреквенцијата на ламбата и фреквенцијата на движењето се идентични, и нумеричката вредност може да се отчита од калибрираниот бројчаник на ламбата со грешка од околу $\pm 1\%$ од отчитаната вредност. Типичните стробоскопски лампи обично имаат дијапазон на фреквенција од 110 до 25.000 блескања во минута.

За мерење на аголна брзина можат да се применат и **еднонасочни (d-c) тахометарски генератори**. Притоа, се користи принципот дека обичниот d-c генератор произведува излезен напон U_o пропорционален на бројот на вртежи во единица време n . Со определени конструктивни дотерувања, ваквиот електричен генератор може да се изведе како прецизен инструмент за мерење на ротационата брзина. Зависноста на излезнот напон од бројот на вртежи, според законите за електричните машини, може да се прикаже како:

$$U_o = \frac{z_p z_c \phi n}{60 z_{pp}} \cdot 10^{-8} \quad (8-14)$$

каде што се:

U_o - просечен излезен напон во V ;

z_p - број на полови;

z_c - број на проводници во арматурата;

ϕ - флукс по еден пол;

n - брзина во вр/мин;

z_{pp} - број на паралелни патеки помеѓу позитивните и негативните четкици.

Како тахометар на овој принцип може да се примени и двофазен (a-c) генератор со негово посебно дотерување.

8.4 СИЛА, МОМЕНТ И МОЌНОСТ

Бидејќи силата е дефинирана како изведена големина (види глава 1.), според II-от Йутнов закон $F = ma$, очигледно е дека мерниот стандард (еталон) за сила ќе зависи од соодветните стандарди за маса и забрзување. Истото се однесува и за мерните единици за сила; т.е. позната е основната мерна единица $N = \text{kgm/s}^2$.

Масата (m) се третира како фундаментална големина и нејзиниот стандард претставува цилиндер од платина-иридиум, наречен меѓународен килограм, што се чува во Севр (Sevres) во Франција. Секоја држава има свои национални стандарди кои се баждарат во однос на наведениот меѓународен стандард.

Забрзувањето, исто така, не е фундаментална големина и е изведено од должината и времето (димензионална формула LT^{-2}) како фундаментални големини. Притоа, гравитационото забрзување g претставува погоден стандард, и тоа може да се определи со голема точност (1 дел од 10^6) со мерење на периодот и ефективната должина на нишало (види пример од димензиска анализа во глава 1.) или со определување на временската промена на брзината на тело во слободен пад. Таканаречената стандардна вредност на g е определена при географска широчина $\phi = 45^\circ$ и нула надморска височина и изнесува $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$. Вистинската вредност на гравитационата акцелерација занемарливо се менува со промената на географската широчина и надморската висина (за што постојат соодветни корекциони формули).

На тој начин, со знаење на нумеричката вредност на g и со точно познат еталон за маса, може да се пресмета и соодветната гравитациона сила ($G = mg$), со што се воспоставува и стандард за сила. Овој начин претставува основа за т.н. калибрирање со „мртва тежина“ на системите за мерење на сила.

Мерењето на момент е тесно поврзано со мерењето на сила (димензионална формула FL , односно единица Nm). Според тоа, посебни стандарди за мерење на моментот не се потребни, т.е. доволни се мерењата на сила и должина за да се дефинира моментот. Моќноста пренесена од ротационо вратило, познато е, претставува производ на торзиониот (вртежниот) момент и аголната брзина:

$$P = M\omega \quad (8-15)$$

и има мерна единица $W = \text{Nm/s}$, односно димензионална формула FLT^{-1} , т.е. ML^2T^{-3} .

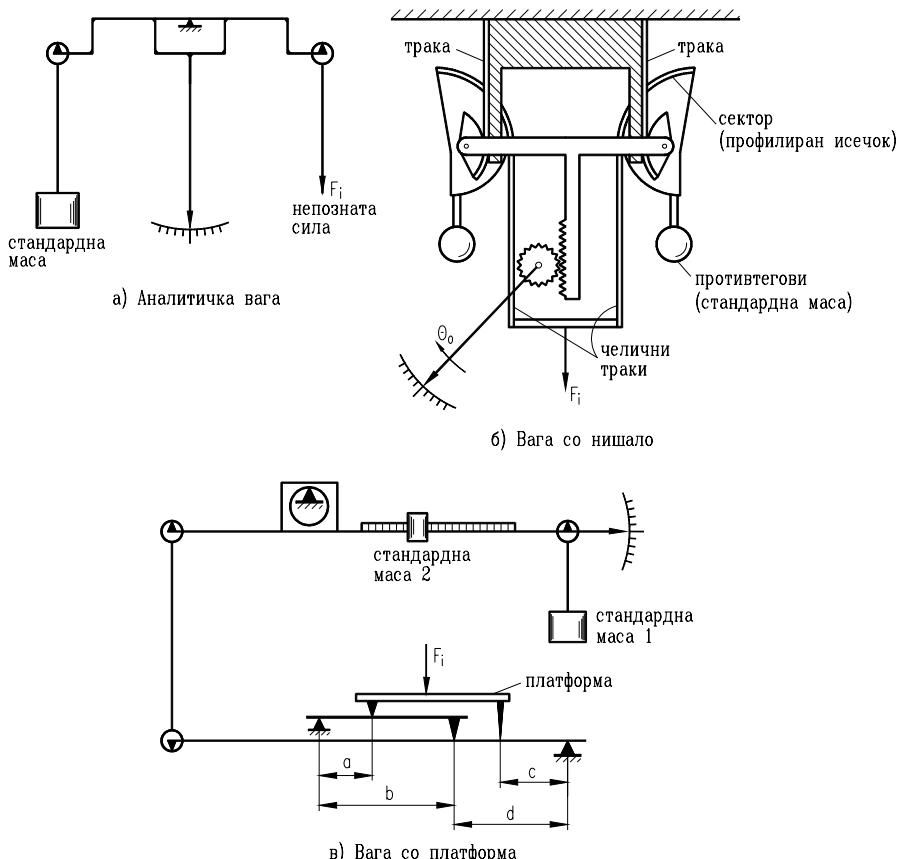
Очигледно дека ако посебно се мерат ω и M , по посреден пат се добива и моќноста P . Во поглавјето 8.3 се прикажани основните методи за мерење на аголната брзина ω . Притоа, $\omega = 2\pi n \text{ rad/s}$, ако е n број на вртежи во секунда (vr/s), или $\omega = \pi n / 30 \text{ rad/s}$, ако е n во vr/min.

8.4.1 Основни методи за мерење на сила

Мерењето на непозната сила F_i може да се изведе воглавно според следниве методи:

1. балансирање на силата F_i наспроти позната гравитациона сила G со стандардна маса m , или директно или преку систем на лостови (сл. 8.13);
2. со мерење на забрзувањето на тело со позната маса m , на кое е приведена непозната сила F_i (сл. 8.14);
3. балансирање на F_i наспроти на магнетна сила развиена со меѓусебно дејствие на струен калем и магнет (сл. 8.15);
4. со претворање на силата F_i во притисок на флуид p_o и со мерење на истиот (сл. 8.16);
5. приведување на силата на некој еластичен елемент и мерење на неговата деформација (сл. 8.17).

На сл. 8.13 е илустриран методот 1. преку аналитичка вага, вага со нишало и вага со платформа. Иако се базира на едноставен принцип, аналитичката вага (сл. 8.13a) бара прецизна конструкција и управување со цел да се постигнат максимални перформанси и точност. За многу прецизни мерења постојат аналитички ваги кои ги земаат во обзир и вршат компензација на узгонската сила на стандардната маса во воздухот, промените на температура и влажност и др. Комерцијалната мрежа нуди широк дијапазон на прецизни аналитички ваги: од макроаналитичка (со мереен опсег $200 \div 1000 \text{ g}$ и резолуција од 10^{-4} g), до ултрамикро вага (со опсег помал од $0,01 \text{ g}$ и резолуција 10^{-7} g). Современите аналитички ваги се комбинираат со соодветни електронски уреди и познати се како електронски аналитички ваги.



Сл. 8.13 Мерење на сила со балансирање на српостатичката сила

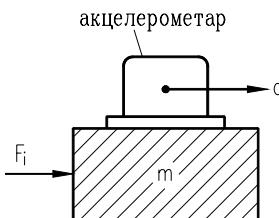
Вагата со нишало (сл. 8.13б) претставува инструмент од дефлекционен (отстапувачки) тип, во кој непознатата сила F_i се трансформира во торзионен момент кој потоа се балансира со моментот на фиксна стандардна маса поставена како нишало. Во практичната верзија на овој принцип се применети посебно профилирани исечоци (сектори) и челични ленти за да се линеаризира нелинеарната врска момент-агол на нишалото. Непознатата сила F_i може да биде директно приведена како на сл. 8.13б или преку систем на лостови (како кај вагата со платформа) за да се зголеми мерниот опсег. Кај овој инструмент, електричен сигнал

пропорционален на силата може лесно да се добие од кој било сензор за аголно поместување, приклучен да го мери аголот θ (види поглавје 8.2).

Вагата со платформа (сл. 8.13в) користи систем на лостови со цел да можат да се измерат големи сили со помош на многу помали стандардни маси (тежини). Скалата кај современите ваги од овој тип може да се изведе како самобалансирачка, со додавање на електричен сензор за детекција на „нулата“ и систем со засилувач-мотор за позиционирање на тегот за рамнотежа кон нултата положба. При тоа, доколку растојанијата на лостовите се во сооднос $a/b=c/d$ (види сл. 8.13в), отчитувањето на скалата е независно од локацијата на силата F_i на платформата.

Додека аналитичките ваги се користат скоро исклучително за мерење на маса на предмети или хемиски супстанци, вагите со нишало и платформа имаат намена и за мерење на сили, како што се при определувањето на моќноста (снагата) со помош на динамометри, кочници и сл. Сите три наведени инструменти со балансирање се наменети воглавно за мерење на статичка сила.

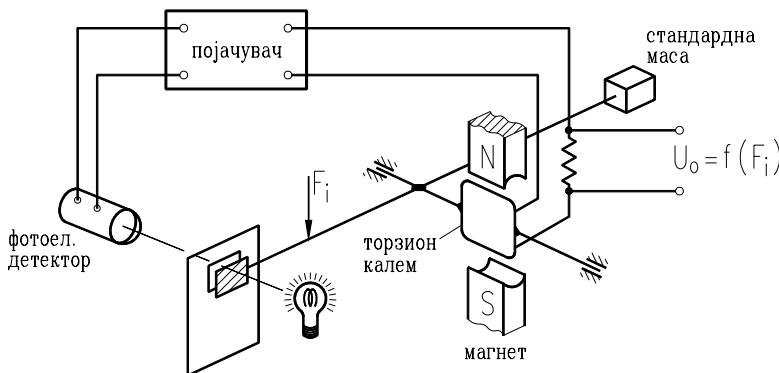
Методот 2. (сл. 8.14), базиран на примена на акцелерометар, е со ограничена примена, бидејќи силата што се определува претставува резултантна сила на масата. Често пати, дејствуваат повеќе непознати сили и тие не можат да бидат поединечно мерени со овој метод.



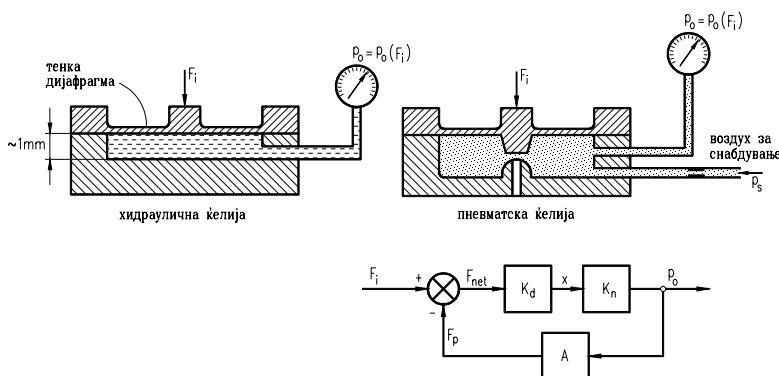
Сл. 8.14 Метод на мерење на сила преку забрзување на познатата маса

Во електромагнетната вага (метод 3. на сл. 8.15) се применети photoелектричен нулти детектор, електронски засилувач и ротационен (торзионен) калем во соодветен сервосистем, а со цел да се балансира разликата помеѓу непознатата сила F_i и гравитационата сила на стандардната маса m . Овој инструмент е во компетиција со механичката аналитичка вага и се користи за исти видови на примена. Во рамките на соодветен мерен дијапазон, електромагнетната вага има предности над

механичката во едноставното користење, помалата осетливост на околината, побрзиот одговор, помалите димензии, и едноставното далечинско управување. Исто така, електричниот излезен сигнал U_o е погоден за запишување и/или автоматско управување. Современите ваги од овој вид имаат во себе вградени микропроцесори (т.н. микропроцесорски ваги), што во голема мера ги зголемува погодноста на примена, брзината на отчитување и точноста.



Сл. 8.15 Принциј на електромагнетна вага



Сл. 8.16 Хидраулична и пневматичка притиска келија

Методот 4. (сл. 8.16) се базира на употреба на хидраулични и пневматски притисни ќелии. Хидрауличната ќелија (сл. 8.16a) е комплетно исполнета со минерално масло и обично има преоптоварувачки притисок од околу 200 kN/m^2 (2 bar). Приведувањето на оптоварувањето (непозната сила F_i) го зголемува притисокот на маслото, што се отчитува од прецизниот манометар. Притоа, можат да се употребат електрични притисни претворачи за да се добие електричен сигнал. Хидрауличните ќелии од наведениот тип често пати се користат како стандарди за мерење на сила до 450 kN , а постојат и посебни изведби за поголеми сили (до 45 MN). Точноста е од ред $0,1\%$ од полната скала, со резолуција од околу $0,02\%$.

Во пневматската ќелија (сл. 8.16b) се користи претворач од видот млазник-плоча како засилувач. Приведувањето на силата F_i предизвикува деформација на дијафрагмата X , која создава зголемување на притисокот p_o (поради затворачкото дејство на придушувачот). Ова зголемување на притисокот влијае на површината на дијафрагмата A , произведувајќи ефективна сила F_p која се стреми да ја врати дијафрагмата во нејзината претходна положба. За која било константна F_i системот ќе постигне рамнотежа при специфичен отвор на млазникот и соодветен притисок p_o , односно статичкото однесување ќе биде:

$$(F_i - p_o A)K_d K_n = p_o \quad (8-16)$$

каде што се:

K_d - карактеристика на дијафрагмата во m/N ;

K_n - карактеристика на претворачот млазник-плоча во Pa/m .

Од изразот (8-16) притисокот p_o се добива како:

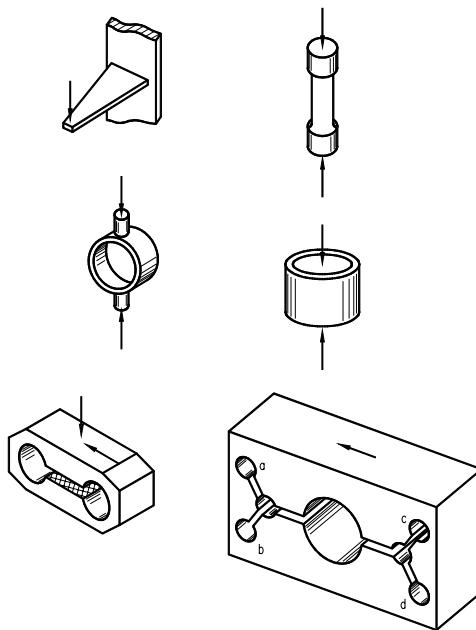
$$p_o = \frac{F_i}{\frac{1}{K_d K_n} + A} \quad (8-17)$$

Во практика, производот $K_d K_n$ е многу голем и членот $1/K_d K_n$ може да се занемари, па со доволна точност:

$$p_o = \frac{F_i}{A} \quad (8-17a)$$

Кај пневматската ќелија, типичниот притисок на воздухот за снабдување изнесува $p_s \approx 400 \text{ kN/m}^2$ и, бидејќи максималната вредност на p_o не може да го надмине p_s , соодветно е ограничена и вредноста на приведената сила, т.е. $F_i < 400 A \text{ kN}$ (каде A е површина на дијафрагмата во m^2). Комерцијалните пневматски ќелии имаат точност од околу 0,5% од полната мерна скала, а потрошувачката на воздух е од ред од околу $2,8 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Додека претходно описаните методи за мерење на сила воглавно се наменети за статички или благо променливи оптоварувања, претворачите со еластична деформација (метод 5., сл. 8.17) наоѓаат широка примена како за статички така и за динамички оптоварувања со голема фреквенција (до неколку илјади циклуси во секунда). Во основа, сите претворачи за сила од овој тип претставуваат „пружина-маса“ системи, а се разликуваат меѓу себе во геометриската форма на изведената „пружина“ (еластичен елемент) и сензорот за поместување употребен за добивање електричен сигнал.



Сл. 8.17 Еластични елементи за мерење на сила

Некои од прикажаните еластични елементи (како, на пример, паралелограмскиот елемент) се крајно неосетливи на приведување на сили или моменти во другите насоки, освен назначената со стрелка, па ваквите елементи се користат и како разложувачи на векторот на силата на соодветни координантни компоненти (определување компоненти на векторот).

Како сензори за поместување, во зависност од големината на оптоварувањето, можат да се користат различни претворачи (види поглавје 8.2), соодветно поврзани со еластичниот елемент. Особено широка примена за оваа намена нашле т.н. мерни ленти, кои посебно се разработени во едно од наредните поглавија.

8.4.2 Методи за мерење на торзионен момент и моќност

Точното мерење на торзиониот (вртежниот) момент на вратилото на некоја енергетска или работна машина е од особен интерес како за определување на самиот момент, така и како потребна големина за посредни мерења на моќноста ($P = M\omega$).

Во зависност од тоа дали се работи за енергетска машина, т.е. извор на енергија (турбина или мотор), или за работна, т.е. апсорбер на енергија (пумпа, компресор, вентилатор и сл.), моментот најчесто се определува со кочење, односно погонување на машината.

Кочењето на енергетската машина може да се изведе на повеќе начини, на пример: со триење (Prony-ева кочница), преку хидраулична виорна работа (хидраулична кочница), со генерирање на електрична енергија (електричен динамометар).

При мерењето на моментот на некоја работна машина, нејзиното погонување најчесто се врши со електричен динамометар, кој работи како мотор.

За случаи на приемни опити на енергетски и работни машини кои се директно споени со електрична машина (генератор или електромотор), моќноста со доволна точност може да се определи преку измерените параметри на електричната машина.

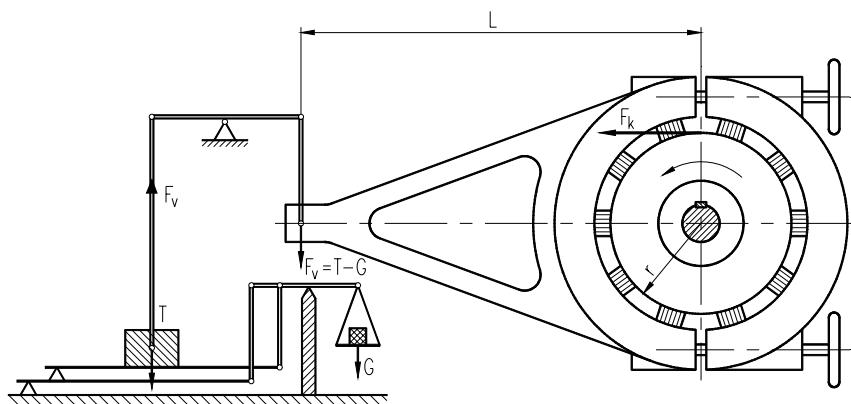
Покрај споменатите методи на кочење и гонење, за мерење на вртежен момент примена нашле и инструментите што работат на принципот на еластично усукување на вратилото (торзиони динамометри). Како што е претходно наведено, широка примена при мерењето на

моментот и моќноста има методот со мерни ленти, а особено поради интензивниот развој на електрониката.

Во литературата често се среќава називот „динамометар“, како општ за инструмент за мерење на моќност и момент. Во ова поглавје се прикажани најчесто применуваните методи и динамометри, додека методите на мерење со помош на мерни ленти посебно се разработени во наредното поглавје 8.4.3.

♦ Мерење на момент и преку триење - Прониева кочница

Еден од најстарите методи за мерење на момент е реализиран со т.н. Prony-ева кочница (шематски приказ на сл. 8.18), а кој што се базира на кочење со триење остварено со затегање на посебна облога на кочницата.



Сл. 8.18 Шема на Прониева кочница

Според сл. 8.18, по периферијата на челичен барабан (цврсто споен со вратилото) се затега облогата на кочницата, изработена во вид на папучи (гуртни) од тврдо дрво, ферода или некој друг соодветен материјал. Облогата се затега на саканата мера, така што по периферијата на барабанот со радиус r се создава периферна сила на кочење F_k , што одговара на моментот со кој е оптоварено вратилото на енергетската

машина, $M = F_k r$. Исто така, на крајот од лостот со должина L се јавува сила F_v којашто одговара на момент со ист интензитет, а може да се измери со помош на некој од методите за мерење на сила (на пример, вага со платформа или вага со нишало).

