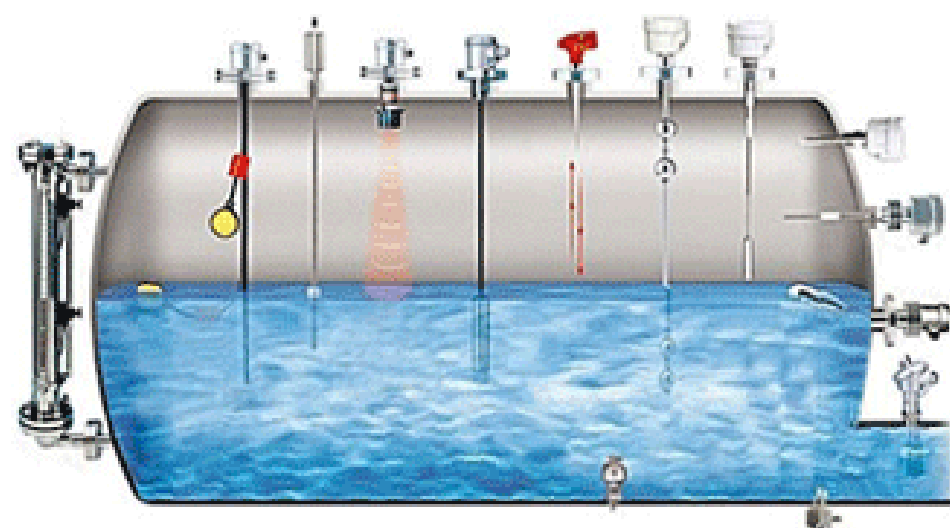


ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСВА ЗА АВТОМАТИЗЦИЯ

УЧЕБНО ПОМАГАЛО



**НАЦИОНАЛНА ПРОГРАМА
„ПРОФЕСИОНАЛНО ОБРАЗОВАНИЕ И ОБУЧЕНИЕ“
МОДУЛ В
„РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ УЧЕБНИ ПОМАГАЛА“**

**УЧЕБНО ПОМАГАЛО
ПО
ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА АВТОМАТИЗАЦИЯ**

ЗА УЧЕНИЦИ ПО ПРОФЕСИОНАЛНА ПОДГОТОВКА

УЧЕБЕН ПРЕДМЕТ: ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА АВТОМАТИЗАЦИЯ

ПРОФЕСИЯ: ТЕХНИК ПО АВТОМАТИЗАЦИЯ

СПЕЦИАЛНОСТ: АВТОМАТИЗАЦИЯ НА НЕПРЕКЪСНАТИ ПРОИЗВОДСТВА

**РАЗРАБОТЕНО ОТ АВТОРСКИ ЕКИП КЪМ
ПРОФЕСИОНАЛНА ГИМНАЗИЯ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“, ГР. РАДНЕВО**

**НАЦИОНАЛНА ПРОГРАМА
„ПРОФЕСИОНАЛНО ОБРАЗОВАНИЕ И ОБУЧЕНИЕ“
МОДУЛ В
„РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ УЧЕБНИ ПОМАГАЛА“**

**УЧЕБНО ПОМАГАЛО
ПО
ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЗА УЧЕНИЦИ ПО ПРОФЕСИОНАЛНА ПОДГОТОВКА**

УЧЕБЕН ПРЕДМЕТ: ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА АВТОМАТИЗАЦИЯ

ПРОФЕСИЯ: ТЕХНИК ПО АВТОМАТИЗАЦИЯ

СПЕЦИАЛНОСТ: АВТОМАТИЗАЦИЯ НА НЕПРЕКЪСНАТИ ПРОИЗВОДСТВА

АВТОРСКИ ЕКИП:

ИНЖ. АНЕЛИЯ ЕМИЛОВА СТОЕВА

ИНЖ. НЕДЯЛКА ДИМИТРОВА ИЛЧЕВА

ДОЦ. СТЕФАН ИВАНОВ ИВАНОВ

РЕДАКТОР:

АНТОНИЯ МИХАЙЛОВА ТОНЧЕВА

ВЪНШНИ ОЦЕНИТЕЛИ:

ПЕТЪР ИВАНОВ МЛЕКАРОВ

МИНА ВЪТЕВА ВЪТЕВА

НЕЛИ АСЕНОВА ГЕОРГИЕВА

СОФИЯ, 2021 г.

СЪДЪРЖАНИЕ

АНОТАЦИЯ	1
ВЪВЕДЕНИЕ	
1. Общи сведения за техническите средства за автоматизация.....	2
2. Функционална схема на система за автоматизация.....	4
3. Основни понятия.....	6
ЧАСТ 1. ИЗМЕРВАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЕЛИЧИНИ	
1.1. Измервателни вериги.....	7
1.1.1. Същност. Видове	7
1. 1. 2. Структура и елементи на измервателните вериги.....	11
1. 1. 3. Измервателни вериги – метрологични характеристики	13
1.2. Дистанционни системи.....	19
1.2.1. Общи сведения за дистанционно предаване на данни.....	19
1.2.2. Класификация на средствата за дистанционно предаване на данни	20
1.2.3. Схеми за дистанционно предаване на данни	22
ЧАСТ 2. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА КОНТРОЛ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЕЛИЧИНИ	
2.1. Методи и средства за контрол на технологични величини	25
2.2. Сензори	26
2.3. Технически средства за измерване и контрол на температура.....	29
2.3.1. Общи сведения и температурни скали	29
2.3.2. Класификация на методите и уредите за измерване на температура.....	31
2.3.3. Термометри, основани на топлинното разширение на налягането на работното вещество	32
2.3.4. Сензори за температура	37
2.4. Технически средства за измерване и контрол на налягане.....	46
2.4.1. Общи сведения.....	46
2.4.2. Класификация на методите и уредите за измерване на налягане	47
2.4.3. Манометри	50
2.4.4. Сензори.....	55
2.5. Технически средства за измерване на разход и количество	59

2.5.1. Общи сведения.....	59
2.5.2. Сензори за разход-поток.....	60
2.6. Технически средства за измерване на ниво.....	67
2.6.1. Общи сведения.....	67
2.6.2. Класификация.....	69
2.6.3. Механични нивомери.....	72
2.6.2. Сензори за ниво.....	74
2.7. Технически средства за контрол на качеството и състава на материалите.....	83
2.7.1. Общи сведения. Класификация.....	83
2.7.2. Измерване на концентрация.....	86
2.7.3. Измерване на влажност. Класификация.....	98
2.7.3.1. Измерване на влажност на газове.....	102
2.7.3.2. Измерване на влажност на твърди, насипни вещества и течности.....	105
2.7.4. Измерване на плътност.....	110
2.7.4.1. Общи сведения.....	110
2.7.4.2. Методи. Класификация. Устройства.....	111
2.7.5. Измерване на водородния показател РН на разтвора.....	118
2.7.5.1. Общи сведения.....	118
2.7.5.2. Измерване и контрол на РН.....	118

ЧАСТ 3. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЕЛИЧИНИ

3.1. Регулатори.....	125
3.1.1. Общи сведения.....	125
3.1.2. Блокова схема на регулатор. Класификация.....	131
3.1.3. Позиционни регулатори.....	135
3.1.4. Структура и динамични характеристики на аналогови регулатори, реализиращи линейни закони за управление.....	144
3.1.5. Особености на реалните промишлени регулатори.....	168
3.1.6. Структурни схеми на регулатор, реализиран чрез усилвател, обхванат с обратна връзка.....	175
3.2. Електронни регулатори.....	186
3.2.1. Елементи и възли на електронните регулатори.....	186
3.2.2. Схема на електронните регулатори.....	194
3.2.3. Електронни регулатори.....	200

3.2.4. Приложение на операционните усилватели в измервателните схеми	207
3.3. Пневматични регулатори	216
3.3.1. Общи сведения.....	216
3.3.2. Пневматични елементи с непрекъснато действие.....	219
3.3.3. Мембранни пневматични елементи.....	223
3.3.4. Пневматични позиционни регулатори ПР 1.5. и ПР 1.6.	233
3.3.5. Пневматични регулатори на налягане и възможности за приложението им в различни пневматични елементи	245
3.4. Изпълнителни механизми	258
3.4.1. Общи сведения. Класификация.....	258
3.4.2. Електрически изпълнителни механизми.....	264
3.4.3. Пневматични изпълнителни механизми	269
3.5. Регулиращи органи	274
3.5.1. Общи сведения. видове.....	274
3.5.2. Характеристики на регулиращите органи.....	278

ЧАСТ 4. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА АВТОМАТИЗАЦИЯ

4.1. Общи сведения и историческо развитие на микропроцесорите.....	281
4.2. Архитектура на микропроцесорна система	282
4.3. Микропроцесорна система за управление на технологичен процес.....	283
4.4. Системи за събиране и въвеждане на данни	285
4.5. Микропроцесорни системи за децентрализирано управление.....	287
4.6. Видове микропроцесорни системи.....	288
4.6.1. Информационни микропроцесорни системи (ИМПС)	289
4.6.2. Микропроцесорни системи като съветник на оператора	291
4.6.3. Управляващи микропроцесорни системи (УМПС)	292
4.7. Предимства на микропроцесорни системи за управление.....	294
4.8. Опасности при автоматизирани процеси.....	295
4.9. Програмируеми логически контролери	296
4.10. Приложение	301
4.11. Индустрални работи	308
ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА.....	315

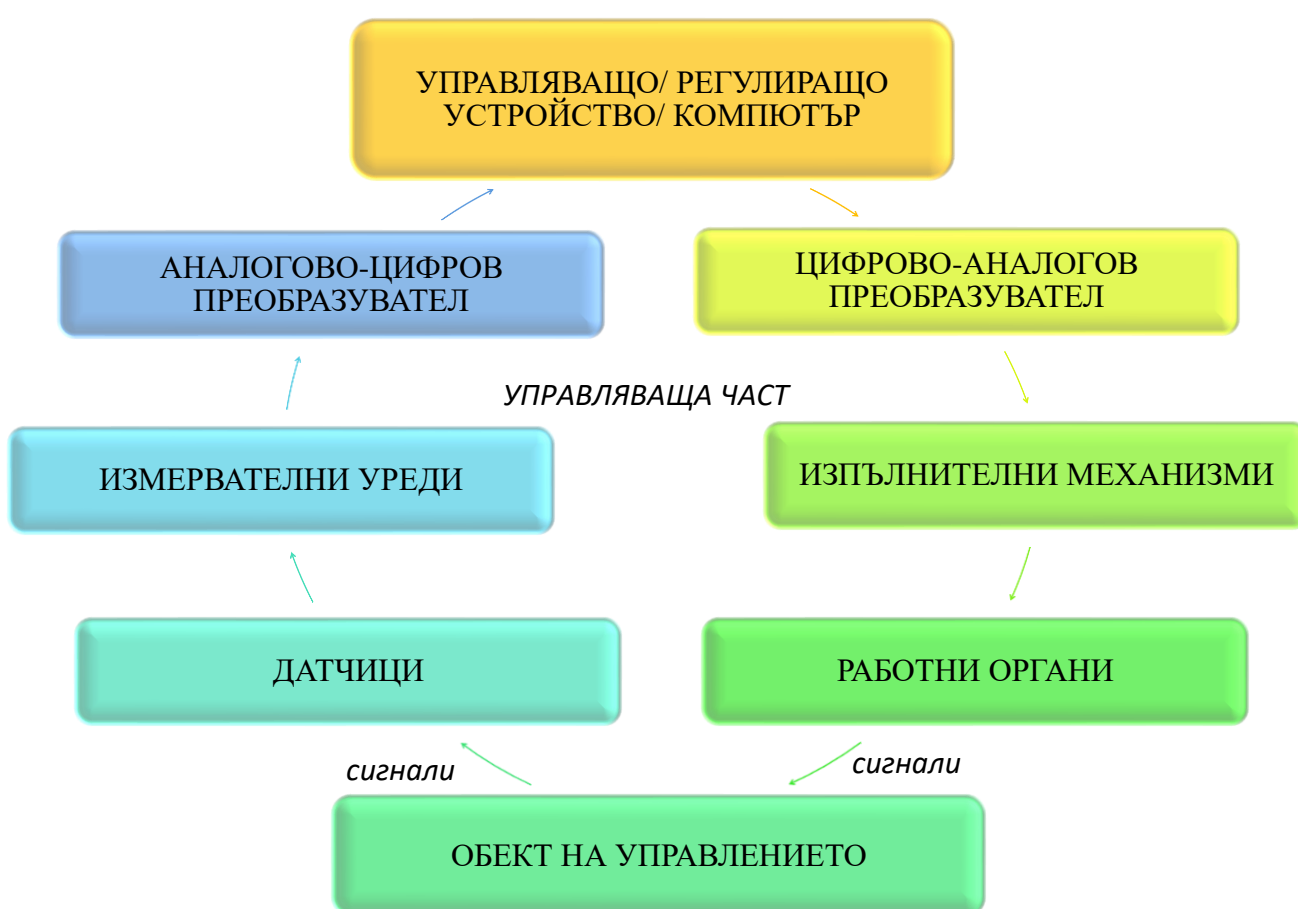
АНОТАЦИЯ

Учебното помагало отговаря напълно на съдържанието на учебната програма по учебен предмет технически средства за автоматизация, утвърдена от министъра на образованието и науката през 2020 г. и е предназначено за ученици, които се обучават във всички форми на обучение по специалности код 5230701 „Автоматизация на непрекъснати производства“ и код 5230704 „Осигурителни и комуникационни системи в жп инфраструктура“ от професия код 523070 „Техник по автоматизация“ и за специалности код 5230801 „Автоматизирани системи“ и код 5230802 „Осигурителни и комуникационни системи в жп инфраструктура“ от професия код 523080 „Монтьор по автоматизация“ от професионално направление код 523 „Електроника, автоматика, комуникационна и компютърна техника“.

Авторският екип е сформиран от Професионална гимназия „Св. Иван Рилски“ гр. Раднево и включва учители, представители на бизнеса и на висши училища с доказан опит в професионалната област.

1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ ЗА ТЕХНИЧЕСКИТЕ СРЕДСТВА ЗА АВТОМАТИЗАЦИЯ

Техническите средства за автоматизация представляват множество различни технически устройства, чрез които се осъществява управлението на даден технологичен процес, така че той да протича по предварително определен (желан) начин. Към техническите средства за автоматизация се отнасят всички средства (уреди, апарати, устройства и приспособления), които се използват за управление на процесите, независимо от това дали има, или не непосредствено участие на човек-оператор.



Фиг. 1. Класификация на техническите средства за автоматизация

Предвид големия брой разнообразни технически средства за автоматизация могат да бъдат разделени в групи на базата на характерни признаци, специфични за дадена група.

При създаването на автоматични системи за управление се използват различни технически средства, които имат различни функционални цели и съответстват на задачите и

функциите, които се решават на определено ниво за конкретен обект. Има няколко основни групи технически средства, които се използват за изграждане на системи за автоматизация :

- ✚ Технически средства за получаване на информация за състоянието на технологичните параметри на съоръжението и технологичното оборудване. Те включват сензори и измервателни преобразуватели, които са директно инсталирани на технологично оборудване за измерване на налягане, температура, ниво, дебит, физични и химични свойства, състояние на оборудването и др.;

- ✚ Технически средства, предназначени за показване и регистриране на информация на панелите на оператора и контролните зали. Това са индикаторни и записващи устройства, индикатори, сигнални табла, мнемонични диаграми и др.;

- ✚ Технически средства за внедряване на алгоритми за автоматично управление и програмирано от логиката управление, включително автоматични контролери;

- ✚ Средства за оперативен контрол, с помощта на който операторът има възможност да осигури дистанционно управление на обекта, директно от панела на оператора;

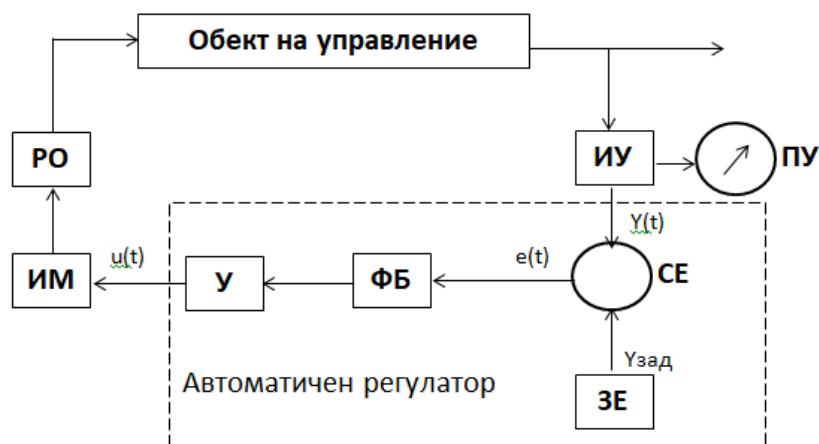
- ✚ Преобразуватели на сигнали от една унифицирана форма в друга, които се използват за хармонизиране на работата на техническите средства от различни видове, когато се използват заедно в един контур за управление или регулиране, и нормализиращи преобразуватели, които са предназначени да преобразуват сигнали от сензори в единен сигнал;

- ✚ Задвижващи механизми, предназначени за придвижване на регулиращото тяло в съответствие с командата на управляващото устройство;

- ✚ Регулиращи органи, предназначени да променят консумацията на вещество или енергия за даден обект.

2. ФУНКЦИОНАЛНА СХЕМА НА СИСТЕМА ЗА АВТОМАТИЗАЦИЯ

Взаимната връзка между средствата за автоматизация се вижда от функционалната схема на системата за автоматично управление, представена на *фиг.2*.



Фиг. 2. Функционална схема на система за автоматично управление

Техническите средства за автоматизация, които участват в една автоматизирана система са: измервателно устройство (**ИУ**), показващо устройство (**ПУ**), автоматичен регулатор (**АР**), изпълнителен механизъм (**ИМ**), регулиращ орган (**РО**).

Информация за текущата стойност на дадена технологична величина от изхода на обекта за управление се получава посредством измервателно устройство. Най-често представлява комбинация от чувствителен елемент (сензор) и преобразувател на една величина в друга. Получената информация се извежда чрез показващо устройство, съдържащо средства за визуализация (индикация), постоянен запис, сигнализация, регистрация на пикови стойности и др.

Предназначението на техническите средства за автоматизация за обработка на информацията е да изработят и поддържат подходящо управляващо въздействие, формирано на базата на съответствието между желаното и реалното състояние на управляваната технологична величина. Управляващото въздействие се формира по определен алгоритъм, наречен закон за управление. Видът и параметрите на закона зависят от свойствата на обекта (процеса) за управление. За формиране на управляващия сигнал се използват задаващи и сумиращи устройства, функционални преобразуватели и усилватели. Тези възли обикновено работят с еднотипни сигнали. Затова най-често те са обединени в един корпус и се произвеждат от промишлеността като едно устройство, наречено автоматичен регулатор. Функционалното предназначение на автоматичния регулатор е да изработи необходимото

управляващо въздействие. Той се явява като основен елемент на всяка автоматична система. За да се реализира правилно регулиране, е необходимо постоянно следене на текущата и желаната стойност на технологичната величина. Желаната стойност на величината, която се регулира, се задава посредством задаващ елемент и се нарича „задание на регулатора“. На изхода на задаващия елемент се формира сигнал $u_{зад}(t)$, който постъпва на положителния вход на сумиращия елемент. На отрицателния вход на сумиращия елемент постъпва сигналът $y(t)$, който дава информация за текущата стойност на регулируемата технологична величина. Разликата между двата сигнала е сигналът $e(t) = u_{зад}(t) - y(t)$ и се нарича „грешка на регулиране“. Грешката $e(t)$ се предава към следващия блок на регулатора - функционалният блок. В този блок е заложен законът за регулиране. Обикновено във функционалния блок са включени елементи за настройка, наречени органи за настройка, чрез които се задават подходящи стойности на параметрите (коефициенти, времеконстанти и др.) на закона за регулиране. По такъв начин регулаторът се настройва спрямо свойствата на управлявания обект. Освен сигнала на грешката, в някои случаи във функционалния блок може да постъпва и сигнал (обратна връзка), отразяващ реализирането на управляващото въздействие от следващите средства за автоматизация. С използването на тази допълнителна информация се постига подобряване на управлението. Обикновено изходният блок на регулатора представлява усилвател. Той усилва по мощност изработеното управляващо въздействие, като в някои случаи управляващото въздействие се дооформя посредством създаване на подходящи характеристики на усилвателя и се преобразува в подходящ сигнал, който да може да въздейства върху следващата част на автоматичната система.

Предназначението на изпълнителните механизми и регулиращите органи е да осигурят използване на формираното управляващо въздействие $u(t)$, което да доведе до изменение на входния за обекта поток енергия, маса или друга управляваща величина. Изменението на управляващия поток е в посока, която води до промяна на регулируемата величина, така че грешката на регулиране да намалява. Обикновено изменението на управляващия поток се постига с помощта на технически средства, които в структурата си имат подвижни елементи. Такива средства са регулиращите органи. Връзката между регулиращите органи и управляващия сигнал $u(t)$ се осъществява посредством изпълнителен механизъм. Той преобразува управляващия сигнал в механично преместване, като по този начин се въздейства върху положението на подвижните елементи на регулиращите органи, а от там и до промяна на съответния управляващ поток.

3. ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ

Обект на управлението се нарича всеки технологичен процес, който протича в някакъв технологичен агрегат (машина, реактор, двигател и др.). Той се характеризира с един или няколко показателя на процеса - физични, химични или икономически величини (температура на пещта, ниво на течност в резервоар, концентрация на разтвор, себестойност на продукцията). В зависимост от конкретните условия те трябва или да се изменят по някакъв закон, или да останат постоянни, независимо от изменението на външните условия и режимите на работа.

Под понятието автоматично управление се разбира съвкупност от целенасочени действия за осигуряване на функционирането на обекта на управлението в съответствие с приетия критерий на съвършенство (целта на управлението). Автоматичното управление, за разлика от автоматичното регулиране, може да се осъществява както с, така и без участието на оператора. И в двата случая, обаче, е налице определена система за автоматично управление (САУ), която обикновено има йерархичен характер (в смисъл на степенуване на информационните команди) и се състои от подсистеми, в това число и от системи за автоматично регулиране (САР). От гледна точка на теорията на информацията, системи за автоматично управление са средства за предаване и преработка на информация, докато системите за автоматично регулиране в някои случаи се използват и като средства за преобразуване и използване на енергия.

Всички необходими операции за управлението на обекта, без участието на обслужващ персонал, се осъществява от устройството за автоматично управление.

Обект на регулиране наричаме тези обекти, на които се регулират величините им с цел достигане на стабилизация. Наричаме ги регулирани величини.

Под понятието автоматично регулиране се разбира поддържане на дадена величина на определено ниво или осигуряването на протичането на определен процес по зададен алгоритъм, без непосредственото участие на човека (оператора). Автоматичното регулиране може да се извърши в затворен или отворен контур, който се нарича система за автоматично регулиране (САР). От гледна точка на теорията на информацията, система за автоматично регулиране е определен клас информационна система, която преобразува съответната информация за постигане на предварително зададените цели.

В някои случаи процесът на управление включва в себе си един или няколко процеса на регулиране, докато обратното е невъзможно. Системите за автоматично регулиране могат да се разглеждат като частен случай на системите за автоматично управление.

1.1. ИЗМЕРВАТЕЛНИ ВЕРИГИ

1.1.1. СЪЩНОСТ. ВИДОВЕ

✓ Измервателна верига

Автоматизиран процес означава да въздействаме върху определени параметри на този процес, като автоматът ги поддържа в определени граници или осъществява изменението им по зададен закон. За да можем да следим конкретни параметри, трябва да имаме информация за техните стойности. За получаване на тази информация се използва измерването.

Всички измервания стават по един и същ начин - сравняваме по опитен път дадена величина с друга, подобна на нея и приета за единица. Да измерим една физическа величина, означава тя да се сравни със съответната единица за измерване.

Измервания, при които стойността на измерваната величина се определя непосредствено от показанията на уред, се наричат преки (измерване на температура с термометър, налягане с манометър или напрежение с волтметър).

Понякога прякото измерване е затруднено или невъзможно. В тези случаи стойността на величината се определя чрез пряко измерване на друга величина, свързана чрез някаква зависимост с измерваната. Тези измервания се наричат косвени.

✓ Елементи на измервателната верига

Съвкупността от техническите средства, с които се осъществява измерването, се нарича измервателна верига. Входен сигнал на измервателната верига е измерваната величина, а изходен - резултатът от измерването. Измерваният сигнал може да се разглежда като изходен сигнал на обекта на измерване.

Някои от изходните сигнали на измервателната верига са достъпни за наблюдение (показатели на волтметъра, амперметъра, термометъра или цифрите на водомера), а други - не (положението на поплавък на нивомер, изходният сигнал на диференциален манометър). В зависимост от конкретното предназначение на измервателната верига и от характера на измервания сигнал, средствата за измерване се делят на:

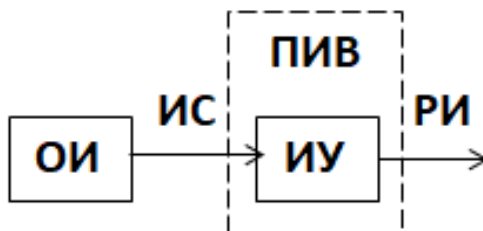
- измервателни уреди;
- преобразуватели.

Изходният сигнал на измервателния уред е предназначен за непосредствено наблюдение и възприемане от човека-оператор. Изходният сигнал на преобразувателя е подходящ за по-нататъшно преобразуване и използване като управляващ сигнал.

✓ *Видове измервателна верига*

Измервателната верига може да съдържа един или няколко елемента.

✚ Най-простата измервателна верига се състои от един елемент - измервателен уред, показана на *фиг. 3*:

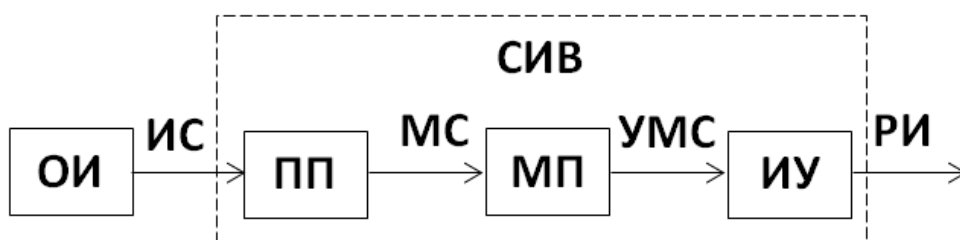


фиг. 3. Измервателна верига с един елемент

ОИ - обект на измерването; **ИС** - измерван сигнал; **ИУ** - измервателен уред;

ПИБ - проста измервателна верига; **РИ** - резултат от измерването

✚ Сложната измервателна верига се състои от няколко последователни измерителни преобразуватели, показана на *фиг. 4*:



фиг. 4. Измервателна верига с няколко елемента

ОИ - обект на измерването; **ИС** - измерван сигнал; **ПП** - първичен преобразувател; **МС**

- междинни сигнали; **МП** - междинни преобразуватели; **УМС** - унифицирани междинни сигнали; **ИУ** - измервателен уред; **СИБ** - сложна измервателна верига;

РИ - резултат от измерването

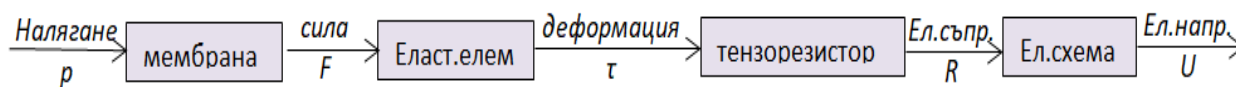
Първият от преобразувателите се нарича първичен преобразувател. Входният сигнал за първичния преобразувател е входен сигнал на цялата измервателна верига - това е измерваният сигнал. Между първичния преобразувател и измервателния уред, в сложната измервателна верига, се включват един или няколко междинни преобразуватели. Всички сигнали в сложната измервателна верига, с изключение на входния и изходния, се наричат междинни сигнали. В практиката се използват ограничен брой изходни сигнали на междинните преобразуватели,

чийто вид и граници на изменение са унифицирани. Тези сигнали се наричат унифицирани междинни сигнали.

Като елемент на измервателната верига първичният преобразувател осъществява първото преобразуване на измервания сигнал в междинен. За целта той е в непосредствен контакт с измерваната среда и е подложен на въздействието ѝ (високи налягания, температура, влажност, химическа активност на средата). Поради тази особеност конструкцията, свойствата и характеристиката на първичния преобразувател трябва да се съобразяват с особеностите на конкретната измервана среда. Ето защо даже при измерването на една и съща физическа величина, в зависимост от условията на измерване, се използват различни първични преобразуватели.

Използването на междинен преобразувател в структурата на измервателната верига се налага по няколко съображения. В системите за автоматичен контрол и регулиране на технологични величини измервателният уред се монтира при оператора, в повечето случаи отдалечен на значително разстояние от обекта на измерване. При пренасянето измерваният сигнал трябва да се усили, филтрира (да се защити от смущаващи въздействия), линеализира и т.н. Тези функции се реализират от междинния преобразувател. В някои случаи първичният преобразувател и измервателният уред се обединяват в едно (когато първичните преобразуватели имат неподходящ за дистанционно предаване изходен сигнал). За да може първичният преобразувател да се отдели от измервателния уред, се налага изходният му сигнал да се преобразува в сигнал, удобен за дистанционно предаване.

Използването на междинен преобразувател с унифицирани изходни сигнали позволява да се намали номенклатурата на измервателния уред. Те са най-сложните и скъпи елементи на измервателната верига. Със създаването на междинни преобразуватели, които да преобразуват различните междинни сигнали в унифициран изходен сигнал, се създават условия един и същ уред да се използва за измерване на различни по своята физическа природа технологични величини, които могат да се изменят в различни обхвати.

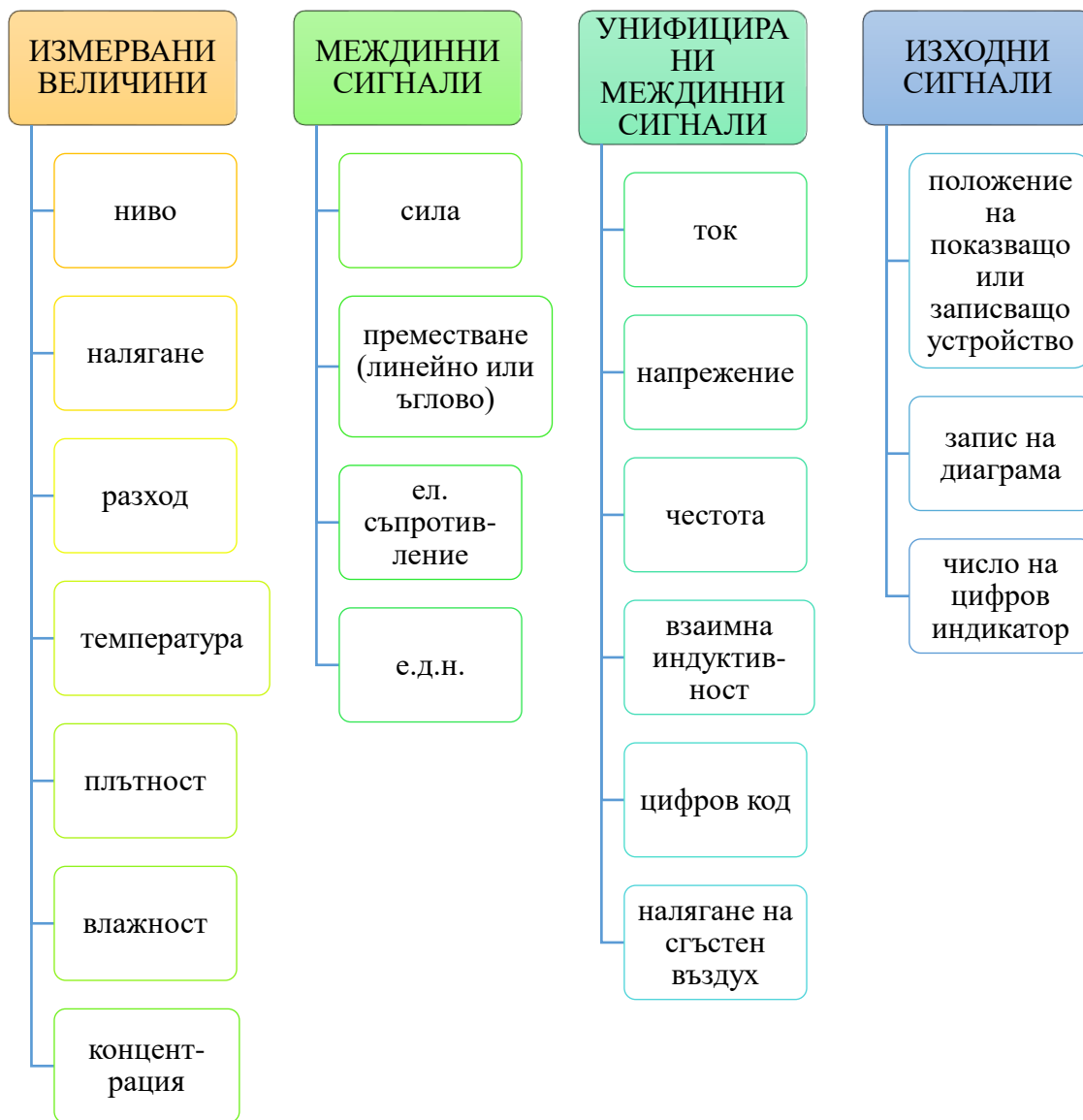


фиг. 5. Преобразуването на налягане в електрически изходен сигнал

В някои случаи, когато изходният сигнал на първичния преобразувател е електрически, за опростяване на измервателната верига той не се преобразува в унифициран. За измерването на такива неунифицирани електрически сигнали се използват специални уреди. Най-често

използваните неунифицирани сигнали са електрическото съпротивление на терморезистор и е.д.н. на термодвойки.

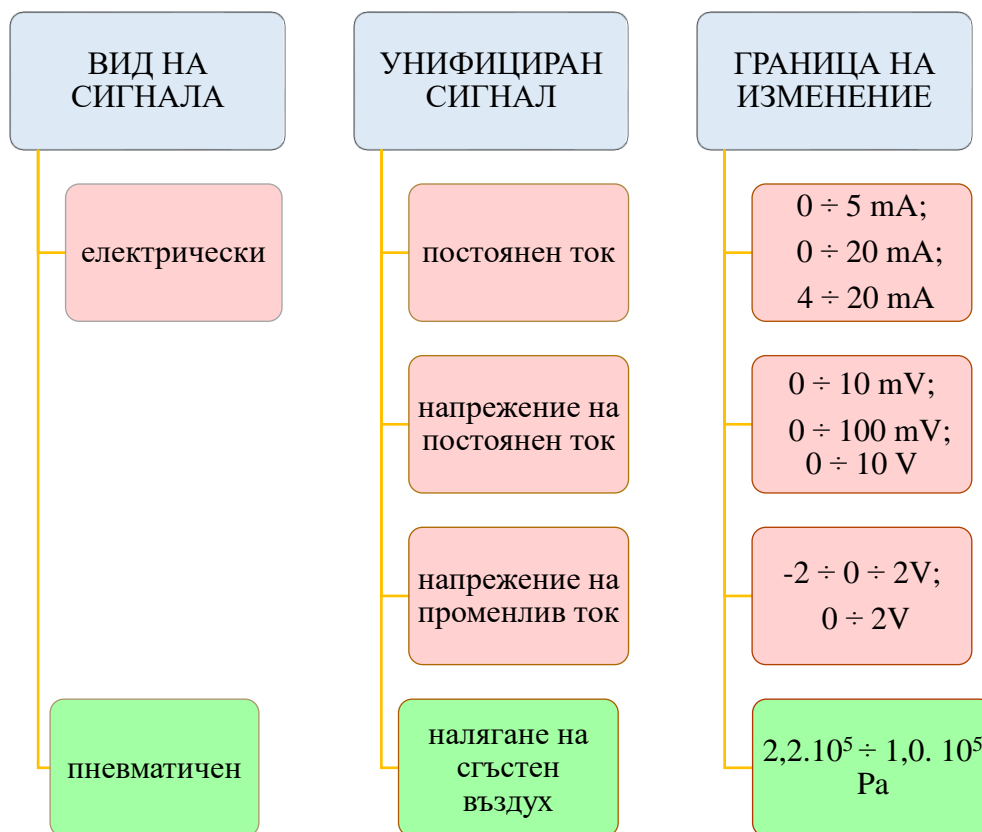
По-долу са посочени най-разпространените междинни, унифицирани и изходни сигнали.



фиг. 6. Междинни, унифицирани и изходни сигнали

Понякога измервателната верига е част от системата за автоматично управление или регулиране и показващ уред не е необходим.

Унифицираните междинни сигнали обикновено са електрически и пневматични. Тези сигнали са най-удобни за дистанционно предаване.



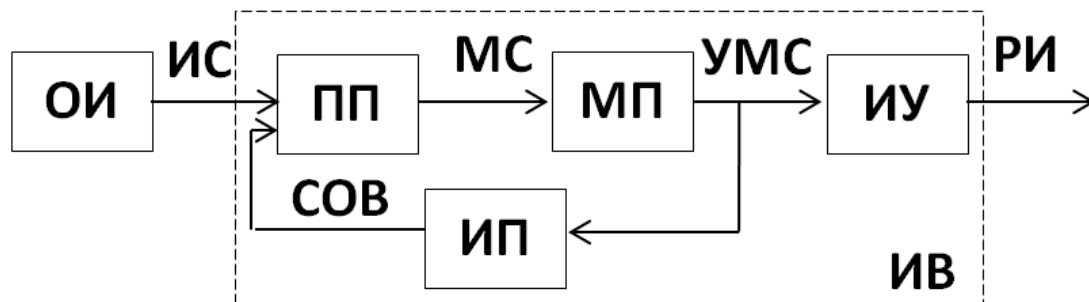
фиг. 7. Унифицирани междинни сигнали

Видът на унифицирания междинен сигнал се определя от дължината и шумозащитеността на канала за връзка, а в някои случаи се отчитат и фактори като пожаро и взривобезопасност на производството и др. Пневматичният сигнал е пожаро и взривобезопасен, а кодираният сигнал - най-шумоустойчив.

1.1.2. СТРУКТУРА И ЕЛЕМЕНТИ НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ ВЕРИГИ

В зависимост от предназначението си измервателна верига може да има различна структура. Разгледаната до момента последователна структура на включване на отделните преобразуватели е най-често срещаната, но не и единствената.

✓ Измервателна верига с обратна връзка

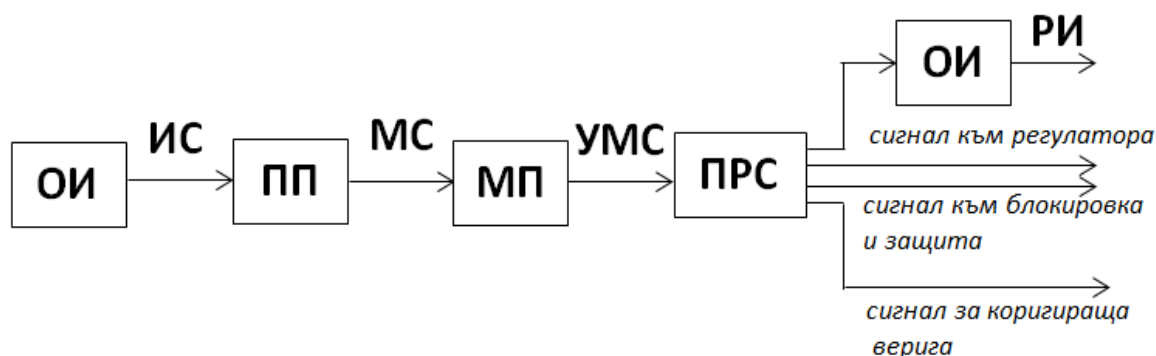


фиг. 8. Измервателна верига с обратна връзка

ОИ - обект на измерването; **ИС** - измерван сигнал; **ПП** - първичен преобразувател;
МС - междинни сигнали; **МП** - междинни преобразуватели; **ИП** - измервателен преобразувател; **ИУ** - измервателен уред; **ИВ** - измервателна верига;
РИ - резултат от измерването

Измервателната верига с обратна връзка (фиг. 8) се използва в случаите, когато изходният сигнал след няколкократни преобразувания се отличава от входния измерван сигнал поради натрупването на грешка при преобразуванията - под действието на различни смущаващи фактори. В такива случаи е целесъобразно изходният сигнал, чрез подходящ измервателен преобразувател, включен във веригата на обратната връзка, да се преобразува в сигнал на обратната връзка (**СОВ**) и да се сравни с входния. Така може да се въведе автоматична корекция в резултат на измерването, като се компенсира част от грешката, възникнала под действието на смущаващите фактори.

✓ *Разклонена измервателна верига*



фиг. 9. Разклонена измервателна верига

ОИ - обект на измерването; **ИС** - измерван сигнал; **ПП** - първичен преобразувател;
МС - междинни сигнали; **МП** - междинни преобразуватели; **УМС** - унифицирани междинни сигнали; **ПРС** - преобразувател за размножаване на сигнала;
ОИ - обект на измерването; **РИ** - резултат от измерването

При разклонената измервателна верига (*фиг. 9*) изходният сигнал може да бъде използван и за други цели: формиране на управляващ сигнал в САР; сигнал за блокировка и защита, а понякога и за формирането на коригиращо въздействие при синтеза на многосвързващи системи за регулиране. В последния случай сигналите се разделят от преобразувател за размножаване на сигнала (ПРС). Ако е необходимо, той разделя галванично изходните сигнали от входните.