Според тоа, моментот на кочење којшто се мери ќе биде:

$$M = F_k r = F_v L = (T - G)L \quad (8-18)$$

За случај на мерења со вага со платформа (како на сл. 8.18),

$$F_v = T - G$$

каде што се:

T - додатен тег-товар за рамнотежа (тара),

G - покажување на вагата.

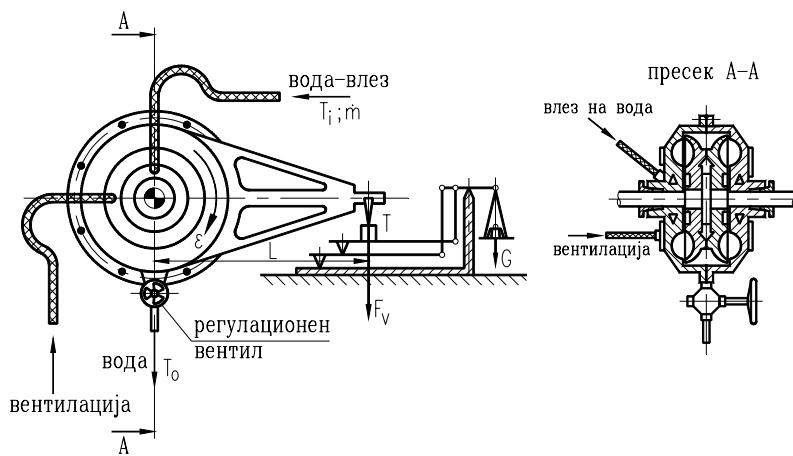
Кај Прониевата кочница целата енергија на кочење се претвора во топлина, поради што во барабанот се доведува вода за ладење. Исто така, по потреба, се изведува и систем со масло за умерено подмачкување на површината на кочење.

◆ *Хидраулична кочница*

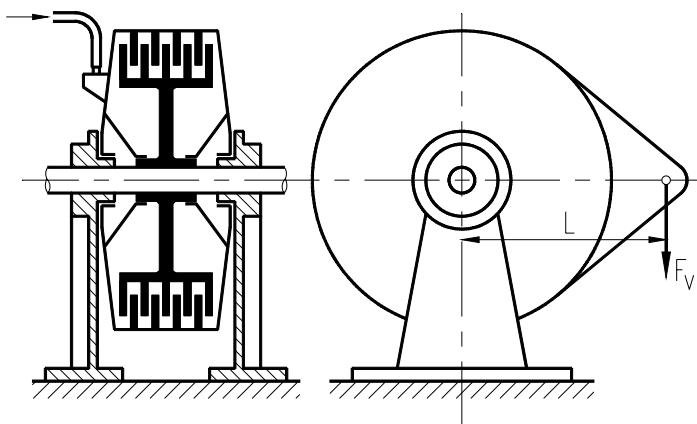
Во оваа кочница енергијата на кочење на енергетската машина се трансформира, преку хидраулична виорна работа, во топлина, којашто се одведува со вода за ладење. Хидрауличната кочница се состои од статор и ротор со лопатки, кои, во зависност од конструкцијата, можат да имаат различни облици (види сл. 8.19 и сл. 8.20). Главна цел е преку хидродинамичкиот контакт на статорот и роторот да се оствари што е можно поголемо виорење.

Во основа, можат да се разликуваат два типа на хидраулични кочници:

- конструкција во која статорот е соединет со кукиштето на кочницата (примери на сл. 8.19) и
- конструкција во која кукиштето ротира околу неподвижен статор во него (сл. 8.20).



a) Хидраулична кочница на Фроуд



б) Хидраулична кочница на Јункерс

Сл. 8.19 Хидраулични кочници со кукишите како спаѓор

Во двата случаја, потрошувачката на водата за ладење (која воедно врши трансформација на енергијата) одговара на моќноста на кочење на машината во W:

$$P \approx C(T_o - T_i) \dot{m} \quad (8-19)$$

каде што се:

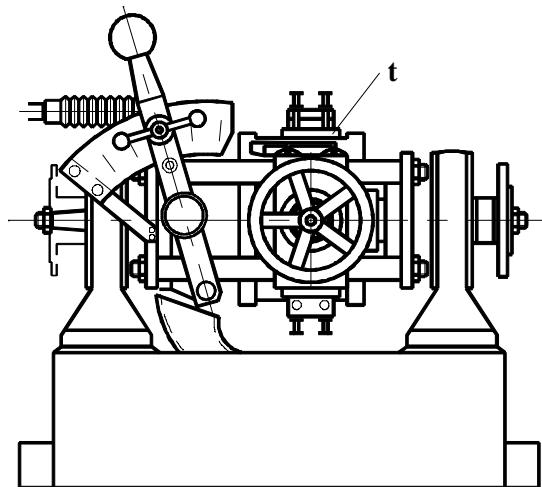
- C - специфична топлина во J/kgK;
- T_o и T_i - температура на водата за ладење на излезот и влезот во K;
- \dot{m} - масен проток на водата за ладење во kg/s.

Обично, кај хидрауличните кочници потрошувачката на вода за ладење е сса 15 до 20 lit/min за 1kW моќност, што одговара на температурски прираст од $\Delta T \approx 43$ до 57°C .

На сл. 8.19 се прикажани примери на хидраулична кочница во која кукиштето е изведено како статор со соодветни лопатки, а роторот (набиен на вратилото на машината што се испитува) се врти внатре во статорот. Во овој случај е овозможено и мерење на вртежниот момент на машината што се кочи преку реактивниот момент на кукиштето, коешто за таа цел е потпредено на посебни лежишта, околу кои истото може да се ниша. Реактивниот момент на кукиштето може да се определи преку силата F_v (на ист начин како кај Прониевата кочница), односно:

$$M = F_v L = (G - T) L$$

На сл. 8.20 е прикажана хидраулична кочница во која кукиштето е изведено како ротор, односно се врти околу неподвижен статор што е инсталиран во него. Нишањето на статорот (како и во претходниот случај) овозможува определување на реактивниот момент преку вага со која се мери силата F_v . Кај оваа кочница е овозможено и додатно кочење на ротирачкото кукиште со помош на триенje (слично како кај Прониевата кочница), со затегање на облогата t , со што се проширува нејзината област на примена и за многу мали аголни брзини.

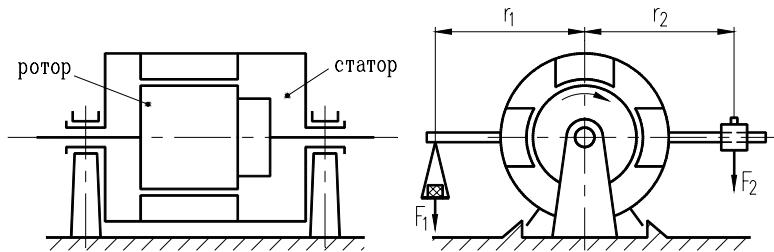


Сл. 8.20 Хидраулична кочница со ротирачко куќиште

◆ **Електрична кочница - динамометар**

Електричните динамометри спаѓаат меѓу најраспространетите инструменти за прецизни мерења на моменти и моќности на работни и енергетски машини. Најчесто, за оваа намена се применуваат електрични машини со еднонасочна струја (д-с електромотори и генератори). Нивната предност е во можноста за остварување на многу стабилна и континуална регулација на моќноста и бројот на вртежи. Во случаи кога електричната машина се користи како кочница на некоја енергетска машина (турбина или мотор), нејзиниот принцип на работа одговара на работа на електричен генератор; а доколку се испитува работна машина (пумпа, компресор и сл.), одговара принципот на работа на електромотор кој ја погонува работната машина. Во двата случаја, со помош на ваквата електрична машина (било генератор или мотор) се мери и вртежниот (торзиониот) момент на вратилото на испитуваната енергетска или работна машина, па, како заеднички назив за двете, вообичаено се среќава „електрични динамометри“ (или само динамометри).

На сл. 8.21 шематски е прикажан принципот на работа на електричниот динамометар. Како и во претходно описаните кочници и кај динамометарот е овозможено нишање на кукиштето околу лежишта со мало триење, така што, со помош на некоја вага (или друг начин, види поглавје 8.4.1), се мери силата на крајот од лостот, која ја создава реактивниот момент на статорот од електричната машина.



Сл. 8.21 Шематски приказ на електричен динамометар

Според сл. 8.21, реактивниот момент на кукиштето очигледно дека ќе биде:

$$M = F_1 r_1 - F_2 r_2 \quad (8-20)$$

Според шемата на сл. 8.21, диспозицијата на дупли лежишта овозможува да се земе во обзир влијанието на триењето во лежиштата при мерењето на моментот, бидејќи моментот на триење во лежиштата на вратилото автоматски се пренесува преку статорот и се додава на мерениот вртежен момент. Кај современите електрични динамометри, наместо тркалачки, се применуваат хидростатички лежишта за нишање на статорот, при што со погодно конструктивно решение се елиминира влијанието на моментот на триење во лежиштата на самата енергетска или работна машина и се овозможува максимална осетливост на мерниот уред. Кај помали динамометри се користат аеродинамички лежишта, во кои, наместо масло за подмачкување, се употребува воздух под притисок.

За случаи кога се работи за електрична кочница, произведената електрична енергија се одведува во регулационо коло на отпорници вклучено околу роторот или во електричната мрежа за употреба.

D-C динамометарот може да се регулира за да снабдува кој и да било момент од нула до неговата максимална инсталирана вредност, за брзини од нула до т.н. „базична брзина“ на машината. При оваа брзина, максималниот торзионен момент ја развива максималната инсталирана моќност. За брзини над базичната брзина, моментот треба прогресивно да се смалува, така што се одржува моќност помала од инсталираниот (пресметаниот) максимум. За оваа намена се употребуваат сервоуправувани динамометри, како што се: Ward- Lenard-овата група (постар тип), динамометарот со регулација на напонот на колекторот на роторот, динамоиметарот со теристорски трофазен мост и сл.

Асинхроните мотори можат, исто така, да се применуваат како електрични кочници. Притоа, примената се базира на особината на трофазниот (а-с) мотор да, доколку му е обртното поле спротивно од вистинската насока на ротација, тој со својот противмомент ја кочи испитуваната машина.

Со адаптирање на системот за регулација на фреквенцијата на а-с индукциониот електромотор, тој се уредува во динамометар (како со намена за кочење, така и за погонување) со карактеристики близки на d-c динамометарот. Во карактеристиките на ваквите а-с динамометри спаѓаат: брз одговор, флексибилна контрола, поедноставено одржување, и конзервација на енергија (дури до 85% од енергијата се враќа во а-с електричната мрежа). При практичната примена на а-с динамометарот, моментот се мери на веќе описанот начин.

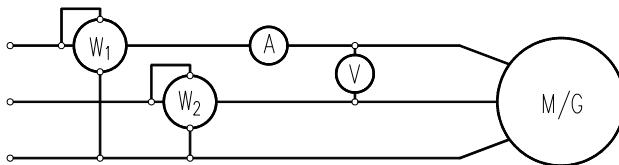
♦ *Определување на моќност со мерење на параметри на електрична машина*

Како што беше претходно кажано, оваа методологија се применува при приемни опити на енергетски и работни машини. Во овој случај моќноста на испитуваната машина, којашто е директно споена со соодветна електрична, се определува преку директно измерената електрична моќност. Притоа, се мери излезната, односно влезната моќност на електричната машина, во зависност од тоа дали се работи за генератор или за мотор. За да се определи моќноста на вратилото на испитуваната машина потребно е да се знаат и загубите на електричната машина, односно нејзиниот коефициент на корисно дејство.

На сл. 8.22 е прикажана шема за мерење на електрична моќност по методот со два ватметра (W_1 и W_2), кои, исто како и останатите инструменти (волнтметар - V и амперметар - A), се приклучени преку соодветни напонски и струјни трансформатори. Притоа, електричната моќност се определува од збирот на моќностите на одделните ватметри:

$$P_{EM} = P_{W1} + P_{W2}$$

Моќноста на испитуваната машина се определува од електричната моќност на електричната машина (P_{EM}) и нејзините соодветни загуби (во бакарот - ΔP_{Cu} , во железото - ΔP_{Fe} , загуби од триенje во лежиштата - ΔP_R и вентилациони загуби ΔP_V).



Сл. 8.22 Шема за мерење на електрична моќност

Доколку се работи за генератор, моќноста на неговото вратило ќе биде:

$$P_G = P_{W1} + P_{W2} + \Delta P_G = \frac{P_{W1} + P_{W2}}{\eta_G} \quad (8-21)$$

За случај на мерење на моќност на вратило на електромотор, таа се определува како:

$$P_M = P_{W1} + P_{W2} - \Delta P_M = (P_{W1} + P_{W2}) \eta_M \quad (8-22)$$

каде што се:

ΔP_G и ΔP_M - вкупни загуби во соодветната електрична машина (генератор или електромотор);

η_G и η_M - коефициенти на корисно дејство во генераторот или моторот. За определување на загубите, однос-

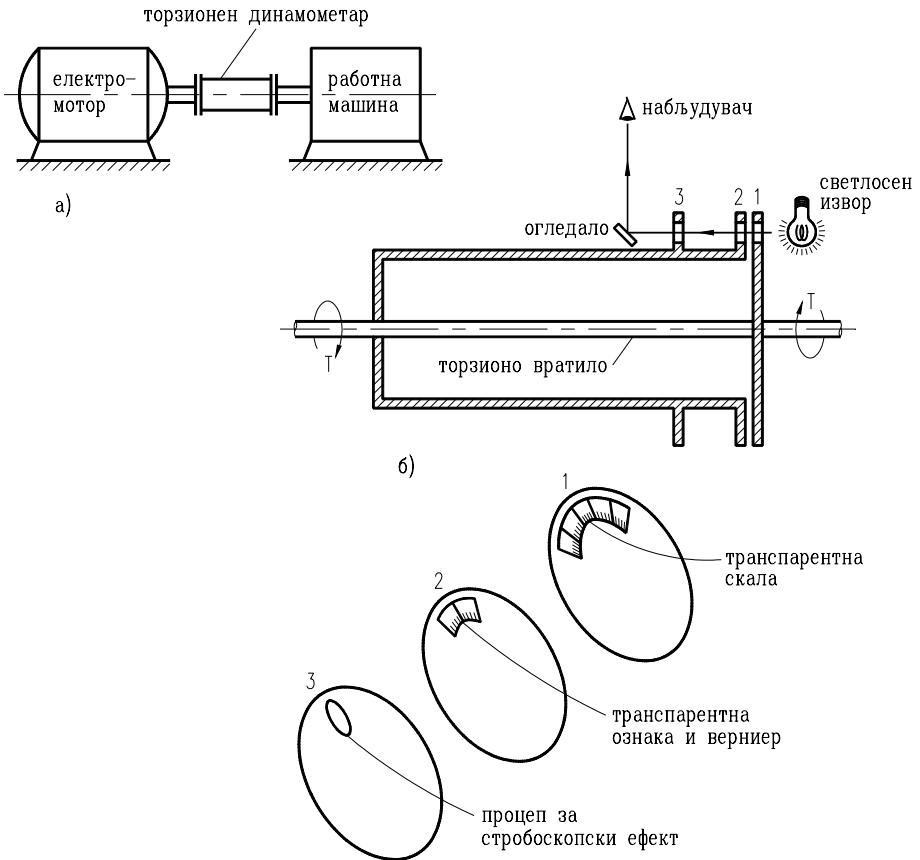
но коефициентите на корисно дејство, се користат податоци од производителот на електричната машина (најчесто во дијаграмски облик).

♦ Торзионен динамометар

Мерење на торзионен момент на вратило, преку еластична деформација на посебен дел (сл. 8.23a), може да се оствари со мерење или на вкупното движење или на едничните деформации. Во двета случаја, потребно е да се измери деформацијата (усукувањето) додека вратилото ротира.

На сл. 8.23 шематски е илустриран торзионен динамометар со истанчено торзионо вратило, коешто се вградува помеѓу спојките на вратилото на испитуваната машина. Во овој случај се користи оптички метод за мерење на дефлекцијата (усукувањето). Според сл. 8.23б, релативното аголно поместување на двете секции на торзионото вратило може да се отчита од калибрираните скали, заради стробоскопскиот ефект на прекинуваното набљудување и истрајноста на гледањето. Со замена на скалите на дисковите 1 и 2 со т.н. секторирани дискови (алтернативно чист и матиран сектор) и со воведување на електрооптички претворач наместо човечкото око, можно е добивање на верзија со електричен излезен сигнал.

Потребата за електрични излезни сигнали и за мерење на моменти кои имаат брза промена довела до развој на современите торзиони динамометри со мерни ленти, соодветно залепени на ротирачкиот дел и поврзани во мерен мост. Напојувањето на мерниот мост (изведен на самото вратило) и преносот на мерниот сигнал од него се врши било преку лизгачки прстени и четкици, или со посебен безжичен (телеметриски) систем. Методите на мерења со мерни ленти подетално се прикажани во наредното поглавие.

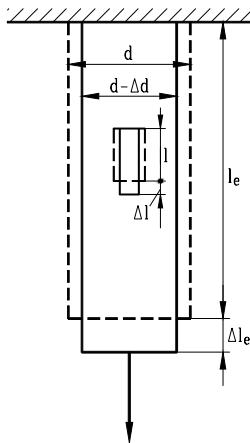


Сл. 8.23 Илустрација на динамометар со тортзионо вратило

8.4.3 Мерења со помош на мерни ленти

Од јакоста на материјалите е познато дека, за добивање на податоци за механичките напрегања на елементите на некоја конструкција, потребно е на определени места да се мерат локалните истегнувања. Овие мерења најдобро се изведуваат со мерни ленти. Тие претставуваат посебни мерни елементи кои, со помош на специјални средства, се лепат на местото каде што треба да се измери истегнувањето. На

тој начин истегнувањето на подлогата во целост се пренесува на мерната лента (види сл. 8.24).



Сл. 8.24 Илустрација на истегнување на елемент и залейена мерна лента

Мерната лента претставува отпорен давач, чиј електричен отпор се менува со промената на издолжувањето. Врската на релативната промена на електричниот отпор и релативното издолжување на мерната лента може да се изрази како:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta l}{l} = K_s \varepsilon \quad (8-23)$$

каде што се:

$\frac{\Delta l}{l}$ - релативно издолжување на мерната лента;

$\frac{\Delta R}{R}$ - релативна промена на отпорот на мерната лента;

K_s - коефициент на пропорционалност наречен фактор на мерната лента.

Зависноста (8-23) се добива со диференцирање на основниот израз за електричен отпор:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

каде што се:

ρ - специфичен отпор на материјалот;

A - површина на напречниот пресек;

l - должина на проводникот.

Притоа, факторот на мерната лента K_s се добива како:

$$K_s = \frac{dR}{\frac{R}{l}} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{dl}}{\frac{\rho}{l}} \quad (8-24)$$

Во изразот (8-24): првиот член (1) одговара на промена на отпорот заради промена на должината; вториот член (2μ) е поради промена на површината на напречниот пресек (кадешто μ претставува Пуасонов коефициент); третиот член е заради пиезоотпорниот ефект.

Од познатиот Хуков закон, релативното издолжување може да се изрази како:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} \quad (8-25)$$

каде што се:

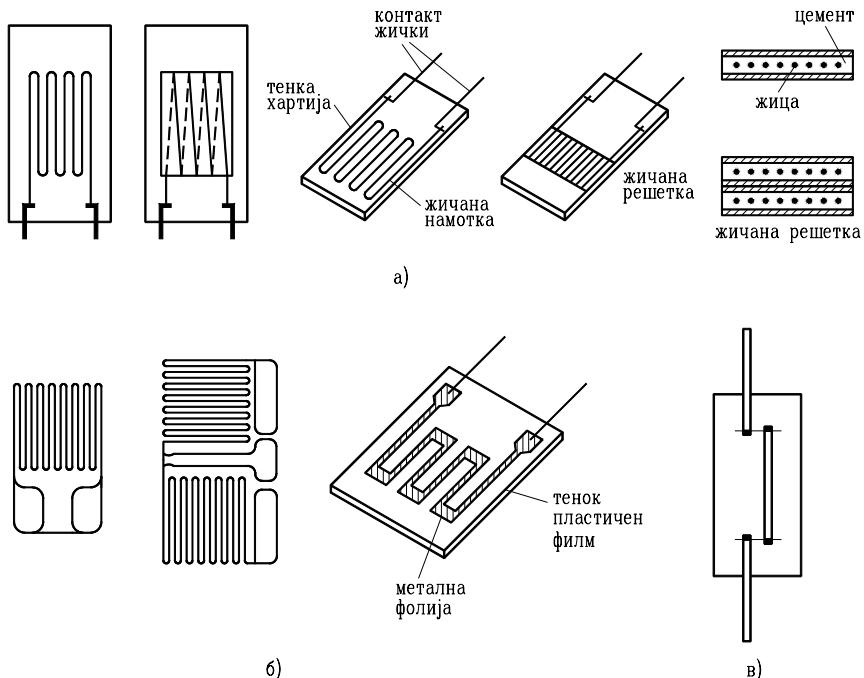
$\sigma = F/A$ - напон на истрагнување,

E - Јунгов (Young) модул.

На тој начин, според изразот (8-23), проблемот на мерење на механичкото истегнување (деформација) се сведува на мерење на промената на електричниот отпор на мерната лента. Односно, доколку се измери $\Delta R/R$, може да се определи и релативната деформација $\Delta l/l$, за познат фактор на мерната лента K_s (добиен како податок од производителот).

Притоа, релативните издолжувања на мерната лента и елементот се исти меѓу себе: $\varepsilon_s = \varepsilon_e$.

Постојат голем број видови на мерни ленти, кои во зависност од намената, се разликуваат во материјалот, големината и обликот. Всички се изведуваат така што осетливиот мерен елемент е сместен во облога (носач) од тенок специјален материјал, со што се обезбедува едноставно ракување со нив. Од широкиот дијапазон на разни видови и облици кои ги нудат производителите, на сл. 8.25 прикажани се три основни типа на мерни ленти: а) жичани, б) фолиски и в) полупроводнички мерни ленти.



Сл. 8.25 Основни видови на мерни траки

Жичаните мерни ленти (сл. 8.25a) се изведуваат од тенка отпорна жица (0,01 до 0,03 mm) поставени во т.н. меандерска форма (или намотани преку тенка изолаторска фолија) на тенок носач од изолатор. Должината на ваквите мерни ленти е од околу 5 mm па сè до неколку

сантиметри. Нивното максималното дозволено истегнување е од 0,5% до 2%. Факторот на жичаната мерна лента е обично $K_s \approx 2$.

Фолиските мерни ленти (сл. 8.25б) се состојат од тенка метална фолија (метален филм), со дебелина 0,002 до 0,01 mm, која во определена форма (во зависност од намената) се нанесува на носачот од изолатор. Тие се значително потенки од другите видови, со што се погодни за нивно инсталирање на криви површини. Се изведуваат со должини од околу 2 mm до неколку см, а нивните максимални дозволени истегнувања се 2% до 4%. K_s факторот е, исто како кај жичаните ленти, околу 2.

Полупроводничките мерни ленти (сл. 8.25в) се изведуваат од кристал на некој полупроводник (германиум или силициум). Основна нивна карактеристика е големата вредност на факторот на лентата, $K_s \leq 200$. Неповолности кај полупроводничките ленти се големата температурна зависност и повисоката цена во однос на металните ленти (жичани и фолиски).

Еден од најкрупните проблеми што се јавува при мерењата со мерни ленти е влијанието на температурата, коешто се манифестира на повеќе начини: отпорноста на лентата се менува со промена на температурата, доаѓа до температурно ширење на материјалот на кој се врши мерењето, се јавува ширење на самата мерна лента (т.е на активниот материјал, жицата или фолијата). На тој начин, промената на температурата влијае така што, за определена мерна лента и материјалот на кој таа се лепи, доаѓа до првидно истегнување; односно материјалот не е механички напрегнат, а доаѓа до промена на отпорот на лентата.

За да се смили температурното влијание, мерните ленти се изработуваат од материјали кои имаат што е можно помал температурен коефициент на промена на електричниот отпор, а покрај тоа потребно е мерната лента и материјалот на којшто таа се лепи да имаат приближно исти коефициенти на линеарно ширење. Покрај тоа, повеќето од производителите нудат мерни ленти со посебна температурна компензација, така што првидното истегнување се сведува на минимум.

При мерењата со мерни ленти многу важно е исправно да се изведе нивното лепење на мерните места. За таа цел се користат специјални лепила, чијашто точна примена ја дефинира производителот. Векот на траење на исправно залепените ленти зависи од повеќе фактори (влажност, температура, максимално истегнување и др.) и може да биде од неколку дена до неколку години. За да се обезбеди подолга употреба се изведува и нивна посебна заштита.

Мерните ленти (strain gages) се применуваат воглавно за два вида намена:

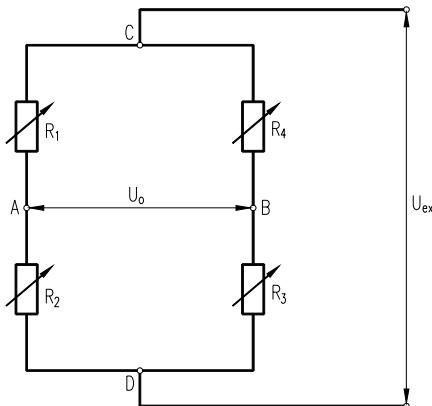
- 1) во експерименталните напонски анализи на машини и структури
- 2) за конструкција на давачи (сензори) за мерење на сила, момент, притисок, забрзување и слично.

Додека во поглавјата за мерење на притисок беше истакната нивната примена, во ова поглавје ќе бидат покажани можности за мерења на истегнувања, сила, момент на свивање и торзионен момент.

♦ *Мерења на истегнувања со помош на мерни ленти*

Промената на електричниот отпор на мерната лента при определено истегнување има многу мала вредност. Така, на пример, при реално релативно истегнување $\varepsilon = 0,1 \text{ mm/m}$ и карактеристики на лентата: $R = 120 \Omega$ и $K_s = 2$, според изразот (8-23), се добива промена на отпорот $\Delta R = 24 \cdot 10^{-3} \Omega$.

Мерењето на таките малите промени на електричниот отпор на мерната лента (ΔR) најефикасно се остварува со помош на Витстоновиот мерен мост, чијашто типична шема е прикажана на сл. 8.26.



Сл. 8.26 Мерен мост со мерни ленти

Мерниот мост се состои од четири гранки (отпори R_1 до R_4) во кои соодветно се приклучени мерните ленти. При тоа, мерни ленти можат да

бидат приклучени во сите четири гранки, а се изведуваат и комбинации со стабилни и прецизни отпорници. Мостот се напојува со константен д-с/а-с напон U_{ex} во точките С и D, а излезниот напон (напон на грешка), означен со U_o се зема во точките А и В (види сл. 8.26). Излезниот напон, особено кај мерните кола со метални ленти, е исто така мал (од неколку μV до неколку mV), па затоа најчесто е потребно негово засилување.

Од основите на електротехниката, за ваквото мерно коло, позната е врската помеѓу излезниот напон U_o и напонот на напојување U_{ex} :

$$U_o = U_{ex} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (8-26)$$

Доколку е мостот во рамнотежа ($U_o = 0$), се добива познатата зависност на отпорите:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

Ако секој од отпорите R_i се промени за ΔR_i ($i = 1,..,4$), се добива изразот за излезниот напон:

$$U_o = U_{ex} \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (8-27)$$

Согласно изразот (8-23), ако се заменат релативните промени на отпорите со соодветните релативни деформации, $\Delta R_i/R_i = K_s \varepsilon_i$, изразот (8-27) се трансформира во:

$$U_o = U_{ex} \frac{K_s}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (8-28)$$

Мерните ленти можат да бидат вклучени во мостот така, што се добиваат следниве три варијанти:

a) Мерен мост со четири активни гранки, односно т.н. полн мерен мост. Во овој случај сите отпори R_i претставуваат 4 активни мерни ленти, односно во секоја гранка е приклучена по една лента. Притоа, мерните ленти се лепат на места каде што две и две имаат исти истегнувања но

спротивен знак ($\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$, $\varepsilon_4 = -\varepsilon_3$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 = \varepsilon$), така што изразот за излезен напон ќе се трансформира во:

$$U_o = U_{ex} K_s \varepsilon \quad (8-29)$$

б) Мерен мост со две активни гранки, или половина-мост. За оваа варијанта можни се две комбинации:

- двете активни ленти трпат исто истегнување и по знак и по големина, а се приклучуваат на местата на отпорите R_1 и R_3 , односно $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$;
- двете активни ленти трпат исто истегнување по големина, но спротивно по знак. Во овој случај лентите се претставени со отпорниците R_1 и R_2 , односно $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$.

На тој начин, за варијантата со две активни ленти излезниот напон ќе биде:

$$U_o = U_{ex} \frac{K_s}{2} \varepsilon \quad (8-30)$$

Притоа, за двете комбинации потребно е строго да се внимава на температурната компензација, т.е. мерните ленти да бидат залепени на места на кои температурата е идентична. Исто така, доколку се применува мерен мост со две активни и две пасивни гранки, најдобро е и во пасивните гранки да бидат вклучени мерни ленти при иста температура.

Често пати се употребуваат мерни мостови со засилување на излезниот сигнал, во кои половината мост е реализиран со многу прецизни и стабилни отпорници, што овозможува на мерното место да се лепат само две активни ленти. Во овој случај најчесто се користи комбинацијата во која лентите трпат исти истегнувања но со спротивен знак (првата комбинација).

в) Мерен мост со една активна гранка. Оваа варијанта се применува кога нема место за лепење на другите ленти или кога истегнувањето е многу големо. Оваа комбинација е најлоша во смисла на температурна компензација, така што во секој случај е потребно соседната гранка (R_1 / R_2) да биде, исто така, мерна лента залепена на истиот предмет при иста температура.

За оваа варијанта излезниот напон ќе биде:

$$U_o = U_{ex} \frac{K_s}{4} \varepsilon \quad (8-31)$$

Потребно е да се истакне дека, особено за варијантите б) и в), значително влијание на точноста на мерењата има должината (т.е. отпорноста) на каблите за поврзување на мерните ленти со засилувачот, како и шумовите што се индуцираат во нив. Затоа, задолжително се применуваат посебни кабли со окlop, со што е можно помала должина и поголем пречник.

На тој начин, практичните мерења на истегнувањата (односно напретањата) на некој елемент се сведуваат на определување на мерењето на излезниот напон на мерниот мост, во кој се приклучени мерните ленти, при што е потребно да се знае соодветната врска помеѓу U_o и ε . Варијантата со четири активни ленти најчесто се применува, бидејќи дава најдобри резултати во поглед на осетливоста (најголем мерен сигнал) и температурната стабилност.

♦ *Мерење на сила со помош на мерни ленти*

Во поглавјето 8.4.1, како еден од методите за мерење на сила, истакнат е начинот на нејзино определување преку деформација на некој еластичен елемент (метод 5). За таа намена се применуваат претворачи со еластична деформација со најразлични облици (види сл. 8.17), со кои можат да се мерат како статички така и динамички оптоварувања. Како сензори за мерење на деформациите (истегнувањата), и овдека, широка примена нашле мерните ленти, кои на соодветен начин се лепат на еластичниот елемент.

Од досега изложеното за примената на мерните ленти, се гледа дека со нив може директно да се определат локалните деформации и напретања на елементот на чии напретнати површини се залепени мерните ленти. Од друга страна, силата што дејствува на некој еластичен елемент (види сл. 8.17), како што е познато, може да се определи индиректно преку соодветниот напон.

Како конкретен пример овдека е покажан методот на определување на сила во елемент што трпи истегнување под нејзиното дејство (на пример, определување на аксијална сила кај водните турбини). Во овој случај, позната е зависноста на силата од напонот σ :

$$F = \sigma A = \varepsilon EA \quad (8-32)$$

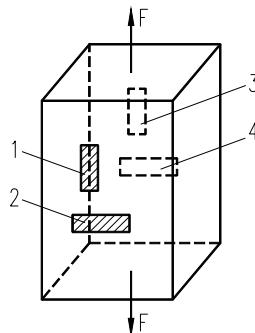
каде што се:

A - површина на напречниот пресек,

ε - релативното истегнување,

E - Јунгов модул на еластичност.

На сл. 8.27 прикажан е елемент што трпи истегнување под дејство на сила F , чијшто интензитет се определува со помош на мерења со мерни ленти, соодветно залепени на површините на елементот. Во овој случај, применета е варијантата со две активни ленти 1 и 3. Лентите 2 и 4 се пасивни, но и тие делумно учествуваат во мерењето на издолжувањето преку Пуасоновиот коефициент μ .



Сл. 8.27 Мерни ленти залепени на елементот аксијално оиштоварен со сила F

Во овој случај директно се применува општиот израз (8-28), во кој релативните истегнувања се внесени како што следи:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} = \varepsilon_3 = \varepsilon ; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\mu\varepsilon$$

ε_2 и ε_4 се определени преку, μ врз основа на смалувањето на напречниот пресек поради издолжувањето (за челик $\mu \approx 0,28$).

За конкретниот случај, со замена на дефинираните релативни истегнувања ε во изразот (8-28) се добива излезен напон:

$$U_o = U_{ex} \frac{K_s}{4} 2,56 \varepsilon$$

односно релативното истегнување:

$$\varepsilon = \frac{4}{2,56K_s} \frac{U_o}{U_{ex}}$$

На тој начин, силата што предизвикува хомогено оптоварување на истегнување на елементот од челик ќе биде:

$$F = \frac{4EA}{2,56K_s} \frac{U_o}{U_{ex}}$$

На сличен начин, може да се измери и сила која оптоварува соодветен елемент на притисок (види сл. 8.28б), при што сите четири ленти се активни.

◆ *Мерење на момент на свивање*

При мерењето на момент на свивање M_f со помош на мерни ленти се применува варијантата со четири активни гранки (варијанта *a*). Четирите активни мерни ленти соодветно се лепат на еластичниот елемент, како на сл. 8.28а.

Според варијантата *a*), истегнувањата ќе бидат:

$$|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4| = |\varepsilon|,$$

односно важи изразот (8-29):

$$U_o = U_{ex} K_s / \varepsilon /$$

односно истегнувањето се определува како:

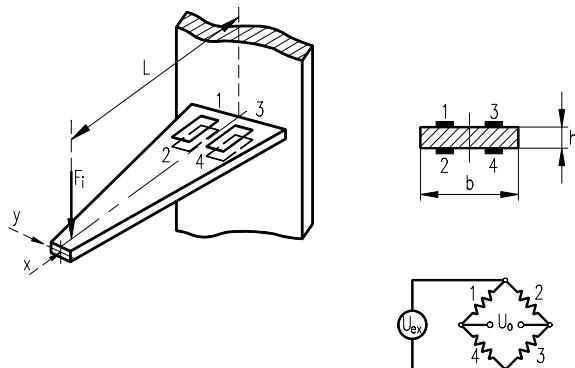
$$|\varepsilon| = \frac{U_o / U_{ex}}{K_s}$$

Врз основа на измереното истегнување ε , моментот на свивање $M_f = FL$ се определува за идеален случај, преку познатите изрази од предметот Јакост на материјалите. На пример:

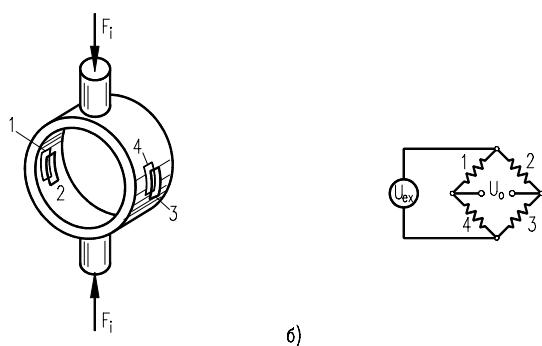
$$M_f = \frac{bh^3}{6} E\varepsilon \quad - \text{за правоаголен пресек на елементот} \\ (\text{сл. 8.28a})$$

$$M_f = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} E\varepsilon \quad - \text{за прстенест пресек на елементот.}$$

Со овој начин може да се определи и дејствувачката сила F , преку изразот $F = M_f/L$.



a)



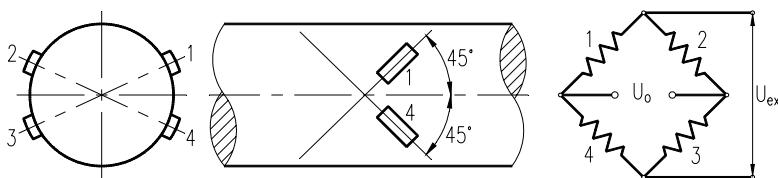
б)

Сл. 8.28 Мерни ленти за лепени на елементи оштовајан на свивање (а) и приписок (б)

◆ **Мерење на торзионен момент со мерни ленти**

Покрај тоа што бара додатна опрема за напојување и пренос на сигналот од мерниот мост, изведен на ротирачкото вратило, методот за мерење на торзионен момент со мерни ленти нашол извонредно широка примена, а особено при определувањето на моќноста на некоја енергетска или работна машина. За таа цел повеќе специјализирани фирмии имаат развиено разни методи за вакви мерења, кои имаат температурна компензација и се неосетливи на свивање или аксијални напрегања.

На сл. 8.29 прикажан е основниот принцип. Мерните ленти се лепат во спојот на Витстоновиот мост на самото вратило (или на негов посебен дел, види сл. 8.23a), точно под агол од 45° во однос на неговата оска. Струјата за напојување на мостот и излезниот сигнал се пренесуваат, до ротирачкиот дел и обратно, преку лизгачки прстени или по безжичен пат.



Сл. 8.29 Основен принцип за мерење на торзионен момент со мерни ленти

Овој принцип одговара на варијантата со четири активни мерни ленти. Лентите 1 и 3 мора да бидат дијаметрално спротивно поставени, и во овој случај тие се истегнуваат. Лентите 2 и 4 (исто така дијаметрално спротивно залепени) се збиваат. Според варијантата a) ќе важи изразот (8-29), односно:

$$U_o = U_{ex} K_s / \varepsilon / , \quad \text{т.е.} \quad |\varepsilon| = \frac{U_o / U_{ex}}{K_s}$$

Со знаење на ε , торзиониот момент M_t може да се определи, за идеален случај на напрегање, преку познатите изрази од јакоста на

материјалите. Така, на пример, за вратило со прстенест пресек (со надворешен и внатрешен дијаметар D и d), торзиониот момент ќе биде:

$$M_t = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16(1 + \mu)D} E\varepsilon$$

Секако дека, при практична примена, потребно е баждарење на инструментацијата за мерење на момент со мерни ленти, со што се вршат и соодветни корекции на горните изрази. Калибраирањето најчесто се изведува при статички услови: при $n = 0 \text{ min}^{-1}$, за спојката (или некое друго погодно место на вратилото) се прицврстува полуга со позната должина L и се оптоварува различни тегови G , со што се симулираат различни моменти $M = GL$ и се добива калибрационата зависност $M_t = M_t(U_o)$.

ГЛАВА
ДЕВЕТА

9. РЕАЛИЗАЦИЈА НА ЕКСПЕРИМЕНТ СО ПОМОШ НА КОМПЈУТЕР

9.1 Системи за аквизиција и процесирање на податоци

Во поедноставните мерни апликации, со мал број канали на податоци и со кои се врши поедноставна обработка на податоците, можат да се применат едноставни мерни системи составени од расположиви мерни елементи (сензори, засилувачи, филтери, регистри, индикатори и слично).

Меѓутоа, доколку потребите и условите за аквизиција и обработка се посложени тогаш треба да се примени некој од комерцијално расположливи DAQ системи. Постојат повеќе вакви системи за аквизиција и обработка на податоци, а нивната употреба зависи од повеќе фактори, како што се:

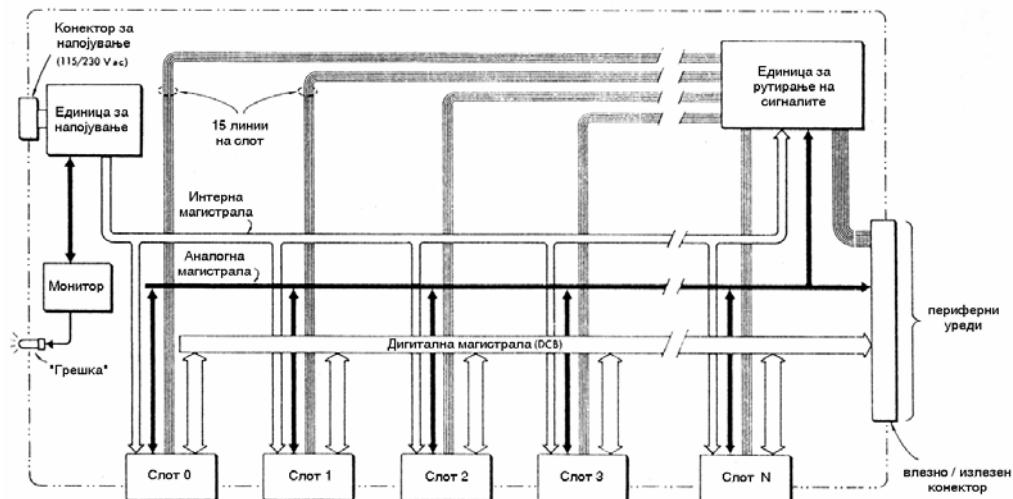
- Дали обработката на податоци е воглавно од аналоген или дигитален облик?
- Каква е брзината на промена на сигналите?
- Колкава е потребата за поврзување на системот со други системи?
- Дали системот треба да се употребува за различни процеси?
- Колкави се економските инвестиции?