Основните елементи на измервателните вериги са:

- първичен регулатор ПР;
- междинен преобразувател МП;
- измерителен преобразувател ИП;
- измерителен уред ИУ;
- преобразувател на размножаваните сигнали ПРС

1.1.3. ИЗМЕРВАТЕЛНИ ВЕРИГИ - МЕТРОЛОГИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

✓ Метрологични характеристики на измервателните преобразуватели и измервателните вериги

Измервателната верига може да се разглежда като входен блок на управляващата част и системата за автоматизация. От точността на измерването и преобразуването, линейната зависимост на изходния сигнал от входния, чувствителността на преобразувателите, мощността на сигналите и т.н. се определят и възможностите за формиране на управляващото въздействие, което да гарантира високо качество на технологичния процес.

За да се удовлетворяват изискванията към измерването, елементите и измервателната верига трябва да имат определени метрологични характеристики:

- допустима грешка при измерването;
- чувствителност;
- линейност на преобразуването и др.

✚ Грешки на измервателните преобразуватели (ИП)

Грешката на измерването е основна метрологична характеристика на измервателните преобразуватели и измервателната верига. Различават се случайни и систематични грешки.

Случайните грешки се изменят случайно при многократни измервания на една и съща величина. Те не могат да бъдат отстранени или отчетени в процеса на измерване. Дължат се на фактори, които се проявяват с интензивност, която трудно може да се предвиди:

- действието на смущаващи въздействия със случаен характер;
- намаляване на вниманието на оператора и др.

При създаването на измервателни преобразуватели и при провеждане на измерването стойността на случайната грешка може да се сведе до допустима граница, при която да не влияе върху резултата от измерването.

Систематичните грешки са тези, които се изменят закономерно или остават постоянни при многократни измервания на една и съща величина. Те възникват поради недостатъци на метода на измерване и конструкцията на измервателния преобразувател. Те могат да бъдат изчислени, а следователно и отчетени в резултата на измерването.

В теорията се използват понятията истинска стойност на измерваната величина и резултат от измерването.

Истинската стойност на измерваната величина не зависи от средствата на нашето познание и представлява абсолютната истина, към която се стремим като се опитваме да я изразим с числена стойност.

Резултатът от измерването е продукт на нашето познание. Той е приблизителна оценка на стойността на величината, намерена чрез измерване и следователно зависи от метода, условията на измерване и техническите средства.

Разликата Δx между истинската стойност $x_{\text{и}}$ на измерваната величина и резултата от измерването x се нарича абсолютна грешка на измерването:

$$\Delta x = x_{\text{и}} - x$$

Абсолютната грешка може да бъде определена с известно приближение, ако вместо $x_{\text{и}}$ се използва резултатът от измерване с по-точен уред или теоретично определена стойност.

За да може да се характеризира точността на измерването, се въвежда понятието относителна грешка $\Delta_{\text{отн}}$:

$$\Delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta x}{x_{\text{и}}} = \frac{(x_{\text{и}} - x)}{x_{\text{и}}}$$

Тя е безразмерна величина и може да бъде изразена в проценти:

$$\Delta_{\text{онт}} = \frac{\Delta x}{x_{\text{и}}} \cdot 100\%$$

при $x_i = 0$, относителната грешка е безкрайно голяма.

Тази неопределеност може да се избегне като се въведе понятието приведена грешка γ (гама), която се дефинира като отношение на абсолютна грешка към някаква нормираща стойност x_i :

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_i}$$

Приведената грешка е също безразмерна величина и следователно може да бъде изразена в проценти:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_i} \cdot 100\%$$

Приведената грешка е пропорционална на абсолютна. Ако абсолютната грешка на измервателния преобразувател е постоянна в целия обхват на измерване, то и приведената грешка ще е постоянна. Следователно приведената грешка γ характеризира точността на измервателния преобразувател, независимо от стойността на измерваната величина. По тази причина приведената грешка се смята за основна метрологична характеристика на измервателния преобразувател и на измервателната верига като цяло.

За всеки измервателен преобразувател се регламентират нормални условия за експлоатация. Това са условията, при които влияещите върху процеса на измерване величини (*температура и влажност на околната среда, захранващо напрежение, външни полета, положение на преобразувателя в пространството и т.н.*) имат стойности, които се определят от стандарти и са записани в техническите условия на дадения вид преобразуватели под формата на номинални с нормални отклонения.

Пример: температура на околната среда $20 \pm 2^\circ \text{C}$; захранващо напрежение $220 \text{ V} \pm 10\%$.

Грешката на измервателния преобразувател, която възниква при неговата работа в нормални условия, се нарича основна грешка.

Изменението на основната грешка, което възниква при отклонение на условията на експлоатация от нормалните, се нарича допълнителна грешка на преобразувателя.

Нито една от разглежданите грешки не може да се приеме като обобщаваща характеристика на метрологичните свойства на измервателните преобразуватели.

За сравняване на различните преобразуватели се използва обобщената характеристика клас на точност.

Класът на точност на измервателния преобразувател е максималната приведена грешка (в проценти) при нормални условия на експлоатация. Класът на точност не може да се използва

като непосредствен показател за точност на преобразувателя, тъй като определя максимално възможната стойност на приведена грешка. При всяко конкретно измерване грешката на преобразувателя може да бъде по-малка от максималната.

При измерване на конкретна технологична величина трябва да се обръща внимание не само на класа на точност, но и на обхвата на измерване на преобразувателя.

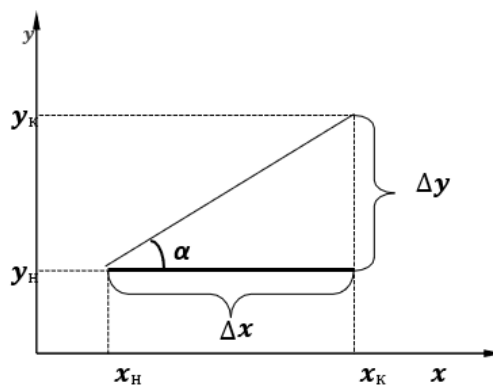
Класът на точност на измервателния преобразувател се регламентира от стандарт. У нас за стандартизирани са приети следните класове на точност: **0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,25**

Грешката на преобразувателя при измерване на постоянна величина се нарича статична. Ако измерваната величина се изменя във времето, преобразувателят работи в неустановен режим. Допълнителната грешка на измервателния преобразувател, която възниква при измерването на изменящи се във времето величини, се нарича динамична. Тази грешка се определя от динамичните свойства (*инертност, закъснение и др.*) на реалния преобразувател при неговата работа в неустановен режим.

Динамичната грешка на измервателния преобразувател или на цялата измервателна верига е много важна при измерването на бързо сменящи се технологични величини (*разход, налягане, концентрация и др.*). Поради непрекъснатото изменение на регулираната величина (*измервания сигнал*), в този случай статичната грешка на измервателна верига не е от значение, тъй като на практика установен режим може въобще да не се достига.

✚ Статични характеристики на измервателните преобразуватели (ИП)

Друга важна характеристика на измервателните преобразуватели е статичната им характеристика. Тя представлява зависимостта на изходния сигнал y на преобразувателя от входния x в установено състояние. Обикновено се използват преобразуватели с линейна статична характеристика, изобразена на *фиг. 10*:



фиг. 10. Линейна статична характеристика

Линейната статична характеристика се определя от два параметъра:

- начална точка на обхвата на измерване (x и, u и) и
- ъгъл на наклона α .

$$K = tg\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Тангенсът на ъгъла ($tg\alpha$) на наклона е равен на отношението на обхвата на изменение на изходния сигнал на преобразувателя Δy към обхвата на изменение на входния му сигнал Δx .

Параметърът K се нарича предварителен коефициент на измервателния преобразувател. Ако сигналите x и y се измерват в еднакви единици, предварителният коефициент е безразмерна величина и се нарича коефициент на усилване.

Пример: Коефициентът на усилване на усилвателя на напрежение показва в каква степен изходното му напрежение е по-голямо от входното.

✚ Чувствителност на измервателните преобразуватели (ИП)

Чувствителността на измервателните преобразуватели определя тяхната способност да реагират или измерват малки сигнали. Колкото по-малки сигнали може да измерва преобразувателя, толкова по-голяма е неговата чувствителност. За количествена оценка на чувствителността се използват праг на чувствителност и праг на реагиране.

Прагът на чувствителност е максимално възможният обхват на измерване, при който приведената грешка достига 100%. Абсолютната грешка в този случай става равна на големината на обхвата на измерване. Преобразувател, който работи в обхват, близък по стойност до прага на чувствителност, е непригоден за измерване.

Прагът на реагиране на измервателните преобразуватели представлява минималното изменение на входния сигнал, което поражда изменение и на изходния.

✚ Метрологични характеристики на измервателната верига (ИВ)

Сложната измервателна верига се състои от измервателни преобразуватели, свързани помежду си последователно, паралелно, със и без обратна връзка и разклонения. Метрологичните свойства на измервателната верига като цяло се определят от свойствата и характеристиките на отделните ѝ елементи и начина на тяхното свързване.

За целите на автоматичния контрол и регулиране се използват две основни метрологични характеристики на измервателната верига: резултатна грешка и предавателен коефициент.

Установяването на еднозначна зависимост между резултатна грешка на измервателната верига и грешката на съставлящите преобразуватели е практически невъзможно. Могат да бъдат оценени само граничните стойности на приведената грешка на сложна верига.

Например: Ако грешките на всички преобразуватели, свързани последователно в измервателната верига, имат еднакъв знак, то максималната резултатна грешка на веригата γ_{max} ще бъде равна на тяхната сума:

$$\gamma_{max} = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \dots + \gamma_n$$

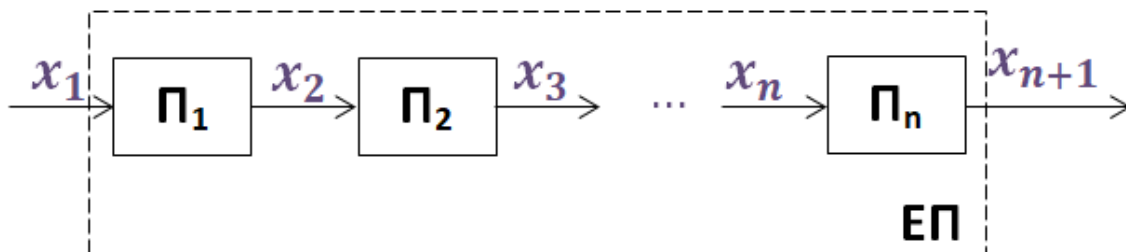
където $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$ са приведени грешки на отделните преобразуватели.

За приближена оценка на приведената грешка е по-целесъобразно да се използва средно квадратична грешка $\gamma_{ск}$:

$$\gamma_{ск} = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 + \dots + \gamma_n^2}$$

Предавателният коефициент K на измервателната верига, съставена от последователно включени $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n$ (фиг.10), е равен на произведението на предавателните коефициенти $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ на отделните преобразуватели (еквивалентен преобразувател ЕП):

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n$$



фиг. 11. Еквивалентен преобразувател

За еквивалентния преобразувател измерваният сигнал x_1 е входен сигнал, а изходен е резултатът от измерването x_{n+1} .

Линейността на статичната характеристика означава постоянна стойност на K за преобразувателя за целия обхват на измерване. Ако всички коефициенти $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ са постоянни, то постоянно ще бъде и тяхното произведение K .

1.2. ДИСТАНЦИОННИ СИСТЕМИ

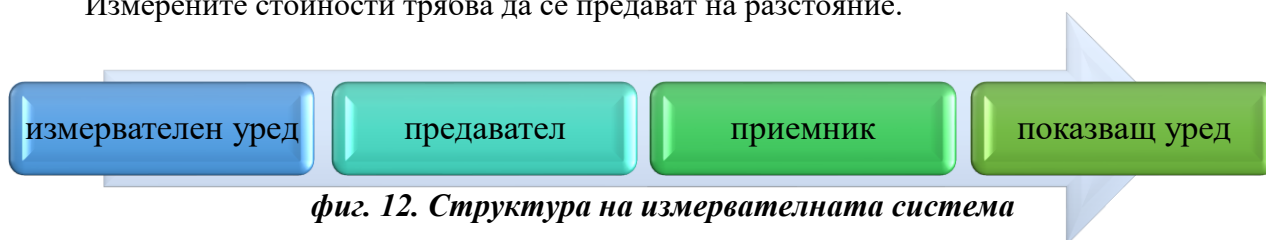
1.2.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ ЗА ДИСТАНЦИОННО ПРЕДАВАНЕ НА ДАННИ

Предаване на сигнали в практиката се налага, когато отделните уреди или самостоятелни възли на съоръжението са отдалечени един от друг или между тях има разделителни стени. Това е важно при машини и агрегати, участващи в един производствен процес, които се намират на известно разстояние от пункта за управление или един от друг (големи заводи, мини, напоителни системи, водопроводна мрежа и др.).

Дистанционното предаване на данни дава възможност да се получат сведения и от недостъпни за човека-оператор обекти: при висока температура, наличие на радиация и отровни газове и др.

✓ Структурна схема на измервателна система

Измерените стойности трябва да се предават на разстояние.



фиг. 12. Структура на измервателната система

Измервателният уред може да се състои само от чувствителен елемент. Предавателят е преобразувател, който изработва удобни за предаване сигнали. Могат да бъдат включени и спомагателни устройства като усилватели, релета, филтри и др. за допълнителни преобразувания на измерената стойност. Каналът за връзка може да бъде жичен или безжичен, в зависимост от разстоянието и начина за предаване на сигналите. Приемникът изработва сигнал, подходящ за приемане от показващия уред или от записващи уреди, сигнални устройства и др.

В някои случаи може да няма някои от блоковете в структурната схема:

- Ако изходният сигнал на измервателния уред е удобен за предаване, може да няма предавател;
- Ако предаденият сигнал е подходящ за входен сигнал на уреда за извеждане на измерените стойности, приемникът може да липсва.

При изграждането на системи за дистанционно предаване на данни трябва да се вземат предвид следните фактори:

- разстоянието между местата на измерване и извеждане на измерените стойности;
- броят на измерените стойности, които се предават за единица време
- скоростта на изменение на измерваната величина
- свойствата на каналите за предаване, капацитетът на каналите
- изискванията към измерените стойности, особено по отношение на графичните стойности на грешките
- видът и формата на сигналите на изхода на измервателния уред
- движение на измервания обект или на приемника, максимални размери на измервателния обект, преминаване през стени, екстремални работни условия на мястото на измерване (топлина, налягане, радиация и др.), допустими разходи.

При проектиране на кабелните трасета трябва да се имат предвид няколко препоръки:

- Силовите и информационните кабели трябва да се пресичат под ъгъл 90° .
- При използване на канали за полагане на кабели, на дъното на канала се монтират силовите кабели с най-високо напрежение, а най-отгоре – информационните (сигналните) кабели.
- Сигналните кабели трябва да се полагат на разстояние по-голямо от 30m от металните конструкции.

1.2.2. КЛАСИФИКАЦИЯ НА СРЕДСТВАТА ЗА ДИСТАНЦИОННО ПРЕДАВАНЕ НА ДАННИ

Сигналите могат да се предават на разстояние както в аналогов, така и в цифров вид, като по продължение на цялата линия първоначалните им параметри трябва да се запазват. В промишлените предприятия, където широко се използват системите за събиране на данни и управление на процесите, обикновено съществува високо шумово ниво. В този случай, за осигуряване на качествено предаване на информацията, трябва да се използват специални методи за предаване на сигналите в зависимост от характеристиките на сигнала, вида на линията за предаване и дължината ѝ.

Класификация на телеизмервателните устройства може да се направи в зависимост от изискванията към тях и от условията, при които те работят.

Основната класификация е по параметъра, с който стойността на измерваната величина се предава по канала за връзка:

✚ Токови системи - при телеизмервателните устройства от тази система големината на тока в канала за връзка зависи от стойността на измерената величина.

- Токова система с реостатен преобразувател (потенциометрична следяща система).
- Система за предаване на данни с постоянен ток, при която измерваният променлив ток се изпраща и по свързващия канал се предава постоянен ток.
- Генераторна система, при която измервателен генератор с малка мощност създава е.д.н., пропорционално на измерваната величина или зависещо по определен начин от нея (обикновено измерената величина предварително се преобразува в скорост на въртене на ос, чието движение се предава на ротора на измервателния генератор).
- Компенсирана точкова система, при която през свързващия канал протича ток от спомагателен източник. Големината на този ток се регулира автоматично, в зависимост от въртящия момент или ъгъла на отклонение на подвижната част на измервателния уред.

✚ Напрежителни системи - големината на постоянното или променливото напрежение на канала за връзка зависи по определен начин от стойността на измерваната величина. В края на канала за връзка напрежението се измерва с компенсатор. Системите с постоянно напрежение имат голяма точност, характерна за нулевия измервателен метод.

✚ Честотни системи - честотата на токовите импулси (при честотно-импулсни системи) или честотата на променливия ток (при честотните системи за променлив ток) зависи от стойността на измерваната величина. Изменението на характеристиките на свързващия канал не влияе върху основната честота на предавания сигнал и не внася допълнителни грешки.

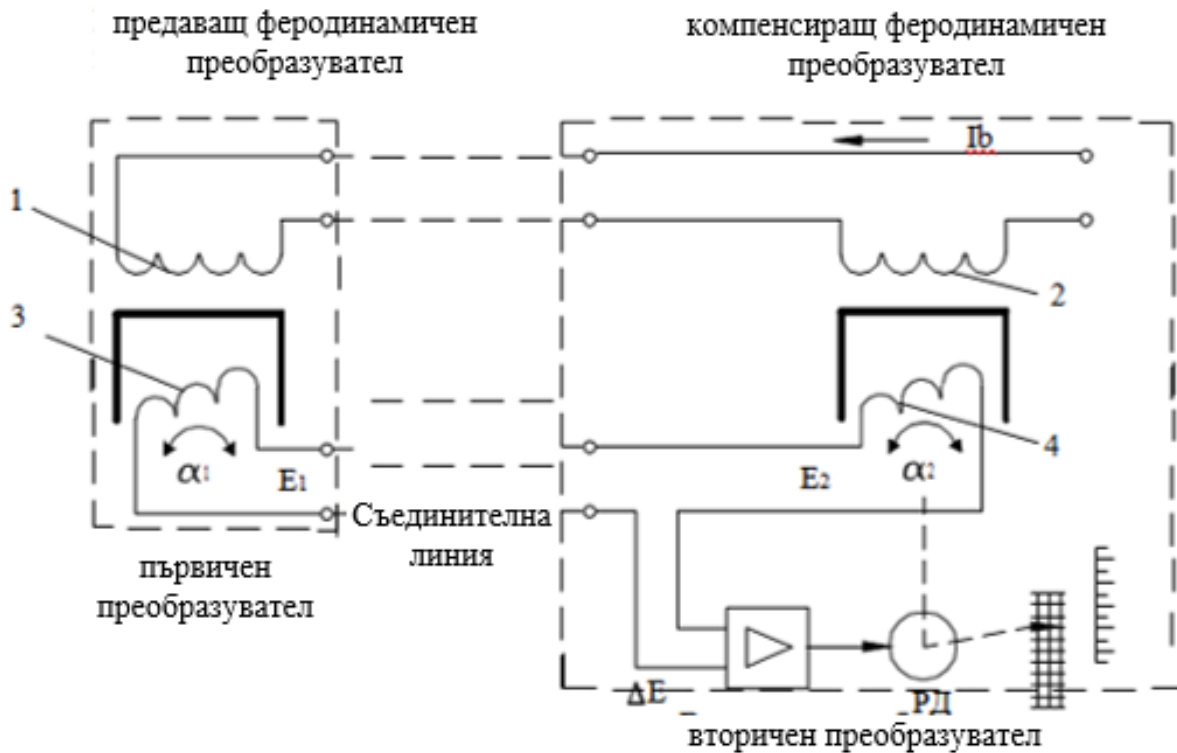
✚ Временни системи - продължителността на импулсите или интервалът между импулсите, или фазовият ъгъл между два тока, или две напрежения зависят от стойността на измерваната величина.

Пример: *В предавателя продължителността на импулса обикновено зависи от отклонението на подвижната част на първичния измервателен уред. В приемника продължителността на импулса се преобразува отново в отклонение на подвижната част на вторичния показващ уред.*

✚ Числови системи - броят на токовите импулси или съчетанието на импулси от различен вид (кодово-импулсни системи) зависи от стойността на измерваната величина.

1.2.3. СХЕМИ ЗА ДИСТАНЦИОННО ПРЕДАВАНЕ НА ДАННИ

✓ Феродинамична система за предаване на сигналите (фиг.12)



фиг.13. Феродинамична система за предаване на сигналите

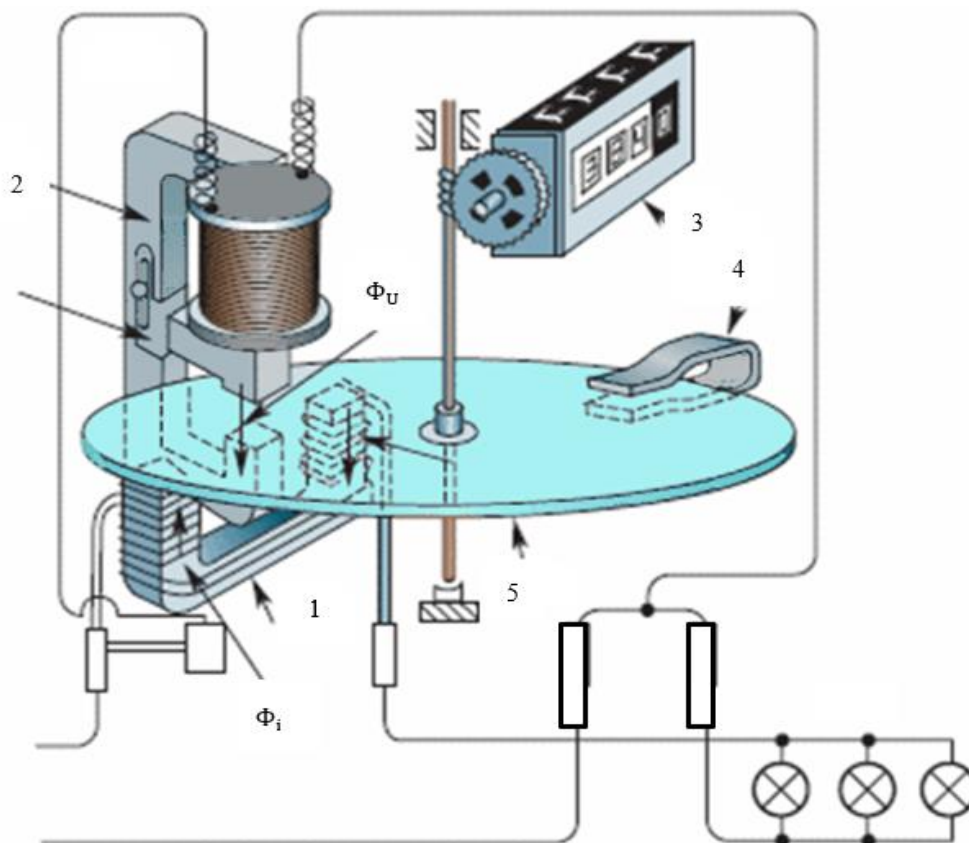
Принципната схема на феродинамичната система за предаване на сигналите е показана на **фиг.13**. Възбуждащите намотки 1 и 2 на предавация и компенсиращия преобразувател са включени последователно, за да се изключи влиянието на изменението на амплитудата и честотата на възбуждащия ток върху показанията на уреда. Рамките 3 и 4 са включени противоположно, вследствие на което на входа на усилвателя постъпва разликата ΔE между електродвижещите напрежения на предавация E_1 и компенсиращия E_2 преобразувател.

При $\Delta E = 0$ на входа на усилвателя няма сигнал и двигателят РД е в покой. При изменение на измерваната величина се изменя положението на чувствителния елемент на първичния преобразувател и стойността на E_1 се променя. На входа на усилвателя постъпва сигналът ΔE , който се усилва и привежда в движение вала на реверсивния двигател РД. Валът на РД е свързан кинематично с рамката на компенсиращия преобразувател и стрелката на уреда.

Двигателят променя положението на рамката до изравняване на E_1 и E_2 . В този момент двигателят спира и стрелката на уреда показва стойност, която съответства на стойността на

измерваната величина. При еднакви характеристики на предаващия и компенсиращия преобразувател, в момента на компенсация, рамките им заемат еднакво положение спрямо неутралната линия.

✓ *Индукционна система (фиг.14)*



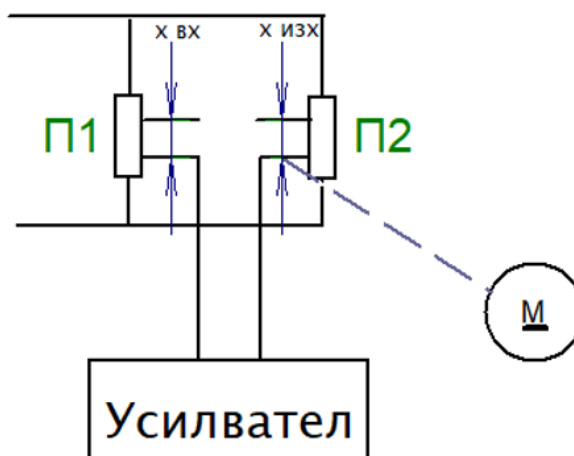
фиг.14. Индукционна система [31]

Устройството на индукционната система, показана на **фиг.14** включва брояч (3), който служи за отчитане на консумацията на електрическа енергия. Основната част на измервателния уред е магнитна система 1 с две намотки. Едната намотка е включена в схемата последователно, а другата паралелно. Променливите токове, протичащи през всяка намотка, възбуждат редуващи се магнитни потоци, които създават въртящо се магнитно поле. Тези потоци проникват в алуминиевия диск 5 на брояча и индуцират вихрови токове в него. Действието на въртящото се магнитно поле, генерирано от магнитните потоци върху вихровите токове, кара диска да се върти. Оста на диска, през зъбни колела, прехвърля движението към преброяващия механизъм 3. Постоянен магнит 4 служи за спиране на диска.

Броячът, по време на въртенето си, преминава между полюсите на постоянния спирачен магнит 4 и пресича неговите магнитни линии. В резултат на това постоянният магнит също

индуцира вихрови токове в диска. Взаимодействието на магнитното поле на постоянен магнит и вихровите токове създава необходимото спиране на диска, пропорционално на скоростта на въртенето му.

✓ *Потенциометрична система за проследяване на движението (фиг.15)*



фиг. 15. Потенциометрична система за проследяване на движението

Подвижната част на първичния измервателен уред е закрепена на оста на плъзгача на потенциометъра П₁, а подвижната част на вторичния показващ уред - на оста на потенциометър П₂. Когато ъгълът на завъртане на потенциометъра П₂ е различен от ъгъла на завъртане на потенциометъра П₁, във веригите им настъпват различни напрежения и към усилвателя се подава тяхната разлика Δu . Усиленото напрежение задвижва двигателя (Д), който премества подвижната част на вторичния показващ уред, докато не се изравнят двата ъгъла. Тогава $\Delta u = 0$, двигателят спира да се върти и системата се намира в равновесие, при което вторичният уред показва стойността на измерената величина.

2.1. МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА КОНТРОЛ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЕЛИЧИНИ

Целта на контрола е само да установи дали определено качество на контролния образец отговаря на изискванията към него. За разлика от измерването, при контрола не винаги резултатът е числена стойност.

Съществуват няколко вида контрол:

- Контролът чрез измерване може да се разглежда като специална област на измервателната техника.
- Контрол без измерване - липсва количественото изразяване, а се класифицират определени, неподлежащи на количествена оценка качества или свойства на контролния образец - форма, цвят и др.

Измервателните методи могат да се класифицират по различни признаци:

- Според наличието на допълнителен източник на енергия, те биват: измервателни методи без спомагателна енергия и със спомагателна енергия.
- Според вида на сигналите, с които се предават измерваните стойности: аналогови и цифрови.
- Според процеса на измерване:
 - ✚ отчитане на показанията на уред или чрез сравняването ѝ със съответна мярка;
 - ✚ косвени измервания, при които резултатът от измерването се получава чрез преки измервания на няколко величини, функционално свързани с измерваната;
 - ✚ съвкупни измервания, при които стойностите на измерваната величина се определят, като се реши система уравнения, в които участват неизвестни стойности на измерваните величини и други параметри, определени чрез преки измервания.

Преките измервания могат да се извършат по няколко основни метода, в зависимост от това дали се сравнява измерваната величина със съответната мярка: метод на отклонението, метод на разликата, компенсационен метод, следящ метод.

- При метода за отклонение (метод на непосредствената оценка), както и при повечето аналогови измервателни методи, измерваната величина се получава като отклонение на стрелката на измервателен уред. Този метод е най-бърз и най-прост, но в редица случаи не е достатъчно точен. Показват се абсолютни стойности, тъй като не могат да се отчетат грешките при измерването.

➤ При метода на разликата на преобразуваната първична или междинна величина противодействия създадена в уреда или въведена отвън сравнителна величина със зададена стойност. Поради необходимите мерки от изработване и поддържане на постоянна стойност на сравнителната величина, този метод в общия случай води до използването на повече уреди, отколкото методът на отклонението, но е особено подходящ да реализира малки, но напълно използвани измервателни обхвати.

➤ Характерно за компенсиращия метод е, че компенсация може да се осъществява само при носещи енергия величини. Най-често това са сила, налягане, въртящ момент, напрежение, ток и излъчване. Някои от предимствата на метода са: в уравновесено състояние не се консумира енергия; намалява се влиянието на смущаващите въздействия при преобразуването на измерваната стойност; лесно могат да се реализират големи измервателни обхвати при висока чувствителност; постига се постоянна чувствителност, дори и при нелинейни характеристики.

➤ Следящият метод не е универсален, а се използва за разрешаване на специални задачи на измерването. При него не се компенсират величини, носещи енергия. Използва се само при величините път и ъгъл или при величини, които могат да се преобразуват в линейно или ъглово преместване.

2.2. СЕНЗОРИ

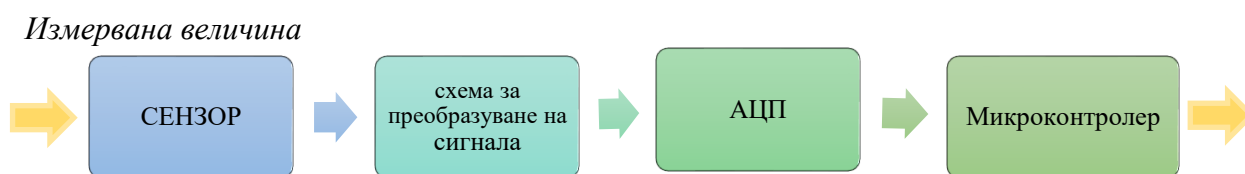
Автоматиката или още автоматизацията, представлява намаляване или изключване на намесата на човека в различни индустриални и технологични процеси, свързани с производството, проектирането, научните изследвания, добиването на полезни изкопаеми, управлението на машини и устройства, преработката и събирането на информация и др. За автоматизиране на даден процес е необходимо да има източник на информацията (сензор), средство за преработване на информацията (процесор, чип), управляващо устройство (контролер), изпълнителен механизъм и обратна връзка. Този комплекс от механизми се възприема в своята цялост и се нарича система.

Сензор или датчик е първичен преобразувател на физични или химични въздействия в удобен за използване електрически сигнал. Тези устройства представляват неизменна част от системите за автоматизирано управление и регулиране. Разликата при сензора, спрямо измервателния уред е, че сензорът сам по себе си няма зададени предварително фиксирани

стойности на отчитаната величина. Сензорът обикновено е част от системата на много измервателни уреди, но той не работи самостоятелно. За да се възприеме информацията от него, първо е необходимо неговият сигнал да бъде усилен и разчетен в системата. Сензори са интегрирани в множество устройства, които използваме всеки ден, като *например* магнитният сензор в мобилни телефони, сензорът за движение др. Възможните им приложения са практически неограничени.

Индикатор за големината на промяната на изходния сигнал при дадена промяна на входната величина е Чувствителността на сензора.

На *фиг. 16* е показана блокова схема на сензор.



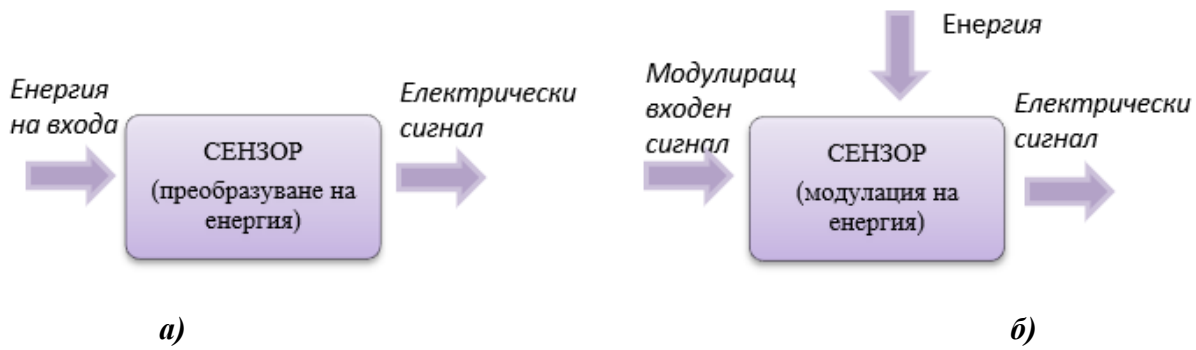
фиг. 16. Блокова схема на сензор

Сигналят, постъпващ от сензора, е малък по амплитуда като е смесен със смущаващи сигнали и шумове. Може да възникне и необходимост от линеаризирането му. Формирането на сигнала с оптимални характеристики за следваща обработка се осъществява с помощта на схема за нормализиране на сигналите, която може да включва усилвател, филтър и други аналогови схеми. В някои случаи част от тези схеми са в непосредствена близост до сензорния елемент. Формираният аналогов сигнал след това се преобразува в цифров и се предава към микроконтролера.

Сензорите се разделят на две основни групи:

➤ Активните сензори - *фиг. 17. а)* преобразуват физичната величина директно в електрически сигнал. Тези сензори не се нуждаят от допълнителна електрическа енергия. Тъй като функционират на електродинамична или пиезоелектрична основа, те измерват само промени на измерваната величина. Статични измервания не са възможни. Друга тяхна важна особеност е, че благодарение на физичния им принцип те могат да бъдат използвани реципрочно като изпълнителни устройства.

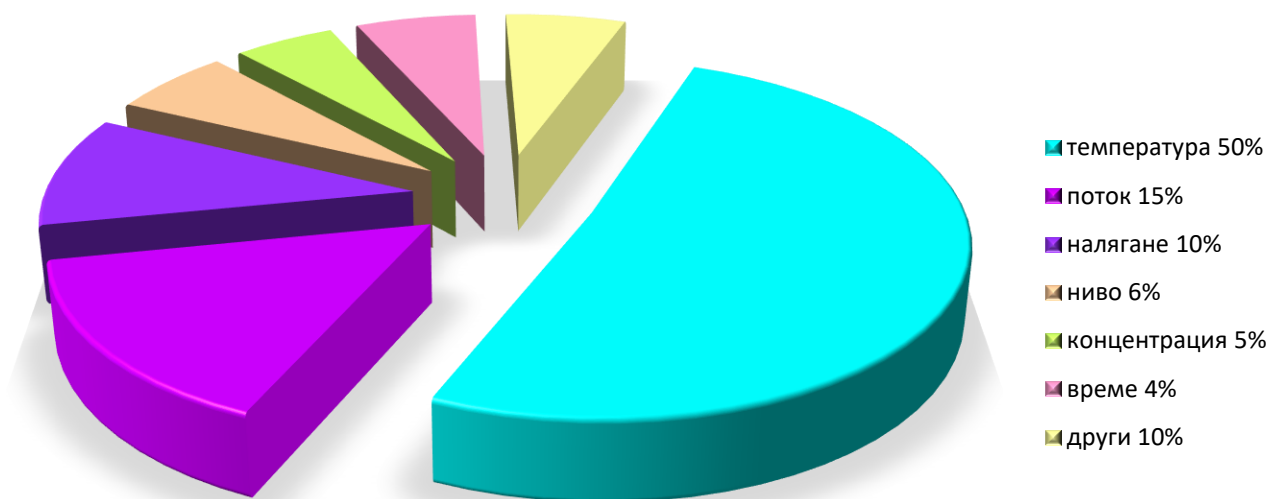
➤ Пасивните сензори - *фиг. 17. б)* съдържат най-вече електрични компоненти, чиито параметри се променят под влияние на измерваната величина, например фоторезистори. Чрез допълнителна електроника изменението бива преобразувано в електрически сигнал. Този вид сензори се използват както при динамични, така и при статични измервания.



фиг. 17. Сензори

На фиг.18 е представена зависимостта на разпределение на видовете измервания при непрекъснатите производства.

Измервания при непрекъснатите технологични процеси



фиг. 18. Разпределение на видовете измервания при непрекъснатите производства

2.3.ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ И КОНТРОЛ НА ТЕМПЕРАТУРА

2.3.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНИ СКАЛИ

Температурата е физическа величина, която характеризира състоянието на термодинамичното равновесие на системата и е един от основните параметри в инженерните системи. Той се отличава с редица основни характеристики, които налагат използването на различни методи и технически средства за неговото измерване.

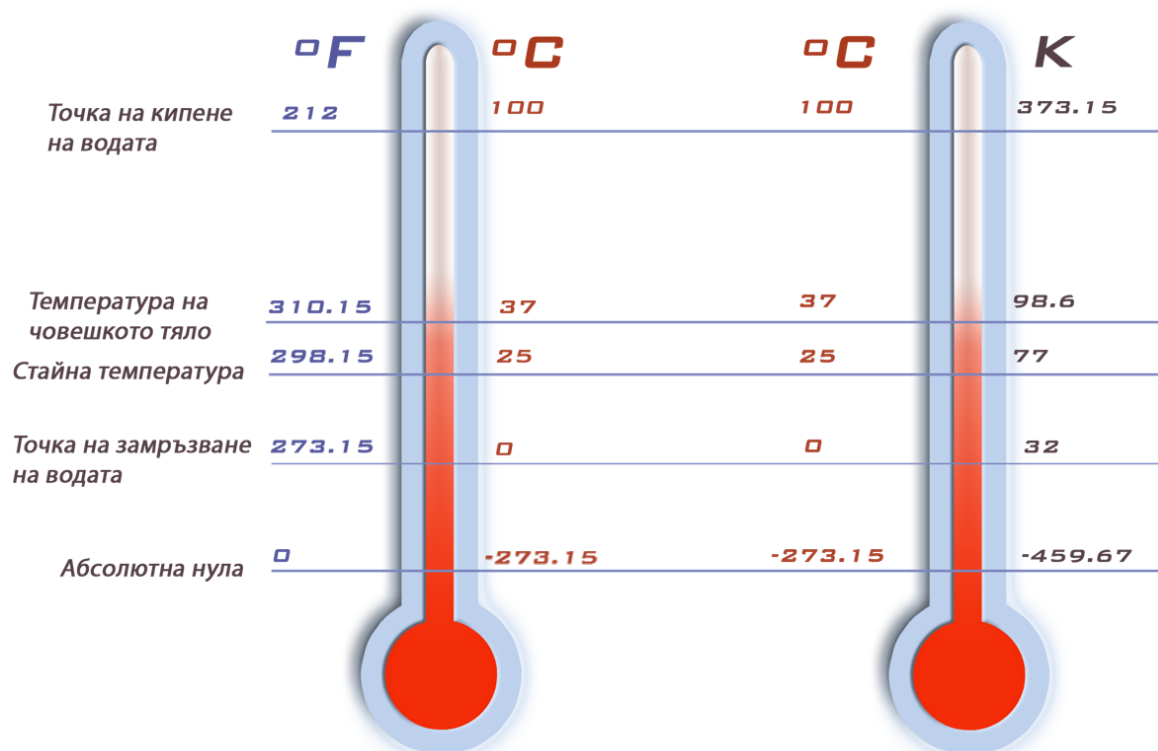
Температурата може да се измери само чрез сравняване на нагрятоста на две тела, като се предполага, че нагрятоста на едното тяло е известна. За сравнение се използва някое тяхно физическо свойство, което зависи еднозначно от температурата, сравнително малко се влияе от други фактори и се измерва лесно.

При количественото определяне на температурата трябва да се решат два проблема:

- да се избере основен температурен обхват (интервал) и начало за отчитане (нулата на температурната скала);
- да се изгради уред, наречен термометър, с който да се сравняват измерваните температури с основния интервал.

Скалата се състои от редица деления в даден температурен интервал, ограничен от две лесно възпроизводими постоянни температури - температурата на топене и температурата на кипене на химически чисти вещества. Тези температури се наричат опорни точки на температурната скала.

В световната практика се използват няколко температурни скали, които носят имената на своите създатели - скали на Ломоносов, на Фаренхайт, на Реомюр, на Целзий и на Келвин. Всички температурни скали, без тази на Келвин, са построени на основата на обемното разширение на течностите. Опорни точки за определяне на основния температурен интервал са: температурата на кипене на водата и температурата на топене на леда. Скалите се различават главно по начина на разпределяне на основния интервал и по вида на използваното работно (термометрично) вещество.