За да се согледат овие прашања во понатамошниот текст ќе бидат описаны примери од некој комерцијално расположливи системи како: модуларен систем со аналогна обработка на податоци, компактен аквизиционен систем, систем базиран на инструменти и компјутеризиран аквизиционен систем.

9.1.1 Модуларен систем со аналогна обработка на податоци

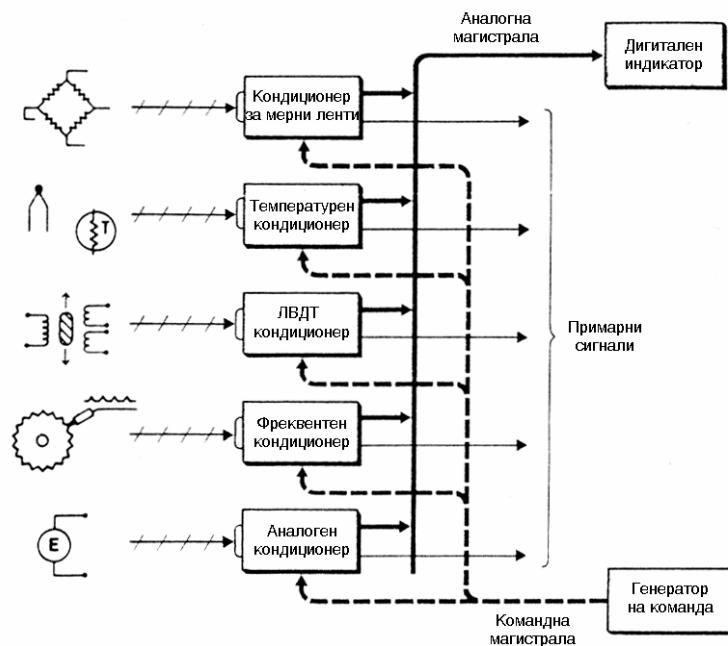
Следните слики ги покажуваат дизајнот и особините на системите, кои иако користат дигитална контролна логика и презентација на податоци, се засноваат на аналогни методи за обработка на податоци. Овие системи за аквизиција се составени од следните елементи: централна единица, модули за кондиционирање на сигналот, модули за обработка на сигналот и модули за презентација.

Централната единица (Сл. 9.1) може да прифати до 60 модули за кои обезбедува напојување и поврзување. Петнаесетина приклучоци се за слободна употреба. Другите 28 приклучоци се поделени на: интерна магистрала (обезбедување со енергија, референтен напон, временски и синхронизирачки функции), дигитална магистрала (13 проводници за пренесување на логички сигнали како адреси на модули, команди за активирање на модулите и др.), и аналогна магистрала (пренесува аналогни сигнали, од одбраниот изворен модул до модулот за презентација).



Сл. 9.1 Централна единица

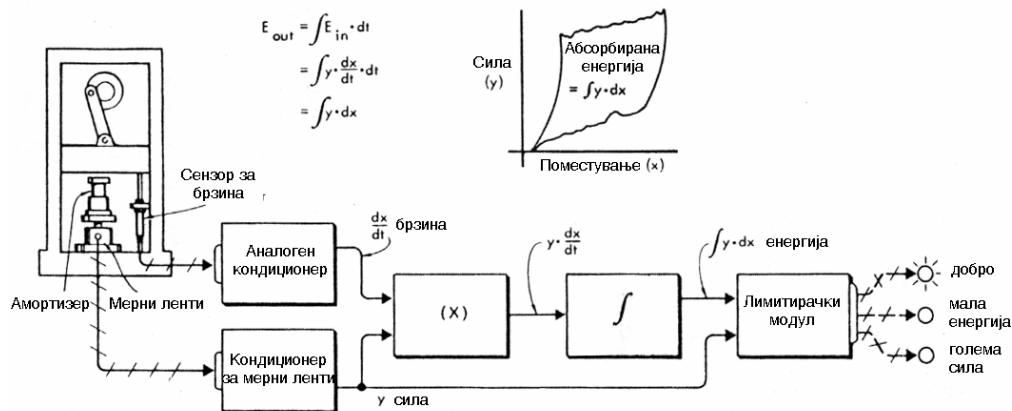
Модули за кондиционирање на сигналот (Сл. 9.2) постојат за нај различни сензори и сигнали како: мерни ленти, термопарови, термистори, фреквентни, струјни сигнали и др. Сите модули нудат по два излеза со опсег од ± 5 V: "континуиран излез на располагање" и "излез од повик" кој се пренесува на сигналната магистрала само кога модулот ќе добие команда од дигиталната магистрала. Системот од овој тип користи засилувач за секој канал. Ова е по скапо од мултиплексирани системи, меѓутоа се добиват континуални сигнали (обратно од семплицираните сигнали) во кои е содржана целата брзина на одзив од сензорот/кондиционерот.



Сл. 9.2 Кондиционирање на сигналите

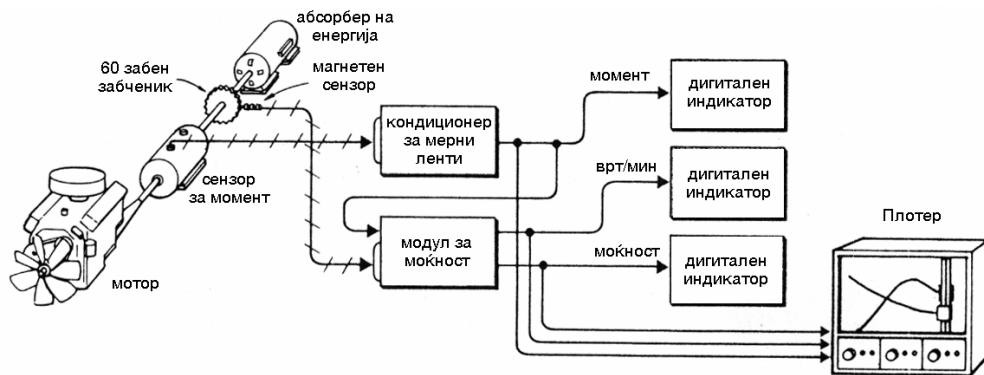
Модулите за обработка на сигналот (Сл. 9.3) извршуваат аналогни и логички функции над влезните сигнали. Овие функции може да бидат од основните како

собирање, одземање, множење, делење па до посложените како интегрирање, усреднување, логички функции и др.



Сл. 9.3 Пример на обработка на сигналите

За презентација или зачувување на податоците постојат повеќе модули како: дигитални дисплеи, аналогни плотери, ASCII модули, видео дисплеи и друго (види пример на Сл. 9.4). Видео дисплеите можат да покажат и сочуват до 100-тина канали. Обликот на презентацијата на дислејот зависи од програмот во PROM чиповите сместени во овие модули. ASCII модулите служат за поврзување со: видео дисплеите, дигиталните магнетни ленти, компјутерите и др.



Сл. 9.4 Пример за прозенетација и архивирање на податоците

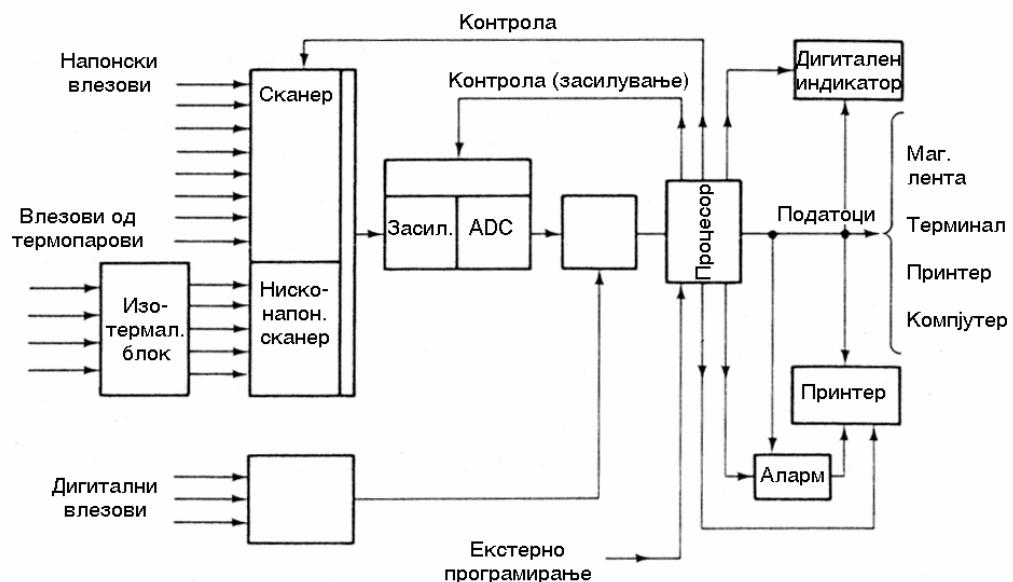
9.1.2 Компактен аквизиционен систем (Compact data logger)

Терминот компактен е описан: типичен уред за 60 податочни канали е со големина од 20*40*60 см и тежина околу 20 kg. Фреквенцијата на семплирањеично е скромна (1 до 20 канали за секунда). Иако постојат обемни функции за кондиционирање на сигналите, можноста за обработка е ограничена на едноставни функции како: линеарни трансформации, временско усреднување на еден или повеќе канали и алармирање кога сигналот ќе излезе од избраницот опсег. Сепак повеќето вакви уреди овозможуваат поврзување со компјутери, со што се овозможува сложена обработка на податоците.

Овие уреди користат микропроцесори за контрола на внатрешните операции. Функционираат на тој начин (Сл. 9.5) што сите податочни канали се мултиплексираат преку единствен засилувач и А/Д конвертор. Засилувањето автоматски се подесува за секој канал. Големината на ова засилување се внесува едноставно со помош на тастатура, преку која се внесуваат и други параметри како на пример: брзина на одбира на податоците, алармантни вредности и др. Овој пристап е доста економичен, меѓутоа не е подесен во случаи кога треба да се следат брзи промени на сигналите. Пример, ако се читаат 5 канали за една секунда, потребни се 12 s за читање на 60 канали, што е големо време за регистрирање на брзи промени на сигналите.

Кондиционирањето на сигналите е олеснето со примената на процесорот. На пример: ако кај термопаровите температурата на референтниот спој се мери со термистор, со оваа информација се вршат компензации со процесорот; исто така со процесорот се вршат пресметки на равенките за линеаризација на сигналот од термопарот; за отпорните термометри се обезбедува напонско напојување и софтверска линеаризација и т.н.

Обично презентацијата на податоците се врши со вграден дигитален дисплеј и принтер (стандардно се регистрираат: број на каналот, вредност на каналот, датум/време и аларми). Постојат и опции за поврзување со: магнетни ленти, принтери, терминал, компјутери и др. Можно е и контролирање на овие уреди со помош на компјутер.



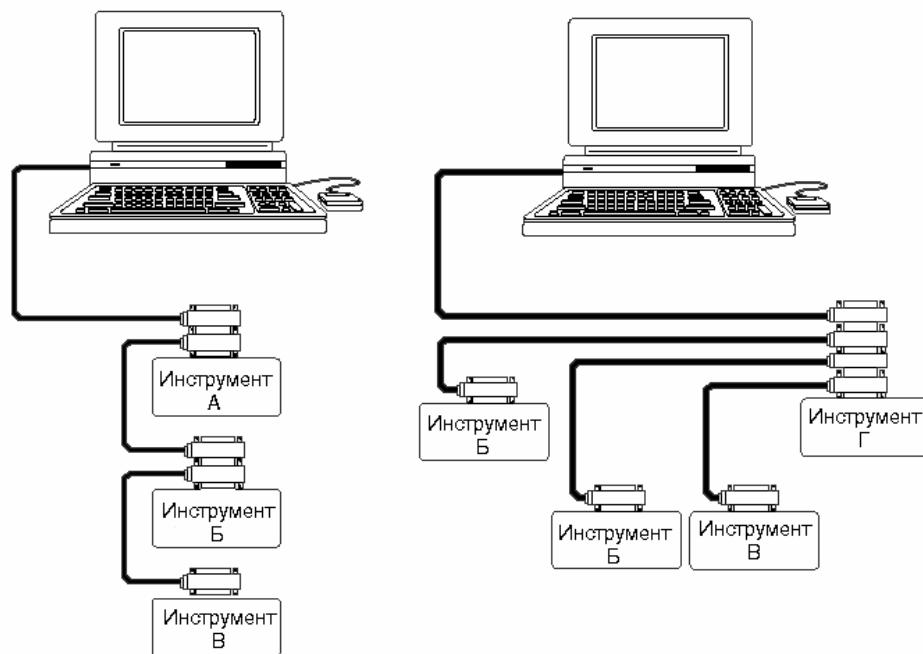
Сл. 9.5 Конфигурација на компактен аквизиционен систем

9.1.3 Систем базиран на инструменти

Модуларните системи со аналогна обработка на податоци и компактните аквизициони системи, главно се наменети за собирање на податоци од примарните сензорски елементи. Инstrumentалните аквизициони системи треба да обезбедат поврзување и заедничко користење на инструменти како: дигитални волт-метри, бројачи, дигитални термометри, генератори на сигнали и други инструменти кои во себе може да содржат сензори, но способни се и за сложени функции. Таквиот пристап

може да биде корисен во повеќе случаи. Ако се потребни 5 - 10 канали, примена на компактните аквизициони системи би била неекономична. Ако постојат веќе набавени мерни инструменти, и има потреба да се комбинираат на различни начини во различни случаи. Способноста на инструментите да се поврзуваат и да се управува со нив е зголемена со користите на микропроцесори вградени во самите инструменти. Така да конструкторите на инструменти вградуваат поврзувачки компоненти во инструментите, иако тие се наменети за самостојна употреба.

Постојат повеќе типови на такви системи меѓутоа најдобро е да се користат системите кои се означени како стандарди. Таков е IEEE-488 стандардот за дигитално поврзување на програмабилни инструменти популарно наречен GPIB (General Purpose Interface Bus). Овој индустриски стандард, официјално претставен 1975 год. е внесен во инструментите на многу произведувачи, со што се олеснува изградбата на инструментални аквизициони системи. Со користење на компјутерски картички кои се во согласност со IEEE-488 стандардот се добиваат огромни можности за контролирање на инструментите како и за презентирање, обработка и архивирање на податоците. Поврзувањето на уредите е покажано на Сл. 9.6. Максималната totalна должина на кабелот е 20 м, дозволено е приклучување на 15 уреди, а максималната должина на кабелот меѓу два уреда е 4 м.



Сл. 9.6 Конфигурации на поврзување по IEEE-488 стандардот

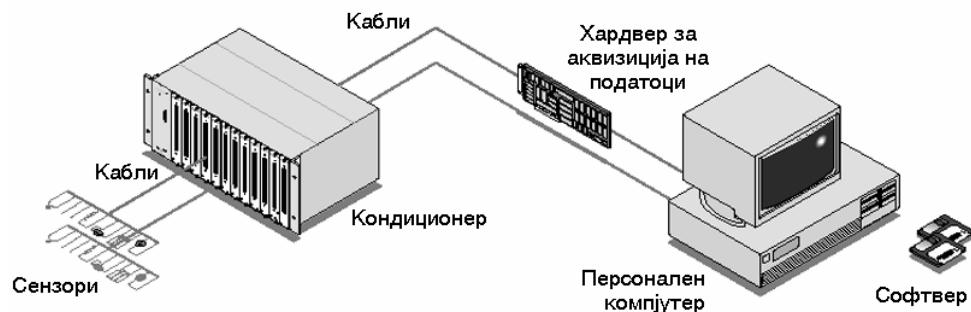
Работата со овие системи се олеснува уште повеќе со донесување на SCPI спецификацијата која го дефинира вообичаеното множество на команди за програмабилните инструменти. Со тоа се овозможува унифициран пристап од софтверска страна за користење на различни инструменти, со што се поедноставува процесот на развивање софтвер за овие системи.

9.1.4 Компјутеризиран аквизиционен систем

Системите за аквизицијата на податоци со персонални компјутери, поврзани со соодветен аквизиционен хардвер за обработка на податоци при разни лабораториски испитувања, мерни тестирања и автоматизација на процеси и операции, наоѓаат широка примена. Овие системи може да бидат изведени како специјализирани за одредена област на примена, или како отворени системи со можност за нивна апликација во различни услови (види Сл. 9.7).

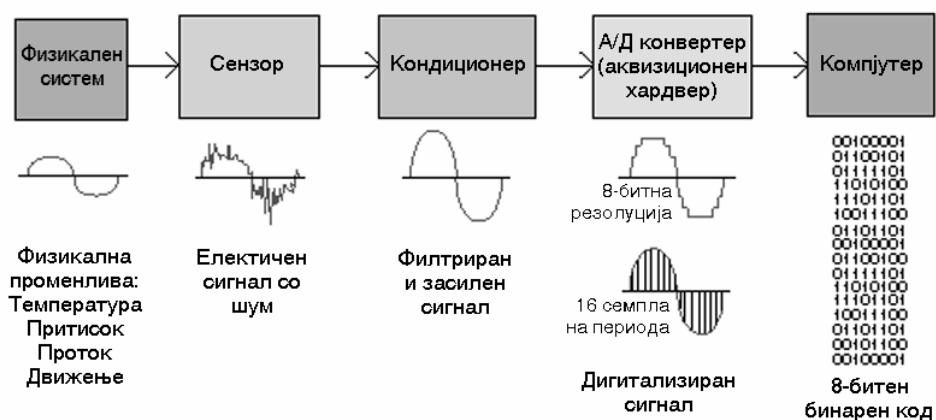
.Заради својата флексибилност во апликацијата за различни намени, отворените системи нашле поширока примена, како во лабораториски, така и во индустриски услови. Главни предности на овие системи се:

- Флексибилност при употреба за различни процеси,
- Едноставно поврзување со други аквизициони системи и компјутерски мрежи,
- Лесно архивирање, обработка и визуелизација на податоците.



Сл. 9.7 Елементи на типичен компјутеризиран аквизиционен систем

Главната трансформација на сигналите, во отворениот компјутеризиран аквизиционен систем е прикажана на Сл. 9.8.



Сл. 9.8 Трансформација на сигнали

9.2 Функционални елементи на компјутериран аквизиционен систем

Компјутерираните аквизициони системи можат да се сретнат во различни конфигурации, меѓутоа во основа генералната конфигурација на еден компјутериран аквизиционен систем се состои од следниве главни елементи и функционални делови (Сл. 9.7):

- Сензори,
- Кондиционери (нормализатори) на сигналот,
- Хардвер (картичка) за аквизиција на податоци,
- Персонален компјутер,
- Кабли,
- Софтвер.

Во понатамошното излагање ќе бидат описаны основните функции и карактеристики на наведените елементи на еден типичен DAQ систем.

9.2.1 Сензори и трансмитери

За да може големините од процесот кој се следи да се регистрираат со аквизициониот хардвер, тие треба да се претворат во стандардни електрични големини (на пример напон: од 0 до 10 V, од 0 до 20 V, од -5 до 5 V, или струја: од 0 до 20 mA, 4 до 20 mA). Значи потребни се инструменти кои ќе вршат електрични мерења на неелектрични големини. Предностите на инструментите за електрични мерења, во основа изложени во поглавјето 3.5, можат да се систематизираат како: можност за далечински пренос на податоците, голема прилагодливост, голема точност и осетливост, можност за едноставно и големо засилување, голема сопствена фреквенција, можност за едноставна презентација и архивирање на сигналите и др.

Според дефинициите во поглавјето 3.5, инструментите за електрични мерења на неелектрични големини се составени од два основни дела; сензор (давач) и трансмитер (нормализатор на сигнал).

Терминот сензор (sensor), или претворач (transducer), се употребува за елементите со функција на примарен сензорски елемент (види Сл. 3.2). Сензорот е основен елемент на мерното коло. Во него се врши трансформација на мерената неелектрична големина во соодветна примарна електрична големина (отпор, капацитет, напон, струја и др.).

Во поглед на трансформацијата на енергијата, сензорите (претворачите) генерално се класифицирани како активни и пасивни. Компонента чија излезна енергија е снабдена потполно, или скоро потполно, од нејзиниот влезен сигнал, е позната како пасивен сензор. Активниот сензор има дополнителен извор на енергија, којшто го снабдува најголемиот дел од излезната енергија, додека влезниот сигнал снабдува само незначителен дел. Во претходните глави презентирани се карактеристични сензори за електрични мерења на неелектрични големини, кои најчесто се среќаваат во струјнотехничките мерења, како и основните електрични кола за нивно поврзување.

Излезниот сигнал од сензорот (примарната електрична големина: напон, струја, отпор и слично) потребно е соодветно да биде обработен, со цел да се обезбеди сигнал погоден за DAQ хардверот. Односно, без разлика дали се работи за активен или

пасивен сензор, потребна е соодветна обработка на излезниот сигнал, со цел да се добие квалитетен сигнал со високо ниво за DAQ картичката.

Трансмитерот врши обработка на примарната електрична големина и ја претвора во нормализирана електрична големина (големина која ќе може да биде регистрирана од аквизициониот хардвер). Трансмитерот ја обавува функцијата на варијабилниот претворувачки и варијабилниот манипулационен елемент (види Сл. 3.2). Во себе содржи хардверски (физички) елементи како што се: електрични уреди за засилување, филтрирање, линеаризација и друго.

Во поголемиот дел од совремната литература од оваа област (книги и каталоги), терминот трансмитер се користи за уред составен од сензор и нормализатор на сигнал, и најчесто се изведува како единствен компактен мерен уред. Во тој случај, под нормализатор ќе се подразбираат елементите (содржани во ваквиот мерен уред) со функција на нормализирање на примарната електрична големина добиена од сензорот.

Квалитетот на претворањето на мерената големина во примарна електрична, кај сензорите и трансмитерите во основа се карактеризира со нивната линеарност, осетливост, стабилност, точност и резолуција:

- Линеарната карактеристика укажува на линеарна зависност меѓу влезот и излезот од сензорот. Нелинеарната карактеристика се компензира (претвора во линеарна) со помош на електронски нормализатори (во кондиционерите) или дигитално процесирање (со компјутерот).
- Осетливоста на сензорот претставува карактеристика со која се покажува големината на промена на излезот од промена на влезот во сензорот.
- Стабилноста ја покажува способноста на сензорот да не ја менува својата карактеристика со текот на времето.
- Точноста најчесто се изразува како релативната грешка, со проценти во однос на целиот опсег на покажување на инструментот.

При избор на сензорот/трансмитерот треба да се провери неговото влезно подрачје (опсег за кој сензорот е функционален и дава гарантиран излез) и карактеристиката на излезниот сигнал (големина на напон, струја, аналоген или дигитален сигнал). Зависно од карактеристиките на параметрите на процесот, аквизициониот хардвер, точноста на приберените податоци, начин на поставување на сензорот се избира сензор кој најповеќе одговара за дадениот аквизиционен систем.

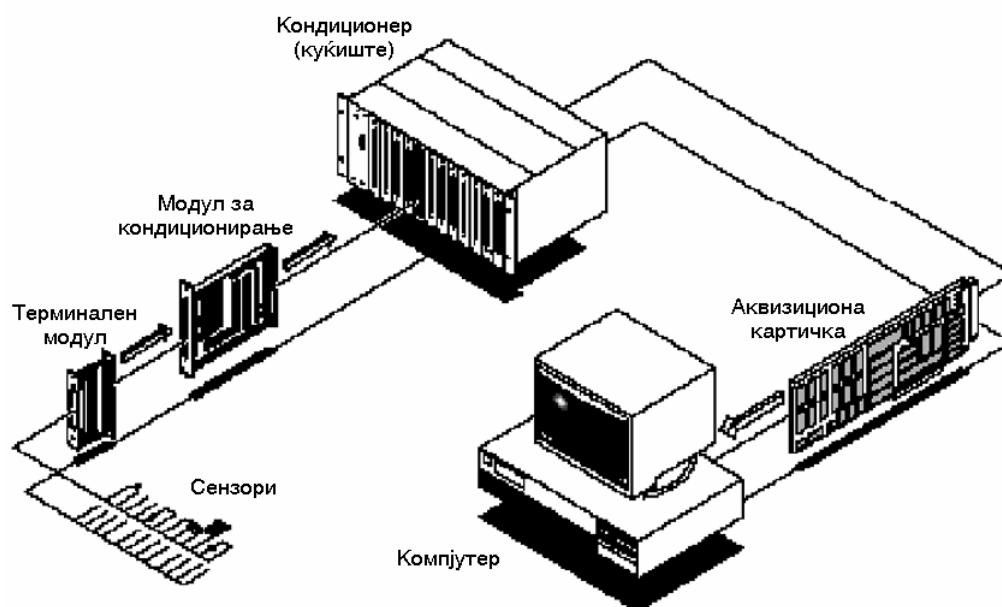
Уредите кои ја имаат функцијата на нормализирање на сигналите од повеќе сензори и трансмитери во еден аквизиционен систем често се нарекуваат кондиционери (види Сл. 9.7). Кондиционерите вршат и посложени функции за целосната работа на еден аквизиционен систем на податоци. Ако се применуваат трансмитери кои на излезот даваат нормализирани електрични сигнали, и при тоа нема опасност од оштетување на аквизициониот хардвер, истите можат да се поврзат директно со аквизициониот хардвер (во тој случај, нема потреба од кондиционерот на Сл. 9.7).

9.2.2 Кондиционери

Аквизициониот хардвер (картичка) на својот влез прима сигнали од стандарден тип и во стандардни опсези. Најчесто тоа се напонски сигнали (дигитални и аналогни) во соодветен опсег; на пример: од 0 до 5 V, од 0 до 10 V, од -5 до 5 V.

Електричните сигнали на излезот од сензорите се прилагодуваат и подобруваат за влез во аквизициониот хардвер со помош на уреди наречени кондиционери. Нивната функција е: засилување на слабите сигнали, филтрирање на сигналите, изолација меѓу сензорите и аквизициониот хардвер, напојување на пасивните сензори, линеаризација на сигналите, трансформација на струјните сигнали, комплетирање на мерните мостови, температурна компензација, мултиплексирање.

Сите овие функции, секоја посебно или неколку заедно, најчесто се имплементирани во модули кои се вградуваат во кондиционерот по потреба (Сл. 9.9). Постојат модули кои претставуваат празни плочки за монтирање на електрични компоненти со кој се создават електрични кола за кондиционирање на сигналите. Терминалните модули обезбедуваат стандардни приклучоци за поврзување со сензорите, заштитен (од електрични влијанија) простор за лесно додавање на отпорници за мерење на струја и други мерни кола, температурни сензори за температурна компензација на термопаровите и слично.



Сл. 9.9 Аквизиционен систем со кондиционер со модули за кондиционирање

Без поголемо детализирање, во ова поглавје описаны се главните функции на еден кондиционер, како што следи:

◆ Главни функции на кондиционерите

• Засилување

Засилувањето надвор од аквизициониот хардвер и поблиску до изворот на сигналот (сензорот), може да ја подобри мерната резолуција и ефикасно да ги намали ефектите на шумот.

Бидејќи влезниот опсег на аквизициониот хардвер е константен, со засилување на слабите сигнали во тој опсег, се подобрува мерната резолуција при аналогно дигиталната конверзија (независно од тоа дали засилувањето е со аквизиционата картичка или со кондиционер).

Многу сензори даваат напонски излезен сигнал од ред на миливолти или дури и микроволти. Со засилување на овие слаби аналогни сигнали директно на аквизициониот хардвер се засилуваат и шумовите собрани од проводниците и компјутерот. Едноставен метод за поништување на ефектите од шумот е да се засилат сигналите што е можно поблиску до изворот, со што се подига сигналот над нивото на шумот од проводниците и компјутерот.

• Филтрирање и усреднување

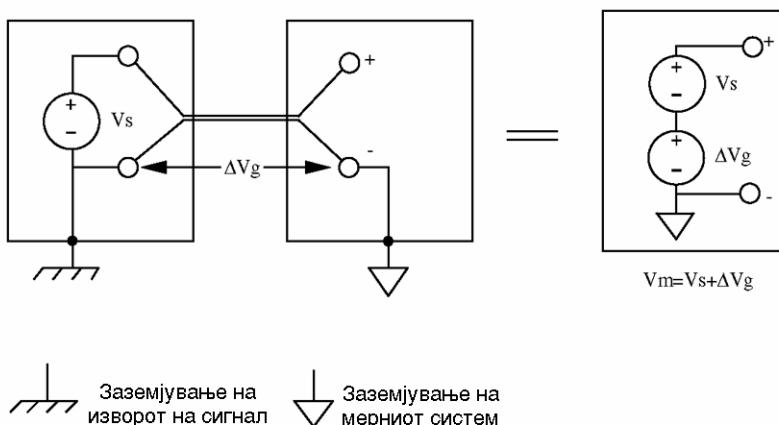
Филтрирањето ги елиминира несаканите сигнали од сигналот кој се мери. Повеќето од уредите за кондиционирање имаат нископропусни филтри (од 4 Hz и 10Hz) за да се елиминира шумот пред сигналот да влезе во аквизициониот хардвер.

Софтверското усреднување е едноставна и ефикасна техника на дигитално филтрирање на прочитаните вредности. На пример, за да се добие еден податок се читаат и усреднуваат 100 точки. При аквизиција на податоци од процес каде параметрите се менуваат споро, усреднувањето е многу ефективна техника на филтрирање на шумот.

• Изолација

Неправилното заземување на аквизициониот систем е најчеста причина за проблеми при мерењето и оштетувања на аквизициониот хардвер. Изолираниите кондиционери можат да ги спречат овие проблеми со пропуштање на сигналот од изворот (сензорот) до мерниот уред (аквизициона картичка) без галванска или физичка врска.

Во несиметричните-референтни мерни системи (види Сл. 9.10) измерениот напон V_m , е сума од напонот на сигналот V_s и потенцијалната разлика ΔV_g (напон на средна вредност) која постои измеѓу заземувањето на изворот на сигнал и заземувањето на мерниот систем. Ако се користат диференцијални влезови може да се потисне напонот на средна вредност, обично до 12 V. Сепак, поголема разлика на потенцијалот во заземувањата и струи во земјениот круг, ќе го оштетат аквизициониот хардвер.



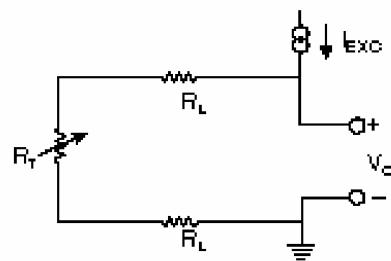
Сл. 9.10 Поврзување на заземјен извор на сигнал со референчен мерен систем

Ако не може да се одбегне користење на заземјувањето, се користат изолирани кондиционери кој ги прекинуваат земјените кругови и ги потиснуваат големите напони на средна вредност.

Вообичаените методи за изолирање на електричните кола користат оптички, магнетни или капацитивни изолатори. Магнетните и капацитивните изолатори го модулираат сигналот со претворање на напонот во фреквенција. Фреквенцијата може да се пренесе низ трансформатор или кондензатор без директна физичка врска, пред да се претвори повторно во напон.

• Напојување

Уредите за кондиционирање може да ги снабдуваат сензорите со побудна енергија и тоа во вид на напон или струја. На пример, мерните ленти се отпорни елементи во мерниот мост, за кои често се потребни кола за комплетирање на мерниот мост и побуден напон, што може да се обезбедат од уредот за кондиционирање. Меѓутоа, за некои сензори, како на пример отпорните термометри (Сл. 9.11), потребен е струен извор кој ја трансформира промената на отпорот во излезен напон. Во случај сензорот да доаѓа со свој струен извор нема потреба за напојување од кондиционерот.



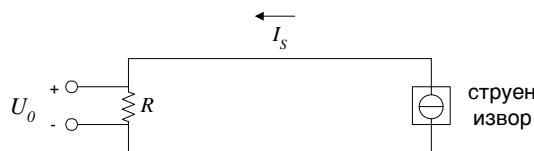
Сл. 9.11 Струен извор за мерење со отворен термометар

- **Линеаризација**

Многу сензори, како на пример термопаровите, имаат нелинеарен одзив од промените на големините кој ги мерат. Со помош на уредите за кондиционирање и аквизициониот софтвер се овозможува да во аквизициониот хардвер влезе напонски сигнал кој е во линеарен однос со промената на мерената големина.

- **Трансформација на струјните сигнали во напонски**

Во последно време, најголем број од производителите, нудат сензори кои на излезот даваат струјни сигнали, обично од 4 до 20 mA или од 0 до 20 mA. Сензорите/трансмитерите со струјни сигнали наоѓаат се поширока примена, поради тоа што се помалку осетливи на пречките од околните шумови, падовите на напон и зголемувањето на отпорот на проводниците (каблите) за нивно поврзување со аквизициониот хардвер. Бидејќи DAQ картичките, најчесто имаат напонски влез, кондиционерите треба да ги конвертираат струјните сигнали во напонски. Наједноставен начин на таква трансформација е со спроведување на струјниот сигнал низ отпорник, како на *Сл. 9.12*.



Сл. 9.12 Трансформација на струјниот сигнал во напонски

Падот на напонот $U_0 = I_s \cdot R$ што се добива кога струјата со јачина I_s тече преку отпорникот со отпор R , се приклучува на влезот во аквизициониот хардвер. Вредноста на отпорот се бира зависно од напонскиот опсег. Отпорникот треба да е високо-прецизен со низок температурен коефициент.

Пример: Ако се користи отпорник со карактеристики: 249Ω , 0.1% и $5 \text{ ppm}^{\circ}\text{C}$; при струен излез од сензорот (струен извор во електричното коло на *Сл. 9.11*) од 4 до 20 mA, ќе се добие напонски излез од 0.996 до 4.98 V.

- **Кондиционирање на дигитални сигнали**

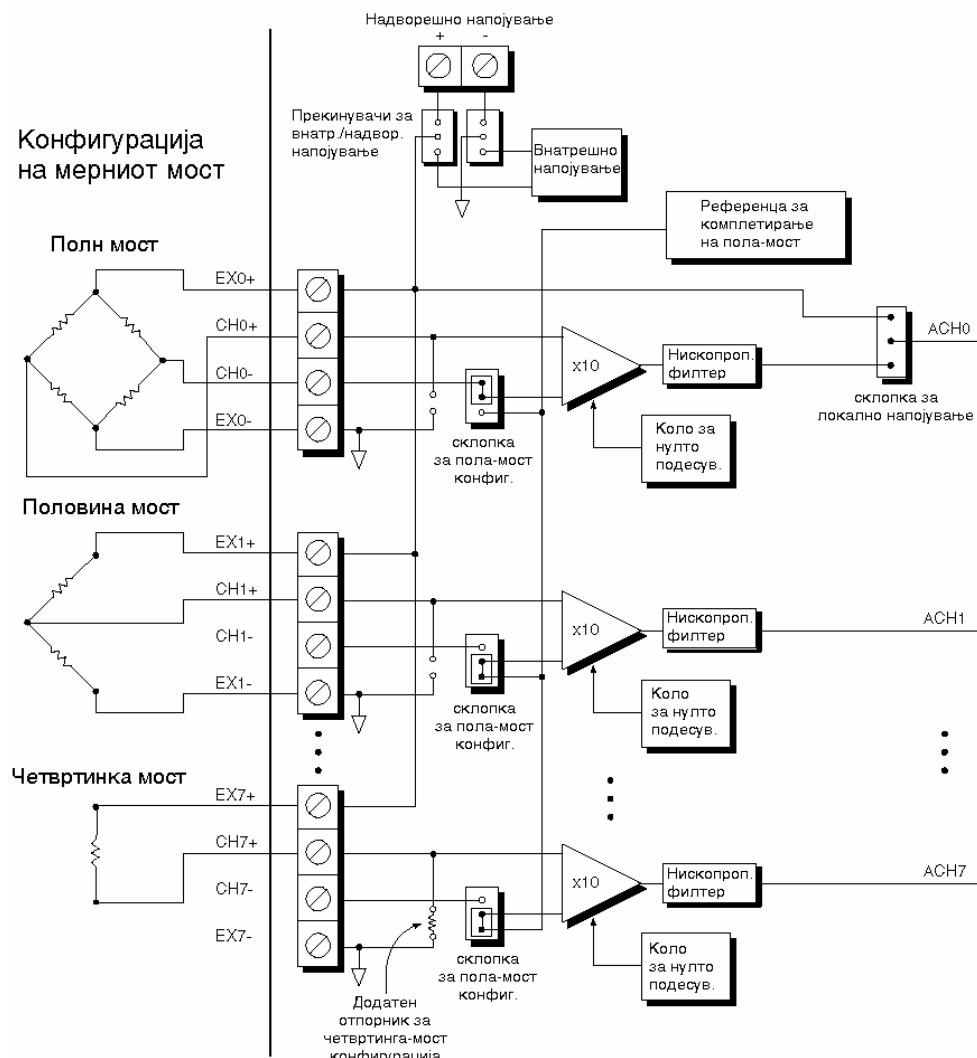
Обично, трансмитерите со дигитални излезни сигнали не се поврзуваат директно на аквизиционата картичка, без некој вид на изолација, поради можната појава на големи напонски пикови. Некои кондиционери, оптички ги изолираат дигиталните влезно/излезни сигнали со што се избегнува оштетување на аквизициониот хардвер. Како пример на трансмитери со дигитални влезно/излезни сигнали, може да се наведе нивната примена при контролирата на електромеханички или полупроводнички релеа; односно, управувањето со високо-напонски уреди како: мотори, сиалици и друго. При тоа, полупроводничките релеа може да се користат за да се прифатат високо-напонските сигнали и претворат во дигитални.

- **Мултиплексирање**

Една типична аквизициона картичка има 8 до 16 аналогни влезови и 8 до 24 дигитални влезно/излезни канали. Со вградување на мултиплексер во уредите за кондиционирање бројот на овие канали може значително да се зголеми. Бројот на дигиталните канали може да се зголеми за стотици, дури и ильади. Аналогните мултиплексери користат т.н. полупроводнички или релејни префлувачи за секвенционално сканирање на повеќе аналогни влезови преку еден влезен канал од аквизиционата картичка.

- **Комплиетирање на мерните мостови**

Мерењето на малите промени на електричниот отпор на мерните ленти (и други сензори) нај ефикасно се остварува со помош на мерните мостови. За едноставно поврзување на мерните ленти, модулите за кондиционирање овозможуваат комплиетирање на мерните мостови. Со овие модули се обезбедува и почетен нулти напон на мерниот мост. Типичен пример на еден ваков модул за поврзување на мерни ленти, што може да се вгради во кукиштето на кондиционерот (види Сл. 9.9), прикажан е на Сл. 9.13.

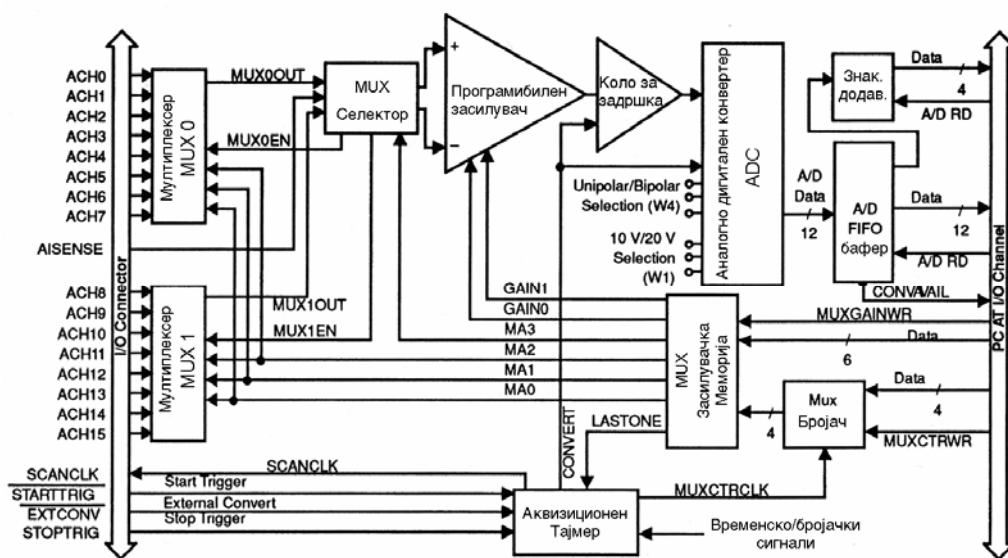


Сл. 9.13 Блок дијаграм на модул за поврзување на мерни ленти

9.2.3 Хардвер за аквизиција на податоци - аквизициона картичка

Нај чест облик на аквизициониот хардвер е во вид на картичка (види Сл. 9.9) која се вградува во компјутерот на неговата магистрала со што се постига лесно инсталирање и брза комуникација со компјутерот. Во следниот текст под аквизиционен хардвер ќе се подразбира аквизициона картичка.

Главна функција на аквизициониот хардвер е да го прифати аналогниот напонски сигнал од сензорите или кондиционерот, да го трансформира во дигитален облик (дигитализира) и да го предаде на компјутерот за архивирање или понатамошна обработка. Ова се остварува со електронски кола (Сл.9.14) во кои аналогните влезови се одбираат со мултплексер и се пропуштаат низ програмабилен засилувач, коло за задршка и Unipolar/Bipolar Selection (W4) 10 V/20 V Selection (W1). Аналогно-дигиталниот конвертер (ADC) го претвора сигналот во цифри и го дава знак и додаток. А/D FIFO бафер го складира податоците и ги испорачува на PCAT I/O Channel.