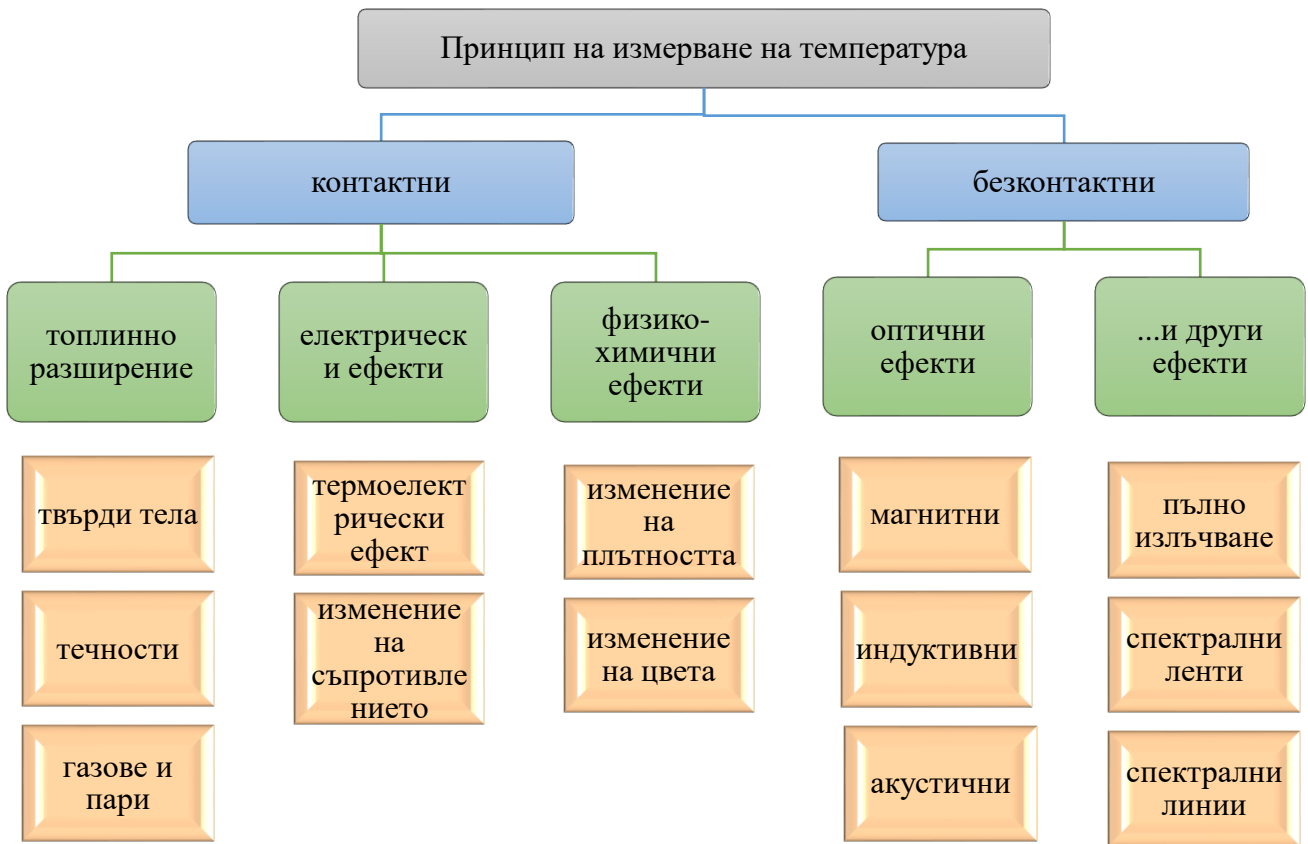


фиг. 19. Видове температурни скали

За измерване на температурата са предложени различни температурни скали. Най-широко използваната е температурната скала от 100 градуса по Целзий (фиг. 19). В тази скала за основни точки, ограничаващи основния температурен интервал, се приема точката на топене на леда (0°C) и точката на кипене на водата (100°C) при нормално атмосферно налягане. Единица за температура, равна на една стотна от основния температурен диапазон, се нарича градус.

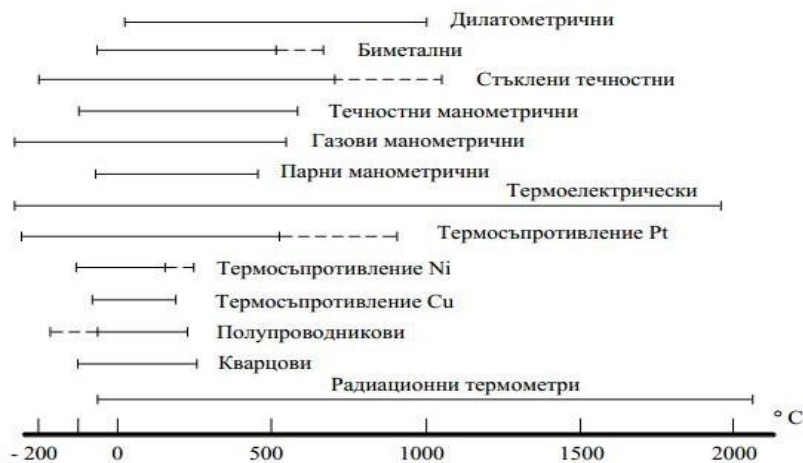
В скалата на Келвин (фиг. 19) долната граница на основния температурен интервал е точката на абсолютна нула (0K), а горната граница се приема като „тройната точка на водата“, която се намира на $0,01^{\circ}\text{C}$ над точката на топене на леда. Тази точка получи цифрова стойност от $273,16\text{K}$.

2.3.2. КЛАСИФИКАЦИЯ НА МЕТОДИТЕ И УРЕДИТЕ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРА



фиг. 20. Принципи за измерване на температура

На *фиг. 21* са показани областите на приложение на най-разпространените видове уреди за измерване на температура. С прекъсната линия са показани областите, където термометрите трябва да бъдат използвани краткотрайно, в противен случай точността на измерване се намалява или се нарушават механичните свойства на чувствителния елемент.



фиг. 21. Видове уреди за измерване на температура и приложенията им
[Error! Reference source not found.]

2.3.3. ТЕРМОМЕТРИ, ОСНОВАНИ НА ТОПЛИННОТО РАЗШИРЕНИЕ НА НАЛЯГАНЕТО НА РАБОТНОТО ВЕЩЕСТВО

Едно от свойствата, което се използва за измерване на температурата, е увеличение на обема на всяко физично тяло под действие на температурата.

Пример: при повишаване на температурата на един прът, той се разширява и увеличава своята дължина.

Увеличението дължината на пръта, т. е. линейното разширение на пръта, почти линейно зависи от изменението на температурата:

$$l_1 = l_0 (1 + \alpha \Delta\theta)$$

l_1 - дължина на пръта при температура θ_1 ,

l_0 - дължина на пръта при температура θ_0 , $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$,

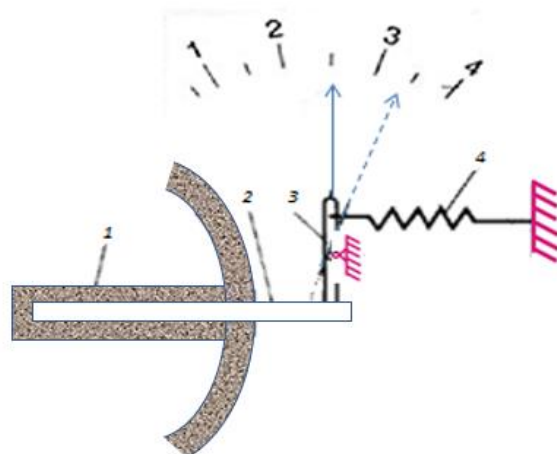
α - коефициент на линейно разширение в интервала $\Delta\theta$. Показва, че при едно и също нарастване на температурата всеки материал се разширява различно.

➤ *Механични термометри*

Механичните термометри са изградени по принципа на сравнението на линейното разширение на материали с различен коефициент α .

✓ *Дилатометричен термометър (фиг.22)*

Принципът на измерване се основава на относителната промяна на дължините на двата пръта с различен температурен коефициент на линейно удължение. Като чувствителни елементи се използва метална тръба с голям коефициент на линейно разширение (*например от месинг, алуминий, мед и др.*), в която се намира прът с много малък коефициент на линейно разширение (*например от инвар, порцелан, кварц и др.*), неподвижно свързани в единия си край. Устройството на дилатометричен термометър е показано на **фиг. 22**:



фиг. 22. Дилатометричен термометър 32

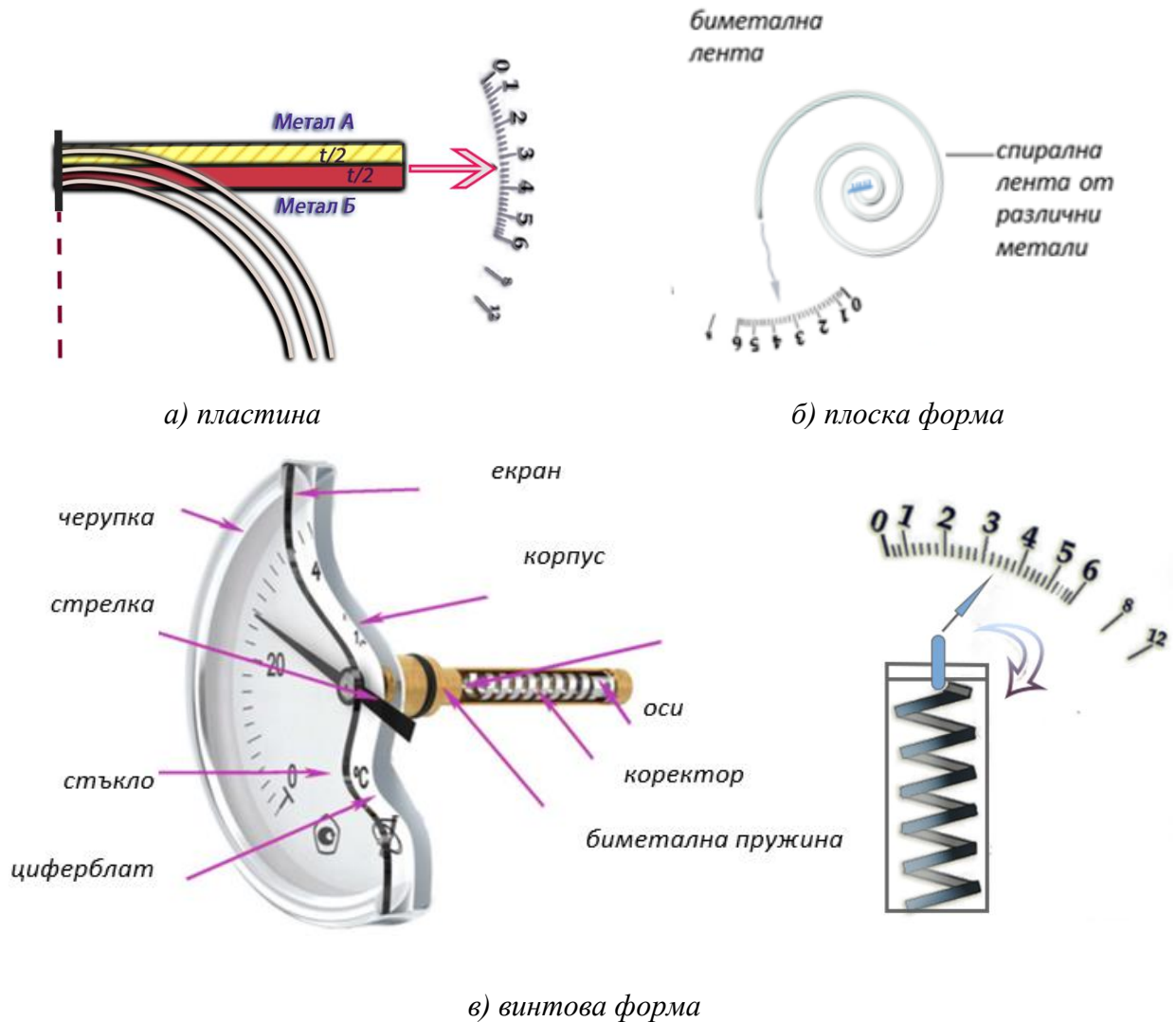
Тръбата 1 е отворена от едната страна и е поместена в измерваната среда, изработена от материал с висок коефициент на линейно разширение. В тръбата 1 е поставен прът 2, който е свързан със свободния си край с пружината 4, чрез лоста 3. Прътът 2 е изработен от материал с много малък коефициент на линейно разширение. При изменение на температурата се променя дължината на тръбата 1 и това води до преместване на пръта 2. Чрез лоста 3 това преместване променя положението на стрелката. Скалата е в температурни единици.

Грешката при измерване с дилатометрични термометри не превишава 1-2%. Тези термометри намират приложение като датчици в системите за автоматичен контрол и регулиране и като терморегулатори в нагревателни уреди.

✓ Биметални термометри (фиг. 23)

Биметалният термометър използва биметалната лента, която преобразува температурата в механично изместване. Работата на биметалната лента зависи от свойствата на топлинно разширение на метала. Термичното разширение е тенденцията на метала, при която обемът на метала се променя с промяната в температурата.

Чувствителният елемент на биметалните термометри се изработва от пластини, които се състоят от два или повече разнородни метали (с различен коефициент на линейно разширение), заварени по цялата си допирна повърхност. На **фиг. 23** са показани най-разпространените конструктивни изпълнения на чувствителните елементи на тези термометри:

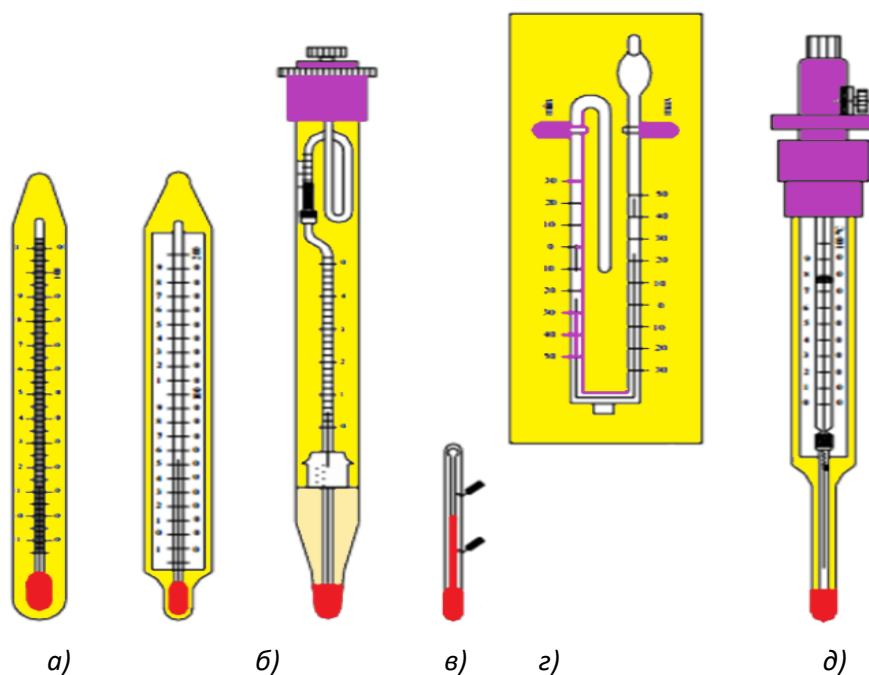


фиг.23. Биметални термометри [32]

✓ **Стъклено-течностни термометри (фиг.24)**

Стъкленият течностен термометър се състои от стъклен балон, капилярна тръбичка, термометрично вещество, запълващо балона и част от тръбичката, и скала. На **фиг. 24** са показани стъклени течностни термометри:

При електроконтактните термометри термометричното вещество е живак. Тези термометри са със споен в капилярната тръба неподвижен контакт и един подвижен контакт за затваряне през живака на електрическа верига. Електроконтактните термометри се използват за сигнализация при достигане на зададена температура.



*а - с вградена скала; б - с вложена скала; в - бекманов термометър;
г - максимално минимален; д - електроконтактен;
е - електроконтактен с променливо задание*

фиг. 24. Стъклено-течностни термометри [35]

Грешката на техническите термометри не надвишава едно скално деление, а на лабораторните е в зависимост от границата на измерване от $\pm 0,1$ до ± 5 °C.

Ако стъкленият течностен термометър по време на измерването не може да бъде напълно потопен в средата, която измерва, е необходимо да се направи поправка на показанията.

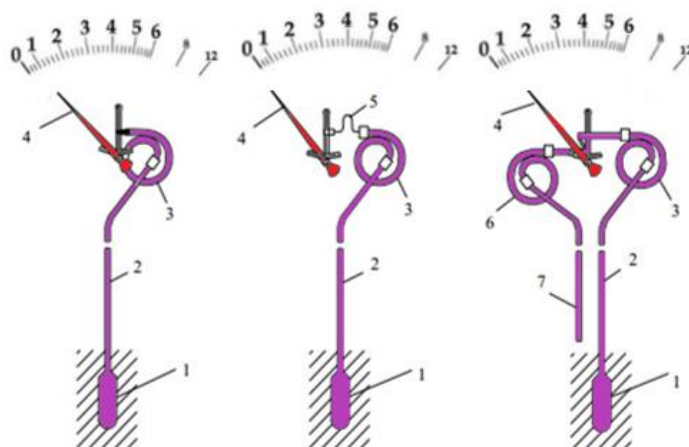
Недостатък на стъклените - невъзможността за регистрация и предаване показанията на разстояние. Предимствата - просто устройство и монтаж, ниската им цена и достатъчна точност на серийно изготвяните термометри.

➤ *Манометрични термометри*

Използва се зависимостта между температурата и налягането на термометрично вещество в затворена херметична термосистема. В зависимост от термометричното вещество, те се разделят на газови, течностни и паротечностни.

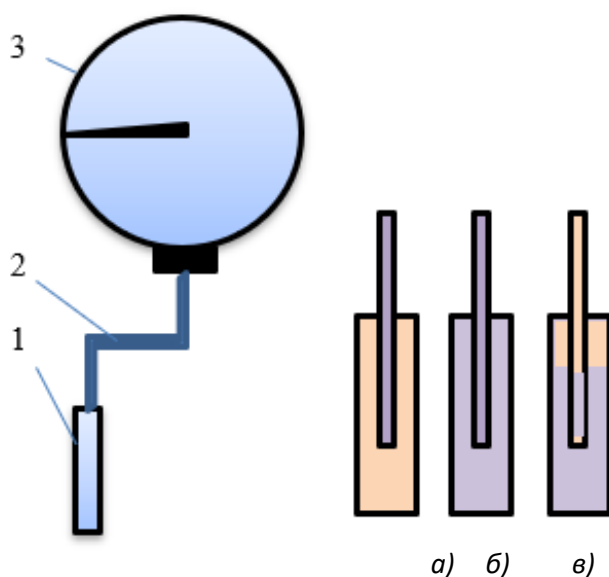
Манометричният термометър (*фиг. 25*) се състои от чувствителен елемент - стоманен термобалон *1*, в който се намира основната част на термометричната течност, капилярна тръбичка *2* с вътрешен диаметър $0,1 \div 0,2$ mm, която свързва термобалона с тръбната

манометрична пружина 3. За намаляване на допълнителната грешка от влиянието на температурата на околната среда се използва биметална пластина 5.



фиг. 25. Манометричен термометър [35]

➤ При газовите манометрични термометри (фиг. 26. а) цялата система е изпълнена с газ. Като термометрично вещество най-често се използва азот. Чрез тези термометри се измерва температура от 50 до 630°C . Началното налягане в газовите манометрични термометри зависи от измерваната температура и обикновено е $0,98$ - $4,9\text{MPa}$.



фиг. 26. Газов манометричен термометър

1 - термобалон, 2 - свързващ капилар от мед или стоманена тръба,
3 - пружинен манометър

а) газов манометричен термометър, б) течен манометричен термометър,
в) паро-течностен манометричен термометър

➤ При течностните манометрични термометри (*фиг. 26. б*) балонът е изпълнен с течност. Обикновено се запълват с живак и по-рядко с органични течности (метилол алкохол или ксилол). Те измерват температури от -50 до 300°C .

➤ В паротечностните манометрични термометри (*фиг. 26. в*) две трети от обема се запълва с течности като метилхлорид, ацетон, бензол, живак и др. Тези манометрични термометри измерват температури от -50 до 300°C . В затворената термосистема протичат процеси на изпарение и кондензация. С повишаване на температурата се увеличава налягането на наситената пара, съответстваща на измерваната температура. Чувствителността на паротечните манометрични термометри е по-висока от газовите и течностните манометрични термометри, защото налягането на наситената пара много по-силно зависи от температурата.

Към предимствата на манометричните термометри могат да се отнесат:

- простата им конструкция;
- дистанционното измерване на температурата;
- възможността за автоматичен запис на показанията.

Недостатъците са свързани с:

- ниската точност на измерване;
- трудност на ремонта при разхерметизиране на измервателната термосистема.

2.3.4. СЕНЗОРИ ЗАТЕМПЕРАТУРА

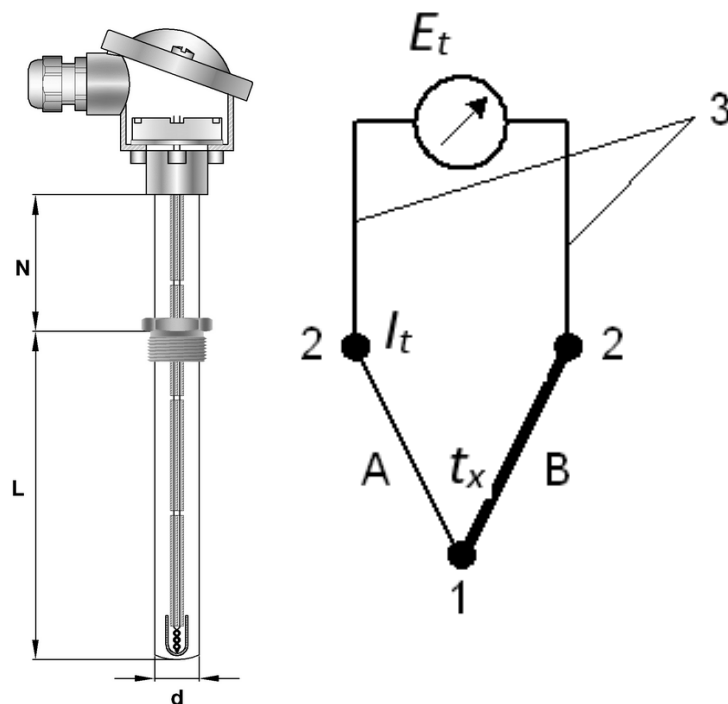
Основата на термочувствителните измервателни преобразуватели са топлинните процеси: нагряване, охлаждане, топлообмен и др. Най-голямо приложение в практиката са намерили следните типове преобразуватели на температура:

- термоелектрически преобразуватели;
- терморезистивни преобразуватели;
- термодиоди, термотранзистори и интегрални температурни сензори.

Тези преобразуватели намират приложение не само за температурни измервания, но и за измерване на редица други величини, свързани с топлинни процеси, например преместване и размери, скорост и разход на газове и течни среди, влажност, химически анализ на газове и др.

✓ *Термоелектрически преобразуватели*

Към тях се отнасят термодвойките (*фиг. 27*). Те се състоят от два разнородни проводника **A** и **B**, наречени термоелектроди, заварени в една обща точка - гореща точка. Прието е заварените краища да се наричат топли, а свободните - студени (неработни).



фиг. 27. Термодвойка [34]

*A, B - термоелектроди; 1 - работна (гореща) точка;
2 - свободни (студени) краища; 3 - удължение на електродите*

Ако горещата точка се постави при температура $t_1 = t_x$, а студените краища се намират при температура t_2 , като $t_1 > t_2$, то между двата свободни края възниква термоелектродвижещо напрежение (т.е.д.н.) E_t , което е функция на разликата от двете температури, т.е.

$$E_t = f(t_1 - t_2)$$

Този ефект се нарича термоелектрически ефект. Като се поддържа $t_2 = \text{const}$, се получава възможност за измерване на температури, т.е. $E_t = f(t_1)$.

Тъй като разстоянията до обекта на измерване са големи, а термоелектродите са от скъпи материали и не е икономически изгодно да бъдат дълги, то в такива случаи се използват междинно свързващи проводници - удължителни проводници (*електроди*).

<i>Видове</i>	<i>Материал</i>	<i>Обхват</i>
<i>Тип К</i>	<i>Хромел (Никел-Хром сплав) / Алумел (Никел-Алуминий сплав)</i>	<i>от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чувствителността е средно $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$</i>
<i>Тип Е</i>	<i>Хромел / Константан (Мед-Никел сплав)</i>	<i>Голямо изходно напрежение ($68\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)</i>
<i>Тип J</i>	<i>Желязо / Константан</i>	<i>Ограничения обхват (-40 до $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$) Чувствителност $\sim 52\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.</i>
<i>Тип N</i>	<i>Никросил (Никел-Хром-Силиций сплав) / Нисил (сплав Никел- Силиций)</i>	<i>Високата стабилност и устойчивост над $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чувствителността е около $39\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>
<i>Тип В</i>	<i>Платина 30% Родий / Платина 6% Родий</i>	<i>За високотемпературни измервания до $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>
<i>Тип R</i>	<i>Платина 13% Родий / Платина</i>	<i>за високотемпературни измервания до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ниската чувствителност ($10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$).</i>
<i>Тип S</i>	<i>Платина 10% Родий / Платина</i>	<i>за високотемпературни измервания до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ Ниската чувствителност ($10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)</i>
<i>Тип Т</i>	<i>Мед / Константан</i>	<i>За измервания в -200 до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ обхват. Чувствителност $\sim 43\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.</i>
<i>Тип С</i>	<i>Волфрам 5% Рений / Волфрам 26% Рений</i>	<i>За измервания от 32 до 4208°F (0 до 2320°C).</i>
<i>Тип М</i>	<i>Волфрам 5% Рений / Волфрам 26% Рений</i>	<i>Обхват 2500°F ($\sim 1400^{\circ}\text{C}$)</i>

фиг. 28. Видове термодвойки

Предимства:

- Голям температурен диапазон на измервания;
- Висока точност;
- Надеждност;
- Ниска цена (въпреки че зависи от допълнителни елементи като свързващи проводници, защита под формата на сонда, допълнителни съединители)
- Простота и надеждност.

Недостатъци:

- Задължително използване на специални компенсационни проводници при свързване;
- Грешка в измерването, дължаща се на въздействието на електромагнитни вълни, в резултат на ниско ниво на имунитет.
- Нелинейност.

✓ *Терморезистивни преобразуватели*

Терморезистивните преобразуватели са термозависими проводници или полупроводници. При измерване през тях протича ток като те се намират в топлообмен с околната среда. Съпротивлението на терморезистора зависи от температурата и се определя от топлинното му равновесие със средата. Теплообменът може да бъде двустранен - от средата към резистора и обратно. Температурата и съпротивлението на терморезистора при топлинно равновесие зависят не само от тока и околната температура, но и от редица други фактори, като геометричните размери и формата на преобразувателя, основата и арматурата, физическите свойства, скоростта и температурата на околния флуид и др. Тези фактори определят възможността терморезистивните преобразуватели да се използват за измерване на различни величини.

Основните изисквания към материалите за терморезисторите са:

- да имат голям температурен коефициент на съпротивление (ТКС) - α ;
- да са температурно устойчиви;
- да имат голямо специфично електрическо съпротивление (това е важно за получаване на малогабаритни преобразуватели).

✓ *Метални терморезистори*

Терморезисторите са предимно от чисти метали, понеже сплавите имат по-нисък температурен коефициент на съпротивление (ТКС). Освен това температурната зависимост на съпротивлението при чистите метали е добре известна и уредите с тях могат да работят със стандартна градуировка. Практическо приложение имат металите мед, платина и никел.

➤ Медни терморезистори - за терморезистори се използва електролидна мед. Тя допуска нагряване до 180°C . При по-високи температури започва да се окислява. Съпротивлението ѝ зависи линейно от температурата от 20 до 180°C .

➤ Платинени терморезистори - платината е химически устойчива и има добра пластичност. Позволява да се изтеглят много тънки проводници - до $1.25\mu\text{m}$. Тя допуска

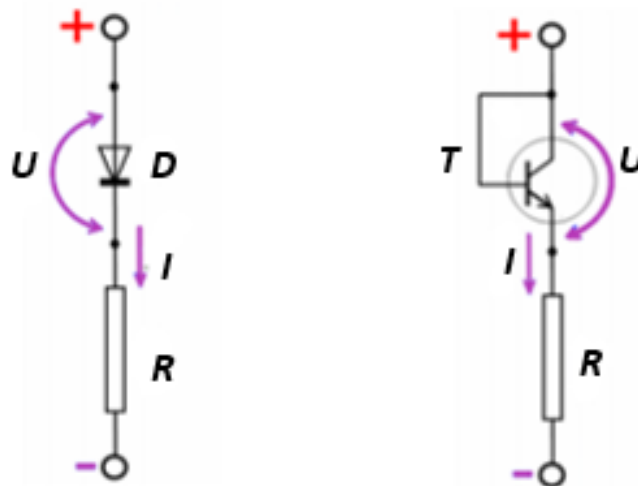
нагряване до 1475°C , без опасност от окисляване и разтапяне. По тези показатели в много случаи тя е незаменима. Неин недостатък е нелинейната зависимост на съпротивлението ѝ от температурата.

➤ Никелови терморезистори - никелът при добра изолация от въздействието на средата може да се използва като терморезистор до около 280°C , тъй като при по-висока температура зависимостта $R_t = f(t)$ е нееднозначна. Електрическите свойства на никела зависят от примесите и термичната обработка. Основните предимства на този материал са голямото специфично електрическо съпротивление- $\rho = (7.5 \text{ } 8.5) \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ и големият ТКС. Това позволява да се реализират терморезистори с малки размери.

Недостатък на медта е малкото специфично съпротивление - за електролидна мед $\rho = 1.75 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$.

✓ Термодиоди, термотранзистори, термистори

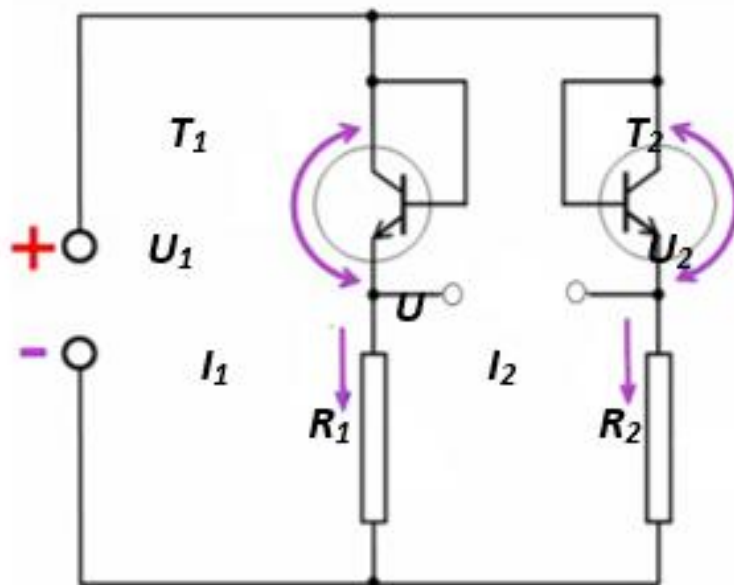
Те са полупроводникови елементи, използвани за измерване на температура обикновено в диапазона $-80^{\circ}\text{C} \div +150^{\circ}\text{C}$. При тях се използва зависимостта на съпротивлението на р-п прехода от температурата. Диодите се използват в право свързване, а транзисторите - също в право свързване, но в диодна схема (фиг. 29).



фиг. 29. Полупроводникови елементи, използвани за измерване на температура

Чувствителността зависи от обратния ток на р-п прехода. Диодите и транзисторите се различават силно по обратния ток, което означава, че трудно може да има взаимозаменяемост между тях. Предимство е ниската им цена.

В значителна степен влиянието на обратните токове се премахва и се получава по-добра линейност, ако се използват два транзистора в един корпус (фиг. 30):



фиг. 30. Два транзистора в един корпус

Тази двойка транзистори могат да се направят върху един кристал като интегрална схема. Тогава параметрите на интегралните транзистори ще са по-добри и характеристиката на получения преобразувател ще бъде почти линейна.

Пример: интегрална схема AD390, която дава линейна зависимост. Изходният сигнал е във вид на ток. Работният диапазон е $-55 \div +150^\circ\text{C}$, като чувствителността е $ST = 1\mu\text{A} / \text{K}$.

✓ Термистори

Термисторите са полупроводникови резистивни преобразуватели с голям ТКС в широк температурен диапазон. Практически се изпълняват в точкова, плоска или цилиндрична форма. При всички случаи се поставят метални изводи (*електроди*). ТКС (α) за всеки полупроводников материал представлява отношение на скоростта на изменение на съпротивлението по отношение на температурата към съпротивлението при зададена температура.

В зависимост от знака на ТКС, се различават два типа термистори:

- с отрицателен ТКС, чието съпротивление намалява с увеличаване на температурата;
- с положителен ТКС, чието съпротивление се увеличава с увеличаването на температурата.

Термисторите от двата типа се изготвят от полупроводникови материали, като диапазонът на изменение на ТКС е от $-6,5$ до $+70\%/^\circ\text{C}$.

Термисторите с отрицателно ТКС имат и значително по-голямо специфично електрическо съпротивление. Това позволява да се произвеждат термистори с малки размери, които имат и по-малка инертност. Чувствителни са към влажността и за предпазване от нейното влияние се покриват с лакова изолация.

Термисторите с положителен ТКС (позисторите- РТС- термисторите) могат да се разделят на две принципно различни групи, в зависимост от типа и свойствата на използвания полупроводников материал.

➤ Към първата група се отнасят термистори от обикновен полупроводник (обикновено силиций) във форма на неголяма пластинка с два извода на противоположните страни. Използването на тези елементи е основано на това, че легираните кристали на силиция както от n , така и от p тип имат положителен ТКС при температури от криогенните до 150°C и по-високи. При това ТКС при стайна температура е приблизително равен на $0,8\%/^{\circ}\text{C}$.

➤ Към втората група се отнасят термистори с голям положителен ТКС (*до* $70\%/^{\circ}\text{C}$), но в по-ограничен температурен диапазон. Като материал за такива елементи може да се използва поликристален полупроводников бариерен титанст с голямо изменение на ТКС при температури, близки до температурата на фазовия преход изолатор - метал, съответстваща на температурата на точката на Кюри.

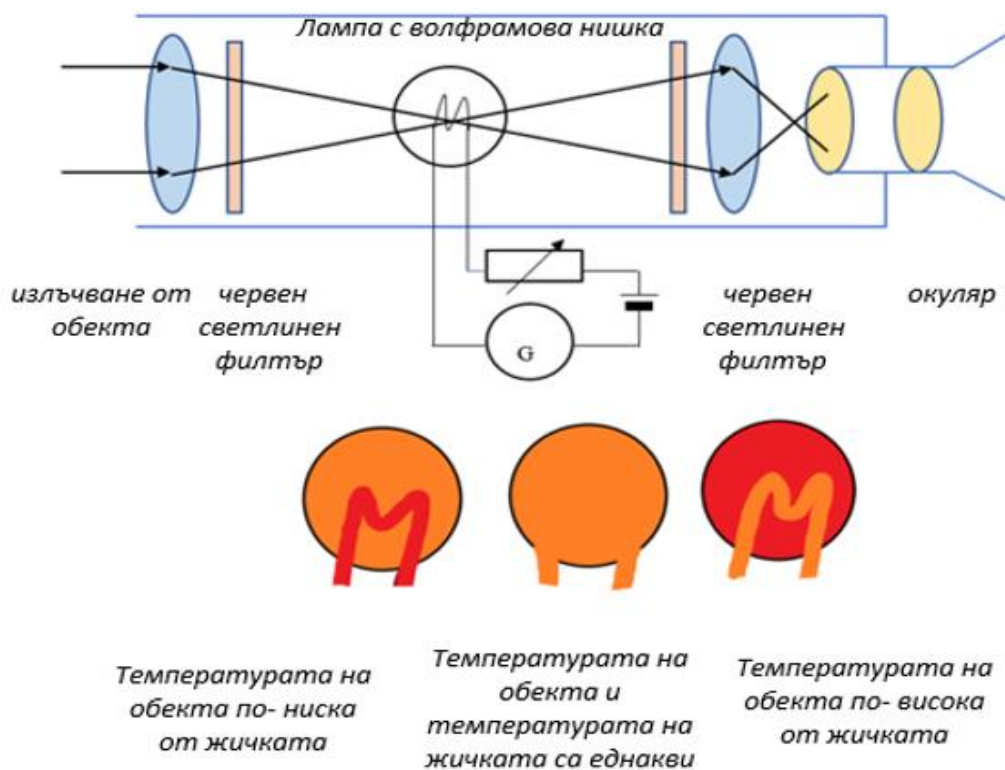
✓ *Оптични температурни сензори*

Физическите влияния върху оптичното влакно (като температура, налягане, сила на опън) - местно променят характеристиките на пропускането на светлината и в резултат водят до промяна в характеристиките на сигнала за обратно отражение. Системите за измерване, базирани на оптични сензори, се основават на сравнение на спектрите и интензитета на първоначалното лазерно лъчение и лъчението, разпръснато в обратна посока след преминаване през оптичното влакно. Термичната устойчивост на покритието от фибростъкло ограничава максималния температурен диапазон на светловодния кабел. Стандартните влакна за данни са акрилни или UV - втвърдени и са подходящи за температури до 80°C . Фибростъклото, с покритие от полиамид, може да се използва до максимална температура от 400°C .

✓ *Пирометри*

Радиационните термометри (или пирометри) са безконтактни температурни сензори. Работа им се основава на зависимостта на температурата от количеството топлинно електромагнитно излъчване, получено от обекта на измерване. Разграничават се цветни пирометри и радиационни пирометри.

Оптичният пирометър (нишковиден пирометър) (*фиг. 31*) използва само видимата част от спектъра, излъчен от горещ обект. Излъчването се фокусира върху нишката, така че излъчването и нишката могат да се видят на фокус през окуляра. Нажежаемата жичка се нагрява с електрически ток, докато се окаже, че има същия цвят като горещия обект и образът на нажежаемата жичка изчезва на фона на горещия обект. Токът на нажежаема жичка е мярка за температура. Често се използва червен филтър между окуляр и нажежаема жичка, за да се улесни съчетаването на цветовете на нажежаемата жичка и горещите обекти. Друг червен филтър може да се вмъкне между горещия обект и нажежаемата жичка, което прави обекта по-малко горещ и по този начин разширява обхвата на приспособлението.

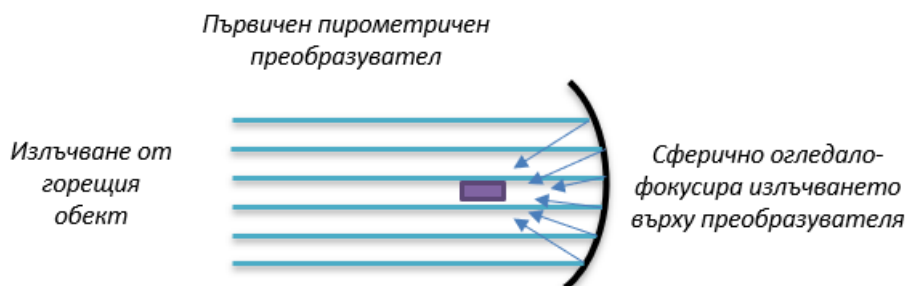


фиг. 31. Оптичен пирометър

Изчезващият нишковиден пирометър има обхват на измерване от 600 до 3000°C, с грешка от около + 0,5% и не изисква физически контакт с горещ обект. По този начин може

да се използва за движещи се или отдалечени обекти. Пълният радиационен пирометър приема лъчение от горещ обект и го фокусира върху радиационен детектор.

Фигурата по-долу (*фиг. 32*) показва обобщен дизайн на инструмент, използващ огледало за фокусиране на лъчението върху детектор.



фиг. 32. Обобщен дизайн на инструмент, използващ огледало за фокусиране на лъчението върху детектор

Често се използва леща за фокусиране на лъчението. Детекторът (първичен пирометричен преобразувател GOST 28243-96) обикновено е термоелемент, състоящ се от 20 или 30 термодвойки или термистори. Детекторът се нарича ширококоленов, защото открива лъчение в широк честотен диапазон, а изходният сигнал е общата мощност на излъчване с дължини на вълните с различни честоти. Мощността е пропорционална на четвъртата степен на температурата (закон на Стефан-Болцман). Точността на широкообхватните пирометри с пълно излъчване е около $\pm 0,5\%$, а обхватът на измерване е от 0°C до 3000°C . Константата на времето (мярка за това колко бързо системата реагира на температурните промени и времето, необходимо за достигане на около 63% от крайната стойност) на пирометъра варира от 0,1 s, когато детекторът има една термодвойка или малък термистор, до няколко секунди, като се използва термопила от няколко термодвойки.

✓ *Инфрачервени сензори*

- Използват сензор, реагиращ на инфрачервената светлина (излъчваната топлина)
- Безконтактни датчици за температура
- Могат да измерват температурата до 2800°C
- Изключително високо бързодействие
- Сравнително висока цена
- Добра точност
- Предлагат се инфрачервени сензори с вградена електроника за опростено свързване към микропроцесорна система

2.4. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ И КОНТРОЛ НА НАЛЯГАНЕ

2.4.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

Налягането е от съществено значение за контрола на процеса и безопасността на производството. В допълнение, този параметър се използва за непреки измервания на други технологични параметри като: ниво, дебит, температура, плътност и т.н.

Физичното понятие налягане се определя като ефект, който се предизвиква, когато сила бъде приложена върху определена площ. Налягането се описва със зависимостта:

$$P = \frac{F}{S},$$

където с P - налягане, F - сила, S - площ на повърхността, върху която действа силата.