Сл.9.14 Електронско коло за аквизиција на аналогни сигнали

Освен овие функции во аквизициониот хардвер се вградуваат и компоненти за: генерирање на аналогни сигнали, примање и генерирање на дигитални сигнали, временско-бројачки функции, алармирање, комуникација со надворешни уреди и др.

Според тоа, најважните елементи, функции и параметри на аквизициониот хардвер, можат да се систематизираат како што следи:

- **Аналогни влезови**

Карактеристиките на аналогните влезови ги покажуваат способностите и точноста на аквизициониот хардвер.

Основни карактеристики за било кој аквизиционен хардвер се:

- број на канали,
- брзина на одбирање (семплирање),
- резолуција и
- влезен опсег.

Бројот на влезните аналогни канали се означува за единечните и диференцијалните влезови, на картичките кои ги имаат двата типа на влезови.

Единечните (несиметрични) влезови се поврзуваат на заедничка точка за заземјување. Нереферентните единечни влезови се поврзуваат со пинот од инструменталниот засилувач AISENSE, а не со заземјувањето. Потенцијалот на влезот AISENSE може да се разликува од потенцијалот на заземјувањето. Овие влезови обично се користат кога влезните сигнали се со напони поголеми од 1 V, проводниците од изворот на сигнал (сензорот) до влезот во аквизициониот хардвер се кратки (< 4.5 m), и сите влезни извори на сигнали можат да се поврзат на заедничко заземјување.

Ако сигналите не ги задоволуваат овие услови, треба да се користат диференцијални влезови. Во диверенцијален или нереферентниот мерен систем ниеден од влезовите не е рефериран на заедничко заземјување.

Идеален диференцијален мерен систем е овој, кој ја регистрира потенцијалната разлика помеѓу двата краја, влезовите (+) и (-). Секој напон измерен во однос на заземјувањето од инструменталниот засилувач, присутен во двата влеза од засилувачот го нарекуваме напон на средна вредност (common-mode voltage). Терминот опсег на напонот на средната вредност ја покажува способноста на аквизиционата картичка, во диференцијален режим на работа да го отфрли напонот на средна вредност; во тој случај грешките од шум се намалуваат поради потиснување на шумот, собран од двата проводника, кој се индуцира во напонот на средна вредност.

Брзината на семплирање (одбирање) покажува колку често се вршат AD (аналогно-дигитални) трансформации. Со побрзо семплирање се добиваат повеќе податоци за сигналот, од кои се создава подобра слика за оригиналниот сигнал. Брзината на семплирање мора да е доволно голема за да може, од прибериените точки, да се добие реална слика за сигналот.

Со цел да се оствари што е можно пооптимално семплирање, се применуваат соодветни методи на семплирање. Овдека се наведени само некои од нив:

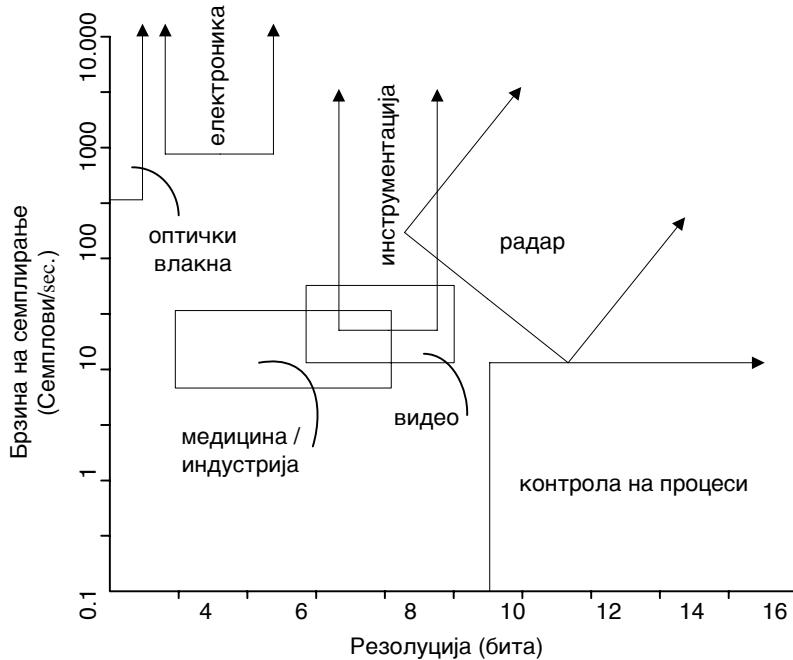
Кога се прибираат податоци од повеќе влезни канали мултиплексерот ги спроведува сигналите од секој канал, поединечно, кон засилувачот и AD конверторот (ADC). Овој метод познат како континуално сканирање, е многу поефтин од користење на посебен засилувач и ADC за секој влезен канал.

Во случај да се потребни вредностите на каналите во исто време, потребно е симултано читање на каналите (симултано семплирање). Аквизициониот хардвер способен за симултано семплирање користи додатно електронско коло, за секој канал, за задржување на вредноста на електричниот сигнал во определен временски рок. Понатаму мултиплексерот ги спроведува сигналите од секој канал, поединечно, кон засилувачот и ADC.

Вообичаена техника за мерење на повеќе сигнали со еден аналогно дигитален конвертор (ADC) е мултиплексирањето. Мултиплексерот одбира канал и го спроведува до ADC за дигитализација, потоа се префрлува на друг, итн. Бидејќи еден ADC семплира повеќе канали, ефективната брзина на семплирање за секој посебен канал, се намалува пропорционално со бројот на канали кои се семплираат. Како пример, ако една аквизициона картичка има брзина на семплирање од 1.25 MS/s, за 10 канали ефективната брзина на семплирање ќе изнесува 125 kS/s на канал.

Бројот на битови кои се добиваат од ADC (при трансформација на аналогната вредност во дигитална) се нарекува резолуција. Колку е поголема резолуцијата, толку е поголема поделбата на влезниот напон и осетливоста на промена на напонот.

Потребната резолуција и брзина на семплирање зависат од конкретните услови на примена на аквизицијата. Како пример, на Сл.9.15, дадени се податоци за брзината на семплирање и резолуцијата во зависност од апликацијата на соодветниот аквизиционен хардвер.



Сл.9.15 Резолуција и брзинана семплирање во зависност од апликацијата

Влезниот опсег (или само опсег) го означува минималниот и максималниот напонски влез во ADC кој дава точен кодиран излез. Повеќефункционалните аквизициони картички нудат избор на опсегот (пример: од 0 до 10 V, од -10 V до +10 V, од -5 V до +5 V) така да со една картичка се читаат сигнали со различни напонски нивоа. Со оваа флексибилност можно е подесување на влезниот опсег од ADC така да се искористи резолуцијата на ADC за поточно мерење на сигналот.

Опсегот, резолуцијата и засилувањето на аквизициониот хардвер ја определуваат најмалата приметлива промена на напонот. Оваа промена на напонот преставува 1 LSB (Least Significant Bit или Најмалку Важен Бит) од дигиталната вредност, и често се вика кодна ширина. Идеалната кодна ширина се добива со делење на напонскиот опсег со засилувањето и максималната големина на излезниот код. Пример, за 16 битна аквизициона картичка, со напонски опсег од 0 до 10 V, и засилување од 100, идеалната кодна ширина би била:

$$\frac{10 \text{ V}}{100 \cdot 2^{16}} = 1.5 \mu\text{V}$$

Значи, теоретската резолуција на еден бит од дигитализиранат вредност е $1.5 \mu\text{V}$.

Кога се зборува за квалитетот на аналогните влезови, иако основните параметри на некоја аквизициона картичка може да покажуваат ADЦ со 16 битна резолуција и брзина на семплирање од 100 kS/s, тоа не значи дека може да се семплираат сите 16 канали со брзина од 100 kS/s и да се добие 16-битна точност. Ова води кон констатацијата, дека покрај наведените основни карактеристики на

аквизиционата картичка, за квалитетот на аквизициониот хардвер потребно е да се познаваат и други карактеристики, како што се: DNL (Диференцијална НЕлинеарност), релативна точност, време на смирување и карактеристики на шумот. Анализата на овие дополнителни карактеристики бара посебни знаења, и претставува посебен предизвик на луѓето што се занимаваат со инструменталниот и компјутерскиот хардвер.

• Аналогни излези

Иако аквизициониот хардвер е пред се наменет за прибирање на податоци, обично на истиот му се додаваат и способности за контрола на процеси со вградување на електрични кола кои создаваат излезни сигнали. Овие електрични кола ја вршат обратната функција од ADC со врешење на дигитално аналогна конверзија. Уредот кој ја врши оваа функција го нарекуваме Дигитално Аналоген Конвертор (DAC). Како и во претходниот случај на аналогно-дигитална конверзија, основни карактеристики на DAC, кои го одредуваат квалитетот на излезниот напонски сигнал, се: време на смирување, излезна фреквенција и резолуција. Времето на смирување и излезната фреквенција, заедно одредуваат колку бргу DAC може да ја промени вредноста на излезниот напон. Времето на смирување е време потребно за излезниот сигнал да се смири на бараната вредност. Времето на смирување обично се однесува на целиот напонски опсег. Излезната фреквенција преставува максималната фреквенција со која DAC го генерира напонскиот излез. DAC со мало време на смирување и голема излезна фреквенција може да дава високо-фреквентни сигнали, поради малото време потребно да прицизна промена на напонскиот излез.

Излезната резолуција е слична со влезната. Тоа е бројот на битови во дигиталниот код од кој се генерира аналоген излез. Со поголема резолуција се намалуваат напонските инкременти, со што се добиваат сигнали со поблага форма. Апликацијата треба да ги одреди карактеристиките на DAC.

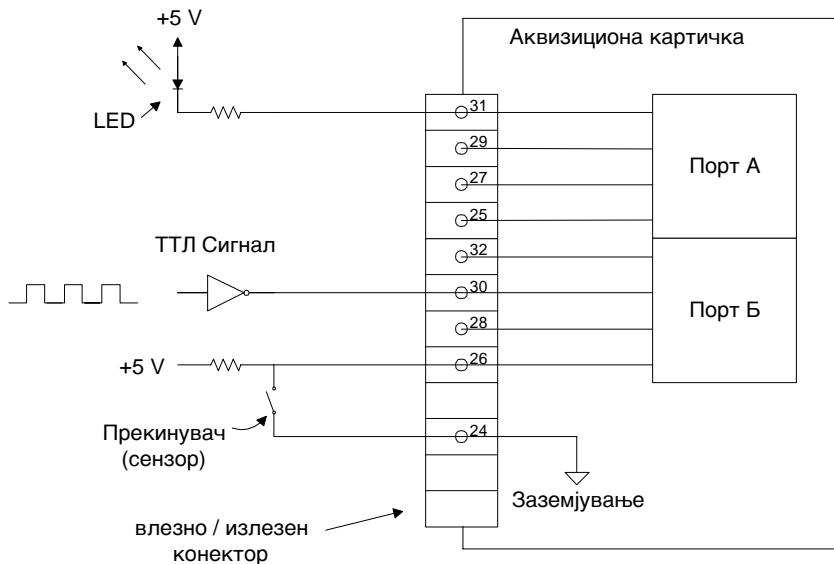
• Дигитални влезови / излези

Дигиталните влезови / излези се користат за аквизиција на податоци, контрола на процеси и комуникација со периферните уреди. Карактеристични параметри се: бројот на дигитални канали, зачестеноста со која може да се примаат и емитират сигналите, и електричните карактеристики на сигналите. Ако дигиталните канали се користат за контрола на процеси со спор одзив (пр. греачи), голема зачестеност на каналите не е потребна. Бројот на дигитални канали треба да одговара на условите на примена. Обично едната половина од каналите се избира како влезна а другата половина како излезна. Количината на излезна снага со која треба да се управуваат надворешните уреди треба да е помала од излезната снага на дигиталните излези.

На Сл. 9.16 прикажани се врските за три типични дигитални влези / излези примени. Портот А служи за дигитален излез, а портот Б служи за дигитален влез. Секој порт засебно може да се назначи како влезен или излезен. Дигиталните влезови користат TTL (Транзистор-Транзистор Логика) сигнали или сензорски елементи со логичка состојба (како прекинувачот). Дигиталните излези емитуваат TTL сигнали, доволни за работа на екстерни елементи како LED (светлосни диоди).

Со уреди за кондиционирање на дигиталните сигнали може да се искористат слабите TTL сигнали, за следење и контрола на високо напонски и струјни сигнали од индустриската примена. Пример, напонот и струјата потребни да се отвори или

затвори голем вентил е 100 V наизменичен напон и 2 A струја. Бидејќи сигналите од дигиталните влезно / излезни картички се од 0 до 5 V еднонасочен напон и струја од неколку милиампера, потребна е примена на кондиционер кој ќе ги изврши потребните трансформации на сигналот и изолација за заштита на картичката од големите напонски пикови.



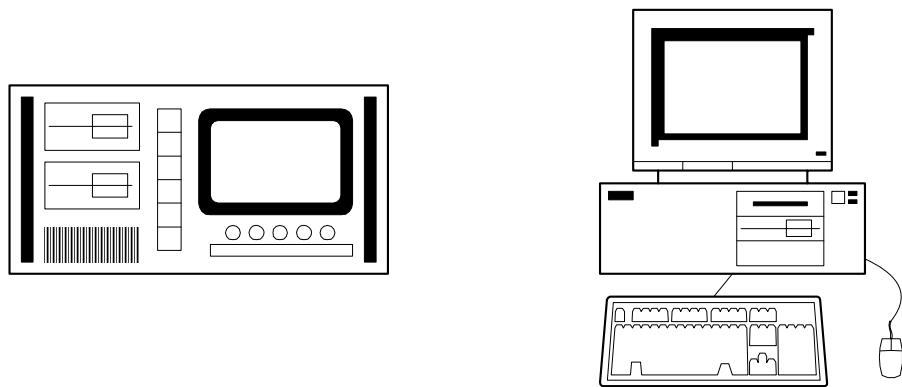
Сл. 9.16 Дигитални влезно / излезни канали

Често се јавува потреба за пренос на податоци меѓу аквизиционата картичка и надворешни компјутери, аквизициони системи, принтери и др. Бидејќи за ваква комуникација обично се користат инкременти од еден бајт (8 бита), бројот на дигиталните канали е по групи од осум. Како додаток, некои картички имаат и линии кој служат за специфични комуникациски потреби (handshaking).

9.2.4 Компјутер

Персоналните компјутери, поради својата отворена концепција, се идеални за примена при аквизиција на податоци и многу се поефикасни од тесно специјализираните компјутери. За тоа постојат неколку причини. Конкуренцијата во производството на персонални компјутери и опрема, направи цената на компјутерите да биде многу пониска од специјализираните компјутерски системи. Цената на одржување е битно смалена, и одржувањето е поедноставено, така да може да го врши и просечно образуван корисник на персонален компјутер. Постојат многу повеќе можности за примена на софтвер и програмирање. Накратко: се добива систем кој е далеку подобар, флексибилен и лесен за одржување, а истовремено и поефтин од специјализираните компјутери.

Зависно од условите на примена, персоналните компјутери се испорачуваат во различни кукишта и со различна опрема. При примена во индустриски и други услови каде нивото на влага, вибрации и друго се над нормалните, компјутерите се вградуваат во индустриски кукишта, "rack mount", со целиот потребен хардвер и софтвер за дадените услови. Кога условите на користење се нормални и не е битен изгледот на компјутерот, истиот се употребува во неговата стандардна конфигурација (Сл. 9.17).



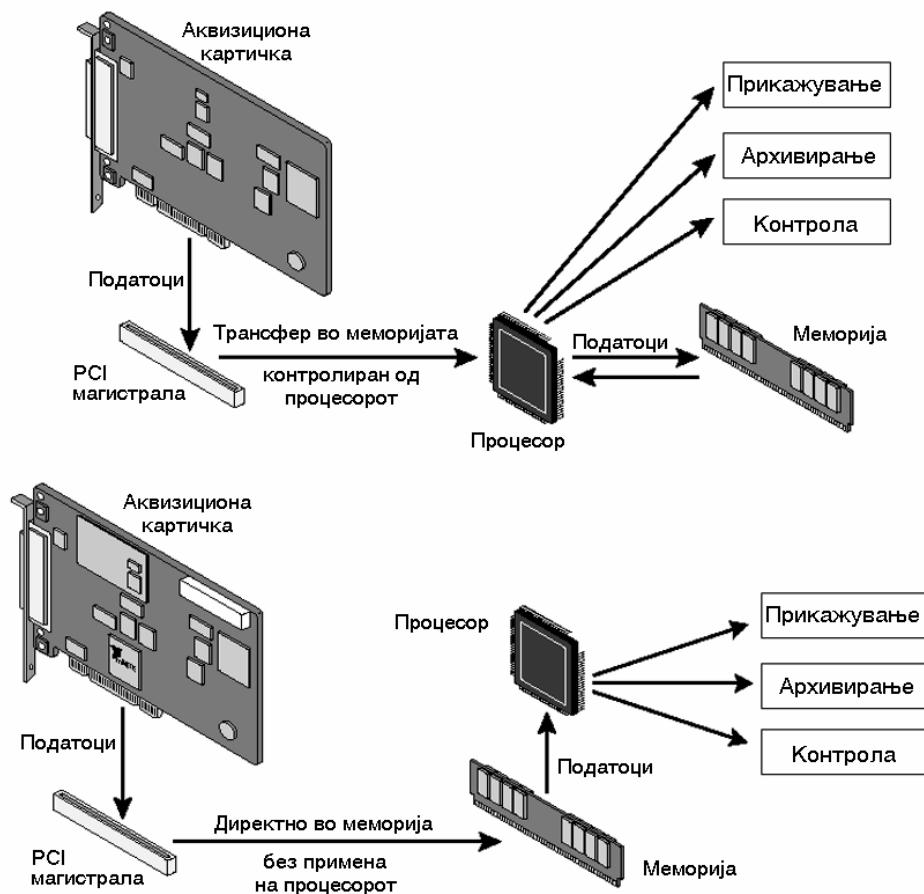
*Сл. 9.17 лево: изглед на индустриски компјутер "rack mount"
десно: изглед на стандардна конфигурација*

Типот на персоналниот компјутер кој се користи за аквизиција на податоци има големо влијание на брзината со која можат да се прибираат податоците. Денешниот технолошки развој налага употреба на Pentium процесори и PCI или обичната ISA/EISA магистрала. За комуникација со други компјутери се користат RS-232 и RS-485 сериските портови.

Карактеристиките на трансферот на податоци во компјутерот има значајно влијание на перформансите на целокупниот аквизиционен систем. Сите персонални компјутери се способни за влезно/излезен и интераптен трансфер. DMA (Direct Memory Transfer) трансферот ја зголемува пропустна моќ на компјутерот со користење на електронски елементи кои ги пренесуваат податоците директно во системската меморија. Со користење на овој метод, процесорот не се користи за пренос на податоците и е слободен за процесирање на други покомплексни задачи. Сличен на овој метод е и управувањето со магистралата ("bus mastering") кај PCI магистралата каде аквизиционата картичка ја превзема контролата над магистралата, ги пренесува податоците до меморијата со голема брзина и ја ослободува магистралата за друга употреба. Овој пристап е покажан на Сл. 9.18.

Лимитирачки фактор за прибирање на голем број податоци, често е магнетниот диск. Времето на пристап на дискот и фрагментацијата на дискот во значителна мерка може да ја намалат максималната брзина со која податоците ќе се прибираат и снимаат на дискот. За аквизициони системи со кој се прибираат високо-фреквентни сигнали треба да се избере брз диск и да се обезбеди доволно континуален (нефрагментиран) простор на дискот кој ќе ги прифати податоците. Ако големината на податоците е помала од слободниот простор во системската меморија тогаш не е потребен брз диск, туку податоците прво се снимаат во меморијата а после на дискот.

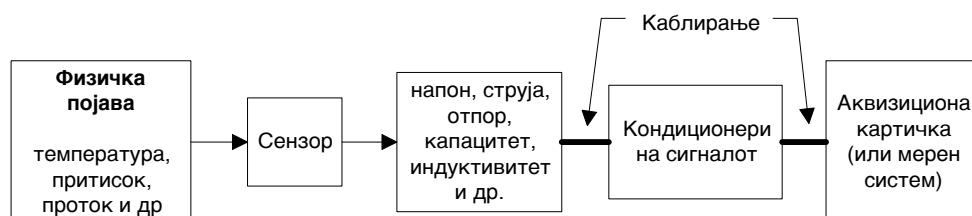
За апликациите каде се користи процесирање во реално време на високо-фреквентни сигнали потребен е брз 32-битен процесор со математички копроцесор или посебен процесор за дигитално процесирање на сигналот (DSP) кој може да се наоѓа на додатна картичка. Ако е потребно прибирање на податоците еднаш или два пати во секунада, тогаш е доволен едноставен персонален компјутер. Мора да се обрне внимание и на расположливите оперативни системи за конкретниот компјутер.



Сл. 9.18
горе: Трансфер на податоци без управување со магистрала
доле: Трансфер на податоци со управување со магистрала

9.2.5 Кабли и разгледување на ефектите на шум кај аналогните сигнали

Мерењето на аналогните сигнали не е секогаш едноставно поврзување на изводите од изворите на сигнал (пр. сензори или кондиционери) со аквизициониот хардвер. Познавањето на природата на изворот на сигналот, прилагодената конфигурација на аквизициониот хардвер, и соодветна шема на поврзување се потребни за да се добие прецизно и ослободено од шум мерење. На Сл. 9.19 прикажан е блок дијаграм на типичен систем за аквизиција на податоци. Целовитоста на добиените податоци зависи од целиот пат на аналогниот сигнал.



Сл. 9.19 Блок дијаграм на типичен систем за аквизиција на податоци

Со цел да се покрие широк спектар на апликации, поголемиот дел од аквизиционите картички обезбедуваат флексибилност во конфигурацијата на аналогниот влез. Поголемата флексибилност понекогаш доведува до конфузија во соодветната примена на различни влезни конфигурации и добиените вредности при тоа. За да се оствари што е можно пооптимално решение, потребно е да се познаваат расположивите типови на влезни конфигурации од аквизициониот хардвер и начинот на кои корисникот треба да ја избере и користи најдобрата конфигурација. Исто така, треба да се обрне внимание и на влијанието на шумот и начините на кои би се минимизирале пречките од шумот со соодветно каблирање и заштита.

Со други зборови, за избор и примена на добра мерна техника потребно е разбирање за типовите на извори на сигнал и мерните системи.

9.2.6 Софтвер и база на податоци

Како резултат на автоматизацијата при аквазација на податоци издвоен е посебен сегмент во компјутерската индустрија кој се занимава со изработка на софтвер за автоматизирано прибирање на податоци - софтвер за аквазација на податоци или скратено аквазиционен софтвер (англ. DAQ софтвер - Data Acquisition Software).

Во денешно време аквазициониот софтвер е многу моќен алат, кого без проблеми може да го употребуваат и луѓе кој не се експерти во оваа област. Најновите софтверски пакети можат симултано да обавуваат повеќе аквазициони функции и тоа со многу високи перформанси, дури и во опкружувања (пр. оперативниот систем Windows) кои не се посебно погодни при инсистирање на брзина.

И покрај сите новини и погодности вградени во аквазициониот софтвер, сеуште е голема уметност да се избере права софтверска подршка за систем за прибирање на податоци, кого сакаме да го автоматизираме, бидејќи треба да се знаат сите мани и предности на разните софтверски пакети.

Потребни услови за аквазиционен софтвер

Аквазициониот софтвер се користи во апликации како: автоматизација на производни процеси, мониторинг и контрола на процеси, експериментална анализа итн. Аквазициониот софтвер мора да задоволи некои основни барања, за да може да се вброи во оваа софтверска категорија. Последно време се применува поимот SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition*.

Пред се, потребно е да има можност за контрола на хардверот за A/D и D/A конверзија во полна мерка. Тоа представува висока флексибилност кај процедурите кои вршат идентификација и иницијализација на приклучениот хардвер. Цел е да корисникот не мора да се грижи за хардверот за конверзија на сигналот, туку да своите напори ги усмири на добивање на саканите податоци и заклучоци кои следат од нив.

Визуелизацијата на сигналот треба да овозможи приказ на сигналот на начин близок на корисникот и да биде погодна за прелиминарна проценка на квалитетот на приберените податоци.

Срцето на секој интелегентен уред е алгоритам кој дозволува издвојување на саканите информации од податоците добиени со аквазација. Процедури кои даваат можност за процесирање на сигналите добиени со аквазацијата, преставуваат основа на софтверските пакети за аквазација на податоци.

Приказот на приберените и обработени информации треба да се организира така да бараната информација се стави брзо и јасно на корисникот на располагање. Тука се користат разни техники како што се алфаниумерички приказ, графички приказ и слично.

Многу важна особина кај аквизициониот софтвер треба да ја има е можноста за меморирање на приберените податоци за процесот. Оваквиот пристап овозможува накнадно процесирање на сигналот (надвор од реалното време), што е неминовно за опсежна анализа на приберените податоци.

Треба да се спомене и важноста на постоење на интерактивен систем, така да аквизициониот софтвер бидејноставен за користење.

Категории на DAQ софтверски пакети

До денес аквизициониот софтвер еволуирал во пет подкатегории, од кои секоја има свои специфични корисници и ситуации во кои се применува:

Turnkey

Turnkey софтерот е најдноставен за користење затоа што не е потребно никакво програмирање. Се што треба да се направи е краткотрајното подесување (setup) на софтерот. Пакетите од оваа категорија се дизајнирани да контролираат дадена фиксна апликација, и тоа го прават доста успешно. Проблемот е во тоа што не се дозволени било какви измени во однос на хардверот и можностите на дадениот софтер. Оваа категорија на аквизиционен софтер по правило има графички интерфејс, со чија помош корисникот ги врши потребните подесувања. Најчесто на мониторот се емулира некој реален мерен инструмент. Оваквиот пристап не бара никаква софтверска развојна околина (освен оперативниот систем) да би се стартувал и користел софтерот.

Јазичен интерфејс

Јазичен интерфејс е подкатегорија на аквизиционен софтер организиран во вид на библиотеки од подпрограми за популарните програмски јазици за општа примена (Pascal, Basic, C и слично). За разлика од Turnkey софтерот, ориентиран кон корисници без програмерско искуство, овој софтер е наменет за корисници кои своите апликации ги програмираат во конвенционалните јазици. Програмерите во своите програми ги повикуваат функциите кои се составен дел од јазичниот интерфејс, па пред добивање на извршната верзија на програмот (способен за аквизиција на податоци) треба да се изврши преведување на кодот и поврзување со библиотеките од подпрограми за аквизиција на податоци. Овие библиотеки најчесто се испорачуваат во пакет заедно со аквизициониот хардвер. Олеснителна околност е тоа што функциите на јазичниот интерфејс се направени на доволно високо ниво, така да програмерот не мора да навлегува во деталите за програмирање на аквизициониот хардвер на најниско ниво. Кога податоците ќе се превземат од посматраниот процес и се сместат во меморијата од компјутерот, над нив може да се примени вообичаено програмерско знаење да истите бидат анализирани, прикажани и сочувани за следна употреба.

Функциите кои се на располагање се делат на: аналогни, дигитални и времененски влезни / излезни функции. Освен овие основни функции подпрограмите треба да поседуваат функционалност за:

- Прибирање податоци со саканата брзина на семплирање
- Прибирање на податоци во позадина, додека истите се процесираат (kontинуална аквизиција на податоци)
- Користење на програмабилни влезови / излези, интерапти и DMA трансфер на податоци
- Пренесување на податоците на и од дискот
- Симултано извршување на повеќе функции
- Употреба на повеќе аквизициони картички
- Управување со уредите за кондиционирање

Како пример во продолжение е даден кодот во програмскиот јазик C, со кој се повикуват функциите од библиотеката NI-DAQ (National Instruments – Data Acquisition) Driver, за читање на напонот од избраниот аналоген канал за дадена аквизициона картичка.

```
main() /* Program za citanje na analogen vlez */
{
int brd, /* Broj na akviziciona karticka */
chan, /* Kanal od kade ke se cita analogniot vlez */
gain, /* Zasiluvanje koe se koristi za kanalot */
reading; /* Binaren rezultat na A/D konverzacijata */
Double voltage; /* Golemina na naponot na vlezniot kanal */
brd = 1; /* Citaj od karticka 1, */
chan = 3; /* kanal 3, */
gain = 100; /* so zasiluvanje od 100 */
AI_Read(brd, chan, gain, &reading); /* Izvrsi go citanjeto */
AI_Scale(brd, gain, reading, &voltage); /* Presmetaj vo napon */
printf("\nThe voltage is %f volts", voltage); /* Prikazi ja vrednosta na naponot */
}
```

Додатоци

Додатоците се софтверските пакети кои се одликуваат со тоа што го дополнуваат познатиот софтвер од општа примена (Excel, MathCad и сл.) со способност за аквизиција на податоци. Користа е очигледна. Инженерите и научниците се поштедени од програмирање во некој програмски јазик, работат во познати програмски пакети од општа примена и при тоа имаат можност за обработка и презентирање на податоците добиени со аквизицијата.

Контроли

Софтверските контроли представуваат софтверски модули кои ги произведуваат поединци и фирмии со цел да се додадат нови можности на развојната околина во кои се вградуваат. Развојната околина треба да има јазички интерфејс со кој се користат сите аквизиционите функции на овие контроли. Карактеристика на овие контроли е тоа што можат да се користат во различни развојни околини (пр. Visual Basic, Delphi итн.) и лесно се вклопуваат во графичкиот интерфејс.

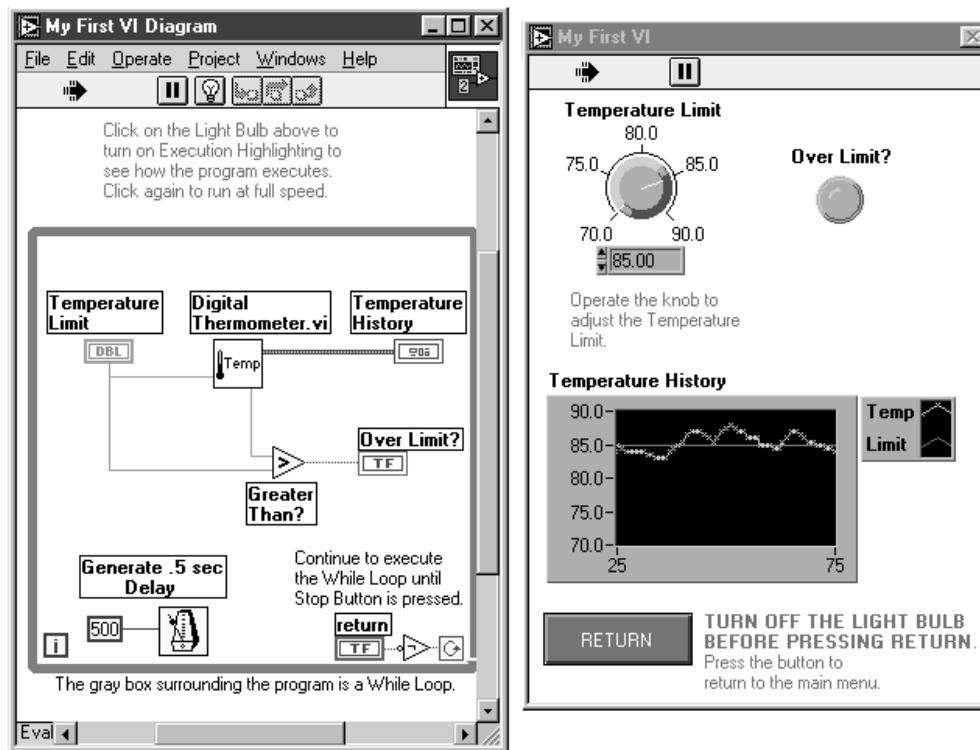
Изворен-код

Категоријата изворен-код софтверски пакети представуваат програми во вид на изворен код (наменет за аквизиција на податоци) кој може да се вклучи и преведе во целната апликација која се развива во некој конвенционален програмски јазик. Изворен-код софтверските пакети може да се третираат како готови примери кои покажуваат што и како треба да се испрограмира на најниско хардверско ниво за да се оствари комуникација со аквизициониот хардвер. Користењето на изворен-код

софтверските пакети е нај комплициран начин за програмирање на апликација за аквизиција на податоци затоа што овој пристап бара познавање не само на програмскиот јазик и аквизициониот хардвер, туку и на детали од хардверот и системскиот софтвер на компјутерот. Предностите се во редуцирање на вкупната големина на крајната апликација.

Виртуелна инструментација

Софтверот за виртуелна инструментација дозволува развој на виртуелни инструменти кои најдобро се вклопуваат во специфичната апликација за прибирање на податоци. Хардверска подршка на оваа идеа се бројните аквизициони картички кои се монтираат во слотовите на персоналните компјутери.



Сл. 9.20 Креирање на виртуелен инструмент

Традиционалните инструменти претставуваат посебни единици кои се одликуваат со можност за приклучување на влезно/излезни сигнали, имаат фиксен кориснички интерфејс, а внатре во уредот специјализирана аналогна и дигитална електроника ги прибира податоците од процесот, ги анализира и на крај ги презентира на корисникот во погодна форма. Проблемот е во тоа што уредот, кога еднаш ќе се направи, е неприлагодлив за различни потреби, иако тоа е често потребно. Спротивно од традиционалните, виртуелните (замислени) уреди ја користат отворената архитектура на персоналните компјутери, која е прерасната во индустриски стандард, и во потполност ја заменува целата комплицирана електроника на класичните инструменти со електрониката на аквизиционите картички приклучени во слотовите од персоналните компјутери, додека процесорската моќ на специјализираните микроконтролери ја превзема централната процесорска единица (CPU) на персоналниот компјутер. На располагање се мемориските ресурси на персоналниот компјутер, видео системот за презентација на корисничкиот интерфејс, магнетните

дискови за трајно меморирање на прибериените информации и едноставно кажано све што денешните моќни персонални компјутери овозможуваат (мултимедиа, умрежување и др.). На овој начин се постига целта да функционалноста на инструментот и неговиот кориснички интерфејс бидат потполно подложни на контрола од проектантот на апликацијата, а да при тоа цената на ваков уред е многу поприфатлива од збирот на специјализираните инструменти кои треба да се набават за секоја засебна примена.

Програмирањето на виртуелните инструменти се врши со графички програмски јазици (во графичка околина). Се селектираат икони од библиотека на икони, каде секоја една икона претставува функција, и се распоредуваат на работната површина која претставува блок дијаграм на виртуелниот инструмент (Сл. 9.20). Секоја икона (функционален елемент) има карактеристични параметри кои се подесуваат после поставување на иконата. Селектирањето на влезен канал се прави со едноставен избор на иконата "канали" и подесување на нејзините параметри на саканиот влез. Протокот на сигнали и податоци се прави едноставно со поврзување на иконите во саканиот логички ред. Овие врски се покажуваат визуелно на блок дијаграмот од виртуелниот инструмент.

Избор на софтвер

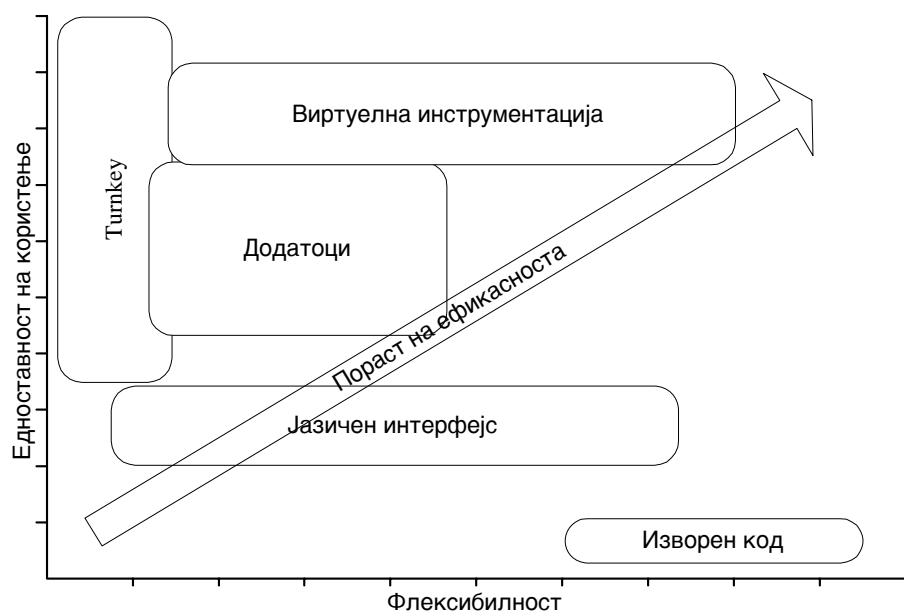
Прво е потребно да се избере оперативен систем под кој ќе работи компјутерот и над кој ќе се развива аквизициониот софтвер. Од тоа се гледаат и двата основни фактора кои влијаат на изборот на оперативен систем, а тоа се компјутерот и апликативниот софтвер.

Класичните оперативни системи како што се: Windows 3.1, Windows 95, Mac OS, OS/2, Windows NT нудат изобилство на развоен и апликативен софтвер погоден за аквизиција на податоци, меѓутоа нивната робусна графичка околина и мултипроцесирањето ги прави непогодни за примени во реално време (брза обработка на интерапти и др.). Поедноставните оперативни системи како DOS, се погодни за работа на поедноставни компјутери и при едноставни побарувања за визуелна презентација.

Постојат оперативни системи специјално наменети за работа во реално време и со мали хардверски побарувања (real-time operating systems).

Зависно од поставените критериуми при проектирање на апликацијата за аквизиција на податоци се избира соодветна категорија на софтвер. Секоја категорија има свои предности и мани. Земајќи ги во обзир флексибилноста и едноставноста на употреба, на овие софтверски категории е формирана Сл. 9.21.

Денешниот тренд во развој на софтверот за аквизиција на податоци насочен е кон класата на софтвер за виртуелна инструментација. Оваа класа се одликува со најголема продуктивност, а да при тоа поседува флексибилност својствена за изворен-код пакетите и леснотија на употреба својствена за турнкес софтверот.



Сл. 9.21 *Дијаграм на ефикасност на софтверските категории*

9.3 Реализација на експеримент со помош на компјутер - пример

Овдека е презентиран на соодветен начин реализацијата на експеримент со помош на компјутер (компјутерско-потпомогнато експериментирање). Оваа техника користи компјутер, не само да собере и обработи податоци, но исто така да ја покренува (да ја стави во погон), делумно или целосно, експерименталната апаратура, и така наоѓа широка примена во научно-истражувачките и развојните (R&D) лаборатории, а и во производството исто така. На тој начин, на добро познатите кратенки CAD (компјутерски-потпомогнато проектирање), CAM (компјутерски-потпомогнато производство), CAE (компјутерски-потпомогнато конструирање), и CAI (компјутерски-потпомогната инструкција), се додава и кратенката CAХ, за компјутерски-потпомогнато експериментирање. Бидејќи сите примери на компјутерски-потпомогнати машини и процеси делат слични основни функции (поврзување на сензорите и покренувачите, логичко програмирање, обработка на податоци и нивно визуелно прикажување, и комуникации компјутер - човек), примерот даден во ова поглавје е добра припрема за проектирањето и остварувањето на било кој физички систем реализиран со помош на компјутер.

9.3.1 Функционален опис на компјутеризиран мерен систем

Воопшто намерата на примерот на систем е да се изврши брзински и тест на обртен момент на ротирачки пневматски мотори. Такво тестирање може да биде од интерес во некој R&D програм, со намера да се разбере однесувањето на моторот и сугерира развивање на подобрувања на конструкцијата. Или тој би можел да биде дел на производниот процес на мотори, играјќи улога на контрола на квалитетот во која секој мотор (или статистички избран примерок) би бил тестиран и спореден со некои спецификации на тестирање на перформансите (референтни точки на перформансите).

Во овој случај, снабдувањето на моторот со воздух е од компресорска станица од 7 бари низ рачен сет филтер/ регулатор/ замаслувач со моќност адекватна за надворешни мотори.

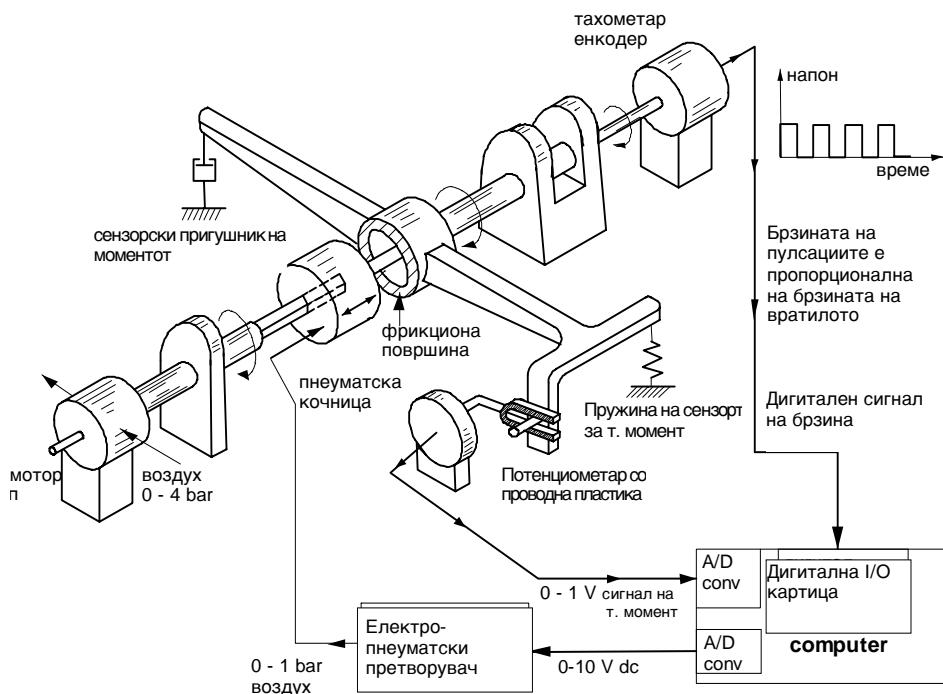
Познато е дека во автоматизацијата на кој и да било експеримент или тест, постои комплетен спектар на степени на автоматизација, почнувајќи од воглавно рачните системи само со минорна компјутерска помош на човекот оператор, до комплетно автоматизирани системи кои воопшто не бараат човечко дејствување. Изборот на оптималното ниво на автоматизација повеќе зависи од детализираните технички и економски фактори и, како во сите реални проучувања на проектирањето бара значајно инжењерско искуство и расудување.