За основна единица за измерване на налягане в SI е Pa (*Pascal*). Големината на един Pa се определя като един N (*Newton*) на m^2 (*квадратен метър*):

$$Pa = \frac{N}{m^2}$$

Освен в паскали Pa , налягането в практиката често се измерва и в други единици като: *psi* (*pounds per square inch*), *atm* (*atmosphere*), *bar*, милиметър живачен стълб - често означаван и като *torr*. Съответствието между тях е представено в таблицата.

единица	Съответствие с Pa
1 psi	6 894,757
1 bar	100 000
1 atm	101 325
1 torr	133,322

фиг. 33. Съотношение на мерните единици за измерване на налягане

Като понятия при измерването на налягане могат да се въведат:

- Атмосферно налягане - това е налягането на атмосферата върху земната повърхност. Налягането на атмосферата при морското равнище се приема да бъде **101.325 kPa**. С увеличаване на надморската височина това налягане намалява.
- Налягане от 0 Pa се приема като абсолютен вакуум.
- Налягания между атмосферното и абсолютния вакуум представляват **вакуум**.

2.4.2. КЛАСИФИКАЦИЯ НА МЕТОДИТЕ И УРЕДИТЕ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА НАЛЯГАНЕ

✓ Класификация на устройствата за налягане

Широкото използване на налягането, неговия диференциал и вакуум в технологичните процеси налага прилагането на разнообразни методи и средства за измерване и контрол на налягането.

Методите за измерване на налягането се основават на сравняване на силите на измереното налягане със силите:

- налягане на колона течност (живак, вода) с подходяща височина;
- разработени по време на деформация на еластични елементи (пружини, мембрани, маншон и габаритни тръби);
- тежестта на стоките;
- еластични сили, възникващи от деформацията на определени материали и причиняващи електрически ефекти.

В съответствие с посочените методи средствата за измерване на параметрите на налягането могат да бъдат разделени на течни, деформационни, мъртви и електрически. Инструментите за измерване на деформация са най-широко използвани в индустрията.

В зависимост от предназначението, уредите за измерване на налягането се разделят на следните основни групи:

Манометри - за измерване на свръхналягане.

Вакууммери - за измерване на вакуум налягане (вакуум).

Мановакуумметри - за измерване на вакуум и манометрично налягане.

Барометри - за измерване на атмосферното налягане.

Баровакуумметри - за измерване на абсолютно налягане.

Манометри с диференциално налягане - за измерване на диференциално налягане.

Според принципа на действие всички инструменти за измерване на налягането могат да бъдат разделени на:

Течностни - устройства, при които измереното налягане се балансира от теглото на колоната течност, а промяната в нивото на течността в комуникаращите съдове служи като мярка за налягане. Тази група включва манометри с чаша и U-образна форма, манометри с диференциално налягане и др.

Дедвейт - устройства, при които измереното налягане се балансира от силата, създадена от калибрирани тежести, действащи върху буталото, свободно движещо се в цилиндъра.

Устройства с дистанционно предаване на показания са устройства, които използват промени в определени електрически свойства на веществото (електрическо съпротивление на проводниците, електрически капацитет, появата на електрически заряди на повърхността на кристални минерали и др.) под въздействието на измереното налягане. Такива устройства включват манометри за устойчивост на манганин, пиезоелектрични манометри, използващи кварцови кристали, турмалин или сол на Рошел, капацитивни манометри, йонизационни манометри и др.

Пружинни - устройства, при които измереното налягане се балансира от силите на еластичност на пружината, чиято деформация служи като мярка за налягане. Поради простотата на дизайна и лекотата на използване, пружинните устройства се използват широко в практиката. Тази група включва различни устройства, които се различават по типа на пружините: манометри на пружинните тръби, на листови пружини, на пружината на кутията, баровакуумметри, с диференциално налягане и други.

✓ *Класификация на измервателните преобразуватели за налягане*



2.4.3. МАНОМЕТРИ

Средствата за измерване на налягане се наричат манометри. Те се разделят на:

- барометри;
- манометри за измерване на свръхналягане;
- вакуумметри;
- манометри за абсолютно налягане.

Манометрите за измерване на налягане или разреждане до 40кРа се наричат напорометри и тягомери.

Тягонапорометрите имат двустранна скала с граници на измерване до $\pm 20\text{kPa}$.

✓ Хидростатични манометри (фиг. 32)

Стълб течност с височина $h = h_1 + h_2$ уравнисява разликата в налягането ($P_1 - P_2$).

$$P_1 - P_2 = \rho_1 g h.$$

ρ_1 - плътността на работната течност, kg/m^3 ;

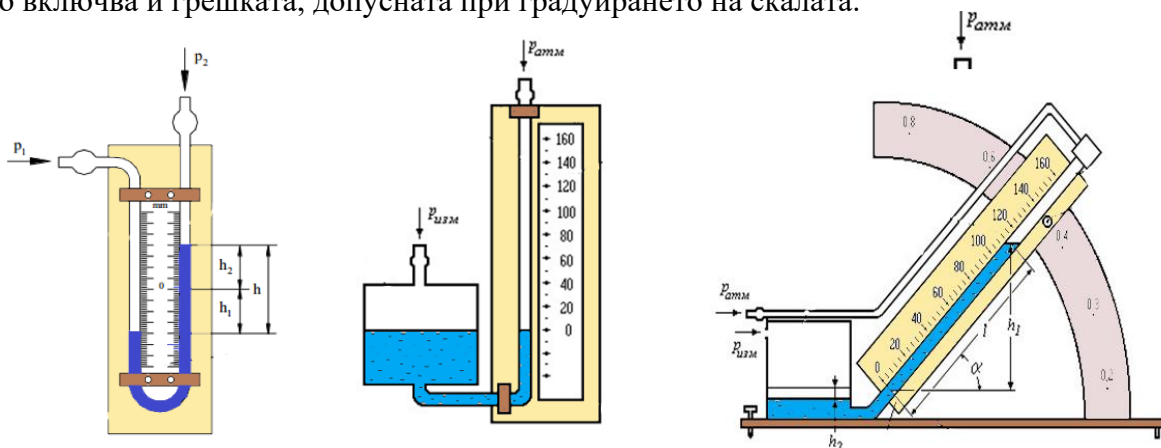
g - земното ускорение, m/s^2 .

Скалата на хидростатичните манометри е градуирана в единици за налягане, в съответствие с горните уравнения.

Чувствителността на манометъра зависи обратнопропорционално от плътността на работната течност. Ако плътността на средата над работната течност ρ_2 е съизмерима с тази на работната течност ρ_1 , тогава

$$P_1 - P_2 = (\rho_1 - \rho_2) g h.$$

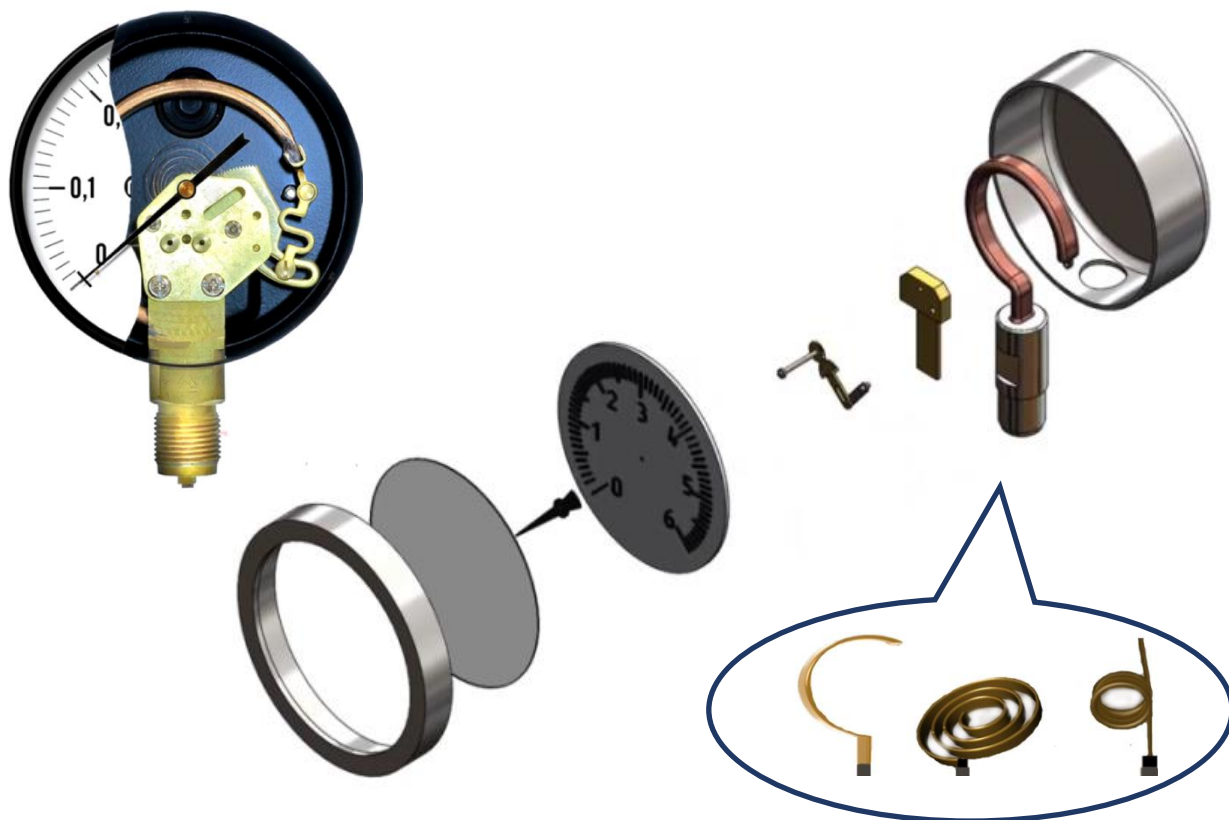
При стойност на едно деление на скалата 1 mm , грешката на измерване ще бъде $\pm 2\text{ mm}$, която включва и грешката, допусната при градуирането на скалата.



фиг. 34. Хидростатичен манометър [65]

✓ Деформационни манометри (фиг. 35)

Използва се зависимостта на деформацията на чувствителния елемент или създава в него сила от измерваното налягане. Пропорционалната на налягането деформация или сила се преобразува в показания или в съответно изменение на изходния сигнал. Повечето деформационни манометри имат еластични чувствителни елементи, които преобразуват измерваното налягане в пропорционално преместване на работната точка.

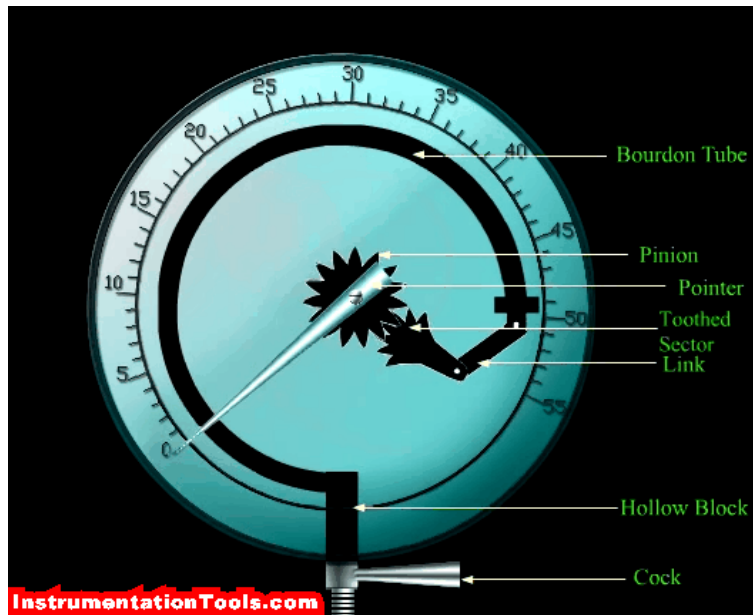


фиг. 35. Деформационен манометър [63, 64]

✓ Манометри на тръбата на Бурдон (фиг.36)

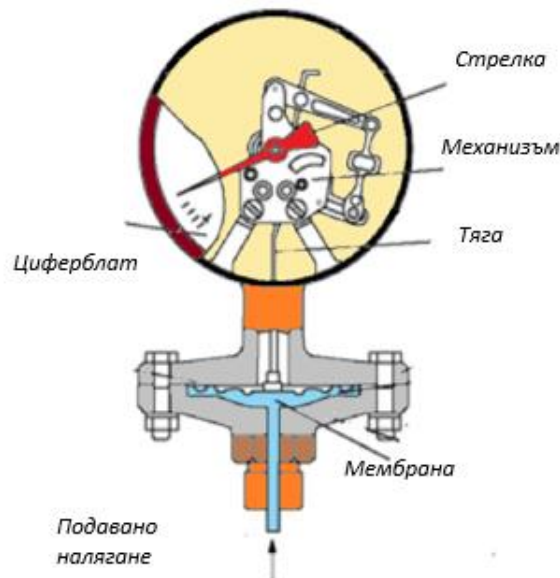
Чувствителният елемент на този тип манометър е огънатата тръба на Бурдон под формата на дъга. Тръбата се деформира под налягане, което води до движение на свободния край на дъгата, разтягане или свиване на пружината. Показалният механизъм се задейства от движението на края на тръбата, степента на деформация, която е пропорционална на измереното налягане. Като правило, тръбите на Бурдон с няколко завъртания се използват за измерване на налягане от 40 бара и повече.

Диапазон на налягане от 0..0,6 до 0 ... 5000bar. Клас на точност от 0,1 до 4,0.



фиг. 36. Манометър с тръбата на Бурдон [36]

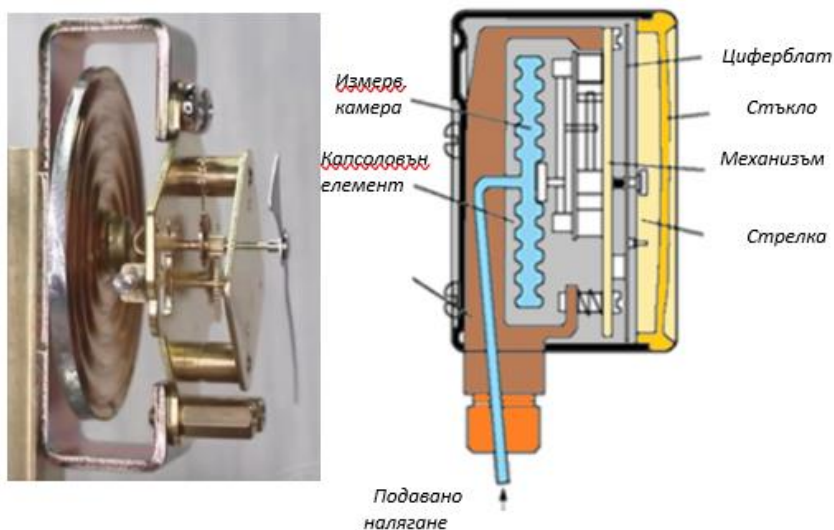
✓ Манометри на листови пружини (фиг.37)



фиг. 37. Манометър на листови пружини [37]

Чувствителният елемент е тънка гофрирана диафрагма, която се деформира под въздействието на налягането на средата. Деформацията на плочата, пропорционална на измереното налягане, задейства превключващия механизъм. Удобството на този тип манометър е свързано с лекотата на промиване, което е необходимо при измерване на налягането на вискозна среда. Възможните специални покрития за плочи осигуряват повишена устойчивост на корозия.

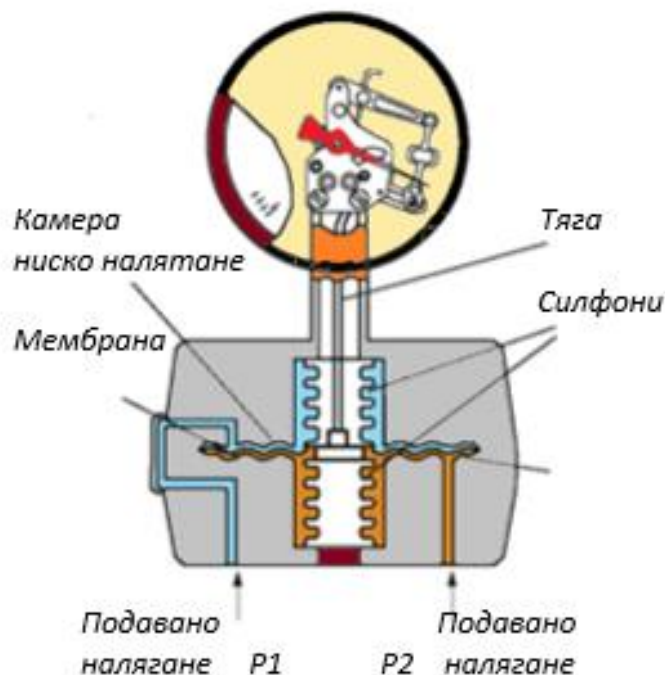
Диапазон на налягане от 0..16mbar до 0..40bar. Клас на точност от 0,6 до 2,5.

✓ *Манометри за налягане в пружината на кутията (фиг.38)*

фиг. 38. Манометър за налягане в пружината на кутията [37]

Сензорният елемент е кутия, състояща се от две мембрани, херметично съседни една на друга. Деформацията на диафрагмата, пропорционална на измереното налягане, задейства циферблата. На първо място, този тип манометър е предназначен за измерване на налягането на газа с висока точност.

Диапазон на налягане от 0..2,5 mbar до 0..0,6 bar. Клас на точност от 0,1 до 2,5.

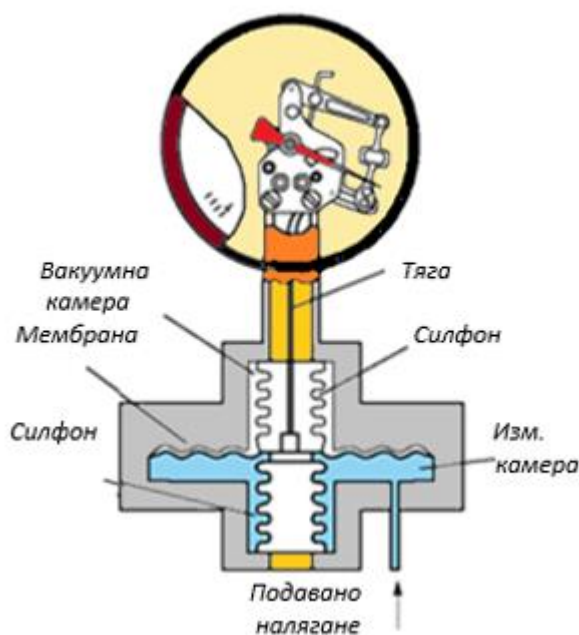
✓ *Манометри с диференциално налягане (фиг.39)*

фиг. 39. Манометър с диференциално налягане [37]

Манометрите с диференциално налягане са предназначени да измерват разликата между различните налягания. Те имат устройство, подобно на манометрите на листови пружини, с единственото изключение, че налягането се прилага върху две камери от противоположните страни на диафрагмата.

Диапазон на налягане от 0..2,5 mbar до 0..40 bar. Клас на точност от 0,6 до 2,5.

✓ *Абсолютни манометри (фиг.40)*



фиг. 40. Абсолютен манометър [37]

Този тип манометър е проектиран да измерва налягането, независимо от околното налягане (независимо от колебанията в атмосферното налягане). Като правило те имат устройство, подобно на обикновените манометри с листови пружини, с единственото изключение, че има вакуум на гърба на диафрагмата.

Диапазон на налягане от 0..16 mbar до 0..40 bar. Клас на точност от 0,6 до 2,5.

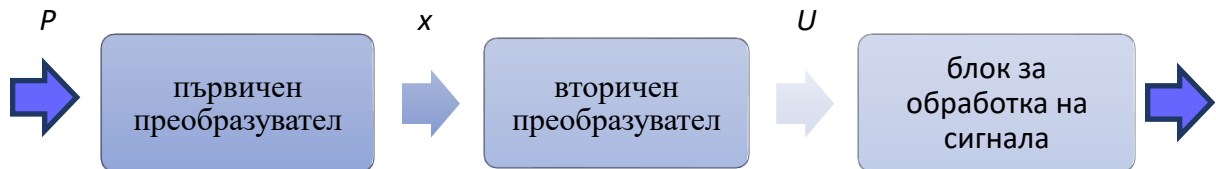
Всички по-горе уреди за измерване на налягането се отнасят до схеми, базирани на принципа на директно преобразуване на деформацията в сигнал, подаван към индикаторното устройство.

Съществуват значителен брой вериги от дистанционен тип, в които деформационният сигнал на еластичен елемент (мембрана, маншон, пружинна тръба и др.) се използва за преместване на преобразуващ елемент (електрически, индуктивен и др.), чийто сигнал се записва на индикаторното устройство.

2.4.4. СЕНЗОРИ

Датчиците за налягане се използват широко в автоматизирани системи. Те ви позволяват да преобразувате механично въздействие в електрически сигнал.

Например:



P - измерено налягане, x - девиелация, U - електрически сигнал

фиг. 41. Блок схема на сензор

Сензорът за налягане се състои от:

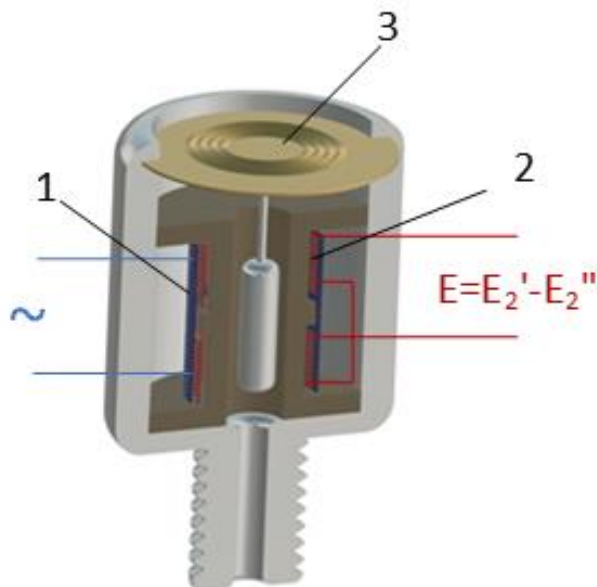
- Първоначален преобразувател със сензорен елемент.
- Корпус на сензора с различен дизайн.
- Електрическа схема.



фиг. 42. Видове методи на измерване на налягане

За целите на автоматизацията интерес представляват сензорите за налягане с електрически сигнал на изхода, който може да се свърже към различно оборудване за мониторинг и контрол.

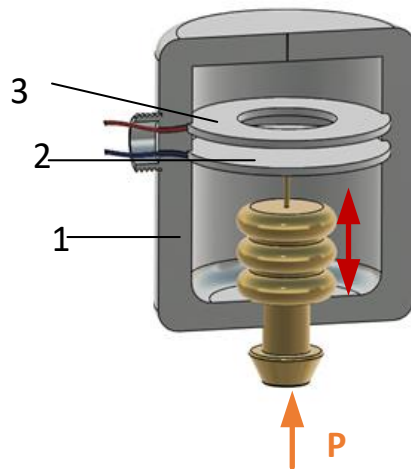
✓ *Взаимно индуктивни сензори(фиг.43)*



фиг. 43. Взаимноиндуктивен сензор

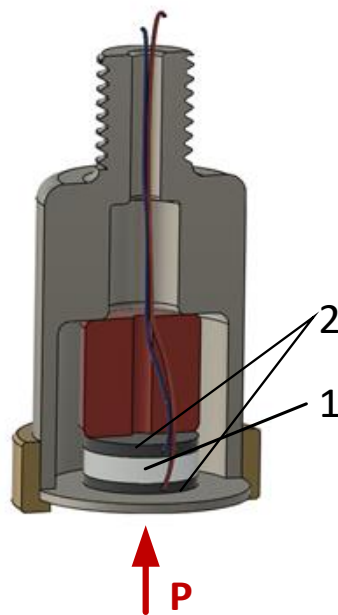
1 - първична бобина, 2 - вторична бобина, 3 - мембрана

Конструкцията на този тип сензори включва диференциален трансформатор, чиято сърцевина е свързана с мембраната на сензора. Под действието на налягането мембраната се огъва, вследствие на което сърцевината на диференциалния трансформатор се премества. Двете вторични намотки на трансформатора са свързани в противофаза. Първичната намотка се захранва със синусоидално напрежение. Когато сърцевината е в магнитния център на трансформатора, генерираният на изхода сигнал има нулева стойност. При преместване на сърцевината, амплитудата на изходния сигнал се изменя в зависимост от преместването. Посоката на преместването може да се определи от фазовия ъгъл между входния и изходния сигнал.

✓ *Капацитивни сензори (фиг.44)***фиг. 44. Капацитивен сензор**

1 - тяло на сензора, 2 - мембрана, 3 - електрод

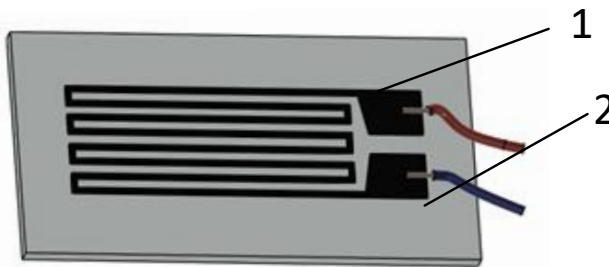
Под действие на налягането се деформира мембрана, която играе ролята на едната плоча на кондензатора. При преместването ѝ се променя капацитета на кондензатора. Посредством подходяща електронна схема, промяната на капацитета лесно може да бъде преобразувана в промяна на изходния сигнал на сензора.

✓ *Пиезоелектрически сензори (фиг.45)***фиг. 45. Пиезоелектрически сензор**

1 - пиезоелемент, 2 - електроди

При този тип сензори се използва пиезоелектрическият ефект на един или няколко пиезокристали, свързани към мембраната на сензора. При деформация на мембраната пиезокристалът генерира заряд, който зависи от приложеното върху мембраната налягане. Този тип сензори са подходящи за измерване на динамично променящо се налягане.

✓ *Тензорезистивни сензори (фиг.46)*



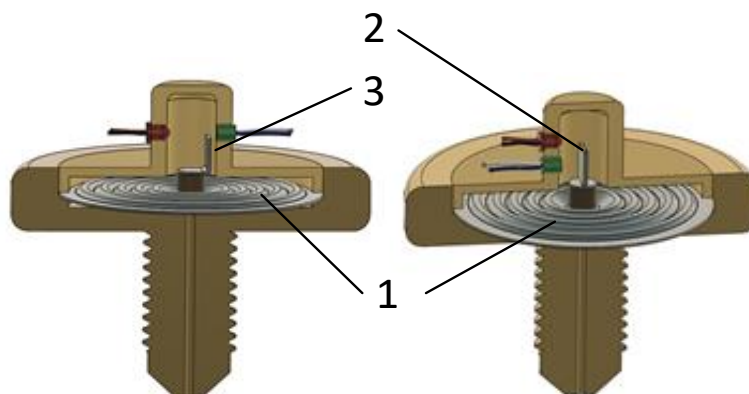
фиг. 46. Тензорезистивен сензор

1 - тензорезистор, 2 - подложка

Този тип сензори са едни от най-често използваните, като са разработени голям брой конструкции, използващи тензорезистори. Тензорезисторите се изготвят с подходяща форма и се разполагат върху деформируемата мембрана.

Вследствие на налягането мембраната променя формата си, при което се променя и формата на тензорезисторите. При това те изменят съпротивлението си. Промяната на съпротивлението лесно може да се преобразува в изходен сигнал, който съответства на приложеното върху сензора налягане.

✓ *Оптични сензори (фиг.47)*



фиг. 47. Оптичен сензор

1 - мембрана, 2 - рефлекторен елемент, 3 - преграда

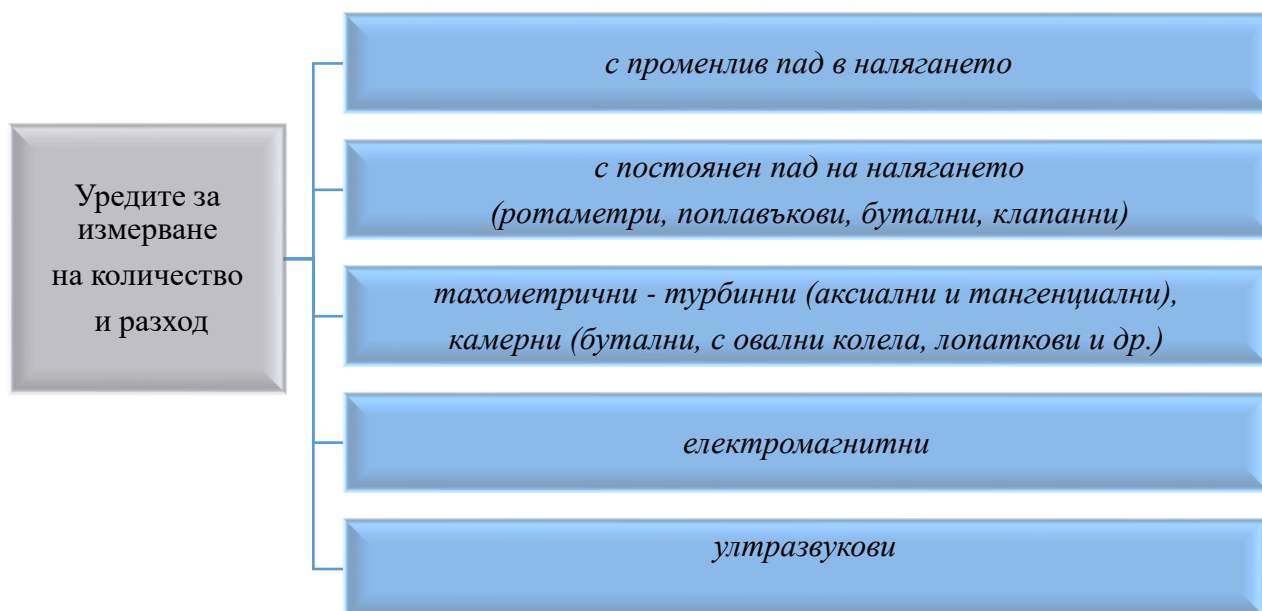
Те могат да работят на принципа на отразяването или на пропускането на светлината.

При сензори *фиг. 47, а*) - върху мембраната се поставя отразяващ елемент, който в зависимост от приложеното налягане и огъването на мембраната отразява определено количество от постъпващата светлина обратно към приемника. При сензорите с пропускане на светлината (*фиг. 47, б*), прикачената неподвижно към мембраната преграда при повишаване на налягането намалява количеството светлина, която постъпва в приемника.

2.5. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА РАЗХОД И КОЛИЧЕСТВО.

2.5.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ.

Във всички отрасли на промишлеността измерването на количеството и на разхода на веществата е от съществено значение за управлението на технологичните процеси, за контрола на състоянието на съоръженията и тяхната производителност, за оптимизация на производствените процеси и др. Измерването на разхода на течности и газове се осъществява с уреди, наречени разходомери, а на количеството - с броячи. Често се използва комбинацията разходомер с брояч. Това е разходомер с вградено интегриращо устройство, така че при желание да се знае и количеството за даден интервал от време - час, денонощие, месец и т.н.



фиг. 48. Уреди за измерване на количество и разход

В зависимост от единиците, в които се измерва, разходът е масов или обемен. Преминването от масови единици в обемни се извършва по равенството

$$Q_M = Q_o \rho,$$

,където Q_M е масовият разход (kg/s);

Q_o - обемният разход, m^3/s ;

ρ - плътността на флуида, kg/m^3 .

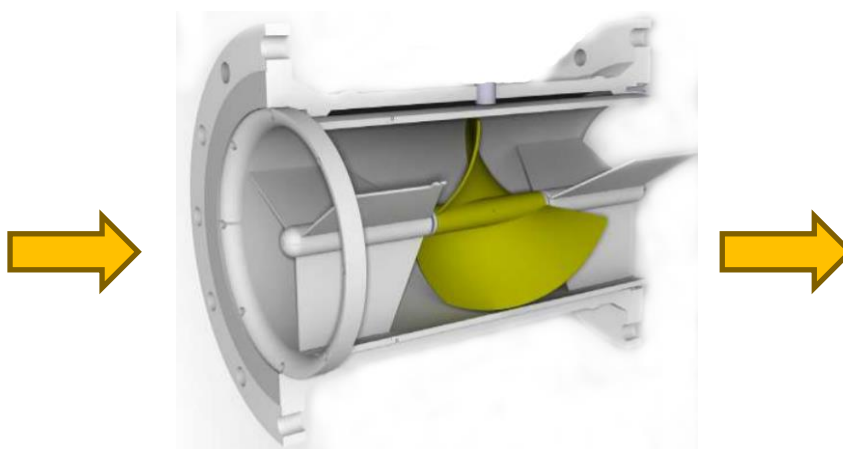
Измерването на разхода в масови единици носи значително по-пълна информация за количеството вещество за единица време. Когато се работи в обемни единици, трябва да се отчитат температурата и налягането на флуида в момента на измерването, особено при количествени сравнения. Това се налага поради съществената зависимост на плътността на различните флуиди от температурата и налягането. Във връзка с това резултатите от измерването се привеждат към нормални условия (температура $20^\circ C$ и налягане $101\,325\ Pa$).

2.5.2. СЕНЗОРИ ЗА РАЗХОД - ПОТОК

При ротационните сензори за поток се преобразува въртеливото движение на ротор, задвижван от перка или турбина, в показание за стойността на потока. При увеличаване на потока се увеличава скоростта на ротора. Към тези разходомери принадлежат сензори за поток с перка и сензори с турбина и индукционен преобразувател.

✓ Сензори за поток с перка (фиг.49).

Конструкцията на този преобразувател за поток се базира на използването на перка, задвижвана от потока.

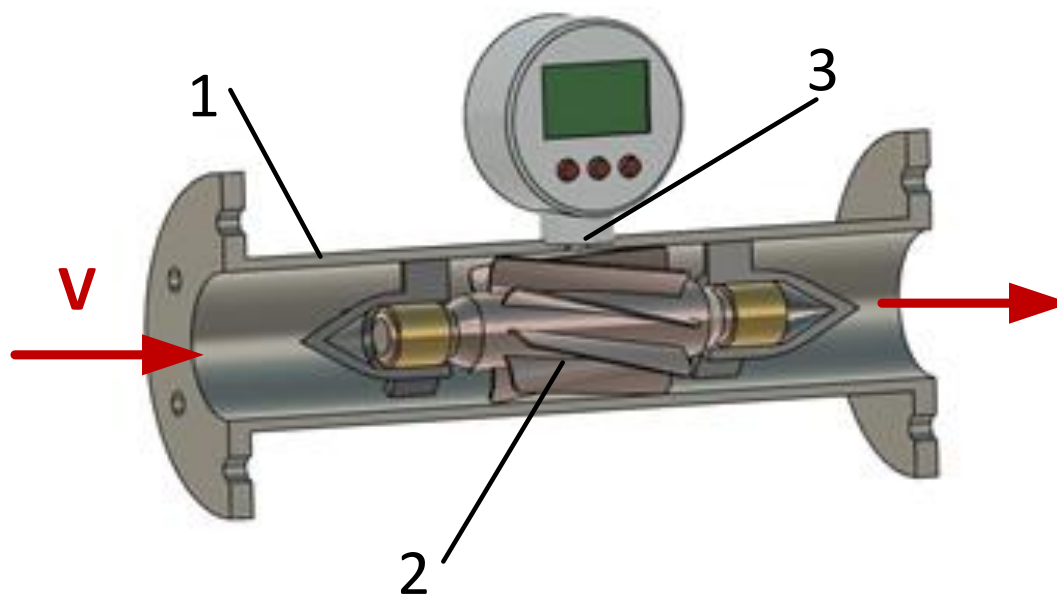


фиг. 49. Сензор за поток с перка

Въртенето на перката се следи от сензори и може да се отчита електронно с помощта на измервателна схема. Това е една от най-евтините конструкции на преобразуватели за дебит/разход, които намират приложение в практиката.

✓ *Сензори с турбина и индукционен преобразувател (фиг.50).*

При този тип преобразуватели роторът с прикачената към него турбина се монтира в центъра на тръбата и при движението си флуидът (течност или газ) завърта турбината.

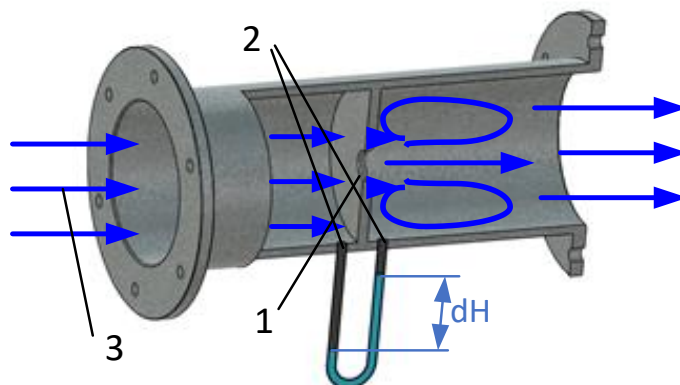


фиг. 50. Сензор с турбина и индукционен преобразувател

1 - тръба, 2 - турбина, 3 - магнитен сензор.

В турбината е пресована феромагнитна пръчка. Извън тръбата, но в непосредствена близост с нея, е разположен постоянен магнит, а около него - измервателна бобина. Постоянният магнит създава магнитен поток, който е максимален - когато пръчката застане успоредно на него и минимален - когато застане перпендикулярно. Вследствие на изменението на магнитния поток, в бобината се индуцира е. д. н., което е пропорционално на скоростта на въртене на турбината $E = f(\omega)$, респективно на скоростта на потока. На основата на тази скорост се пресмята и дебитът/разходът на флуида.

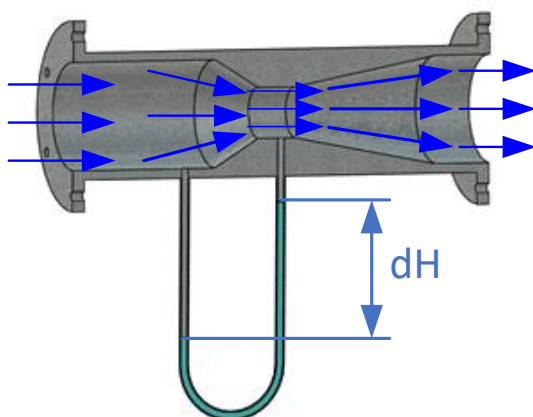
✓ *Сензори за поток на основата на измерване на налягане с калибриран отвор (фиг.51).*



фиг. 51. Сензор за поток на основата на измерване на налягане с калибриран отвор
1 - калибриран отвор, 2 - измервателни отвори

Калибрираният отвор представлява метална диафрагма с отвор, разширяващ се по посока на движение на течността или газа. Тя е монтирана перпендикулярно на посоката на потока. От двете страни на отвора има измервателни отвори, където се отчита налягането в тръбата преди и след него. Разликата в двете налягания се използва при определяне на големината на потока.

✓ *Сензори за поток на основата на измерване на налягане с тръба на Вентури (фиг.52).*

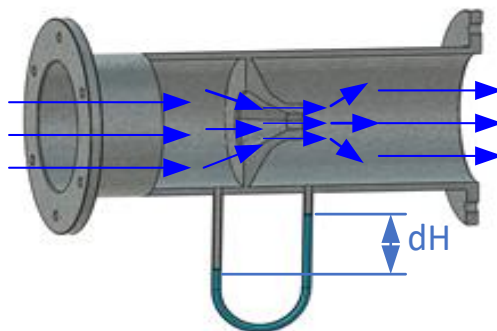


фиг. 52. Сензор за поток на основата на измерване на налягане с тръба на Вентури

Измерването на поток с тръба на Вентури използва същия принцип, както и преобразувателите за поток с калибриран отвор, а именно - разлика в наляганията. В сравнение с измерването на поток с преобразувателите с калибриран отвор, тези с тръба на Вентури

създават по - малка турбуленция. Поради това те не намират приложение в тръби с голям диаметър. Отворите за измерване на налягането се разполагат в най-широката и съответно - в най-тясната част в тръбата на Вентури.

- ✓ *Сензори за поток на основата на измерване на налягане с дюза (фиг.53).*



фиг.53. Сензор за поток на основата на измерване на налягане с дюза

Този тип преобразуватели за поток действа по подобен начин на тези с калибриран отвор и тръба на Вентури. Геометрията на дюзата се определя от диаметъра на тръбата.

- ✓ *Ултразвукови сензори на поток.*

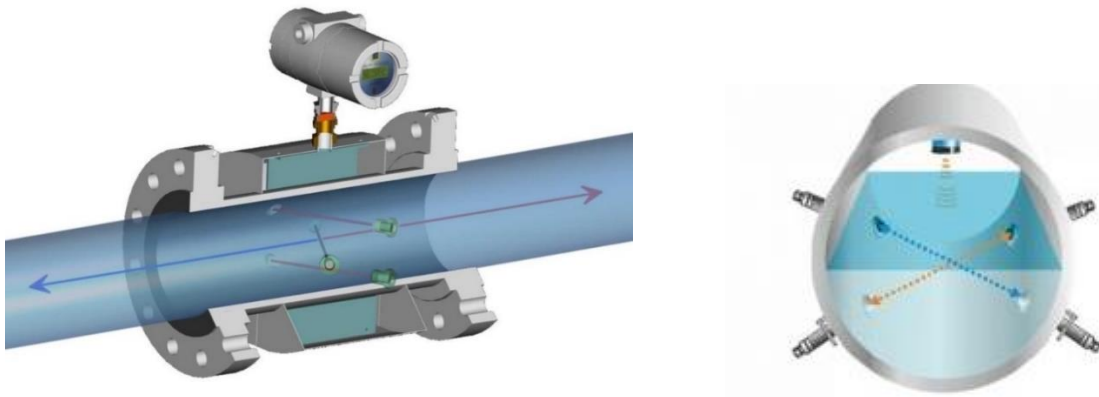
Този вид сензори измерват промяната на времето на преминаване на ултразвуков сигнал по посока и обратно на посоката на движение на потока. Ултразвуковият сигнал, изпратен по посока на движение на течността, има по-висока скорост от сигнала, движещ се в обратна посока на флуида.