Во примерот направен е изборот на доводниот притисок на моторот со "рачно дејство" (добро отколку компјутеризирано). Читателот може да најде за корисно да направи листа на "за" и "против" рачна (споредена со компјутеризирана) селекција на воздушниот притисок во овој пример, за да го процени типот на резонирање (заклучување, наведување на причини) инволвирано во правењето на таков избор.

Со регулаторот на доводниот притисок може рачно да се поставува влезниот притисок на моторот како се сака. Сега е потребно некој вид на подесливо механичко оптеретување за да моторот работи против него (за да може моторот да го совладува).

Бидејќи се сака да се произведе вртлив момент и брзина за стационарен работен режим на фиксиран доводен притисок, ова оптеретување ќе биде сет на неколку (речи 10) различни нивоа со брзина и обртен момент измерени на секое ниво. Одлучено е да

компјутеризирано поставување на оптеретување може овде да биде оправдано, и се обидува да се најде задоволителна направа на оптеретување. Нека се претпостави дека компјутерот ќе има D/A претворувачи, така да компјутерските команди на направата на оптеретување ќе бидат аналогни напони со опсег од 10V. Од повеќето расположливи направи на оптеретување, избрана е автоматски покренатата фрикционна кочница која го произведува посакуваниот опсег на обртен момент за опсег на манометарски воздушен притисок од 0,021 до 1,05 bar.

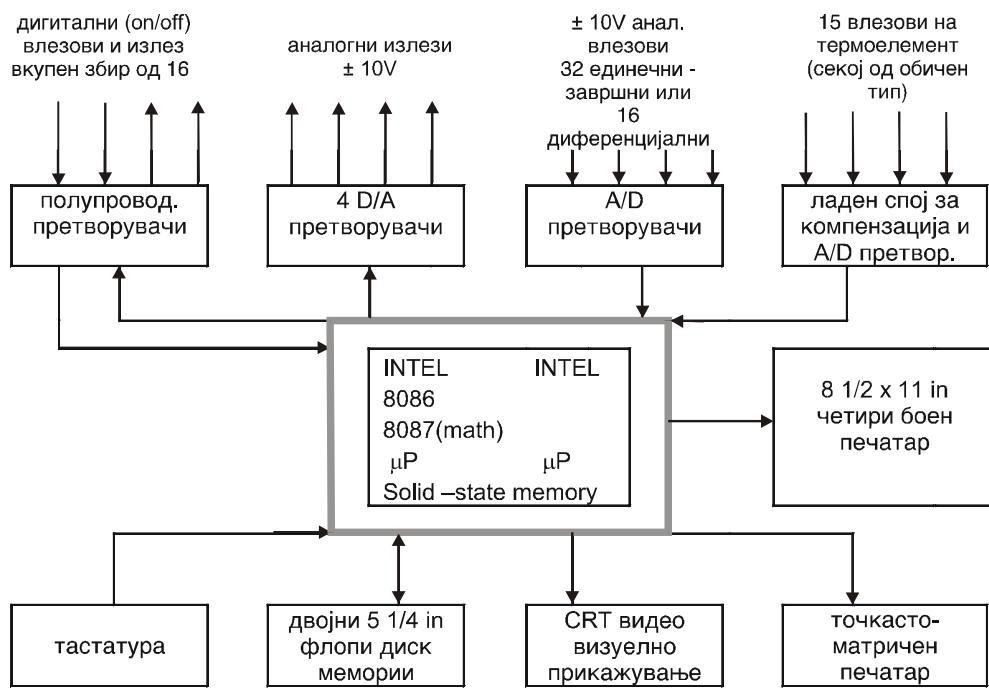


Сл. 9.22 Експеримент со јадмоши на компјутер (САХ) за мерење на брзина и моменат кај инеуматички мотор

Види исто Сл. 9.7 и Сл. 9.13

Функционален опис на компјутерскиот систем

Прикажниот тест на пнеуматски мотор бил висушност за студентска употреба во курсот на мерења на Охјо Универзитетот во САД. Компјутерски системи за општа намена на собирање на податоци и контрола биле на располагање и тие се добар избор за еден вид на рачна примена. Многу мала "компјутерско инжењерска" експертиза е барана, така да работниот систем може да биде брзо реализиран од инжењери на кои им е блиска опремата за тестирање (испитување) но кои не се компјутерски специјалисти. Кога се порачува таков систем, поради неговата модуларна природа, може да му се даде облик за умерена или проширена моќност. На едноставен систем може да му се подобри квалитетот со додавање на саканите модули. Расположливите системи на Охјо Универзитетот во САД биле оригинално набавени со прилично универзални модули за дополнување бидејќи системите биле наменети за корисење на обработка на податоци и контрола со многу различни сетови на апаратура за учење и истражување на процеси. Слика 9.23 го детализира хардверот на системот.



Macsym 100 јадојачен систем за контрола и собирање на јадојачи

Сл. 9.23 Градба на систем за обработка на јадојачи и контрола - стапар тий

Од еднаква важност за брз развој на тестсистем е софтверот. Во Macsym системите, хардверот и софтверот биле развиени како единици и специфично оптимизирани за обработка на податоци и контрола на процеси. Јазикот на високо ниво наречен Macbasic (Basic за мерење и контрола), развиен специфично за оваа намена, дозволува брзо програмирање.

Тоа е големо-брзинска верзија на Basic со дополнителни команди за да се олесни извршувањето на саканото мерење и контрола на дејствијата. Бидејќи повеќе студенти веќе знаат Basic дури од средна школа, Macbasic-от брзо станува близок за повеќето инжењери.

Моќност потполно слична на таа од Macsym системите може да биде добиена со комбинирање на еден од популарните персонални компјутери со дополнителни шеми на обработка на податоци, кои се на располагање кај бројни испорачатели. Специјален софтвер за мерење и контрола е исто така на располагање, и бидејќи персоналните компјутери се веќе во широка употреба за инжењерски пресметки, ова е популарен период. При тоа, секако дека може да се употреби еден од веќе објаснетите софтвери.

Употребени сензори

За отчитување на брзината било одлучено да се употреби тахометар енкодер (десифратор) со 15 импулси/вртеж и софтверска шема на бројење/мерење на време за да се пресметаат вртежите во минута од измереното време за 200 импулси. За максимална брзина на моторот од 1200 вртежи/мин., 200 импулси земаат околу 0,67 секунди. Macsym саатот искористен овде има 1/60 секунди поделба, така да во најлош случај на стоп/старт е можна грешка при мерење на времето 1/30 s, но повеќето грешка би била околу 1/60 s или 1,5%.

За мерење на вртежниот момент на моторот (максимална вредност 40 in lbf = 4,53 Nm) се користи еластичен сензор за вртежен момент изработен во САД. Полугата

на обртниот момент, споена со завртка на қукиштетот од лежиштето на кочницата, реагира на фрикциониот обртен момент во повратно дејство на опругата на сензорот предизвикувајќи околу $1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$ грешка за полната скала изведувајќи обртен момент од $45 \text{ in lbf} = 5,1 \text{ Nm}$. Подесливиот воздушен амортизер прицврстен на другиот крај на полугата на обртниот момент ги пригушува торзионите осцилации. За да се добие DC напон во зависност од обртниот момент, грешката на повратното дејство на опругата е претворена во ротација на осовината на потенциометарот со користење на споен подвижен клин, со $1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$ грешка, давајќи околу 90° ротација на осовината. Потенциометарот е со проводлива пластика. Точноста на овој сензор на вртежен момент е определена со компјутерско реализирање на калибрирањето (со балести) и е дел од вкупниот (општиот) програм.

9.3.2 Општ план за редослед на експериментот

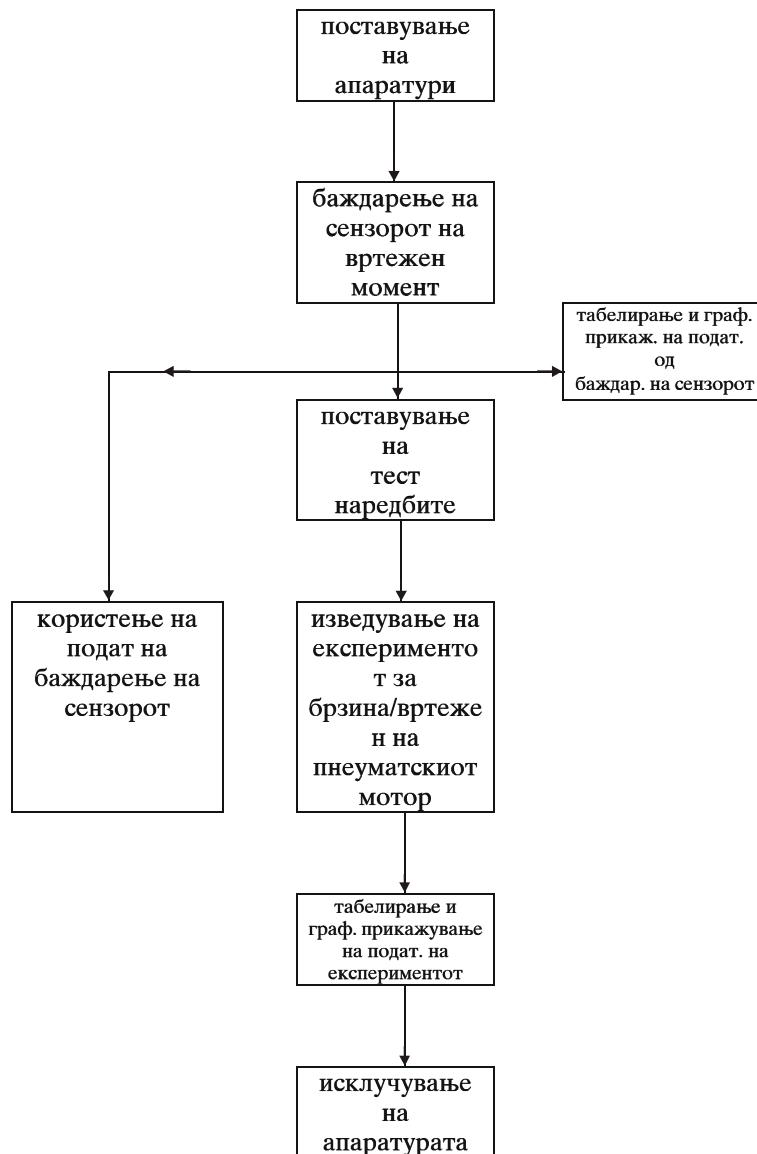
Пред почнување на деталното програмирање мора да се одлучи точно кои дејствија би биле извршени. Се претпоставува дека потребите биле задоволени со следниов редослед:

1. Се користат CRT еcranски пораки за да се води операторот во подготвување на апаратурите за користење (се поврзуваат инсталираните жици, се вклучува снагата).
2. Се води операторот низ калибрирање со баласт на сензорот на обртен момент.
3. Се табелираат и графички прикажуваат калибрираните (баждарените) податоци. исто така, го меморира него во компјутерска меморија за подоцнежна употреба во тестирањето на моторот.
4. Се воспоставуваат тест наредбите за воздушниот мотор.
5. Се пушта во погон брзинскиот тест со 10 различни вредности на обртниот момент и фиксирано поставен доводен притисок на моторот.
6. Се табелираат и графички прикажуваат податоците на брзинскиот и тестот на вртежниот момент.
7. Се води операторот низ процедурите на исклучување на апаратурите.

На Сл. 9.24 прикажан е шематски блок дијаграм на редоследот на експериментот.

Првиот дел од програмот е посветен на некои обележувања кои ја опишуваат намената на внатрешноста на компјутерски-потпомогнатата апаратура. Следно се вметнува некоја "конверзациона" секција каде на компјутерскиот еcran се печати, по време, редоследот на инструкциите, кои операторот мора да ги следи за да ја припреми апаратурата за тестирање. Кога операторот го пополнува секој чекор, притискувајќи CARRIAGE RETURN ги доведува на еcranот инструкциите од следниот чекор.

Овие чекори инволвираат "инсталирање на жици и инсталирање на водови", кои ги воспоставуваат потребните електрички и пнеуматски поврзувања помеѓу апаратурите, компјутерот и обезбедената моќност (снага).



Сл. 9.24 Блок дијаграм на редоследот на експериментот

Следно, компјутерот го води операторот низ подесување на сензорот на вртежен момент со мртви балести (мртви тежини). Ова подесување е направено со ослободување (деблокирање) на кочницата но со работење на моторот на брзина приближно во средината на опсегот на брзината за да биде искористена во тестирањето на моторот. Ова "динамичко" подесување (калибрирање) е почувствување да биде по репрезентативно на актуелните услови на тестот на моторот потоа ќе биде извршено "статичко" подесување со застанување на моторот. Спецификациите на воздушен мотор покажуваат дека моторот, на максималниот баран притисок, е способен на околу $40 \text{ in lbf} = 4,54 \text{ Nm}$ максимален обртен момент, така да подесувањето е изведено да малку го поминува овој опсег. Соответна должина на тежински подесливата (калибрациониа) кракна полуга беше избрана како $7,5 \text{ in} =$

190,5 mm, и шест тежини од 0,45 kg приложени во зголемувачки и намалувачки начин дава вкупно 14 подесливи (калибрациони) точки. Бидејќи полугата на подесување (калибрирање) се врти малку со дадената тежина, кракната полуга варира од 7,5 in - 190,5 mm радиус, сепак пресметувањата покажале дека овој ефект бил незначителен. (Ако тоа не било, лесно ќе се вклучи геометриска корекција во компјутерскиот програм).

Брзинскиот сензор на тахометарскиот дешифратор е некоја "апсолутна" направа и овде не бара за себе калибрација. Тој произведува точно 15 електрични импулси/вртеж, и овој број не зависи од температурата, стареењето или други променливи.

Штом калибрирањето е изведено, табелирано, и графички прикажано, системот е спремен за актуелното тестирање на моторот.

Цел е да се добијат дијаграми на брзинии и криви на вртежниот момент за фиксно поставениот регулатор на притисок на моторот.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ašković T., "Praktikum za laboratoriske ve`be iz mehanike fluida, hidraulike, pneumatike i turbomašina", Mašinski fakultet, Beograd, 1989.
2. Benedict R. P., "Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements", John Wiley & Sons, New York, London, 1972.
3. Bradschaw P., "An introduction to Turbulence Measurement", Pergamon press, Oxford, 1975.
4. Бундалевски Т., „Механика на флуидите“, МБ - 3, Скопје, 1992.
5. Бундалевски Т., Ношпал А., Костиќ З. и др., „Определување на хидрауличките карактеристики на обложени цевки со цементен малтер и епоксиден премаз“, истражувачки проект за ФЗЦ „11 Октомври“ - Куманово, Мачински факултет, Скопје, 1994.
6. Čorlukić F., "Mjerenje protoka fluida", ATM i Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
7. Dayly J. W., Harleman D.R.F., "Fluid Dynamics", Addison-Wesley publ. comp., Massachusetts, 1973.
8. Doebelin E. O., Measurement Systems - Application and Design", McGraw-Hill Publ. Comp., New York, London e.t.c, 1990, 2004.
9. Herschy R. W., "Hydrometry", John Wiley & Sons, New York, 1978.
10. Hantley H. E., "Dimensional Analysis", Dover publ. Inc., New York, 1967.
11. Karassik I. J., "Pump Handbook", McGraw Hill Book Comp., New York, 1967.
12. Ковалев Н. Н., „Гидротурбины“, „Машиностроение“, Ленинград, 1971.
13. Костиќ З., Бундалевски Т., Ношпал А. и др., „Експериментална проверка на методот за пресметка на ејекторите“, Зб. на труд. - Маш. фак. Скопје, год. 11, бр. 12, 1992.
14. Костиќ З., Ношпал А., „Експериментално определување на минималната брзина на флуидизација во зависност од температурата на слојот“, Зб. на труд. - Маш. фак. Скопје, год. 7, бр. 7, 1988.

15. Krsmanović Lj, Vušković I., "Metod laboratoriskih merenja". Mašinski fakultet, Beograd, 1971.
16. Маглиќ К., Ока С. и др., „Мерни методи, мерење и обработка на податоци“, Машински факултет, Скопје, 1980.
17. Macagno E. O., "Intermediate Mechanics of Fluids", I.I.H.R., the University of Iowa, Iowa City, 1974.
18. Малиновски В., "Програм за мониторинг систем на параметрите од хидраулична инсталација", дипломска работа, МФС, Скопје
19. National Instruments, www.ni.com
20. Ношпал А., "Струјнотехнички мерења и инструменти", МБЗ, Скопје. 1995.
21. Ношпал А., "Temeratursko polje u neizotermskoj turbulentnoj difuziji potopljenog izliva tople vode", doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1980.
22. Ношпал А., Tatinclaux J. C., "Design of Alternating Diffuser Pipes", ASCE Journal of Hydr. Research, No.HY4, 1976.
23. Ношпал А., "Investigation of the Thermal Near Field for an Alternating Multiport Diffuser Pipe", M.S. Thesis, the Univ. of Iowa, Iowa City, 1974.
24. Pavlović M.J., "Međunarodni sistem jedinica" Službeni list SFRJ, Beograd, 1980.
25. Повх И.Л., „Аэродинамический эксперимент в машиностроении“, „Машиностроение“, Ленинград, 1974.
26. Rouse H., "Advanced Mechanics of Fluids", John Wiley & Sons, New York, 1965.
27. Самсонов Г. В. и др., „Датчики для измерения температуры в промышленности“, Наукова Думка, Киев, 1972.
28. Седов Л.И., „Методы подобия и размерности в механике“, „Наука“, Москва, 1967.
29. Stanić J., "Metod inžinjerskih merenja", Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
29. Стојановски В., Пановски С., Ношпал А., „Споредба на нумерички и експериментално добиени резултати за максимален проток на дополнителна вода за ТЕЦ - Битола“, Зб. на трудови - Маш. фак. Скопје, год. 7, бр. 7, 1988.

30. Стојковски В., Ношпал А., Костиќ З., „Практикум за лабораториски вежби по струјнотехнички мерења“, Машински факултет, Скопје, 1993.
31. Tuve G.L., Domholdt L.C., "Engineering Experimentation", McGraw Hill Book Comp., New York, Tokio, 1966.
32. Vušković I., "Osnove tehnike merenja", Mašinski fakultet, Beograd, 1977.

КАТАЛОЗИ:

- DIN 1952, "Durchflussmessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen", Berlin, 1971.
- VDI 2040 Blatt1, "Durchflusszahlen und Expansionszahlen genormter Drosselgeräte und Abweichungen von Normvorschriften", VDI-Handbuch Energietechnik, Düsseldorf, 1971.
- "Instruments for research, Industry and Education", Cole-Parmer Instrument Company, Chicago, USA.
- "Engineering and Application Handbook", Dwyer Instruments Inc., Michigan City, USA.
- "Perfection in Pressure Measuring and Calibration", DEBRO Messtechnik GmbH, Meerbusch, Deutschland.
- "Flow and temperature measurement Equipment Catalogs", DISA Elektronik A/S, Skovlunde, Denmark.
- "DISA Information - Measurement and Analysis", DISA Elektronik A/S, Skovlunde, Denmark.
- "Laser Doppler Anemometry", DANTEC, Denmark.
- "Flow Sensors", IFM Electronic, Overlida, Sweden.
- "Airflow Catalogs", Airflow Lufttechnik GmbH, Rheinbach, Deutschland.
- "DATA Instruments Catalog", DATA Instruments Inc., Lexington, USA.
- "Flowmeters & Hydraulic test Equipment", International Controls Corporation Ltd., Thetford Norfolk, England.
- "Materiel de pyrométrie", Piro-Control, Vaulx en Velin, France.
- "Temperature Measurement Equipment Catalogs", OMEGA International Corp., Stamford, USA.
- "Flowmeters and Flowline Components for Liquids and Gases", Platon Flowbits Ltd., Hampshire, England.

- "Pocket - Multicontrol HMC 31", Hydrotechnik GmbH, Limburg, Deutschland.
- "Strain Gauges and Accessories", HBM GmbH, Ortenburg, Deutschland.
- "Displacement Measuring", Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, Deutschland.
- National Instruments, www.ni.com
- Cole-Parmer, www.coleparmer.com