- **Ултразвукови сензори за поток с непрекъснат ултразвуков сигнал**

Когато се използва непрекъснат ултразвуков сигнал, между излъчения и приетия сигнал се появява фазова разлика, посредством която се определя големината на потока.

- **Ултразвукови сензори за поток с генериране на импулси с ултразвукова честота**

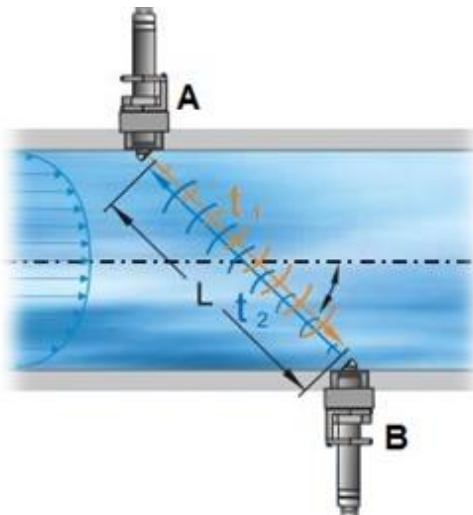
При измерването посредством генериране на импулси се излъчват импулси от двата ултразвукови сензора, съответно по посока и обратно по посоката на движение на флуида или газа. Измерва се времето на приемане на импулсите като големината на потока се определя вследствие на разликата във времето на приемане на импулсите, движещи се в двете посоки.



фиг. 54. Ултразвуков сензор за поток с генериране на импулси с ултразвукова честота [38]

✓ *Посредством използване на Доплеровия ефект (фиг. 55).*

При този метод за измерване на поток се използва така наречения Доплеров ефект. Доплеровият ефект се състои в промяната на приеманата от наблюдателя честота или дължина на вълната, когато източникът и/или наблюдателят (приемникът) се движат по направление един към друг. Честотата се увеличава, когато източникът и наблюдателят се доближават, и намалява, когато се отдалечават.



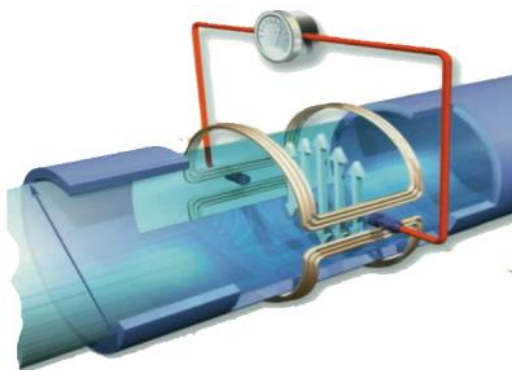
фиг. 55. Измерване на поток посредством Доплеров ефект [38]

При този метод се следи отражението на ултразвуковия сигнал от движещите се в потока частици. При достигането на частица ултразвуковият сигнал се отразява като с това изменя и честотата си. Разликата в честотите се използва за определяне на скоростта на потока.

Недостатъкът е, че с увеличаване на броя на частиците се увеличава и евентуалната грешка от измерването.

✓ *Магнито-индуктивните сензори за поток (фиг. 56).*

Магнито-индуктивните сензори за поток се основават на свойството, че ако проводник с дадена дължина l се движи в магнитно поле, перпендикулярно на магнитните линии, в проводника се индуцира електродвижещо напрежение.

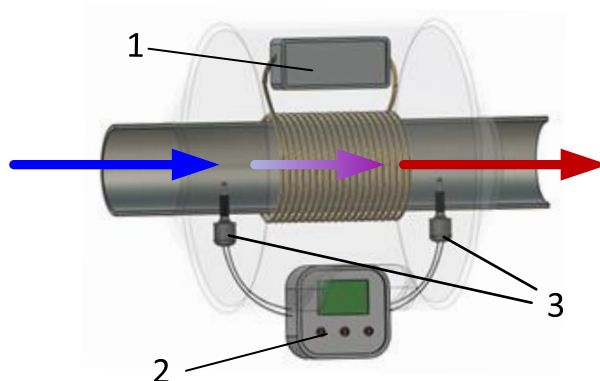


фиг. 56. Магнито-индуктивен сензор за поток [48]

Движещия се проводник е течността, която трябва да е електропроводима. От двете страни на тръбата са разположени електроди, които определят дължината l на проводника. Индуцираното напрежение е пропорционално на скоростта на движение на флуида. Точността на този тип преобразуватели е значителна, но имат високата цена.

✓ *Калориметрични сензори за поток (фиг. 57).*

Методът се базира на разпространение на температурата, създадена от нагревател, която се измерва от два сензора, разположени симетрично на нагревателя.



фиг. 57. Калориметричен сензори за поток

1 - управление на нагревател, 2 - измервателен блок,

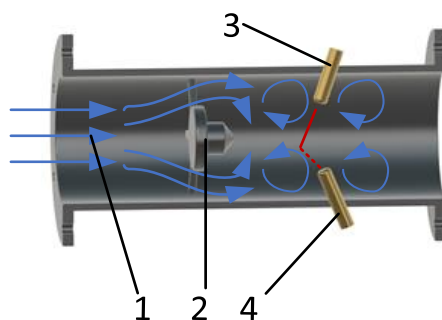
3 - температурни сензори.

Скоростта на движение на флуида или газа е пропорционална на разликата в показанието на двата сензора. Принципът на работа включва и компенсиране на температурата на самия флуид, за да може да се постигне добра точност на измерването.

✓ *Вихрови сензори на поток (фиг. 58).*

Вихровите преобразуватели за поток са базирани на принципа на завихрянето на течностите или газовете, ако по техния път на движение се постави препятствие. Те не съдържат движещи се части, което за някои приложения е от голямо значение. Честотата и броят на образувалите се завихряния е пропорционален на потока. Използваният в тези преобразуватели на поток метод е удобен за измерване на по-големи скорости на движение на флуида, докато при ниски скорости грешката нараства.

Самият брой на завихрянията може да се измерва посредством термистори, ултразвукови и оптични сензори, както и чрез тензопреобразуватели, кондензаторни и пиезоелектрически сензори.



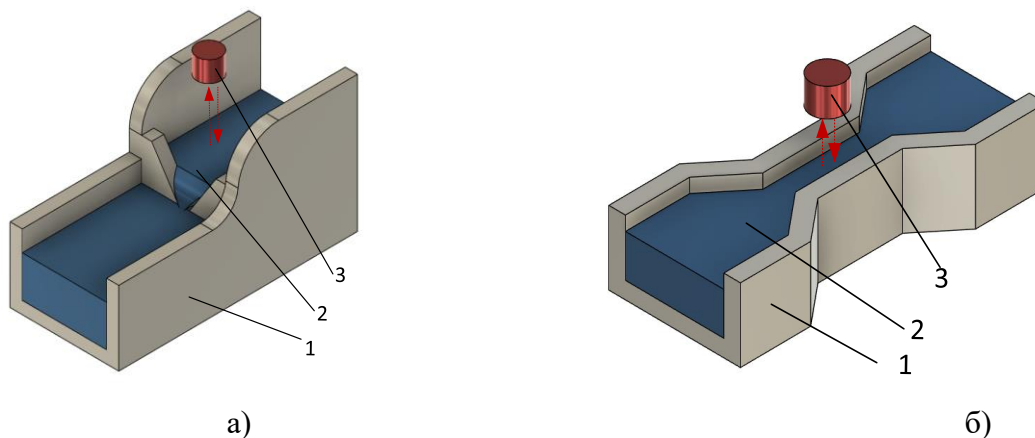
фиг. 58. Вихров сензор на поток

1- посока на потока, 2 - препятствие,
3 - излъчвател, 4 - приемник.

✓ *Сензори за поток за отворени канали (фиг. 59).*

Често в практиката се налага измерване на поток на течност в отворени канали. В този случай основно се използват два метода:

- с преливници (фиг. 59 а);
- с подаващи канали (фиг. 59 б).



фиг. 59. Измерване на поток на течност в отворени канали

1- канал, 2 - флуид, 3 - сензор за ниво

2.6. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА НИВО.

2.6.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ.

Днес има голям брой автоматизирани системи за управление на различни технологични процеси и една от основните задачи на такива процеси е да се контролира нивото. В тази връзка производителите произвеждат много видове датчици за ниво, базирани на различни принципи на работа и използвани с течни и насипни материали.

Уредите за измерване на ниво се наричат нивомери. Те имат разнообразна конструкция и принцип на действие според условията на работа (*температура, налягане, влажност*), обхвата на измерваната величина и приложението.

Манометрите и нивелирите позволяват непрекъснато да наблюдавате нивото и да контролирате дали материалът достига определеното ниво.

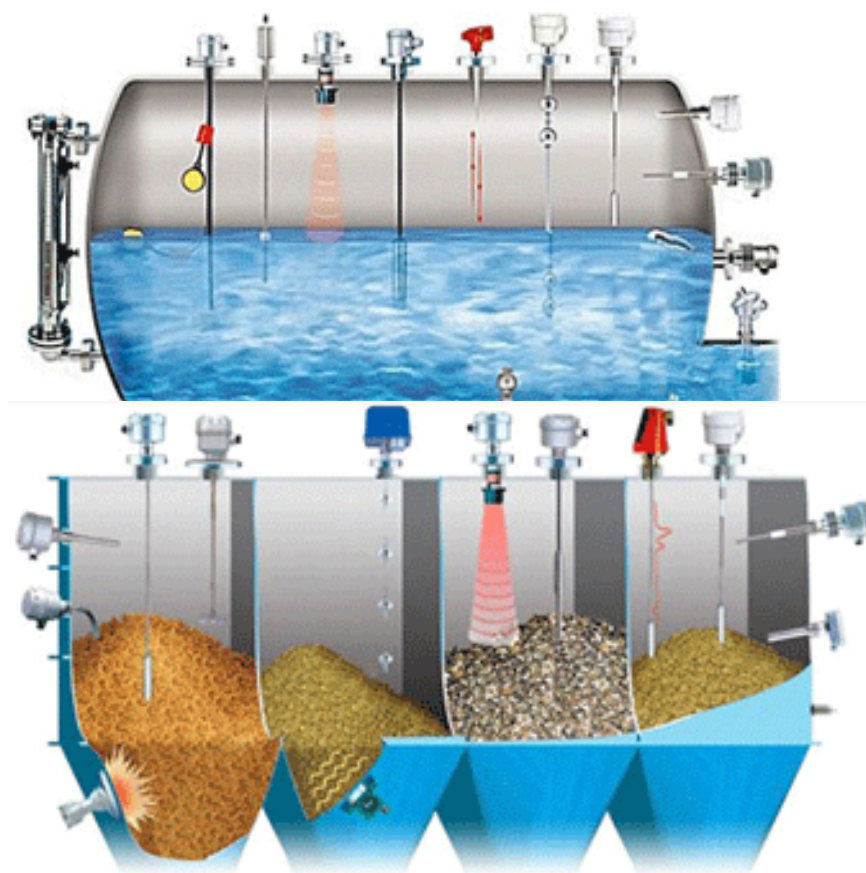
Днес е възможно да се използват сензори за ниво както с течности, така и с насипни материали и дори с газове, като материалът може да бъде разположен както в контейнера, така и в тръбопровода (*фиг. 60*).

Сензорите се подразделят на контактни и безконтактни, а според метода на монтаж те могат да бъдат проектирани за монтаж или в тялото на тръбопровод или в контейнер с измерения материал, или над измервания материал.

В миналото сензорите работеха на принципа на поплавка и използваха метод за затваряне на контакти с материал. Сега сензорите са претърпели подобрения, те съдържат схеми в своя дизайн, които осигуряват редица допълнителни функции, като измерване на

обем, дебит, сигнализация при достигане на границата и др. Резултатите от измерването могат да бъдат обработени и съхранени.

Независимо дали индустрията се справя с течни, вискозни, газообразни, свободно течащи, лепкави, пастообразни материали, винаги има подходящ сензор за ниво за правилната среда. Вода, разтвор, алкали, киселина, масло, горива и смазки, пластмасови гранули - обхватът на приложение е много широк, а сензорите, базирани на различни физически принципи, ви позволяват да изберете този, подходящ за конкретни условия и за почти всяка задача.



фиг.60. Видове сензори за ниво

фиг. 60. Видове сензори и монтажа ѝм [39]

Хардуерът на сензора се състои от две части: самия сензор и визуализатора на данни. Типът на избрания сензор се определя от спецификата на индустриалния процес и средата, в която сензорът ще работи. С инструментите за визуализация процесът на измерване може да генерира графики за анализ на информацията на ниво продукт, което значително улеснява автоматизацията.

Манометри се използват за непрекъснато наблюдение на нивото на насипни материали или течности в естествени и изкуствени резервоари. Те измерват нивото дискретно от няколко

милисекунди до десетки секунди. Използват се за наблюдение на нивото на водни разтвори, киселини, основи, алкохоли, както и за насипни материали. Те са контактни и безконтактни и според физическите принципи са изключително разнообразни.

2.6.2. КЛАСИФИКАЦИЯ

Всички сензори за ниво на течността се различават не само по функционалност (нивомери/ сигнални устройства), тип (контактен/ безконтактен), но и по принципа на работа



фиг. 61. Класификация на сензорите за ниво

Когато говорим за измерване на ниво на насипни материали, имаме предвид не само материали, състоящи се от множество твърди микроскопични частици, например брашно или цимент, но и твърди материали с по-голям гранулометричен състав, които имат условна течливост, например - трошен камък, натрошена руда и др. В повечето случаи за задачите за измерване на нивото на насипни материали няма значение дали веществото е от еднородни или е смес от различни насипни материали.

Превключвателите за ниво на насипни материали са проектирани да подават сигнал, когато материалът достигне предварително определено ниво. Превключвателите на ниво

използват метод за измерване на контакт (ротационен, вибрационен, капацитивен) или безконтактен метод за измерване (ултразвуков, микровълнов, радиационен).

Манометрите за насипни твърди вещества или датчици за ниво дават информация за нивото на контролирания материал непрекъснато или със зададена дискретност. Манометрите също могат да използват контактен метод (електромеханична партида, капацитивен, микровълнов рефлекс) или безконтактен метод (ултразвуков, акустичен, микровълнов).

✓ **Капацитивните сензори за ниво** са икономично решение за контрол на нивото, при което няма пяна или слепване на средата върху сензора и където не се изисква висока точност на измерването на нивото. Обикновено се използва за измерване на нивото на течността в малки резервоари. За хранителни продукти и корозивни среди се препоръчват модели с измервателна сонда с пластмасово покритие. Съществен недостатък е голямата грешка при измерване на течности с ниска диелектрична константа ($\epsilon = 1,5 \dots 3,0$), както и невъзможността за работа с диелектрични течности.

Решението за премахване на проблема с измерване на течности с ниска диелектрична константа и проблема с определянето на интерфейса между средите с близки стойности на диелектричната константа е капацитивно-честотното сигнално устройство. За разлика от капацитивното, благодарение на RF технологията и фината настройка, то е способно да открива слабо проводими течности и в същото време не реагира на пяна.

✓ **Хидростатични нивомери и сигнали** имат по-висока точност на измерване в сравнение с капацитивните и същата ниска цена. Те са най-добрият избор по отношение на съотношението цена/ качество. Стойността на нивото се изчислява чрез измерване на налягането на течната колона, поради което хидростатичните сензори се използват в отворени или затворени резервоари, но в които въздушното налягане съответства на атмосферното, в противен случай манометърът ще даде неверни резултати. Определянето на нивото също се влияе от плътността на течността. За използването на хидростатични измервателни уреди е необходимо да се гарантира, че стойността му остава постоянна през цялото време на измерване. Поради това не се препоръчва използването на метод за определяне на хидростатично ниво за течности с променлива плътност (радиохимично производство, петролни продукти с температурни промени). Използват се за контрол на нивото на чиста и отпадъчна вода, течна храна или химикали, не реагират на пяна. Те са практическо решение за измерване на нивото на течността в кладенци.

✓ **Работата на байпасните нивомери** се основава на принципа на комуникаращите съдове, което прави процеса на измерване много ясен и разбираем. Такива нивомери се

използват в малки резервоари под налягане с температура на работната среда до +250°C. Те могат да се използват заедно с магнитостриктивни измервателни уреди. Байпасните нивомери не трябва да се използват с вискозни течности или течности, чийто вискозитет се увеличава с намаляване на температурата, тъй като температурата на течността в байпасната камера, поради топлинните мостове в свързващите фитинги, е по-ниска, отколкото в съда, комуникиращ с нея.

✓ **Магнитостриксционните и магнитните измервателни уреди** са от тип поплавък, което означава, че поплавъкът „лежи“ на повърхността на течността и нивото се измерва спрямо положението на този поплавък. Такива нивомери са по-точни. Препоръчително е да се използват при търговското счетоводство на леки нефтени продукти, химикали и други скъпи течности. Плаващите превключватели са подходящи за измерване нивото на разпенващи се течности, но не са подходящи за вискозни течности.

✓ **Микровълновите рефлекторни нивомери** състоят се от електронен блок и вълновод. Дължината на вълновода трябва да съответства на височината на резервоара, което ограничава използването на сензори във високи резервоари. Всички сензори с подобен дизайн (капацитивни, магнитни, магнитостриксционни) са изправени пред този проблем. Принципът на действие и дизайн на рефлекторния нивомер го прави изключително точен и подходящ за използване в сурови условия (висока температура и налягане), както и при разпенване и залепване на течности. Този тип нивомери могат да се нарекат най- универсалните, подходящи за използване с почти всяка течност, независимо от налягането на въздушната среда, над повърхността на течността или диелектричната константа на средата.

✓ **Предавателите за изместване** са сензори за тежки условия, които също изискват висока точност на измерване. Принципът на действие на предавателите за изместване е подобен на работата на поплавъчните сензори и се основава на използването на закона на Архимед. Някои модели могат да осигурят резултати от измервания при температури от -196 °C до + 500°C и налягане на работната среда до 414 атмосфери. Имат висока цена. Обикновено се използват в нефтосъхранение и химическа промишленост.

✓ **Микровълновият радарен нивомер** е универсално устройство за непрекъснато измерване на нивото на течности. Той има всички предимства на безконтактния метод на измерване и се характеризира с изключително висока точност. Подходящ за всички течни среди, с изключение на пяна. Най-доброто приложение за тези сензори е в резервоари с бавни промени в нивото на течността, където е важна висока точност на измерване. Недостатък е високата им цена.

✓ **Ултразвуковите сензори за ниво** са друг вид безконтактен тип сензор. Именно ултразвуковите сензори се използват най-често за безконтактно наблюдение на нивото на течностите. Липсва им много високата точност на измерване, но цената на такива устройства е няколко пъти по-ниска. Ограничение за употребата се налага от разпенващи се течности и контейнери, в които се образува газова възглавница (контейнери с азотна киселина), както в случаите на импулсни радарни измервателни уреди.

✓ **Оптичните нивелири за течности** са миниатюрни сензори, предназначени да следят нивото в малки контейнери и резервоари под вибрация.

✓ **Вибриращи аларми** или, както ги наричат още „**вибрационни вилици**“, врязани в контейнера на необходимите нива. Сензорният елемент постоянно вибрира, което позволява на сензора да се използва с вискозни и пенещи се течности, без страх от фалшиви аларми. Такива сензори имат средна точност и цена в сравнение с други аларми.

✓ **Поплавковите превключватели** са най-простите и икономични устройства за наблюдение на нивото на течността и отпадъчните води, както и леко агресивни течни среди. Поплавъчните превключватели са разделени на два вида - кабелни поплавъчни превключватели и магнитни поплавъчни превключватели. Разликата се състои в това, че кабелните кабели имат определена дължина на кабела и са потопени в течността през горната част на резервоара, докато магнитните се врязват в страничната стена на резервоара на необходимото ниво. За агресивни среди поплавъкът и кабелът са изработени от различни пластмаси. Като правило те се използват за включване/ изключване на помпи. Те се отличават с ниската си цена и ниска точност.

2.6.3. МЕХАНИЧНИ НИВОМЕРИ

Непрекъснатите технологични процеси в различни индустрии често изискват постоянен автоматичен контрол на количеството натрупан материал, суровини, течност и газ.

Нивомерът е устройство, предназначено да определя нивото на съдържанието в отворени и затворени резервоари и съоръжения за съхранение. Съдържанието се отнася до различни видове течности, включително газообразни, насипни и други материали. С помощта на такива устройства се извършва автоматичен контрол и регулиране на нивата на течни и насипни материали, както и звукова и светлинна сигнализация за повишаване или намаляване на нивото на контролираната среда. Нивомерите могат да се използват както като независими устройства, така и като част от система за автоматично управление и/или наблюдение.

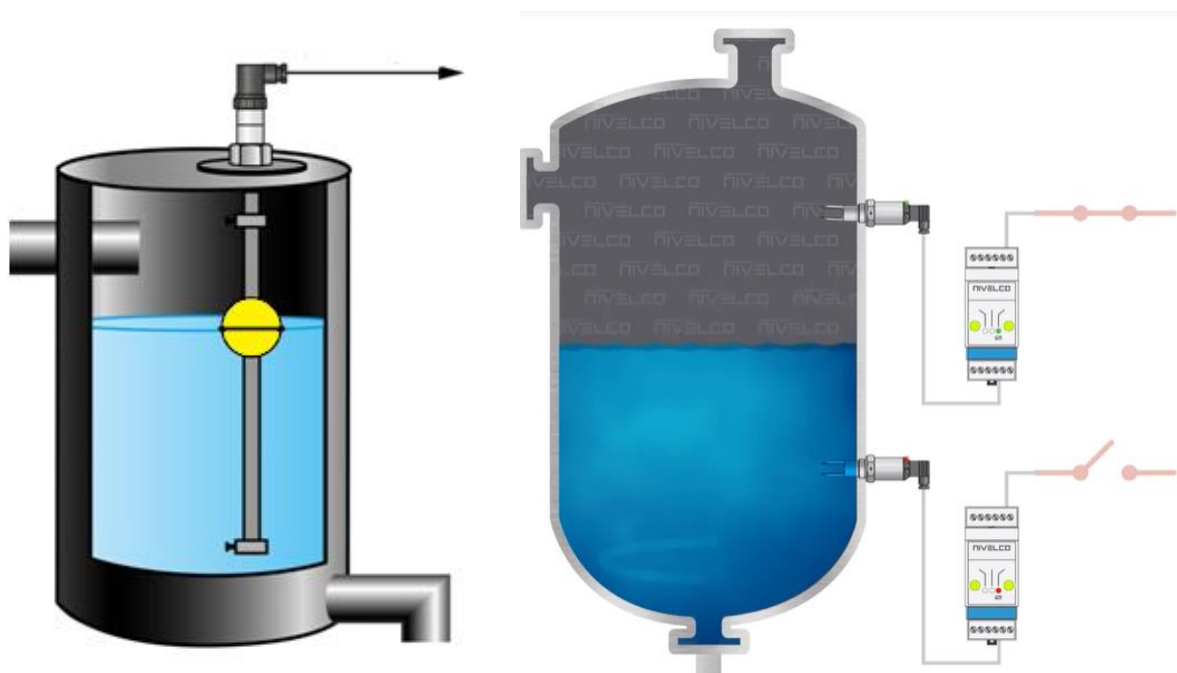
Нивомерите понякога се наричат датчици/ превключватели на ниво, или нивелири. Основната разлика между нивомер и превключвател на нивото обаче е способността да се измерват градациите на нивото, а не само неговите гранични стойности. В индустриалното производство в момента има редица различни технически средства за решаване на проблема с измерването и контрола на нивото.

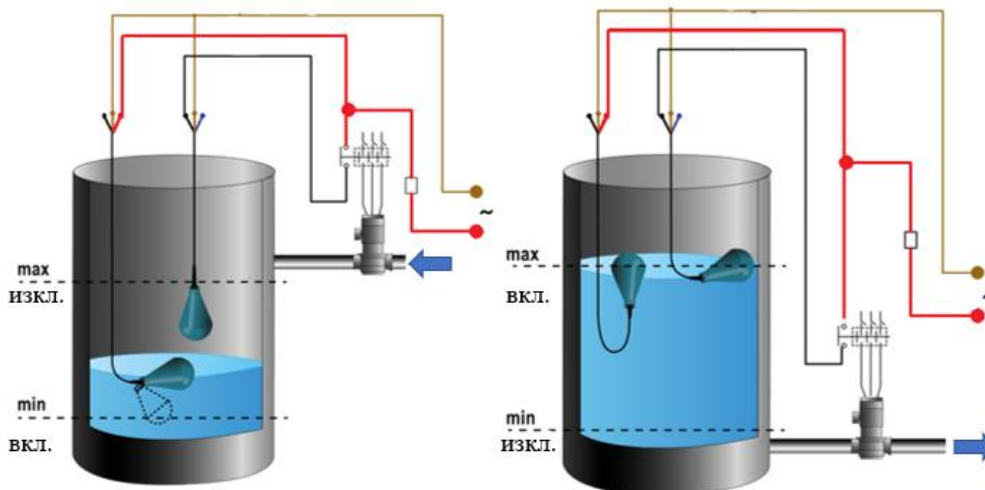
Механичните нивомери са показани на (фиг.62). Те се разделят на:

- плувка, с чувствителен елемент (плувка), плаващ на повърхността на течността;
- изместител, чието действие се основава на измерването на плаващата сила, действаща върху изместващото устройство.

Движението на поплавка или изместителя, посредством механични връзки или дистанционна (електрическа или пневматична) трансмисионна система, се съобщава на измервателната система на инструмента.

Поплачковите превключватели са най-простото и евтино решение за откриване на гранични нива в течности. В същото време те са надеждно решение и могат да се използват за сигнализиране на нивото на различни течни среди, от корозивни течности до обикновена вода.





фиг. 62. Поплавков превключвател [45, 46, 47]

За правилния избор на поплавок превключвател за ниво е необходимо да се вземат предвид характеристиките на измерената течност и параметрите на околната среда, тъй като температурни условия, пяна, вихри (от работещ смесител) и др. може да са проблем за някои поплавъчни сензори.

2.6.2. СЕНЗОРИ ЗА НИВО.

✓ Поплавъчен магнитен индикатор на нивото с байпасна камера (фиг.63).



фиг. 63. Поплавъчен магнитен индикатор с байпасна камера [40, 41]

Байпасната (измервателна) камера се използва за непрекъснато визуално показване на количеството течност в различни отворени или затворени съдове, в резервоари с свръхналягане. Байпасната (измервателната) камера се монтира в близост до резервоара се извършва съгласно принципа на комуникационните съдове, докато същите условия се създават в измервателната камера и в резервоара с измерения продукт.

Тръбата има индикаторни плочи с различни цветове, които променят своето положение под въздействието на магнитното поле на магнита. Поради факта, че няма контакт на течността с външната среда, предавателите на нивото на байпаса са приложими в хранителната и фармацевтичната индустрия. Ограничение на нивото на измерване до 3,5 метра. Точност в рамките на 0,5 mm. Работна температура до +250°C.

Байпасните нивомери намират приложение в топлоенергетиката, химическата промишленост, жилищния и комунално - битовия сектор, електроенергетиката, хранително-вкусовата промишленост, петролната и газовата индустрия.

✓ *Магнитни нивомери (фиг.65).*



фиг. 65. Магнитен нивомер [41]

На водача има поплавок с постоянен магнит. Вътре във водача са инсталирани магнитно чувствителни превключватели. Последователната работа на превключвателите при пълнене или изпразване на резервоара води до промяна на тока в отделни порции. Принципът е прост,

тези манометри не изискват допълнителна настройка и са с ниска цена. Ограничението при ползване е в плътността на течността. Работна температура до +120°C. Границата на измерване е 6 метра.

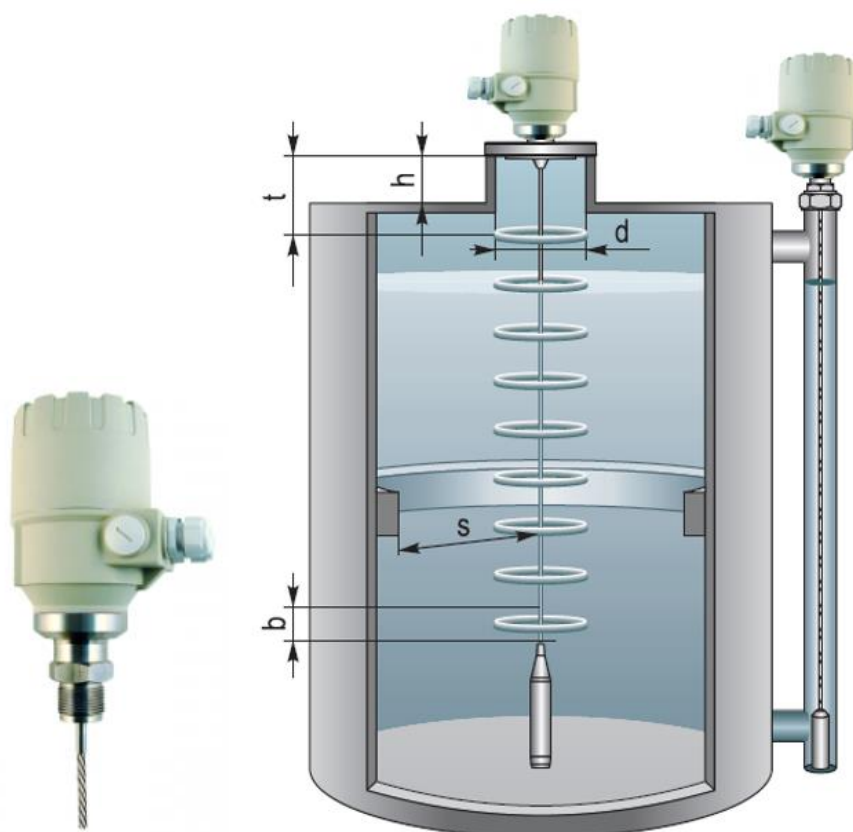
✓ *Капацитивни нивомери (фиг.66).*



фиг. 66. Капацитивен нивомер [41]

Работата на капацитивен нивомер се основава на принципа на промяна на капацитета на кондензатор, който се формира от едната страна от измервателна сонда (инструмент), от другата страна от еталонна сонда, която обикновено е проводима стена на съда или допълнително инсталирана референтна сонда. Изолаторът - диелектрик на кондензатора в този случай ще бъде продукт на измерването. В зависимост от нивото на продукта, капацитивните сензори за ниво ще променят капацитета на кондензатора, чиято стойност се преобразува в аналогов изходен сигнал 4-20mA. Работна температура до +800°C, в зависимост от модела. Времето за забавяне е регулируемо.

Капацитивните сензори за ниво се използват главно за наблюдение на нивото на течности в много области, където е необходимо да се поддържа дадено ниво на продукта: при производството на напитки, битови химикали, във водопроизводствени предприятия, в земеделието и др.

✓ *Микровълнови рефлекторни индикатори (фиг.67).*

фиг. 67. Микровълнов рефлекторен индикатор [49]

Измерванията, използващи електромагнитни вълни, се основават на принципа на преминаване на електромагнитни вълни от излъчвателя на микровълновия сензор за ниво към приемника. Сигналят от излъчвателя, преминаващ през празния контейнер, се регистрира от приемника и когато контейнерът е пълен, той се абсорбира от измерената среда. Осигурени са връзки в металните стени на контейнера, в които са монтирани излъчватели и приемници. Тъй като микровълновият метод е безконтактен, приемникът и предавателят могат да бъдат инсталирани в различни контейнери, тръбопроводи, мини и насипи. Микровълновите превключватели за ниво се използват за откриване на запушване, дебит, крайно положение, позициониране, отчитане, измерване извън процеса, поради което са издръжливи и не изискват поддръжка. Типичните приложения са дървени стърготини, хартия, картон, вар, чакъл, пясък. Рефлекторни нивомери могат да се използват там, където радарът не може да работи поради радиационната схема, например в тесни високи резервоари. Граница на измерване 30 метра. Работна температура до +200°C. Точност в рамките на 5mm.

✓ *Измерватели на нивото на партидата (фиг.68).*



фиг. 68. Измервател на нивото на партидата [50]

Товарът е прикрепен към кабел или лента, навита на барабан. Когато инсталирате сензора върху капака на резервоара, става възможно понижаването на товара надолу по резервоара. Електродвигателят върти барабана и товарът се спуска надолу върху кабела. Когато тежестта докосне повърхността на материала, който трябва да се измери, напрежението в въжето се освобождава и това е сигнал за нивото на материала. Въжето отново се навива около барабана, повдигайки товара обратно.

Електрониката изчислява нивото въз основа на броя обороти на барабана. Такъв сензор е подходящ за откриване на вещества с плътност 20 kg на m³. Ограничение на нивото на измерване до 40 метра. Точност от 1 до 10 см, в зависимост от модификацията. Интервалът на измерване се задава от потребителя и може да бъде от 6 минути до 100 часа. Работна температура до +250°C.

Измервателните уреди на ниво се използват в различни индустрии за контрол на нивото на насипни материали в автоматизирани системи.

✓ *Микровълнови радарни измервателни уреди (фиг.69).*



фиг. 69. Микровълнов радарен измервателен уред [41]

Принципът на действие на радарния манометър се основава на излъчването на високочестотен радиоимпулс от антената, който се отразява от повърхността на измерената среда. В зависимост от вида и размера на сензорната антена точността на устройството може да варира. Колкото по-голяма и по-широка е антената, толкова по-силен и точен ще бъде сигналът, толкова по-голям е обхватът, толкова по-добра е разделителната способност. Времето между излъчване и приемане на импулс е пропорционално на изминатото разстояние. Предварително определената геометрия на плавателния съд ви позволява да изчислите нивото на измерената среда, измерено от радарния манометър.

Точността на микровълновите радарни сензори е в рамките на 1mm, те могат да работят при температури до +250°C и да измерват нивото до 50m.

Радарните нивомери се използват в много индустрии, където се извършва работа с насипни материали: в строителството, дървообработването, в химическата промишленост, в хранителната промишленост, в производството на пластмаса, стъкло и керамика. Те са приложими и за измерване на нивото на течности.

✓ *Акустични нивомери (фиг.70).*

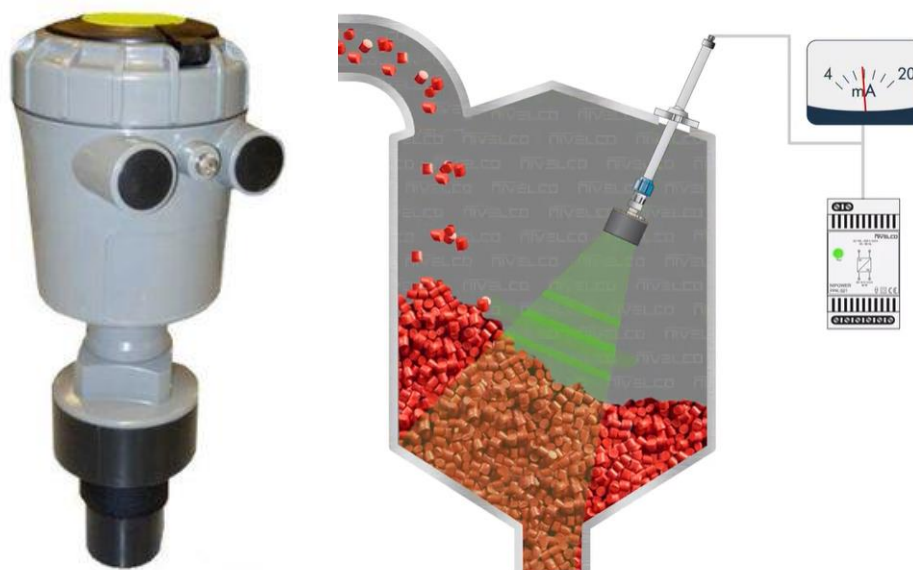


фиг. 70. Акустични нивомери [41]

Използват се акустични вълни, които при отражение от наблюдаваното вещество се приемат и обработват. Софтуерът филтрира желания сигнал, като разпознава паразитното ехо.

Сигналят се доставя с мощен импулс, така че загубите и затихването са минимални. В зависимост от температурата сигнала се компенсира и точността остава висока, в рамките на четвърт процент. Сензорът е инсталиран вертикално или под ъгъл. Нивото на промяна може да бъде до 60 метра. Работна температура до +150°C.

Акустичните нивомери се използват в много индустрии, в системите за автоматизация, за товарене на кранове и системи за мониторинг на нивото на отпадъчните води в септичните ями, до производството на шоколад.

✓ *Ултразвукови манометри (фиг. 71).*

фиг. 71. Ултразвуков манометър

Измерванията на нивото с помощта на ултразвук се основават на зависимостта на времето на преминаване на ултразвук от пътя от излъчвателя до приемника от разстоянието, изминато от ултразвуковия сигнал. Излъчвателят на ултразвуковия манометър изпраща ултразвуков импулс, който се отразява от повърхността на измерената среда и се връща към приемника. Измереното време и известната скорост на ултразвук в разпространяващата среда позволяват да се определи изминатото разстояние от ултразвук. Това разстояние се изважда от височината на резервоара и определя нивото на измерената среда. Поради невъзможността за едновременно излъчване и приемане на ултразвук в близост до предавателя на ултразвуковия манометър има така наречената „мъртва зона“, в която е невъзможно да се получи ултразвуков сигнал. Това определя минималното разстояние между предавателя и горната граница на измерване. Работна температура до +90°C.

Ултразвуковите манометри се използват за наблюдение на нивото на насипни материали в много области, от цементовите заводи до химическата и хранителната промишленост.

✓ *Хидростатични манометри (фиг.72).*



фиг. 72. Хидростатичен манометър [41]

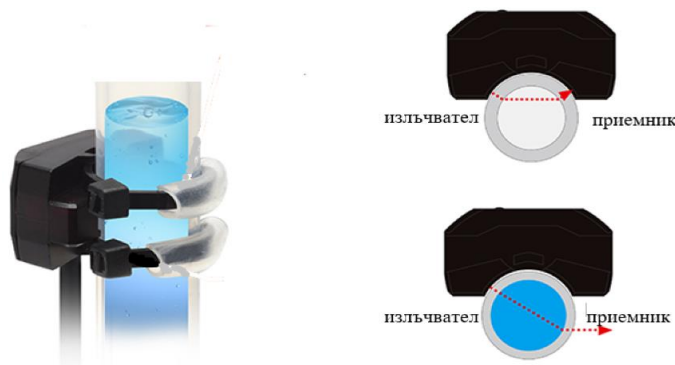
Измерването на хидростатично ниво в отворени резервоари се основава на определяне на величината на хидростатичното налягане, което се произвежда от колона течност, разположена над нивомера. Измереното по този начин налягане определя височината на колоната с течност над връзката на сензора за налягане. По този начин измереното налягане определя нивото на течността.

В затворени контейнери под налягане хидростатичното налягане на течната колона се създава от диференциалното налягане, хидростатичното и налягането над течността. Тази разлика в налягането се определя като хидростатично налягане. Горният сензор за налягане е монтиран над огледалото за течност, другият под огледалото, в дъното на контейнера, разликата в налягането определя височината на колоната с течност в контейнера. Работна температура до +125°C.

Хидростатичните нивомери се използват широко в химическата промишленост, в резервоари, в жилищните и комуналните услуги, в кладенци, в хранителната промишленост за са оборудване на контейнери с течни продукти, в металургията, във фармацевтиката, в петролната индустрия и др.

✓ *Оптични сензори за ниво на течност (фиг.73).*

Сензорът за ниво се състои от инфрачервен полупроводников излъчвател и приемник.



фиг. 73. Оптични сензори за ниво на течност [42]

Когато сензорът е без течност, инфрачервената светлина се отразява от призмата обратно към приемника. Когато сензорът се навлажни с течност, само част от оптичното инфрачервено лъчение се отразява обратно в приемника, докато по-голямата част от лъчението не се отразява обратно в течността. Промяната в нивото на сигнала се следи от вградения фотодетектор и съответно контролира превключването на изходния контакт.

Приложения:

- Наблюдение на нивото на охлаждащата течност в радиаторите на автомобила;
- Аларма за ограничение на нивото на водата в резервоари и резервоари, монтирани на автомобилен, железопътен или въздушен транспорт;
- Контрол на нивото на водата в машини за кафе и сода;
- Аларма за ниво за други невзривни течности.

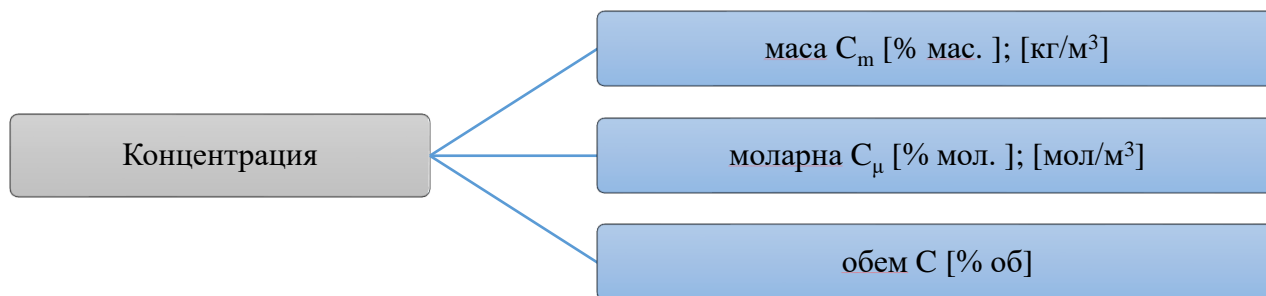
2.7. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА КОНТРОЛ НА КАЧЕСТВОТО И СЪСТАВА НА МАТЕРИАЛИТЕ

2.7.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ. КЛАСИФИКАЦИЯ

В много съвременни производствени процеси, особено в химическата и хранителната промишленост, важна задача е непрекъснатото количествено определяне на състава на многокомпонентни материали и на други свойства на веществата - влажност, плътност и подобни. Измерването им се разглежда заедно, тъй като в някои случаи концентрацията се

определя чрез някои измерими свойства на веществата. Също така съществува подобие между методите и техническите средства при измерване на концентрацията и свойствата на веществата.

В някои системи определени концентрации имат собствени имена, например „влажност“ за концентрация на вода и газ. Тъй като концентрацията включва данни за количество (точно за съотношения на количества), единиците за концентрация могат да се образуват чрез всички единици за количество, някои показани на *фиг. 74*.



фиг. 74. Концентрация

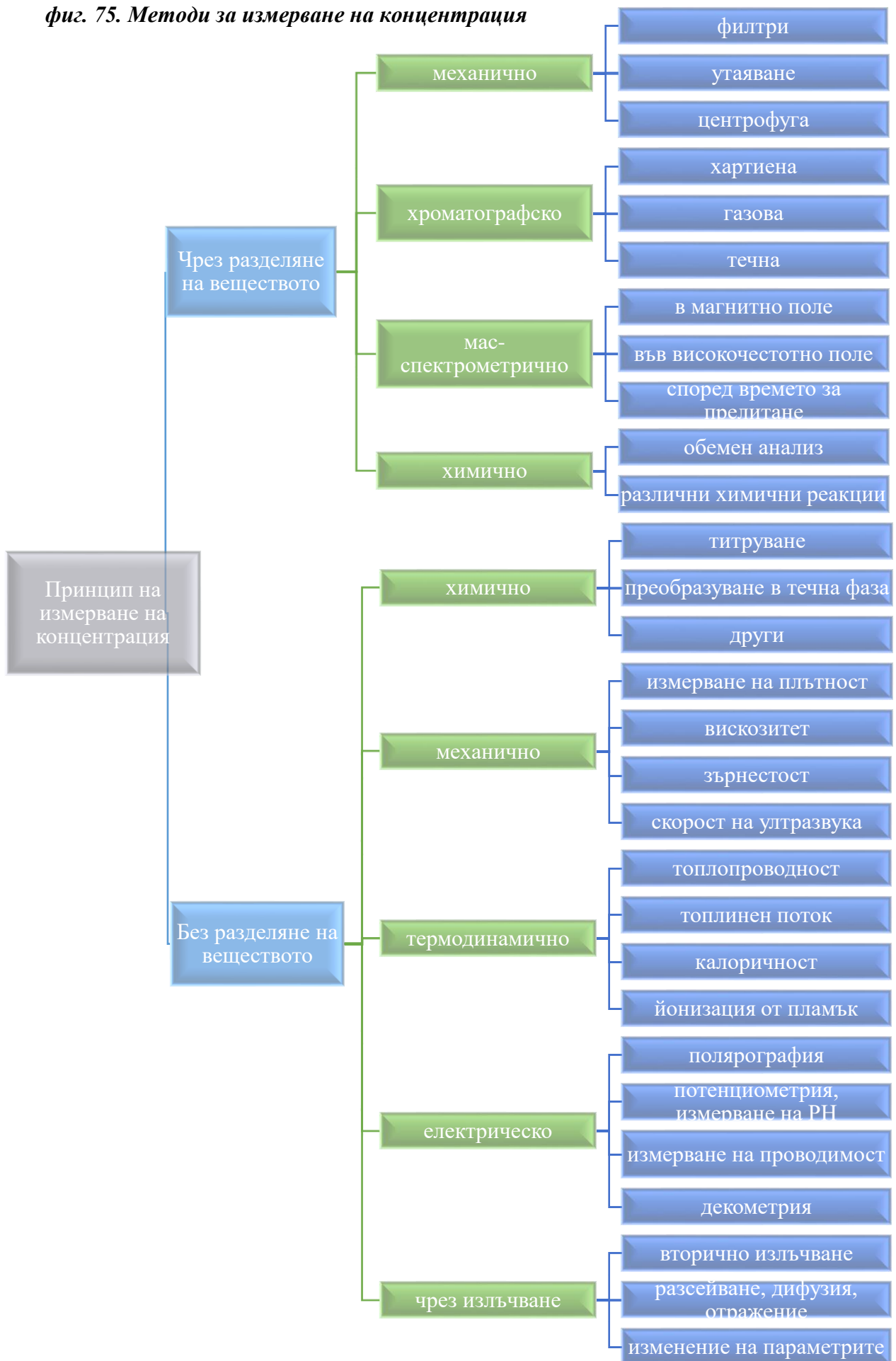
Концентрацията и свойствата на веществата се определят предимно в течно или газообразно агрегатно състояние поради предимствата, които дава този начин на измерване.

Характерна особеност при измерване на концентрация е фактът, че тази величина се измерва индиректно. Различават се:

- специфични методи - използваният за измерване ефект възниква само за търсената съставка;
- неспецифични методи - използваният за измерване ефект възниква при всички или при по-голямата част от съставките на системата, но е различно изразен.

Принципите и методите за измерване на концентрация са многобройни, показани на *фиг. 75*.

фиг. 75. Методи за измерване на концентрация



2.7.2. ИЗМЕРВАНЕ НА КОНЦЕНТРАЦИЯ

✓ Методи и средства за измерване на концентрация на разтвор

В хранителната индустрия разтвори на соли, киселини и основи се използват за различни технологични процеси.

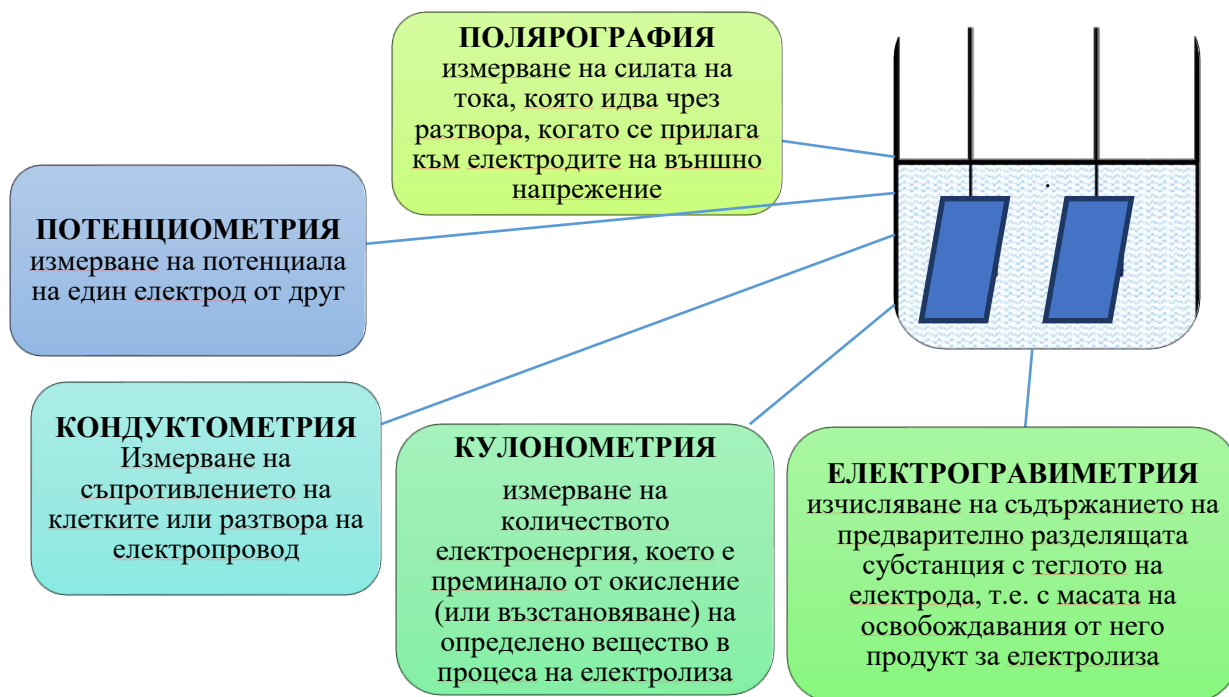
Например солени разтвори се използват за осоляване на месо, киселини и основи се използват за почистване на оборудване и тръбопроводи.

Внедряването на автоматичен контрол и регулиране на тяхната концентрация е много важна задача.

Тези среди обикновено са добри електролити, т.е. разтвори с висока електропроводимост, чиято стойност зависи от тяхната концентрация. За да се контролира този показател в индустрията, широко се използват така наречените кондуктометрични устройства - кондуктометри, които се отличават с висока чувствителност, сравнителна простота и надеждност. Те се разделят на две групи - концентратомери и соленомери.

- Концентратомерите са предназначени за измерване на киселини и основи.
- Соленомерите са уреди, с които се измерва съдържанието на соли във водата, захранваща парните котли и топлообменниците, в парата и кондензираната вода.

Класификация на методите е показана на **фиг. 76**.



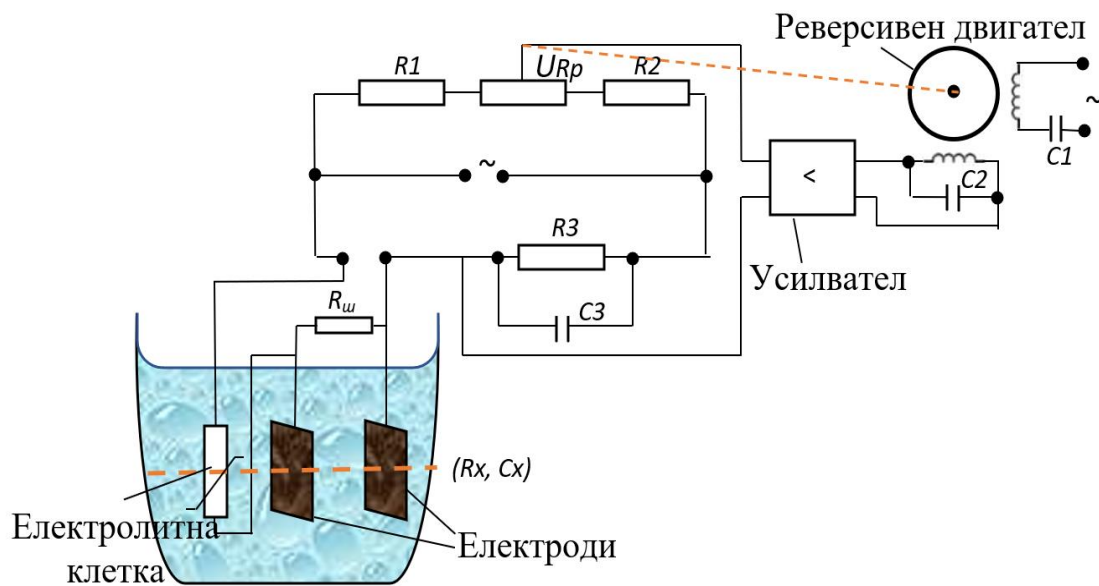
фиг. 76. Класификация на методите на измерване на концентрация на разтвор

Кондуктометричният метод се основава на зависимостта на електрическата проводимост на водните разтвори на електролити от тяхната концентрация. Проводимостта на разтворите се определя с помощта на електродна клетка. Способността на веществото да провежда електрически ток се характеризира със специфичната му електрическа проводимост. Проводимостта на разтворите зависи от температурата. Когато температурата се промени с 1°C , електропроводимостта се увеличава с 2,4% за киселина.

При конструирането на устройства е необходимо да се предвидят схеми за термична компенсация или разтвор. Веригите работят на променлив ток. Според методите за измерване на електрическата проводимост, кондуктометричните инструменти се разделят на два вида:

- Безконтактна нискочестотна, с измервателна клетка под формата на течен контур, и високочестотна, с измервателни клетки от капацитивен или индуктивен тип.
- Контакт с дву- или четириелектродни измервателни клетки.

Измервателната верига на устройството с 2 - електродна измервателна клетка е мост с автоматично балансиране. Схемата на устройството е показана на **фиг. 77**.



фиг. 77. Измервателната верига на устройството с 2 - електродна измервателна клетка

Електродите на електродната клетка, включени в измервателния мост, изпълняват двойна роля - служи за захранване на работния ток и за източване на спада на напрежението, но поради това е невъзможно напълно да се елиминира поляризацията на електродите. Показанията могат да бъдат повлияни от проводимостта на водата, поради разтворените в нея соли. Капацитетът на кондензатора $C3$ зависи от капацитета на измервателната клетка и се

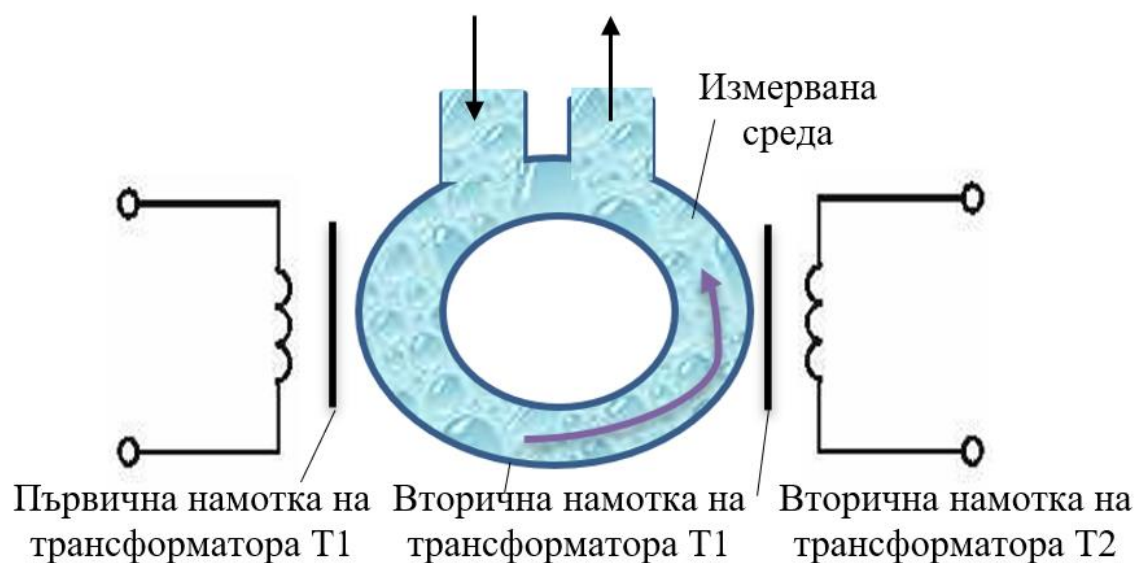
определя експериментално. Резултатите от измерването зависят от температурата. За компенсация на температурата се използва метален термометър за съпротивление или контейнер с еталонен разтвор със същия температурен коефициент на проводимост. Предимството е висока точност при големи температурни отклонения, а недостатъкът е неудобството на това решение и нестабилността на стандарта във времето. За да се премахне напълно явлението поляризация в устройствата, се използва четириелектродна измервателна клетка.

Изискванията към измервателната верига на устройството са както следва:

- Токът, протичащ през клетката, трябва да бъде стабилен.
- Токът не трябва да предизвиква значителен топлинен ефект.
- Измервателното устройство, свързано към електродите, не трябва да консумира ток.

За измерване на концентрации над 1% със специфична проводимост $1\text{h}100\text{ S/ m}$ се използват безконтактни нискочестотни концентратори.

Схема на индуктивен кондуктометричен сензор с течен контур е показана на *фиг. 78*.



фиг. 78. Схема на индуктивен кондуктометричен сензор с течен контур

През последните години концентраторите, базирани на безконтактни методи за измерване на проводимостта, все повече се развиват. С безконтактния метод няма контакт на чувствителната част на сензора с измерената среда, което елиминира грешката от замърсяване на електроди. Безконтактният метод предоставя възможност за измерване на концентрацията на силно замърсени агресивни течности, суспензии и колоидни разтвори.

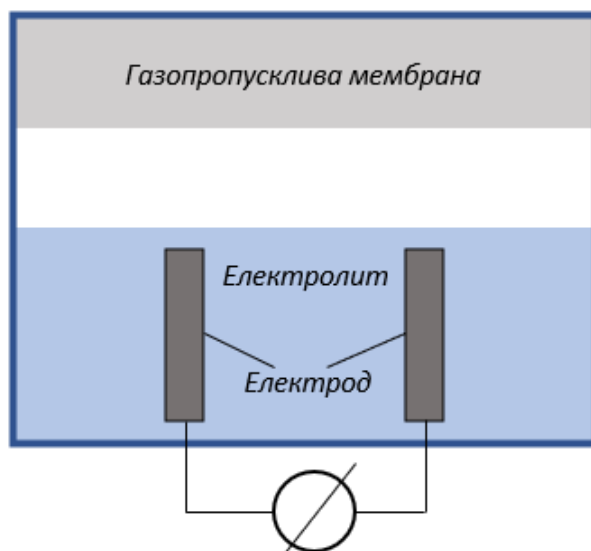
Безконтактните кондуктометри, в зависимост от метода за измерване на проводимостта, се делят на: нискочестотни индуктивни, високочестотни индуктивни и високочестотни капацитивни.

Безконтактните измерватели на проводимостта с течен контур, работещи с индустриална честота от 50 Hz, използват схема за измерване на компенсация и компенсация на температурата. Значителен брой разработени устройства покриват обхвата на измерване на електрическата проводимост от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \text{ l / Ohm} \cdot \text{cm}$.

✓ *Методи и средства за измерване на концентрация на газове*

Контролът върху съдържанието на различни вещества във въздуха на работната зона е много важен. И не само в опасните индустрии, където са възможни течове на газ, но и в офиси, класни стаи и т.н.

✚ Електрохимичен метод за измерване на съдържанието на газ (фиг. 79).



фиг. 79. Електрохимичен метод за измерване на съдържанието на газ

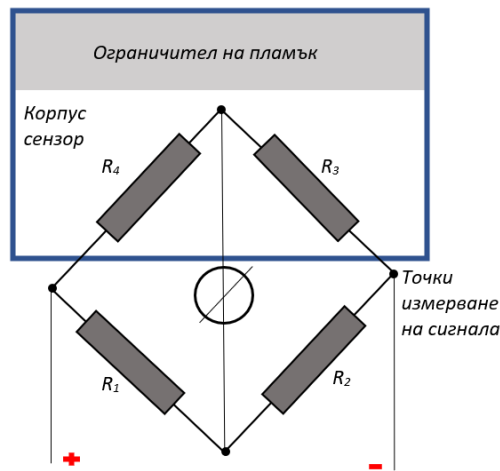
Този метод се основава на промяна на електрическите параметри на електродите в електролитна среда, което променя проводимостта му в зависимост от количеството измерен газ, попадащ върху него.

Измервани газове: NH_3 , H_2S , CO , SO_2 , Cl_2 , O_2

Предимства и недостатъци:

- Разумна цена, широка гама от вещества, ниска консумация на енергия.
- Ниска точност, в зависимост от работните условия.

✚ Термокаталитичен (термохимичен) метод за измерване на съдържанието на газ (фиг.80).



фиг. 80. Термокаталитичен (термохимичен) метод за измерване

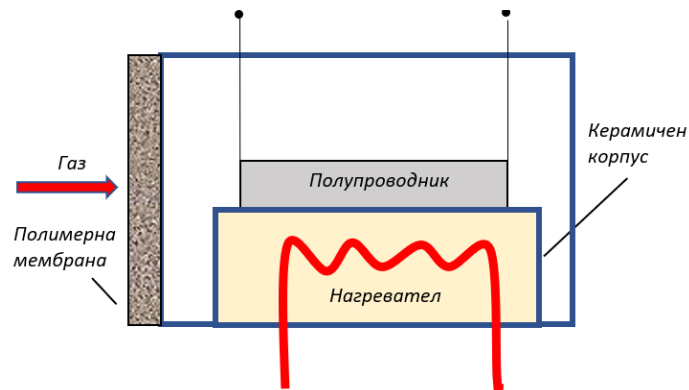
Най-евтиният и най-достъпен начин за измерване на запалими газове и пари. Основният елемент е мостова верига, резистори 3 и 4 са в контакт с измерения газ. На един от тях има специален каталитичен слой. Когато в него влезе газ, започва реакция с окисляване и отделяне на топлина. R на този резистор се повишава и балансът на моста се променя.

Измервани газове: CO , CH₄, O₂, H₂

Предимства и недостатъци:

- Най-евтиният и лесен метод.
- Ниска точност и ниска устойчивост на претоварване и каталитични компоненти, кратък експлоатационен живот, необходимо съдържание на кислород, използва се реакцията на окисление.

✚ Полупроводников метод за измерване на съдържанието на газ (фиг. 81).



фиг. 81. Полупроводников датчик газоанализатор

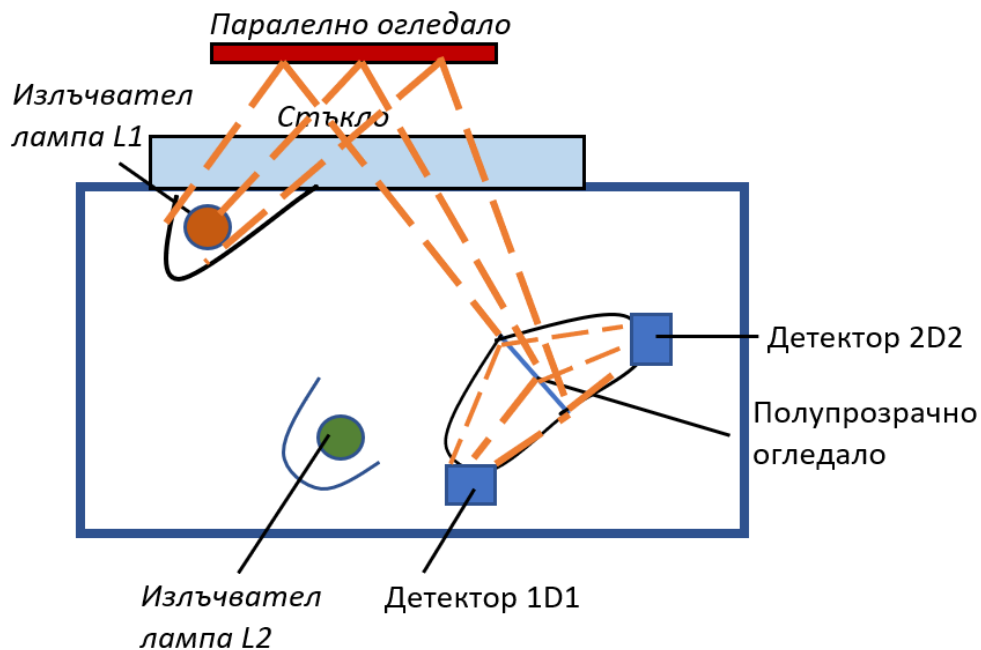
Принципът на действие се основава на факта, че повърхностното съпротивление на полупроводниковия материал (метален оксид) се променя в резултат на взаимодействието му с измерения газ, преминаващ през полимерната мембрана. С помощта на мостова верига това измерване на проводимостта се преобразува в промяна на напрежението. Необходим е нагревател за поддържане на температурата на повърхността на полупроводника, за да се елиминира грешката в измерването.

Измервани газове CO , C_5H_8 , H_2S , H_2 , C_2H_5 , OH , O_2 .

Предимства и недостатъци:

- Разумна цена, голям работен температурен диапазон, ниска инертност
- Ниска точност, ниска селективност, възможност за отравяне с органични вещества и дълго време за регенерация.

✚ Инфрачервен (оптичен) метод за измерване на съдържанието на газ (фиг. 82).



фиг. 82. Инфрачервен (Оптичен) метод за измерване

1 - Излъчвател (лампа) L1; 2 - излъчвател (лампа) L2; 3 - Детектор 2 D2;
4 - Детектор 1 D1; 5 - Стъкло; 6 - Паралелно огледало; 7 - Полупрозрачно огледало

Методът се основава на способността на газовите молекули да поемат селективно радиация в инфрачервената област на спектъра. В зависимост от компонентите в газовата смес, поглъщането на инфрачервения лъч се променя. Лъчът преминава от излъчвателя и, отразен

от огледалото, удря детекторите в оптичния модул. При дължини на вълните, характерни за определени газове, сигналът се абсорбира и детекторите записват тази промяна.

Измервани газове: алкани, алкени, алкохоли, CO₂, NO


Предимства и недостатъци:

- Висока точност - сензорът може да работи във всякаква среда и всякакви газове.
- Висока цена - трябва да наблюдавате замърсяването на оптичните пътеки и влагата, защото това въвежда значителна грешка в измерването.

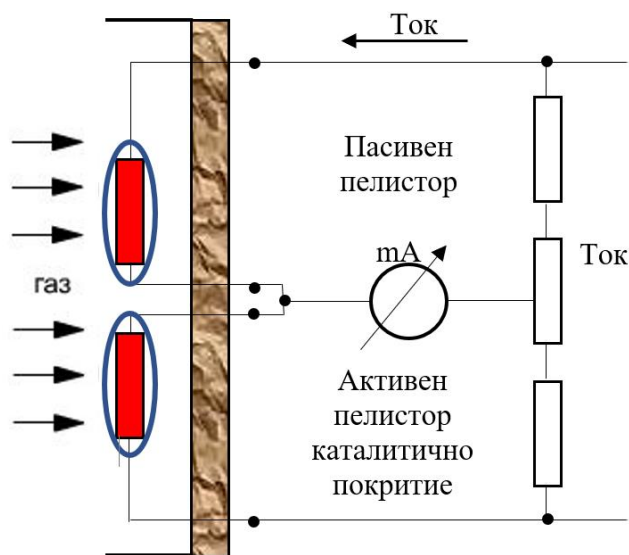
✓ *Сензори за измерване на концентрация на газове*

Всяко производство е свързано с потреблението на енергия. Самото производство на енергия (например електрическа) изисква използването на други видове енергия. Най-често за това се използва топлинна енергия, генерирана от изгаряне на различни видове горива: газ, въглища, рафинирани продукти. По време на транспортиране и разход на гориво в течно или газообразно състояние могат да възникнат течове поради повреда на фитингите или тръбопроводите. При определени концентрации на газове и пари това може да доведе до опасни ситуации. Течовете на запалими вещества и газове могат да причинят пожар и експлозия, което да доведе до значителни щети - пожар и нараняване. Когато изтичат токсични вещества, съществува заплахата за човешкото здраве - много вероятно е задушаване и отравяне, включително фатални. За да се намали рискът от подобни аварийни ситуации при работа с газове и пари, наред с други мерки, газовите алармени системи са ефективно средство за защита. Но само при условие за правилното им поставяне, настройка, експлоатация, както и редовна поддръжка и проверки на производителността.

В момента има много газови анализатори с различни методи за измерване на концентрацията на газове и пари, но най-широко разпространени са газовите анализатори с термокаталитични и електрохимични принципи на измерване.

 Термокаталитичният принцип е особено ефективен при откриване на горими газове и пари (*фиг. 83*). Термокаталитичният сензор има метален или пластмасов корпус. Горим газ протича през газопрониклива мембрана върху две миниатюрни керамични топчета (пелистори) има платинена намотка, загрята от протичащия ток до около 450°C. Едно от топчетата (активен пелистор) има каталитично покритие, което окислява заобикалящия го газ, което води до повишаване на температурата му (пелистор). Това увеличение може да бъде измерено чрез промяна на съпротивлението на

платиновата намотка в активния пелистор. Тази устойчивост се сравнява с тази на пасивния пелистор.

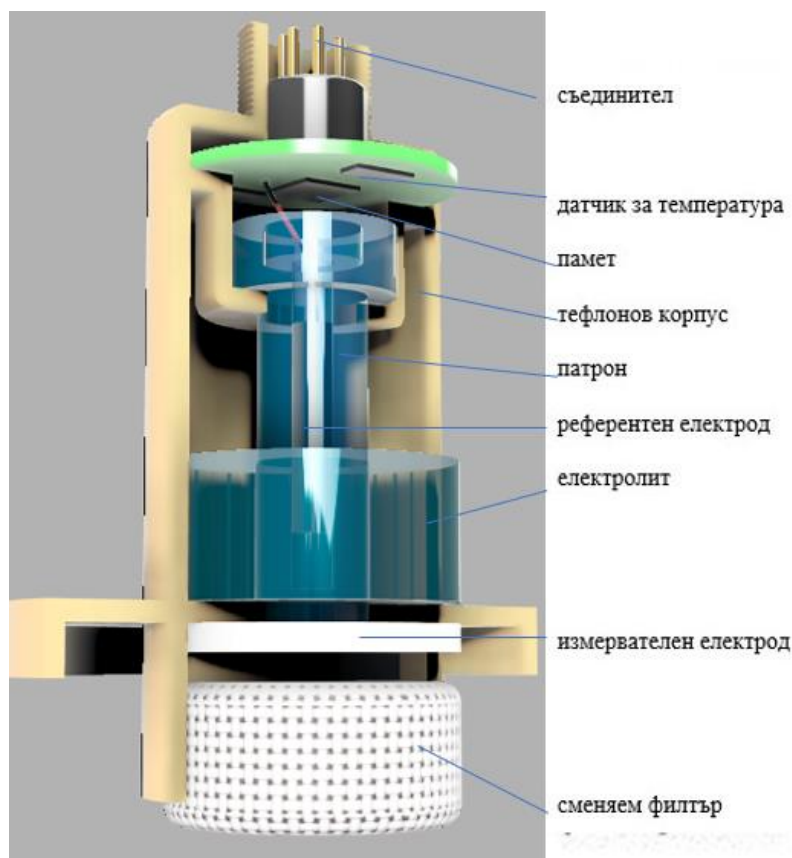


фиг. 83. Схема на термокаталитичен сензор

Термокаталитичните сензори имат проста конструкция и са рентабилно решение за наблюдение на течове на запалими газове. Те са много бързи. Недостатъците на този тип сензори включват ограничен експлоатационен живот и намаляване на чувствителността с течение на времето. Друга характеристика на термокаталитичните сензори е, че кислородът във въздуха е необходим за окисляване на горимия газ върху пелистора. Следователно, ако измерването се извършва не във въздушна атмосфера, а например в атмосфера от чист азот, показанията на газовия анализатор ще бъдат значително подценени.

✚ Газоанализаторите с електрохимични сензори (фиг. 84) се използват за откриване на течове на инертни, токсични и други газове, киселинни пари и органични вещества. Газът, чрез прахов филтър (който служи и като селективен филтър) и хидрофобна мембрана, влиза в газопронепусклив измервателен електрод от благороден метал. Електроните, освободени в този случай, преминават през електролида и еталонния електрод и образуват електрически ток във външната верига. Силата на този ток е пряко пропорционална на концентрацията на измерения газ. Контраелектродът поддържа потенциала на електродите на постоянно ниво, значително увеличавайки стабилността на сензора и подобрявайки неговите измервателни свойства. Сензорите от ново поколение имат вътрешна EEPROM памет, в която се запазват настройките на константите на сензора. Когато такъв сензор е свързан към измервателната глава на газовия анализатор, данните се четат автоматично от него и устройството е готово за измервания. Вграденият температурен сензор, компенсира температурното влияние. В

резултат на това сензорът може да работи стабилно с необходимата точност при околна температура от -40 до + 65°C.

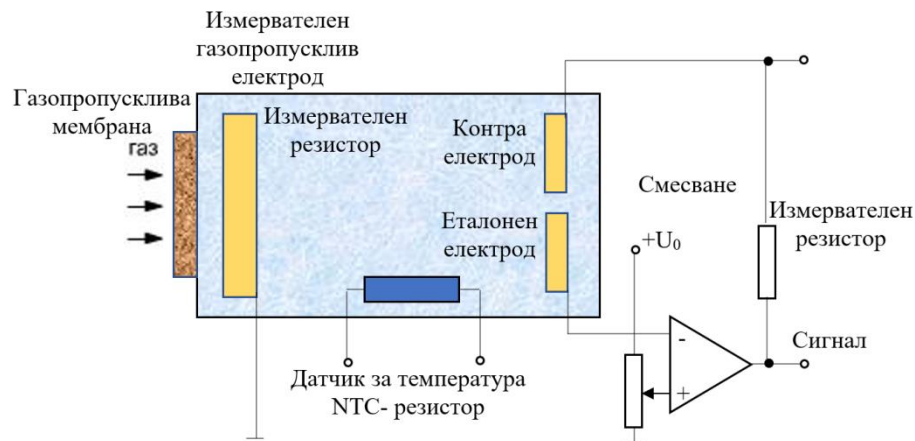


фиг. 84. Газоанализатори с електрохимичен сензор

Селективният филтър е проектиран да елиминира ефекта на кръстосана чувствителност.

Например присъствието на 40 ppm азотен диоксид NO_2 в атмосферата би довело до отрицателни показания до - 30 ppm в кислороден O_2 сензор, предназначен да измерва ниски концентрации. Филтрите са импрегнирани със специално вещество, което химически свързва определени газове, към които сензорът има кръстосана чувствителност. Следователно филтрите имат ограничен експлоатационен живот и са индивидуални за различните сензори. В допълнение, наличието на селективен филтър увеличава времето за откриване на целевия газ и намалява чувствителността на сензора.

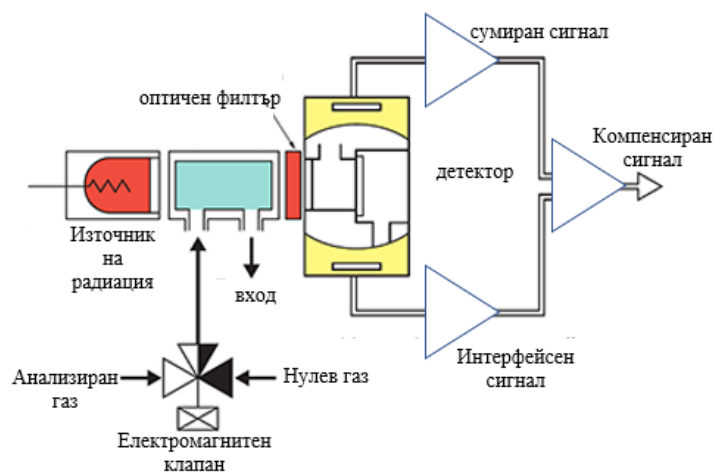
Електрохимичните сензори имат ограничен живот и може да се сравни с конвенционална батерия. Средният експлоатационен живот или съхранение (ресурсът на сензора се консумира, независимо дали работи или не) е от 9 до 36 месеца. Колкото по-голям е размерът на сензора и колкото повече електролит има в него, толкова по-дълъг е неговият живот и толкова по-висока е чувствителността и стабилността на работа.



фиг. 85. Схема на свързване на електрохимичен сензор

Електрохимичните сензори могат да издържат на значително претоварване в концентрацията на измерения газ, но за кратко време. Продължителното претоварване може да повреди сензора.

✚ Газовият анализатор с оптичната абсорбция (в инфрачервената област на спектъра) се състои от източник на инфрачервено лъчение, измервателна кювета, оптичен филтър и детектор от типа микрофон с компенсация за влиянието на смущаващи компоненти (фиг. 86). Детекторът, от своя страна, се състои от две части: предна камера и задна камера. В предната камера на детектора се извършва общо измерване на всички компоненти на анализираната проба, включително пречещи; в задната камера се откриват само пречещи компоненти. Крайният сигнал, получен в резултат на изваждане на сигналите, измерени в камерите, е практически независим от влиянието на смущаващи компоненти.



фиг. 86. Схема на аналитичния блок на газовия анализатор [43]

За разлика от традиционния метод за модулиране на потока на инфрачервеното лъчение с помощта на оптичен сплитер (обтуратор), анализаторът използва метода на кръстосана модулация, който се състои в последователно подаване (след 0,5 s) в измервателната камера на фиксирано количество от анализираната проба и нулев газ с използване на трипътен превключващ клапан (ресурс на клапана - най-малко 100 милиона превключвания).

Някои от предимствата на този газоанализатор са :

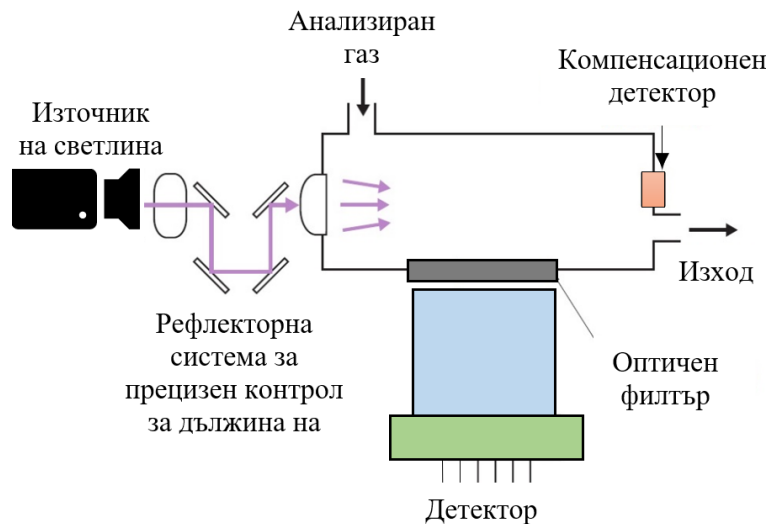
➤ Висока точност на измерване - поради използването на детектор за компенсация на смущения в газовия анализатор, нулевият газ, използван при калибрирането на нулевите показания на устройството, автоматично се почиства от примеси на CO, което гарантира висока точност на измерване.

➤ Висока чувствителност и стабилност - газоанализаторът работи на принципа на модулация на кръстосания поток и технология за абсорбция на IR, което избягва сложни настройки на оптичното оборудване и осигурява по-висока чувствителност и стабилност на измерванията за дълго време.

➤ Трайност - не използва отразяващи огледала или други компоненти, които могат да се замърсят и да причинят чужди вещества да пречат на процеса на измерване. Това означава, че оптичната система винаги остава чиста, осигурявайки дълготрайна и стабилна работа на газовия анализатор.

✚ Газов анализатор, основан на флуоресцентен принцип - автоматично устройство за непрекъсната работа с принудително вземане на проби, използващо вграден стимулатор на дебита (*фиг. 87*).

Предният панел на газовия анализатор съдържа контроли, сензорен графичен дисплей с течни кристали, слот за карта с памет, корпус на основния филтър и сериен порт за обслужване. Задният панел съдържа RS-232C сериен вход / изход, незадължителен аналогов изход 4-20 mA и Ethernet порт.



фиг. 87. Газов анализатор, основан на флуоресцентен принцип [43]

Принципът на действие на газовия анализатор е флуоресцентен - когато са изложени на ултравиолетово лъчение върху газова проба, молекулите SO_2 излъчват характерно излъчване в диапазона 220 ... 240 nm, което се измерва от анализатора. Концентрация на SO_2 изчислена от измервания на интензивността на лъчението. Използва ксенонова лампа като източник на светлина, а дизайнът на флуоресцентната камера свежда до минимум разсейването на светлината. Оптичната система осигурява ниско фоново ниво, което позволява измервания със стабилна нулева точка. Освен това референтният детектор следи колебанията в интензивността на светлинния източник. Това позволява автоматично калибриране на инструмента, което значително подобрява стабилността.

Аналитичната единица на анализатора на газ се състои от източник на ултравиолетово лъчение, предназначен да възбужда молекули SO_2 , оптичен отразяващ филтър за задаване на необходимата дължина на вълната на излъчване, флуоресцентна камера, детектор за компенсация на интензивността на излъчване и детектор. Като източник на UV светлина се използва светкавична ксенонова лампа. Лампа от този тип има широк спектър от UV лъчение, включително диапазона на дължината на вълната, необходим за реакцията. Въпреки факта, че газовият анализатор с вграден преобразувател H_2S не използва метода на кръстосана модулация, постигната е висока стабилност на измерванията, благодарение на други инженерни решения. За да се елиминира влиянието на въглеводородите (особено на толуола), се използва специално молекулно сито, което филтрира въглеводородите и позволява на молекулите SO_2 да преминават през него, след което анализираният газ се подава във флуоресцентната камера. За да се сведе до минимум времето за реакция, което зависи от

абсорбцията на молекули SO_2 върху стените на камерата, вътрешната му повърхност е покрита със защитен слой от флуоровъглерод. Вътре във флуоресцентната камера е разположен детектор, който записва енергията, освободена, когато възбудените молекули се върнат в стабилно състояние.

Интензитетът на ксеноновата лампа ще намалее с течение на времето, което може да доведе до необходимостта от по-чести калибrierания или ранна подмяна на лампата. Газоанализаторът има допълнителен детектор, който измерва интензивността на излъчване на основната лампа и автоматично компенсира получената концентрация на SO_2 , като отчита намаляването на интензивността на излъчване на основната лампа.

2.7.3. ИЗМЕРВАНЕ НА ВЛАЖНОСТ. КЛАСИФИКАЦИЯ

Измерването на съдържанието на влага във веществата в химическата промишленост е необходимо за определяне на съдържанието на влага в газове, твърди вещества или насипни материали.

Така че, за да се контролира влажно-термичният режим в пещи, камери и други технологични устройства, е необходимо да се контролира текущата стойност на влажността на въздуха или газовете.

В химическата технология и други индустрии е възможно да се разграничи процесът на сушене, основан на промяна в съдържанието на влага, което е немислимо без измерване на текущите стойности на съдържанието на влага в продуктите. Това е енергоемък технологичен процес, който изразходва до 15% от консумираното в страната гориво, например премахване на влагата от минерални торове преди опаковане в запечатани торби, сушене на цимент и други целеви продукти.

Съдържанието на влага в газ или насипен материал се разбира като съдържание на влага в единица обем. Основната мерна единица за абсолютна влажност е килограм на кубичен метър (kg / m^3).

Под относителната влажност е съотношението на масата на водната пара, съдържаща се в 1 m^3 газ, към възможно най-голямата маса на водната пара в 1 m^3 от същия газ при същата температура и налягане. Мерната единица за относителна влажност е %.

Устройствата, които измерват влажността, се наричат влагомери. Те също могат да бъдат наречени сензори за влага.

Косвени методи за измерване на влажността - измерват количества, които са функционално свързани с влагата на материала. Те са гръбнакът на съвременните уреди за измерване на влагата. В зависимост от измереното свойство предлага да се разделят косвените методи на две големи групи - електрически и неелектрически. Първите се основават на директно измерване на електрическите параметри на материала; за второто - измереното физическо количество не е електрическо. Въпреки това, на определен етап на измерване, като правило, той се преобразува в електрически сигнал.

➤ *Неелектрическите методи за измерване на влажността* се основават на механичните, акустичните, термичните и оптичните свойства на материала. Това също трябва да включва методи, които използват взаимодействието на различни видове електромагнитни трептения и ядрено лъчение с изследваното вещество.

Акустичен метод. Продължава търсенето на имоти, най-тясно свързани с влагата. Интересно в това отношение е изследването на GC Zoerb, който изследва зависимостта на всички изброени по-горе свойства върху пшеницата, както и нивото на звука при въздействието на зърното върху влагата. Акустичните методи се основават на зависимостта на скоростта на разпространение на звуковите вибрации от съдържанието на влага в материала.

Механичен метод. По-недвусмислената зависимост от влагата има стойност на разрушаване на зърното при удар. Тази зависимост е в основата на механичния влагомер. Тестовите на устройството във влагата варират от 9,8 до 17,4%, така че връзката между броя на унищожените зърна (N) и тяхното съдържание на влага (W) е линейна.

Радиометричните методи използват взаимодействията на различни видове радиация и неутронно разсейване във влажен материал. За определяне на съдържанието на влага и плътността на почвите са използвани методи, торф, гама и неутронни методи. Предимствата на тези влагомери включват неразрушаващо изпитване, независимост на измерванията от температура, висока чувствителност и скорост. Необходимостта от защита на персонала от вредното въздействие на радиацията е съществен недостатък на метода.

Ядрено-магнитният резонанс е един от най-ефективните методи за изследване на твърди и течни вещества. Той се основава на използването на магнетизма на атомните ядра на анализираната проба, така че получената информация идва от самите дълбочини на материята и ви позволява да прецените структурата на материята. Определянето на водното съдържание по този метод е свързано с регистрирането на протонния резонанс.

Термофизичните методи за определяне на съдържанието на влага все още не са получили широко практическо приложение. Основните им недостатъци за дълго време бяха ниска точност и ниска скорост.

Оптичен метод - действието на оптичните влагомери се основава на селективното поглъщане от влага на IR (инфрочервено) - излъчване с определена дължина на вълната, отразено от повърхността на контролирания обект или преминало през този материал.

➤ *Електрическите методи за измерване на съдържанието на влага* се основават на зависимостта на електрическите свойства на материала от съдържанието на влага. Те станаха широко разпространени благодарение на удобството за преобразуване на влажността в електрически сигнал, възможността за изпълнение с помощта на просто електронно оборудване, изпълнението на непрекъснати и неразрушаващи измервания и висока скорост. При измерването на влагата най-широко разпространените методи се основават на зависимостта на съпротивлението, диелектричните загуби, диелектричната константа, както и комплексите от тези количества от съдържанието на влага в материала.

Електрическите методи за измерване на влажността могат да бъдат класифицирани както по електрически параметър, така и по честотния диапазон, в който се извършват измерванията.

Кондуктометричен метод - при ниски честоти (до постоянен ток) се използва зависимостта на специфичното съпротивление на материалите от тяхното съдържание на влага. В заводи за производство на инструменти в Русия, Украйна, Естония и Латвия, както и в чужди страни, се произвеждат кондуктометрични влагомери за различни материали. Основният недостатък на този метод е голямото влияние на смущаващи фактори върху резултата от измерването.

Високочестотен метод - в честотния диапазон със средна и къса дължина на вълната (0,3–30 MHz) се използва зависимостта на диелектричните характеристики от съдържанието на влага в материала. Този метод измерва електрическия капацитет на първичния преобразувател, напълнен с изпитвания материал, който е функция на диелектричната константа и съответно съдържанието на влага в изпитвания материал. Високочестотните методи за измерване на влажността се използват широко в индустрията. Високочестотните устройства включват VZK-2, PVZ-10, VZPK-1, TsVZ-3, „Kolos“ и други. Основният парк от експресни влагомери на чуждестранни фирми се състои от диелектрични високочестотни устройства.

Недостатъците на високочестотните влагомери включват: ограничена маса на контролираната проба, ефектът от променливата концентрация на соли във вода, зависимостта на диелектричните характеристики на материалите от тяхната плътност и температура. Следователно измерванията на влагата по тези методи трябва да се извършват при постоянна плътност и температура на материалите или да се въведат корекции в резултата от измерването.

Свръхвисокочестотни (UHF) - методи за измерване на влажността - един от най-обещаващите методи за измерване на влагата е свръхвисокочестотните (UHF) - методи за измерване на влагата. Тези методи се основават на зависимостта на диелектричните параметри на материалите от тяхното съдържание на влага при измерване на тези параметри в микровълновия диапазон.

Предимствата на микровълновото измерване на влагата са: безконтактно измерване, измерване в големи обеми и добри метрологични характеристики. В чужбина се отделя специално внимание на развитието на измерването на микровълнова влага. Те се използват за контрол на съдържанието на влага в зърнени култури, хранителни продукти, текстилни материали, тютюн, памук и различни други продукти по степен на затихване на микровълновата вълна.

Ние вярваме, че поради такива предимства като възможност за безконтактно измерване, широк обхват на измерване (до 100%), висока чувствителност и точност, интегралният резултат от измерването на съдържанието на влага в микровълновия метод може ефективно да се използва за измерване и контрол на зърнена влага по време на съхранение и преработка.

Амплитудните методи за измерване на влага позволяват да се получи висока точност на определяне на влагата, подлежаща на стабилизация или като се вземат предвид температурата и класът на материала. Основна е зависимостта на затихването на микровълновата енергия от влажността

$$W = \frac{N - |G|}{8,686\alpha(t)\rho'd},$$

където W е съдържанието на влага в материала; N е измереното затихване; $|G|$ - модулът на коефициента на отражение; $\alpha(t)$ - коефициент на затихване в зависимост от температурата; ρ' - плътността на материала; $\rho' = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$; d - дебелина на материала.

Фазов метод за измерване на влагата - зависимостта на фазовото изместване на микровълновата вълна от съдържанието на влага в материала е основна. При измерване на фаза на изместването на електромагнитна вълна, преминаваща през мокър материал, е необходимо да се вземе предвид, че фазовите коефициенти за вода от сух скелет и въздух са от един и същ вид.

Трябва да се отбележи, че фазовите методи са най-малко чувствителни към промените в сорта, химичния състав и редица други неинформативни смущаващи фактори. Въпреки това, в сравнение с амплитудните методи, фазовите методи изискват по-сложно изпълнение на веригата.

Отделна група трябва да включва методи, базирани на измерване на параметрите на отразената вълна. Те обикновено се използват в случаите, когато е изключително трудно да се контролират параметрите на предаваната вълна поради условията на измерване. При методите с отразена вълна измерените параметри могат да бъдат: амплитуда, фаза, честота и състояние на поляризация. Най-често срещаният от тях при измерване на влага е модулът на отражение.

Измерването на влажността по величината на фазовото изместване на отразената вълна не е широко разпространено, което се свързва с ниската ѝ чувствителност и неяснота на функцията.

В практиката на микровълновото измерване на влагата се използват предимно методите на предавани и отразени вълни, въпреки че са известни редица конструкции, които използват разпръснати и повърхностни вълни.

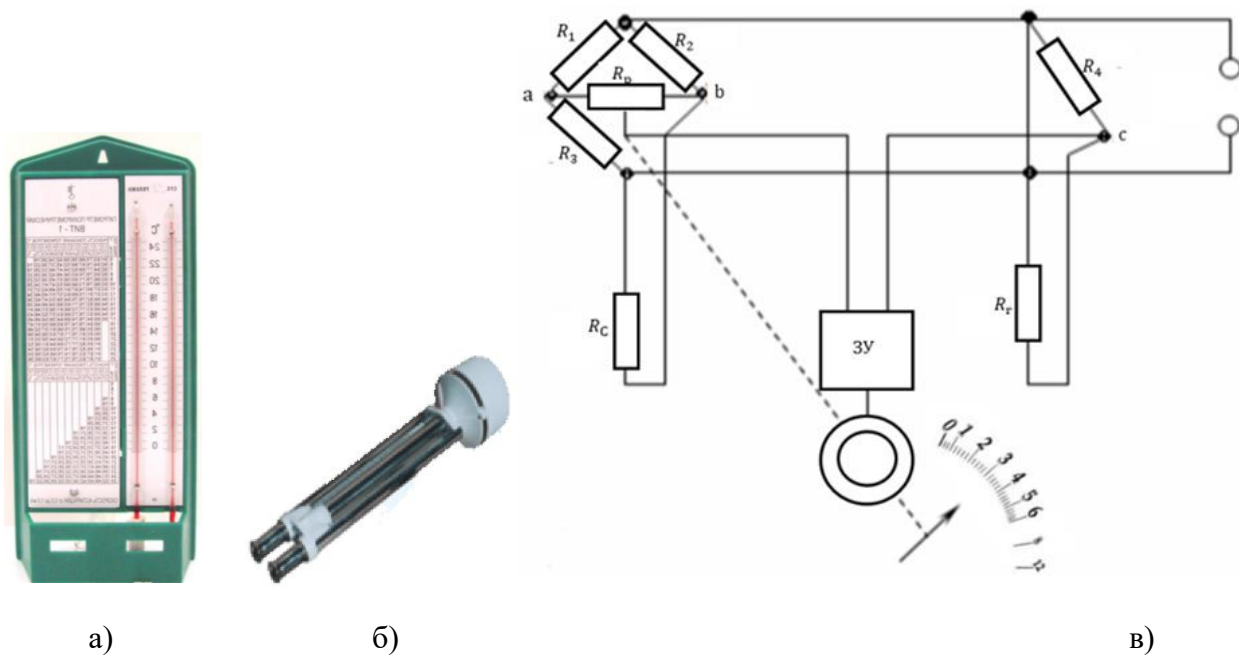
2.7.3.1. ИЗМЕРВАНЕ НА ВЛАЖНОСТ НА ГАЗОВЕ

За автоматично определяне на относителната влажност на газовете най-често се използват психрометричният метод и методът на точката на оросяване.

Психрометричен метод - влажността се оценява по интензивността (скоростта) на изпаряване на влагата, в зависимост от влажността на околната среда (психрометричен ефект). Когато мокър термометър се изпари от навлажнена повърхност, температурата му намалява. Ако имате два термометъра, единият от които винаги е във влажна среда, а другият - в измерена, тогава по величината на психрометричната влажност на техните температури може да се прецени влажността (*фиг. 79*):

$$\frac{W = P_v - A(Q_c - Q_v)}{P_s},$$

където A е психрометричният коефициент; $Q_c - Q_v$ - температурна разлика между сухи и мокри термометри; P_v - налягане на парите при мокрия термометър; P_s - налягане на парите при сухия термометър.



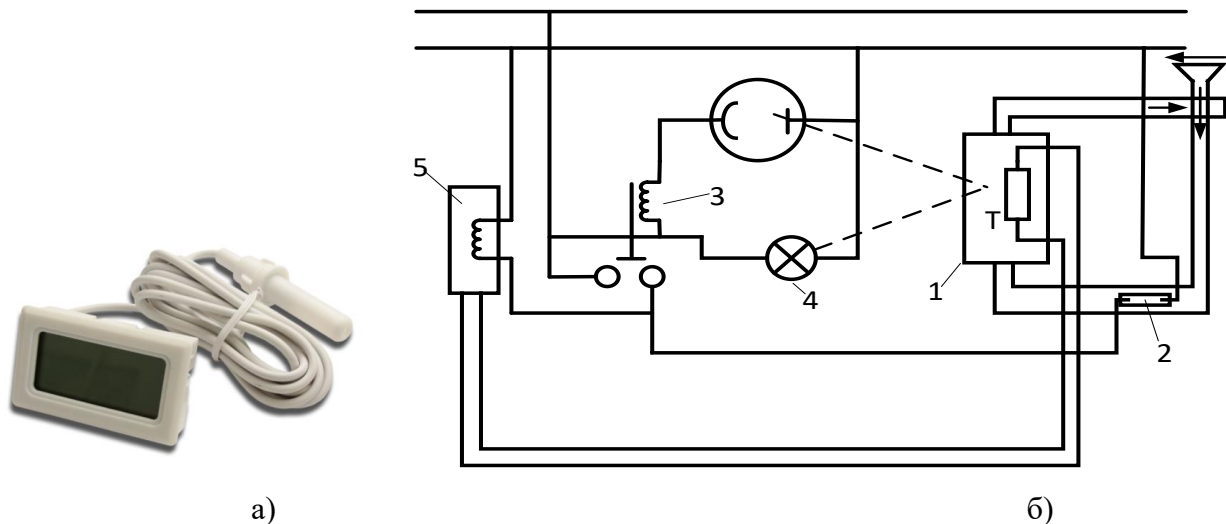
фиг. 88. Психрометър 44

a - външен вид; б - автоматичен психрометър;

в - схематична диаграма на автоматичен психрометър

Метод на точката на оросяване - методът се състои в определяне на температурата, до която е необходимо да се охлади (при постоянно налягане) ненаситен газ, за да се доведе до състояние на насищане. Влажността се определя от температурата на росата, според таблицата с наситени водни пари. На (фиг. 88, б) се показва схематична диаграма на автоматичен хигрометър.

Измервателната част на устройството се състои от 2 моста (фиг. 88, в). Съпротивителни R_1, R_2, R_3, R_4 са включени в раменете на един от тях. В още раменете - R_5, R_6, R_7, R_8 . Двете рамена - R_1 и R_3 - са общи за двата моста. Потенциалната разлика във върховете a и b на първия мост е пропорционална на сухия термометър и разликата между a и c в диагоналите на втория мост температурата на мокрия. Спадът на напрежението между диагоналите b и двойния мост е пропорционален на разликата между сухия и мокрия термометър. Равновесието се установява автоматично чрез промяна на позицията на плъзгача R_p , задвижвана от реверсивния двигател. Стрелката се движи едновременно.



фиг. 89. Автоматичен хигрометър [44]

а - външен вид; б - схематична диаграма:

1 - цилиндър; 2 - нагревател; 3 - реле; 4 - лампа; 5 - реле.

Огледалото е полирана повърхност на кух цилиндър от неръждаема стомана 1, поставен в газ, чиято влажност се измерва. Вътрешната кухина на цилиндъра се охлажда циркулираща течност. Температурата на течността се регулира от нагревател 2, управляван от реле 3, през чиято намотка протича фототокът на фотоклетката F . Фотоклетката се осветява от светлинния поток на лампата 4, отразена от огледалната повърхност на цилиндър 1. Температурата на повърхността на цилиндъра (точка на оросяване) се измерва с термометър за съпротивление T . Реле 5 контролира работата на реле 3. Мъглата се появява на стената на цилиндъра (огледалото), когато стената на цилиндъра се охлади до точката на оросяване. В този случай светлинният поток, падащ върху фотоклетката, намалява, фототокът намалява, реле 3 се задейства, затваря веригата 2. Охлаждащата повърхност приема температура над точката на оросяване. Мъглата изчезва. Фотопотокът се увеличава. Релето включва верига 2. По този начин температурата на огледало 1 постоянно се колебае около точката на оросяване.

Метод на сорбция - той се основава на абсорбцията на влага от анализираната среда от някакво хигроскопично вещество. Количеството абсорбирана влага се определя от промяната в масата или други параметри на влагопоглъщащите материали.

Електрохимичен метод - съдържанието на влага в газа се оценява от величината на електрическия потенциал, необходим за извършване на електролизата на кондензирана влага в газа.

Метод на кондензация - той се основава на охлаждане на тестовия газ в хладилник, докато съдържащата се в него влага напълно се кондензира. Количеството влага се определя от количеството вода, отделено в хладилника.

Спектрометричен метод - методът се основава на зависимостта на поглъщането на радиация от съдържанието на влага в изпитвания газ. Използва се за измерване на висока влажност, така че частиците да могат да въздействат върху радиацията.

Кондуктометричен метод - твърдите вещества често са капилярно - порести вещества, съдържащи влага. Те се характеризират със зависимостта на техните електрически свойства от задържането на вода. Овлажнени, такива тела стават проводници. В този случай електрическото съпротивление пада рязко. Зависимостта на електрическото съпротивление в тях от влагата е в основата на метода за измерване:

$$R = \frac{A}{W^n},$$

където A е константа; W е съдържанието на влага в материала; R е устойчивостта на порестия материал; n е показател, който зависи от структурата и естеството на материала.

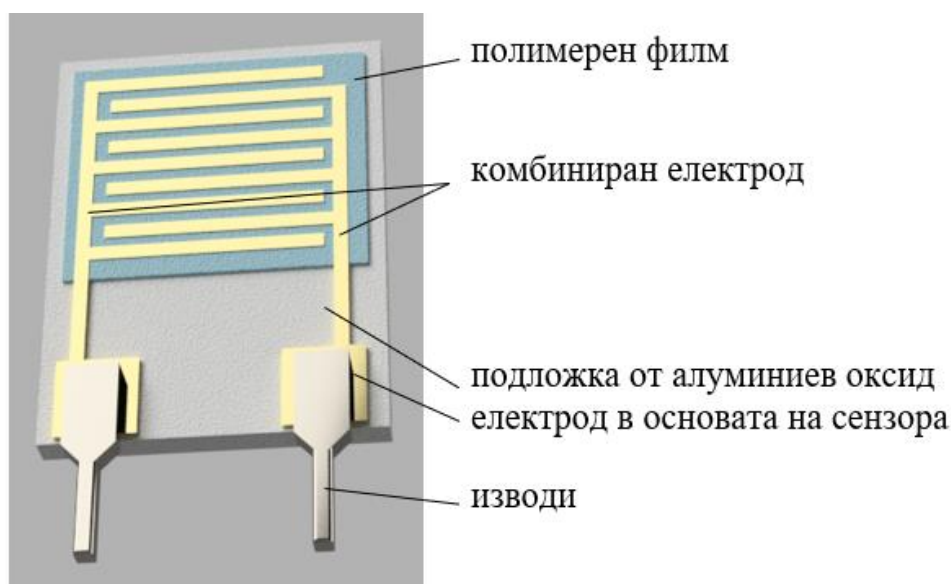
Диелкометричен метод - въз основа на измерването на капацитета на кондензатор, който се променя поради промяна в неговата диелектрична константа, в зависимост от влажността.

2.7.3.2. ИЗМЕРВАНЕ НА ВЛАЖНОСТ НА ТВЪРДИ, НАСИПНИ ВЕЩЕСТВА И ТЕЧНОСТИ

За определяне на съдържанието на влага в твърдите вещества обикновено се използват косвени методи, които правят възможно определянето на съдържанието на влага чрез измерване на функционално свързано физическо количество. От косвените методи за автоматично непрекъснато измерване на съдържанието на влага в твърдите вещества най-широко се използват методът на диелектричната константа и кондуктометричният метод.

Най-широко разпространени днес сред произвежданите полимерни сензори за влага са електронните резистивни и капацитивни типове сензори.

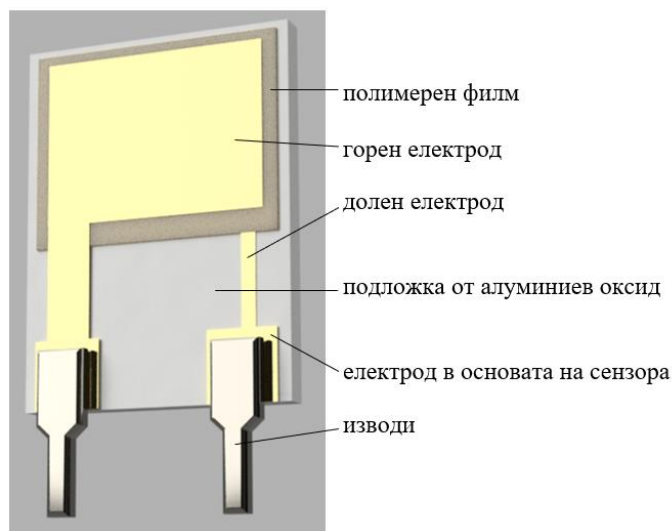
✓ *Резистивни сензори за влажност* - съпротивлението на чувствителния елемент се променя с промяна на влажността, след което се преобразува под формата на електрически сигнали. Структурата на такъв компонент е показана на **фиг. 90**.



фиг. 90. Резистивни сензори за влажност

Проводим дебел филм от благороден метал (злато или рутениев оксид) се напръсква под формата на хребет върху алуминиев субстрат и след това се отгрява, за да се образуват електроди. След това върху електродите се нанася слой полимер, за да се създаде филм, който е чувствителен към промени във влагата. Механизмът на „реакция на определено ниво на влага“ на такъв филм може да бъде оправдан от съществуването на подвижни йони, които са в състояние да се движат свободно поради абсорбцията на водните молекули. По-специално се смята, че това допринася за промяна в импеданса, причинена от промяна на броя на подвижните йони като източник на електрическа проводимост.

✓ При *сензорите за влажност с променлив капацитет* основната характеристика на сензорния елемент се променя в зависимост от промяната на влажността, която се записва под формата на електрически сигнали. *Фиг. 91* показва структурата на капацитивен сензор за влажност.



фиг. 91. Капацитивен сензор за влажност

Електродите в долната част са оформени върху алуминиев субстрат, върху който е нанесен полимерен филм (направен от целулоза или поливинилов алкохол) с дебелина няколко микрона, който служи като чувствителен елемент. Електродите в горната част на сензора се образуват чрез нанасяне на тънък златен филм. С други думи, сензорите за влажност с променлив капацитет са кондензатор с полимерен филм, действащ като диелектрик. Капацитивният сензор за влажност е линеен и може да измерва относителната влажност дори при 0% относителна влажност. От друга страна, той има висок капацитет от няколкостотин pF при 0% относителна влажност и малък диапазон на отклонение от няколко десетки pF при 0 до 100% относителна влажност. В тази връзка, става необходимо да се увеличи малкото отклонение на капацитета, като същевременно се компенсира голямото нулево отместване.

✓ *Оптични сензори за влага*

Базира се на точката на оросяване при определяне на влагата. Когато тази точка на оросяване бъде достигната, течността и газът придобиват равновесие на термодинамиката.

Ако стъклото се постави в газообразна среда с температура над точката на оросяване, тогава температурата на стъклото се намалява допълнително, след което върху стъклото ще се образува конденз. Това е процесът на преход на водата в течно състояние. Температурата на този преход се нарича точка на оросяване. Температурата в тази точка зависи от налягането и влажността на околната среда. Ако можем да определим температурата и налягането, тогава можем лесно да изчислим влажността. Този метод е основният.

Проста схема на сензора включва светодиод, който излъчва светлина върху повърхността на огледалото, отразява и променя посоката. В нашия случай е възможно да промените

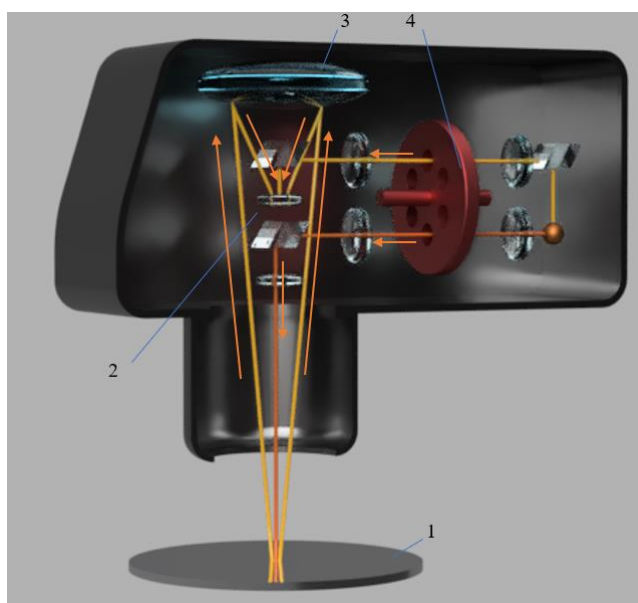
температурата на огледалото чрез нагряване или охлаждане със специално прецизно устройство за контрол на температурата. Може да се използва термоелектрическа помпа. На огледалото е монтиран температурен сензор.

Преди започване на измерванията температурата на огледалото се настройва така, че стойността му да е по-голяма от точката на оросяване. След това огледалото се охлажда. На огледалото ще се образуват капки вода, в резултат на което светлинният лъч, идващ от светодиода, ще бъде пречупен и разпръснат, което ще доведе до намаляване на тока във фотодетектора.

Притежавайки информация от фотодетектора, регулаторът ще поддържа температурата на огледалото, а термодатчикът ще определя температурата. Познавайки налягането и температурата, се определя влагата.

Оптичният сензор има най-висока точност в сравнение с други аналози. Сред недостатъците може да се открият увеличените разходи и значителната консумация на енергия, както и поддръжката, която се състои в поддържане на чиста повърхност на огледалото.

Друг принцип за измерване на съдържанието на влага в различни материали е реализиран в инфрачервения измервателен уред (*фиг. 92*). Онлайн безконтактната измервателна система е оборудвана с оптично устройство за събиране на измерените параметри. Работният инструмент е инфрачервено лъчение, погълнато от мокър материал: колкото по-сух е материалът, толкова повече инфрачервени лъчи ще отразява.



фиг. 92. Инфрачервен измервателен уред

Скоростта на поглъщане на лъчението с определена дължина на вълната е пропорционална на съдържанието на влага в материала. Кварцов халогенен източник излъчва светлина в определен диапазон на дължината на вълната. Светлината от източника преминава през въртящи се филтри. Оптичните IR филтри разделят светлинния поток на измервателни и еталонни лъчи, които се поглъщат и не поглъщат от анализирувания компонент. Отразената енергия на лъчите се преобразува в електрически сигнали, чието съотношение е пропорционално на стойността на контролирания параметър. Допълнителни оптични канали (вътрешни лъчи) компенсират всяка нестабилност на оптичните и електронните компоненти. Светлината, преминаваща през филтъра, е насочена към пробата и се абсорбира частично и частично отразява. Отразената светлина се събира и фокусира върху сензора.

Принципът на действие на ултрависокочестотните влагомери за насипни материали (*фиг. 93*) се основава на значителна (десетки пъти) разлика в електрическите свойства на водата и сухия материал. Концентрацията на влага се определя от затихването на микровълновото лъчение, преминаващо през слоя на анализирувания материал. В такива влагомери, лента от материал преминава между предавателната и приемащата антени. Предавателната антена е свързана с микровълновия генератор, приемащата антена е свързана с измервателното устройство. Колкото по-високо е съдържанието на влага в анализирувания материал, толкова по-слаб е сигналът, постъпващ в измервателното устройство. Микровълновите влагомери ви позволяват да измервате влажността в широк диапазон (0-100%) с висока точност.



фиг. 93. Ултрависокочестотен влагомер

Методът за измерване на влагата се основава на принципа на поглъщане на микровълновото лъчение от материала. Колкото по-високо е съдържанието на влага в материала, толкова повече енергия от микровълните се абсорбира от него и се превръща в топлина и по-малко се връща към сензора на сензора за влага. Отразените високочестотни вълни се преобразуват и обработват цифрово, за да осигурят влагомер с висока разделителна способност. Структурата на материала и еднородността на влагата влияят върху резултатите от измерванията, поради което измереното съдържание на влага се намалява до средна стойност чрез обемната плътност на тествания материал. За това се извършва предварително калибриране на устройството, по време на което в сензора се въвеждат референтните данни за съдържанието на влага в суровината. Случайни промени във влажността, причинени от хетерогенността на материала и неговата обемна плътност, се елиминират чрез софтуерни инструменти. Сензорът за влага за насипни материали е оборудван с функция за автоматична компенсация за промени в околната температура.

2.7.4. ИЗМЕРВАНЕ НА ПЛЪТНОСТ

2.7.4.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

Плътността на веществото е една от основните характеристики, числено равна на съотношението на масата M към нейния обем:

$$\rho = M / V$$

Единицата за плътност в системата SI е kg/m^3 . Понякога те използват концепцията за относителната плътност на дадено вещество, която се определя от съотношението на неговата маса към масата на чистата вода при температура от $+4^\circ\text{C}$, взета в същия обем. Относителната плътност е безразмерна величина. Тъй като водата и петролните продукти имат неравномерни коефициенти на разширение, при определяне на плътността е необходимо да се посочат температурите на водата и петролните продукти, при които е извършено определянето.

Специфичното тегло на веществото е физична величина, определена от съотношението на теглото G на веществото към обема, който то заема V . Специфичното тегло и плътността са свързани чрез съотношението

$$\gamma = \rho g = \frac{mg}{V}$$

, където g е ускорението на гравитацията.

Плътноста на течностите и газовете намалява с повишаване на температурата. Плътноста на газовете се увеличава с увеличаване на налягането, плътността на течността е практически независима от налягането. Инструментите за измерване на плътност често се наричат плътномерни или денсиметри (денситометри). За измерване на плътността в момента се използват измерватели на плътност: тегловни, плаващи (хидрометрични), вибрационни, пиезометрични, хидроаеростатични, хидрогазодинамични, радиоизотопни, акустични и др.

2.7.4.2. МЕТОДИ. КЛАСИФИКАЦИЯ. УСТРОЙСТВА

За да се определят характеристиките на плътността на течностите и газовете, има голям брой методи, които се различават по своя принцип на действие (*фиг. 94*). Голяма група се състои от методи с плаващо тегло (измерване с хидрометър, метод на хидростатично претегляне, поплавък, флотационни методи за определяне на плътността).

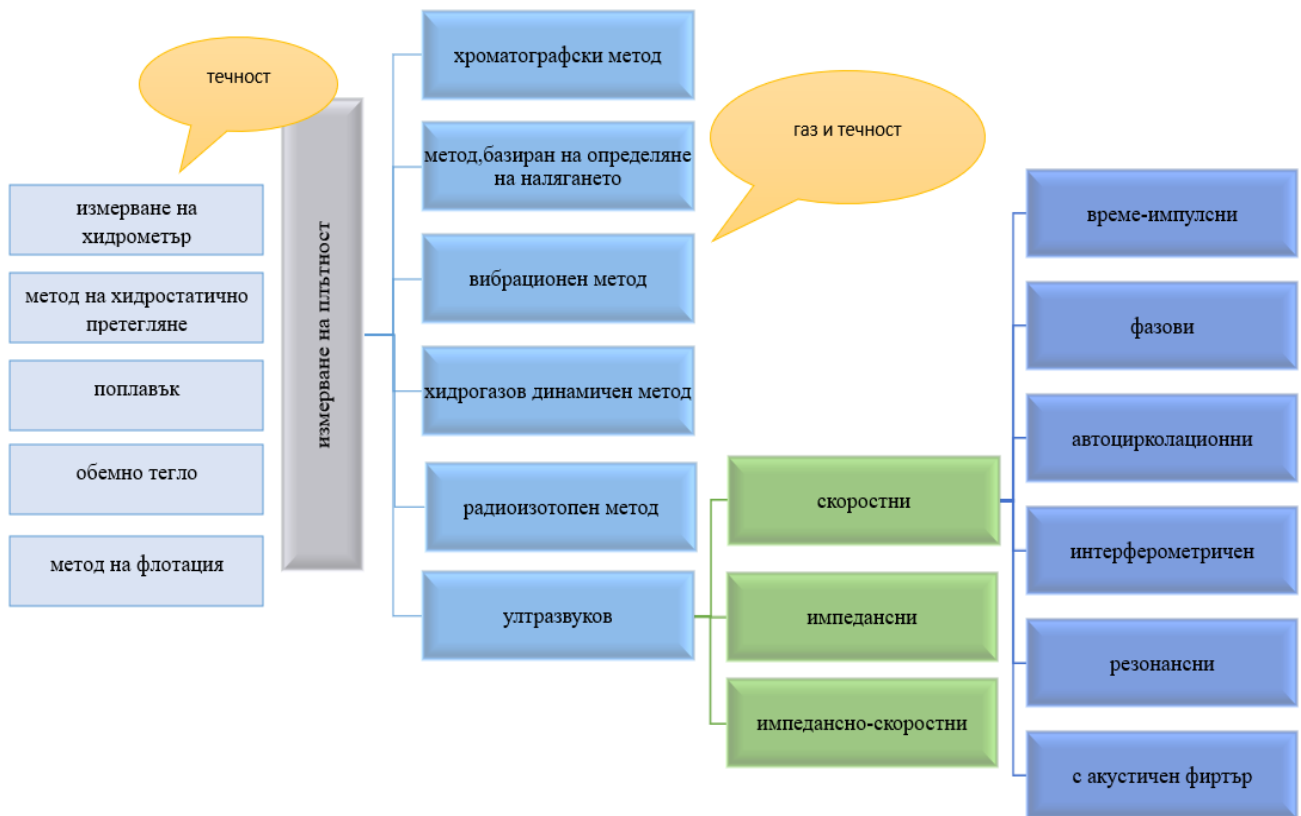
Следващата група включва хидростатични методи за определяне на характеристиката на плътността, която определя зависимостта на статичното налягане на колона с течност или газ с постоянна височина от тяхната плътност.

Към хидро-газодинамичните методи може да се отнесе отделна група, в зависимост от плътността на други физически величини, например времето на изтичане на течността или газа от отвора, степента на въздействие на струята върху бариерата, енергията на потока течност и динамично налягане.

Изходът е сравнение на честотата на трептене на усилвателя с честотата на кристалния осцилатор. Измервателят на честота измерва разликата в честотите на тези вибрации, която в крайна сметка е пропорционална на плътността на газа.

Радиоизотопният метод за определяне на плътността се основава на принципа на затихване на интензивността на гама-лъчението, чийто лъч се разсейва в течност или газ.

Хроматографията е метод за разделяне на вещества, базиран на разпределението на отделените компоненти между две несмесваеми фази, едната от които е неподвижна (адсорбент), а другата е подвижна, протичаща по слоя на неподвижната фаза. Принципът на разделяне е неравен афинитет на веществата към летливата подвижна фаза и стационарната фаза в колоната. Компонентите на сместа селективно се задържат от последните, тъй като тяхната разтворимост в тази фаза е различна, тогава веществата напускат колоната и се регистрират от детектора.



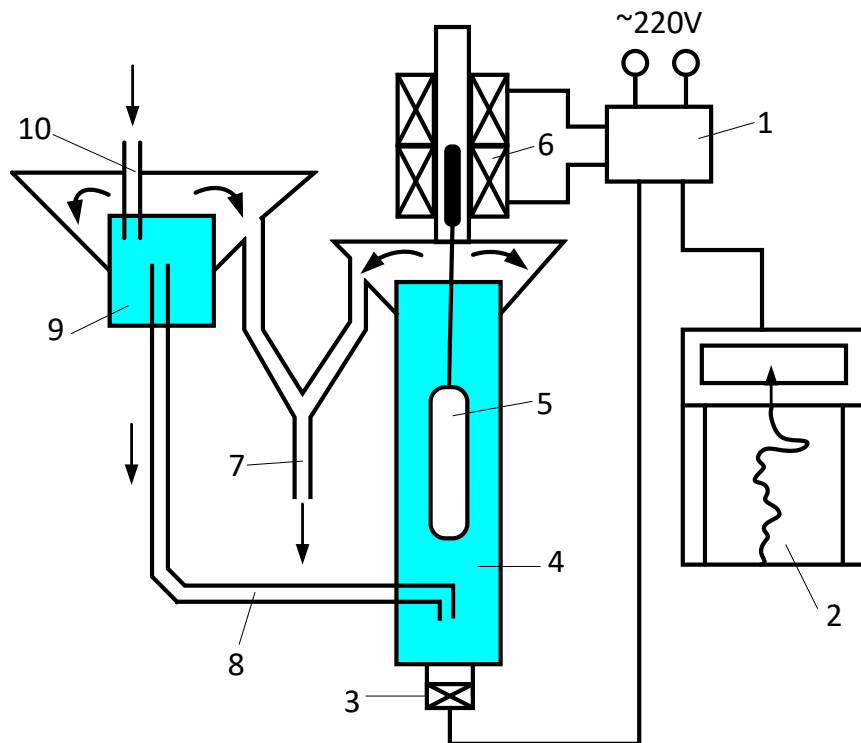
фиг. 94. Методи за определяне на плътността на течностите и газовете

Разглежданите методи и устройства, базирани на тях, често не са подходящи за автоматизирано редовно определяне на плътността на газа. Те са скъпи и тромави, изискващи допълнителни разходи за закупуване и поддръжка. Най-подходящи методи за измерването на плътността и вискозитета на течностите и газовете е използването на акустични (ултразвукови) методи, които се основават на измерване на скоростта на звука в изследваната среда. Съществува и акустичен метод за анализ на газа, основан на измерване на скоростта на разпространение на ултразвукови вълни в газова среда, която зависи от съдържанието на анализа в анализирания газ.

Устройствата за измерване на плътността на течните и насипните твърди частици, според принципа на действие, се разделят на *поплавък, тегло, габарит, звук и радиоизотоп*.

✓ *Хидрометър*

Измервателят на плътността на поплавка (влажомер) използва принципа на плаващ поплавок. Схема на измервател на плътността е показана на **фиг. 95**. Течността тече през тръбата 10 в преливния съд 9, което осигурява постоянно налягане. Освен това, през тръбата 8 течността навлиза в измервателната камера 4, снабдена с устройство за преливане. Излишната течност тече по тръбата 7. Измерването на плътността на течността причинява вертикално движение на поплавка 5 и свързаното с него ядро. Това движение се измерва с помощта на индуктивен преобразувател 6, включен в мостовата верига 1 и записан на индикаторното устройство 2. Температурният ефект се компенсира от термистор 3, включен в измервателната верига на моста. Най-големият ход на поплавка е 200 мм.



фиг. 95. *Схема на измервател на плътността на поплавка*

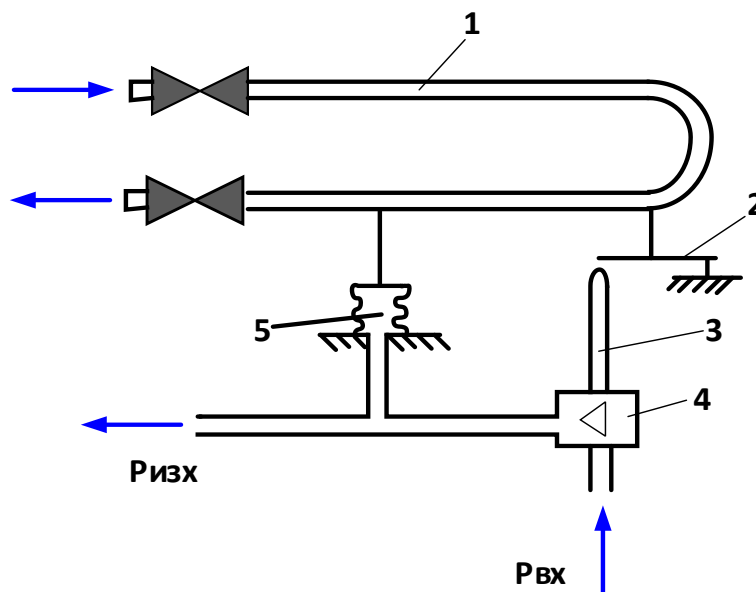
*1 - мост; 2 - индикаторно устройство; 3 - термистор; 4 - измервателна камера;
5 - поплавок; 6 - индуктивен преобразувател; 7, 8 и 10 - тръба; 9 - преливник*

Тегловните или пикнометричните методи се основават на факта, че масата на течността, докато обемът ѝ остава непроменен, е право пропорционална на плътността. Следователно, при непрекъснато претегляне на определен постоянен обем на веществото, протичащо през тръбопровод, може да се измери неговата плътност.

✓ *Измервател на плътността на теглото*

На **фиг. 96** е показана схема на измервател на плътността, където сензорният елемент на устройството е U-образна тръба, масата на която, заедно с течността, протичаща през него, се измерва непрекъснато. Масата на тръбата 1 с течността се прехвърля към клапата 2, която покрива дюзата 3, и през пневматичния усилвател 4 под формата на единен пневматичен сигнал към устройството. Когато плътността на течността, преминаваща през тръбата, се променя, нейната маса се променя и клапа 2 се приближава или се отдалечава от дюзата 3. В съответствие с промяната в плътността на измерената течност, въздушното налягане на изхода на пневматичния усилвател 4 също се променя в системата, съответстваща на измерената плътност на течността.

Измерватели на плътността на теглото се използват за измерване на плътността на вискозни течности, суспензии и течности, съдържащи твърди включения. Възможно е и измерване на плътността на газа.



фиг. 96. *Схема на измервателя на плътността*

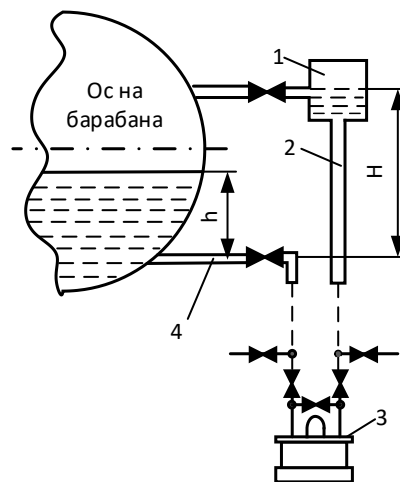
1 - тръба; 2 - капак; 3 - дюза; 4 - пневматичен усилвател; 5 - маншон

Методите за измерване на измервателната плътност се основават на факта, че налягането на течността p на дълбочина H от повърхността е равно на масата на колоната на течността с основна площ 10^{-4} .

$$P = \rho g H$$

$$\rho = P / g H$$

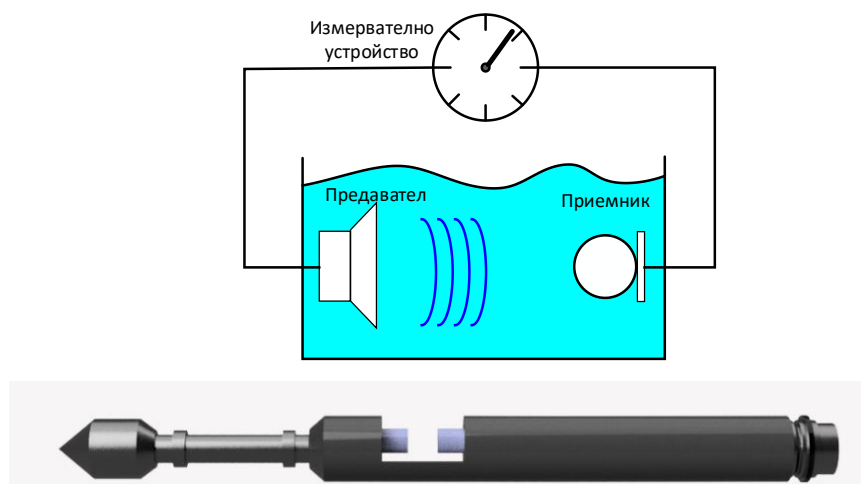
При постоянна височина на течната колона налягането е мярка за нейната плътност. Измерването на налягането на колоната на течността се извършва по същия начин като измерването на нивото на течността с манометрични манометри (фиг. 97), при условие, че нивото е постоянно. Камерата на манометъра за диференциално налягане 3 е свързана чрез тръба 2 към балансиращия съд 1, а отрицателната камера е свързана с долната част на водното пространство на резервоара чрез тръба 4. Нивото на течността в съда 1 се поддържа постоянна и нейната плътност може да се определи от показанията на манометъра за диференциално налягане.



фиг. 97. Измерване на нивото на течността с манометричен манометър

✓ Ултразвукови измерватели на плътност

В ултразвуковите денситометри се използва зависимостта на скоростта на разпространение на ултразвука в течност от нейната плътност. Чрез измерване на скоростта на разпространение на ултразвукови вибрации може да се прецени неговата плътност.



фиг. 98. Ултразвуков денситометър

Методите за измерване на плътността на радиоизотопите се основават на измерване на абсорбцията на γ - лъчение от радиоактивен източник, когато лъчите преминават през вещество, което се променя в зависимост от промяната в неговата плътност.

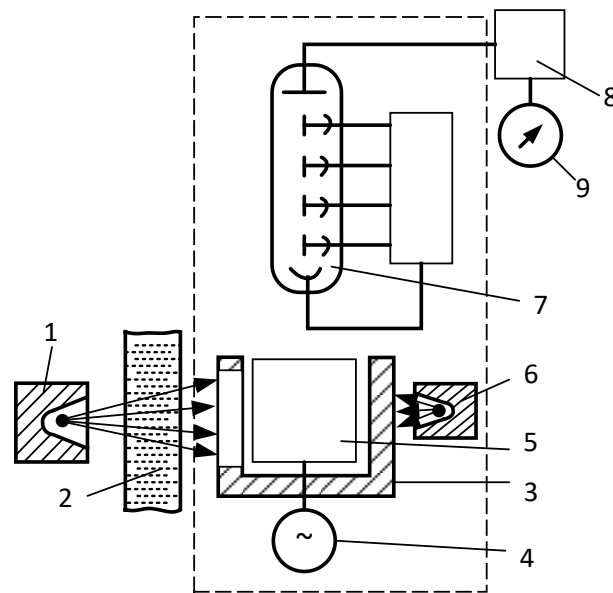
Методът на γ - предаване се използва широко за определяне на плътността на плочи, бетонни блокове, почвени суспензии и др.

Измерватели на плътността на радиоизотопит е принципът на действие на радиоизотопните денситометри се основава на зависимостта на степента на поглъщане на твърди гама-лъчи от плътността на анализираната среда (*фиг. 98*). Те са предназначени за безконтактно измерване на плътността на различни разтвори и суспензии, транспортирани през тръбопроводи. Затихването на паралелен моноенергичен лъч от гама-лъчи при преминаване през слой материя с дебелина x се случва съгласно закона:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x},$$

където I е интензивността на излъчване след преминаване през слоя на материята; I_0 е интензивността на радиацията, падаща върху слоя на веществото; μ е линейният коефициент на поглъщане на радиацията. Коефициентът μ зависи от енергията на гама-квантите ($E = h \cdot \nu$), плътността на веществото ρ , атомния номер Z и атомното тегло A .

Регистрацията на гама-лъчение, предавано през анализираната среда, може да се извърши чрез газоразряден брояч, сцинтилационен брояч или йонизационна камера. При избора на източник на радиоактивно излъчване с максимална енергия се взема предвид и неговият полуживот. Схемата на радиоизотопен метър за плътност е показана на (*фиг. 99*). Устройството използва два източника на излъчване: основният (работещ) I и компенсационен $б$.



фиг. 99. Схема на радиоизотопен измервател на плътността [51]

*1,6 - източници на лъчение; 2 - тръбопровод; 3 - прекъсвач; 4 - електрически мотор;
5 - брояч; 7 - множител; 8 - електронен блок; 9 - регистрационен блок*

Източникът преминава през тръбопровода 2 с контролирана среда, гама-лъчението на компенсиращия източник влиза в приемника, заобикаляйки контролираната среда. За детектор на лъчение се използва брояч 5 с фотоумножител 7. В измервателната верига се сравняват два лъчеви потока. Хеликоптерът (оловен полуцилиндър) 3 с помощта на синхронен електродвигател 4 се върти с постоянна честота около радиационния приемник, като блокира последователно двата радиационни потока, в резултат на което излъчването от източниците се записва от приемника отделно на време. Токът на радиационния приемник последователно зарежда кондензаторите в електронния блок 8. Сравнението се извършва чрез измерване на съотношението на напреженията в кондензаторите за съхранение. Съотношението на тези напрежения се преобразува от вибрационен датчик в сигнал на променлив ток и се измерва от регистрационния блок 9, направен на базата на автоматичен мост. Такъв измервател на плътността е предназначен за измерване на плътността на течности, разтвори, суспензии и суспензии в тръбопровода или други контейнери, изцяло пълни с контролирано вещество. Радиоизотопният метод за измерване на плътността на пулпата е безконтактен и има големи перспективи, особено при измерване на висока плътност на пулпата, когато използването на други методи е трудно. Недостатъкът на радиоизотопните денситометри е невъзможността за тяхното използване при наличие на елементи с голям атомен номер в пулпата, както и необходимостта от защита на обслужващия персонал от въздействието на радиоактивното лъчение.

2.7.5. ИЗМЕРВАНЕ НА ВОДОРОДНИЯ ПОКАЗАТЕЛ РН НА РАЗТВОРА

2.7.5.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

РН е мярка за концентрацията на свободни водородни йони във вода. Изчислява се като десетичен логаритъм на концентрацията на водородни йони, взет с противоположния знак: $pH = -\log [H^+]$. Има диапазон от 0 до 14.

Нивото на рН определя киселинността или алкалността на водата. Нивото на рН от 7 се счита за неутрално (в идеалния случай това е диапазон от стойности от 7,2 до 7,6 и е възможно най-близо до 7,4). При рН под 7 разтворът е кисел, при рН над 7 е алкален. Нивото на рН над 7,8 води до натрупване на различни минерални отлагания, варовик и други видове отлагания. Киселинното ниво на рН насърчава корозията на различни метални покрития. Поради факта, че водата е евтина, лесно достъпна работна течност, както и охлаждаща течност, тя се използва широко в почти всички съществуващи видове производство. Следователно за правилната работа на оборудването е необходима определена химическа обработка на водата, както и контрол на нивото на рН.

2.7.5.2. ИЗМЕРВАНЕ И КОНТРОЛ НА РН

РН-метърът е устройство, предназначено да измерва киселинни и/или алкални стойности, активността на водородните йони в течности и активността на други моновалентни катиони. Неутралната стойност на РН е 7. Питейната вода обикновено има тази стойност. Стойността от 0 до 7 е киселинна (електролитът на оловните батерии има стойност около 1), а стойностите от 7 до 14 са алкални (РН на белина е около 12). РН 14 е максимумът на скалата.

РН-метрите играят важна роля в повечето индустриални процеси в съвременния свят. Фармакологична, химическа, агрономическа, рибовъдна и селскостопанска продукции не могат да бъдат представени без използване на РН-метър за контрол на качеството на входящите и изходящите продукти или суровини.

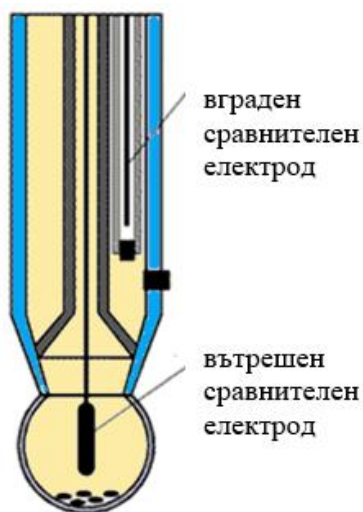
РН-метър измерва напрежението между два електрода, потопени в тествания материал. РН-метър може да се нарече още и милivolтметър, но с по-сложен алгоритъм на работа (*фиг.100*).



фиг. 100. РН-метър [52]

Единия електрод е индикатор. Тялото му е направено от боросиликатно стъкло, което не се страхува от окислители и е изпълнено с РН-разтвор с известна стойност. Вторият електрод се нарича измервателен или референтен електрод. Тялото му също е направено от специално електропроводимо боросиликатно стъкло с издухана топка в края. Тялото е изпълнено със суспензия от сребърен хлорид в разтвор на солна киселина, в която е потопена сребърна жица.

Съвременните РН-метри побират двата електрода в един корпус (фиг. 101).



фиг. 101. РН-метър с два електрода

Един от важните фактори за получаване на точни резултати е температурата на тествания разтвор (проба). За да се постигнат най-точни резултати, измерванията се извършват при температура на пробата от $+25^{\circ}\text{C}$. Но често се случва да е необходимо да се измерва РН по време на производствените процеси, когато е трудно, а понякога и невъзможно да се получи течност от над температурата. В такива случаи промяната на температурата влияе върху електромоторната сила ЕМП на течностите, което от своя страна влияе върху отчитането на РН. Повечето съвременни устройства са оборудвани с автоматична (според показанията на

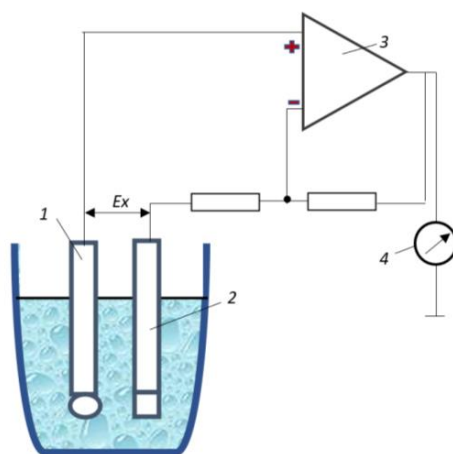
вградения температурен сензор) или ръчна температурна компенсация (при ръчно въвеждане на температурата на обекта в настройките на устройството), поради което рН-метърът показва стойността на рН с температурни корекции въз основа на калибрационните криви.

Според принципа на работа рН-метрите могат да бъдат разделени на три основни групи:

- устройства с директно отчитане;
- устройства с астатична компенсация;
- устройства със статична компенсация.

Най-простата схематична диаграма на рН-метър с директно отчитане е показана на **фиг.**

93. ЕМФ E_x (клетъчната електродвижещата сила) на измервателната клетка се подава към входа на усилвател 3, който е операционен усилвател с постоянен ток, осъществен с отрицателна обратна връзка.



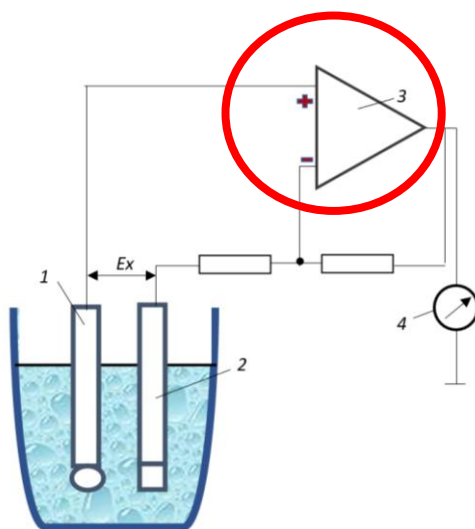
фиг. 102. Схематична диаграма на рН-метър с директно отчитане

1 и 2 - стъкло и спомагателни електроди; 3 - операционен усилвател; 4 - измервателно устройство или цифрово-аналогов преобразувател

Операционните усилватели, използвани в схеми за рН-метър, имат полеви транзистори на входа. Високата степен на изолация на управляващия електрод на полевия транзистор осигурява необходимия входен импеданс на усилвателя при входен ток от порядъка на 10^{-12} - 10^{-14} А. Недостатъците на полевите транзистори включват относително ниска стабилност на характеристиките и високо ниво на шум, което води до явление, наречено „нулево отместване“, т. е. наличието на определено напрежение на усилвателя изход с нулев сигнал на входа му. Нестабилността на нулевото отместване във времето, от своя страна, причинява появата на такова явление като „нулев дрейф“. Основните причини за нулевия дрейф са промени в параметрите на усилващите елементи и части на веригата поради стареене и температурни колебания, както и промени в напрежението на захранващите устройства. За да

се намали нулевия дрейф, DC (електронен) усилвателите се изпълняват съгласно балансирани (мостови) вериги; такива усилватели се наричат диференциални усилватели.

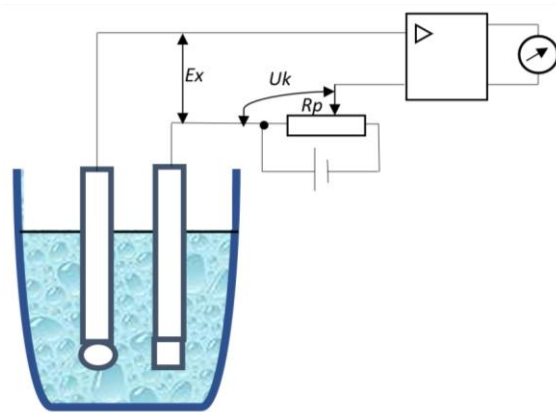
Диференциалните усилватели обикновено се изпълняват по схема, при която един от входовете (със знак плюс) е неинвертиращ, т. е. промяната в изходния сигнал на усилвателя съвпада в знак с промяната в сигнала на този вход, а другият вход (със знак минус) е инвертиращ, т.е. промяната в изходния сигнал на усилвателя е противоположна по знак на промяната в сигнала на този вход *фиг. 103*.



фиг. 103. Вериги на РН-метър

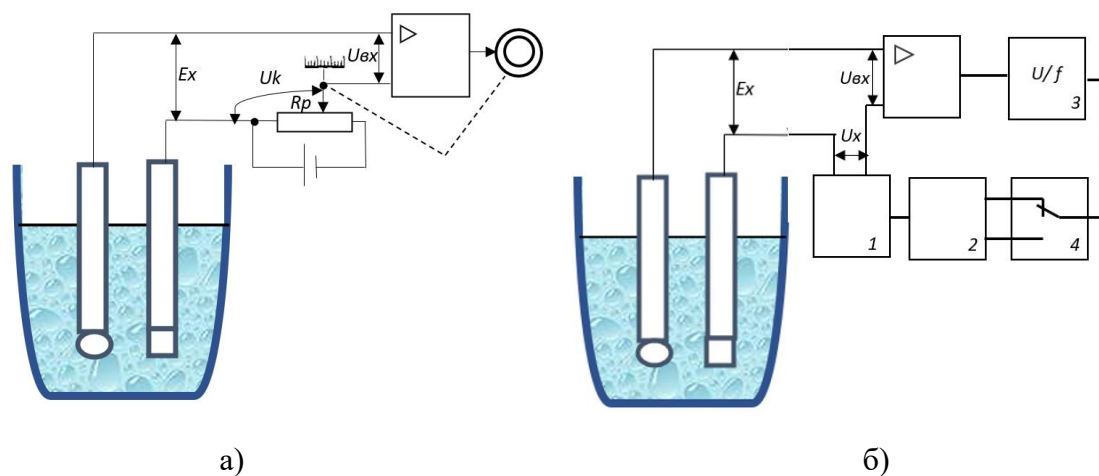
Устройствата с директно отчитане са прости по дизайн, но те отстъпват по точност на устройствата от компенсационен тип.

Най- протият компенсационен тип РН-метър е устройство, чиято диаграма е показана на *фиг. 104*. Това устройство използва метода на астатична компенсация, когато последователно с ЕМП на електродната система е свързано равно по големина и противоположно по знак компенсационно напрежение U_K , взето от компенсиращия променлив резистор R_p или спомагателния потенциометър. Чрез промяна на напрежението U_K , чрез преместване на плъзгача на плъзгащото колело, те постигат, че изходният сигнал на усилвателя е същият като при нулев сигнал на входа. В този случай напрежението U_K е равно на измерената ЕМФ E_x . Скалата е калибрирана в РН единици.



фиг. 104. Схематична диаграма на РН-метър с ръчна компенсация на измерената ЕМП

Устройството, чиято схема е показана на *фиг.105. а)* се различава от подобен РН-метър, работещ съгласно метода за ръчна компенсация, по това, че плъзгачът на плъзгача R_p , механично свързан към показалеца на скалата, се задвижва от реверсивен двигател. В момента на компенсация, когато $E_x = U_k$, напрежението на входа $U_{ВХ}$ на усилвателя е нула и реверсивният двигател спира.



фиг. 105. Вериги на РН-метър с автоматична компенсация на измерената ЕМП

Недостатъците на такива устройства са сложността на кинематичната схема за задвижване на двигателя с плъзгача се жичка и необходимостта да се използва самата плъзгача жица, особено в химическата индустрия. Схемата на РН-метъра е показана на *фиг. 105, б.* Тук компенсационното напрежение се създава от цифрово-аналогов преобразувател (ЦАП) 1, управляван от обратен брояч (РС) 2. Ако входното напрежение на усилвателя е $U_{ВХ} = E_x - U_k$ различно от нула, тогава усиленото напрежение се преобразува в последователност от импулси с честота f (в преобразувател 3), които чрез превключвател 4, се захранва в зависимост от полярността или сумиращото изходно напрежение на усилвателя или

изваждащите входове на компютъра при компенсация на времето, когато $E_x = U_K$, напрежението на изхода на усилвателя е нула, импулсите на компютъра престават да действат и изхода на ЦАП е зададено постоянно напрежение U_K .

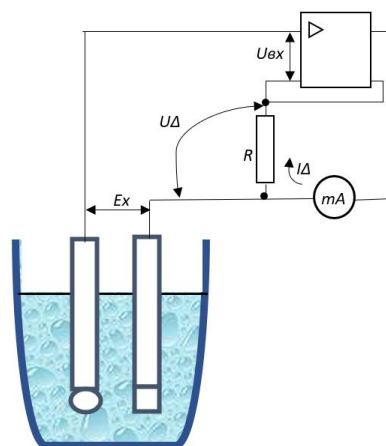
В допълнение към устройства с астатична компенсация, използвани с пълна компенсация на ЕМП на измервателната клетка, се използват РН-метри със статична (непълна) компенсация. Схемата, обясняваща принципа на работа на РН-метър със статична компенсация, е показана на **фиг.106**. Измерва ЕМФ E_x се сравнява с напрежение, образувана от усилвател изходен ток потоци $I_{изх}$ на резистор R . Разликата в напрежението псе подава на входа на усилвателя:

$$U_{вх} = E_x - U_{изх}$$

Ако $k = \frac{U_{изх}}{U_{вх}}$, тогава уравнението може да бъде преобразувано във формата:

$$E_x = U_{изх} \left(1 + \frac{1}{k} \right),$$

когато достатъчно голяма стойност на К: $E_x \approx U_{изх} = I_{изх} \cdot R$.



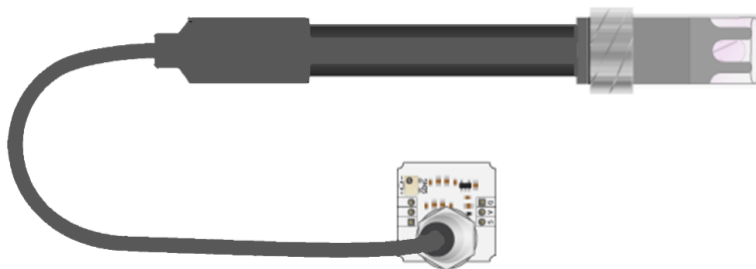
фиг. 106. Схема на РН-метър със статична компенсация

По този начин токът, протичащ през изходния етап на усилвателя, е практически пропорционален на входния сигнал от клетката на измерващия електрод. Чрез измерване с милиамперметър можете да определите E_x , т.е. РН на разтвора. Използването на метода за статична компенсация позволява многократно намаляване на консумирания ток от клетката по време на измерването. В същото време еквивалентният входен импеданс на устройството се увеличава с $(K + 1)$ пъти, т.е. $R_{екв} = R_{ex}(k + 1)$, където R_{ex} е входният импеданс на усилвателя.

Постигнати са значителни намаления в отместването и нулевият дрейф на усилвателите с постоянен ток, като се използват различни схеми за предварително усилване с автоматична настройка (автоматична корекция на нулевия дрейф), както и преобразуване на входния

сигнал в променливо напрежение, усилване на променливото напрежение и обратно преобразуване при изход.

Сензорът за РН включва сонда и контролна платка (*фиг. 107*).



фиг. 107. Сензор за РН

Сондата на сензора е направена в пластмасов запечатан цилиндър с два електрода в края. Когато се потопи в разтвор или вода, която трябва да се измери, възниква потенциална разлика между електродите, която се записва и обработва от контролната платка. Контролната платка отчита потенциалната разлика между електродите. Когато се потопи в течност, между електродите възниква съпротивление, което е пропорционално на електрическата проводимост на разтвора. След това сигналът се стабилизира и усилва с помощта на операционни усилватели. На изхода сигналът се филтрира и подава към изходния сигнал на платката.

Промислените РН-метри позволяват да се измерва киселинността на растенията, млечните продукти, водата и други течни носители директно по време на технологичния процес. За защита на измервателните електроди от вредни производствени фактори и механични влияния се използват защитни фитинги. Те от своя страна позволяват измерванията да се извършват без средства по време на потока на изследваната течност или чрез потапяне на индикаторния електрод в съд с изследваната течност. Допълнителният електрод се поставя в отделен съд с концентриран разтвор на NaCl сол, комуникиращ с анализираната система чрез пропусклива хидравлична устойчивост.

3.1. РЕГУЛАТОРИ

3.1.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЕЛИЧИНИ

Обектът е онова устройство или звено в една автоматична система, в което протича процесът, който подлежи на управление (регулиране). В общата принципна и структурна схема на управление по затворен контур обектът е поместен между регулиращия орган и измервателния елемент. Точното познаване на обекта (неговия вид, статични и динамични свойства, математическо описание) е необходима предпоставка, за да може към него да се свърже най-подходящият регулатор и по този начин да се постигне най-доброто, възможно в дадения случай, автоматично регулиране на съответния процес в обекта.

Подобно на всяко елементарно звено в такава система, обектът също има вход и изход (фиг. 108).



фиг. 108. Обект

Входното му въздействие u наричаме управляващо или регулиращо, а изходното y — управляемо или регулируемо. На фиг. 2.1 са дадени и смущаващите въздействия, които действат върху обекта.

Например: при регулиране на температурата на едно помещение за смущаващи въздействия се считат промените на външната температура, отварянето на прозорци, врати и пр.

Смущенията могат да влияят на всяко друго звено в системата, обаче за удобство и простота в разглежданията приемаме, че фактически в системата всички смущения са приведени към съответни входове на обекта.

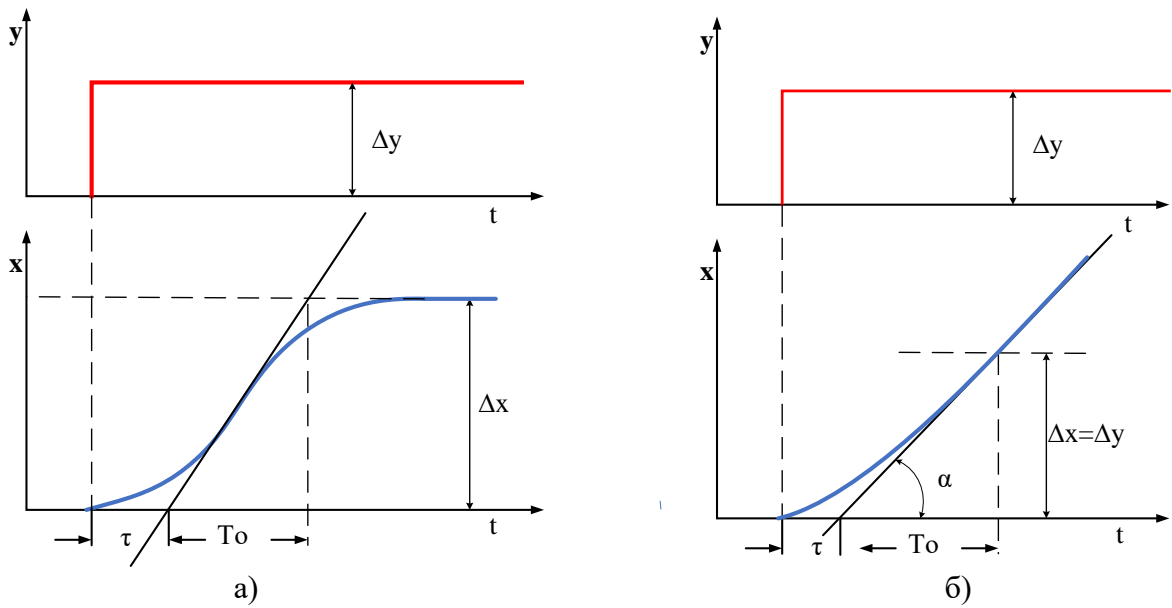
Най-важните параметри на обекта са преходната функция, статичната характеристика и някои времеконстанти.

τ - време на закъснение, характеризира забавянето на променящия се параметър при регулиране или смущение. Увеличението на τ затруднява работата на регулатора, влошава стабилността.

T_0 - времекопстанта на обект, мярка за инертността на обекта. Колкото е по-голямо T_0 , толкова по-бавно се променят параметрите на системата и тя се регулира по-лесно.

$k_o = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ - коефициентът на предаване на обекта-показва как се променя параметърът x при промяна на регулиращото въздействие y или смущаващото въздействие z . Колкото k_o е по-голямо, толкова обектът е по-чувствителен към въздействията.

Тези параметри се определят от преходните характеристики на обекта, които са показани на **фиг. 109, а)** - за обект със самоизравняване и на **фиг. 109, б)** - за обект без самоизравняване.

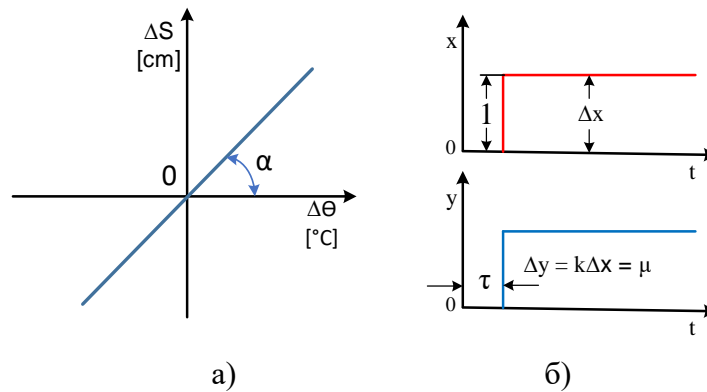


фиг. 109. Характеристики на обекта

✓ **Обектът като идеално П-звено**

В този случай той се характеризира с линейна статична характеристика от вида, показан на **фиг. 139, а)**, и преходна функция, показана на **фиг. 110, б)**. Тази функция има вида

$$\Delta y = k(= k\Delta x \text{ и } \Delta x = 1)$$

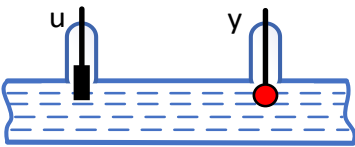


фиг. 110. Обект, като идеално П-звено

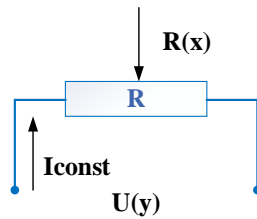
В този най-прост случай алгебричната зависимост между изходната величина и входното въздействие съвпада с алгебричната зависимост, която изразява статичната характеристика (фактически в този случай за преходна функция не може да се говори). Коефициентът k е величината на усилването или предавателното число на обекта. Обратната му величина се нарича коефициент на установяване (или статизъм).

$$\rho = \frac{1}{k}$$

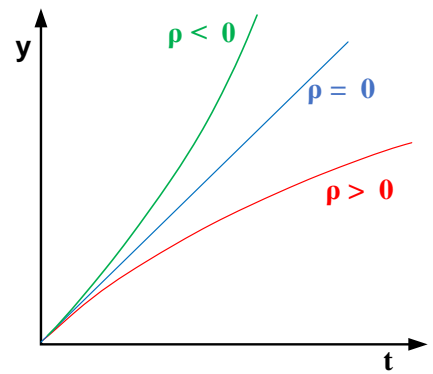
Пример на такъв обект е тръба с течност под налягане, в която управляващо въздействие е налягането, а управляемо — определено пропорционално механично преместване (фиг. 111).



фиг. 111



фиг. 112



фиг. 113

Всяко внезапно изменение на налягането в тръбата се предава пропорционално и без закъснение на всички места по тръбата.

Такива обекти са и съпротивленията, изготвени от силициево-карбиден прах. Ако при постоянен ток във веригата, на такова съпротивление се мени налягането, което се упражнява върху прахообразния силициев карбид, напрежението U в краищата на съпротивлението R , образувано от прахообразното вещество, се мени право пропорционално с изменение на налягането (фиг. 112).

✓ **Обектът като инерционно П- звено**

В този случай динамиката на обекта се дава с познатото ни уравнение

$$Ty' + y = Kx,$$

в което y' е скоростта, с която се изменя регулируемото въздействие, а T — времеконстантата на обекта. Ако разделим двете части на това уравнение на T , ще получим следното уравнение:

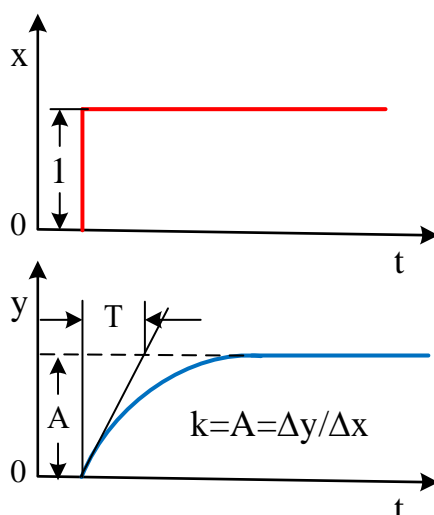
$$y' + \frac{1}{T}y = \frac{K}{T}x$$

Величината

$$C = \frac{K}{T}$$

$$k = A = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \Delta y / \Delta x$$

се нарича скорост на прехода. Тя е числено равна на скоростта, с която се изменя регулируемата величина в началото на преходния процес, т. е. при $t = 0$ и $x = 1$ (единично входно въздействие). При безкрайно голяма скорост на прехода (C клони към безкрайност, т. е. $C \rightarrow \infty$) се вижда, че $T \rightarrow 0$, т. е. получава се безинерционен обект; когато $C \rightarrow 0$, то $T \rightarrow \infty$, т. е. обектът не реагира на регулируемото въздействие (все едно не зависи от него). Кривата на **фиг. 113** се характеризира с положителна стойност на статизма ($\rho > 0$).



фиг. 114. Преходна функция

Обектите с такава стойност на ρ са най-разпространени в автоматиката. При $\rho < 0$ обектът е неустойчив, а преходната функция е показана на **фиг. 114**. Такъв обект изобщо няма определена установена стойност.

Например: Някои кораби са неустойчиви без автоматично регулиране. Без непрекъснато управление на кормилото те не са в състояние да поддържат зададения курс. Ако към такъв обект се свърже подходящ автоматичен регулатор, коренно ще се измени неговото статично и динамично поведение. Той става устойчив - ще поддържа зададения курс, независимо от действащите върху него постоянни смущения.

Съществуват обекти, за които $\rho = 0$. Това означава, че в обекта не съществува зависимост между регулиращото и регулируемото въздействие. Такова поведение, както вече

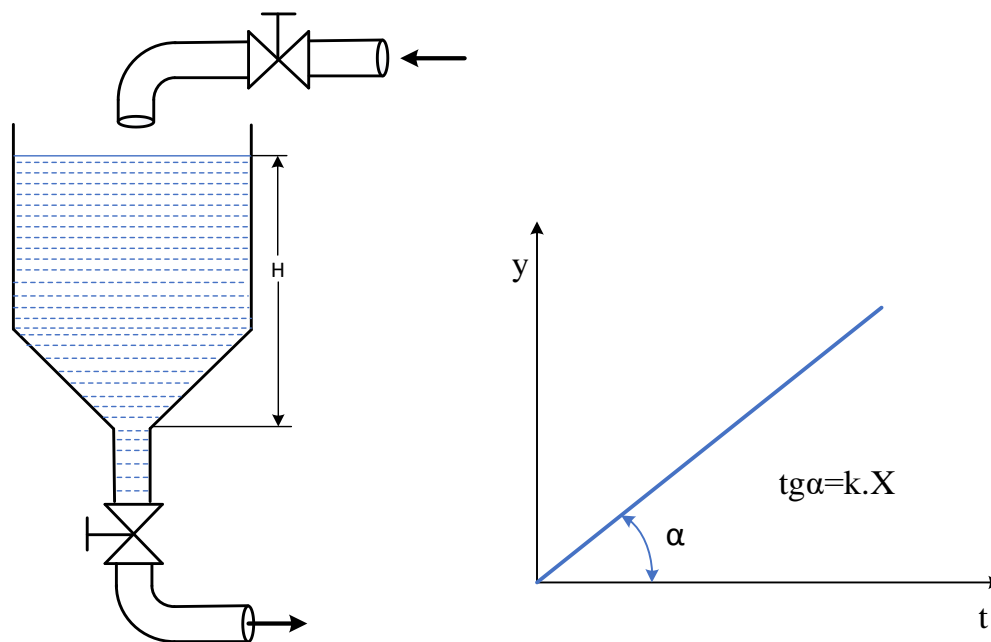
се запознахме, има И- звеното (астатично поведение). Такива обекти се наричат още неутрални - при тях липсва установена стойност.

Например: Един неуправляем самолет е безразличен към курса на летене. Въздушното течение може да измени в произволно направление първоначалния курс на самолета. Въвеждането на подходящ регулатор (автопилот) придава съществено различни статични и динамични качества на самолета - той вече е в състояние да съхранява зададен курс и не се поддава на смущаващите въздействия.

Скоростта на прехода S е характеристика и на нелинейните обекти, чиито преходни функции може да се ликвидират в известни участъци. Тази величина може да се отчете и от преходните функции на инерционни обекти от по-висок ред, с наличие на установена стойност.

Обекти с инерционно П поведение са електродвигателите при регулиращо въздействие-напрежението на котвата, а регулируемо - скоростта на въртенето на техните валове.

На **фиг.115** е показан един обект с интегрално поведение, т.е. без установена стойност.

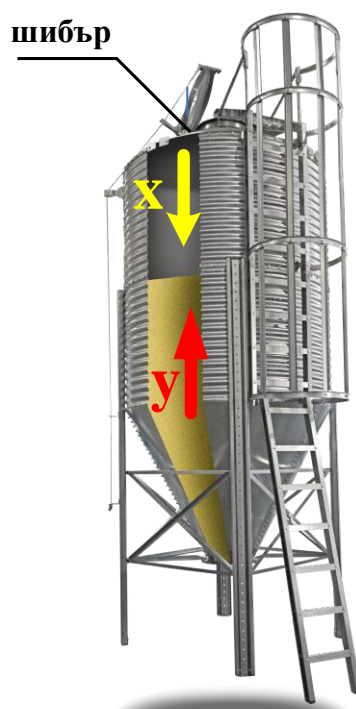


фиг. 115. Обект с интегрално поведение

Друг подобен обект е силозният бункер (**фиг. 116**). Ако внезапно се отвори шибърът за пълненето, в бункера постъпва материал в насипно състояние с равномерна скорост. Тук регулиращо въздействие е отварянето на шибъра, а регулируемо - височината на бункера. Съществуват и обекти с чисто закъснение.

Например: Ако с помощта на транспортър се пренася с равномерна скорост определено количество рудна маса и в даден момент се отвори повече шибърът, който регулира достъпа

на масата върху лентата на движещия се транспортър, ще трябва да измине определено време, преди това изменено количество на пренасяния материал да достигне до измервателното място и бъде регистрирано.



фиг. 116. Силозен бункер [54]

Преди да се пристъпи към съединяване на обект със съответен регулатор в автоматична система, е необходимо да се знаят следните параметри на обекта: коефициент на усилване k , скорост на прехода C и преходна времеконстанта T_0 . Тук приемаме, че обектът се представя идеализиран като линеен. Обаче в същност всеки обект, повече или по-малко, е нелинейно звено. Тук имаме предвид, че неизбежните нелинейности, независимо от тяхната природа, не се отразяват чувствително на съществените свойства на обектите, които следователно в първо приближение могат да се приемат за линейни.

Един от основните елементи, включени в системата за управление, е автоматичен регулатор - устройство, който променя или стабилизира изходната стойност на управлявания обект според даден алгоритъм, като влияе върху неговата входна стойност.

Автоматичният регулатор е устройство, което усеща разликата между тока и зададената стойност на контролираната променлива и я преобразува в изместването на регулиращия орган, в съответствие със закона за регулиране, заложен в него. Типичният регулатор включва измервателен преобразувател, зададена точка и саморегулиращо устройство, което генерира сигнал за несъответствието между текущите и зададените стойности на контролираната

променлива, усилва и коригира в съответствие със закона за регулиране, генерирайки сигнал на регулиращото действие.

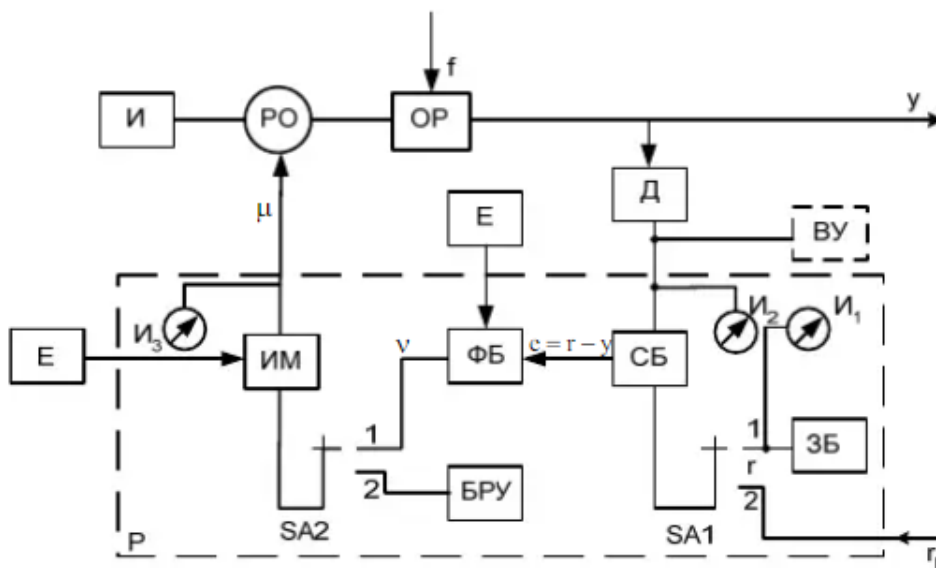
Чрез средствата за автоматичен контрол се осигурява необходимата обективна информация както за текущото състояние на обекта, така и за историята на протичащите в него процеси. Предотвратяват се аварийни и нежелани ситуации във функционирането на обекта, като едновременно се алармира за тях. Натрупаната информация характеризира качеството на произвеждания продукт и е основа за изработване на стратегия на ръководния и експлоатационен персонал за по-нататъшни действия. Такъв подход предполага изграждането на автоматизирани системи за управление. При тях човекът е непосредствен участник в процеса управление.

Ролята на човека в този процес се променя съществено при въвеждане на автоматични регулатори. Този подход предполага изграждането на системи за автоматично регулиране и управление. Тук обработката и използването на информацията се възлага на автоматични устройства. Алгоритъмът на функциониране на системите за автоматично регулиране и управление се определя от вида на използвания регулатор и от неговите възможности.

3.1.2. БЛОКОВА СХЕМА НА РЕГУЛАТОР. КЛАСИФИКАЦИЯ

✓ Блокова схема

На *фиг. 117* е изобразена блокова схема на регулатор, която илюстрира основните му елементи и режими на работа, както и мястото му в системата за автоматично регулиране.



фиг. 117. Блокова схема на регулатор [57]

В обекта на регулиране ОР протича контролираният процес. За качеството на процеса се съди по стойността на регулируемата величина x . Тази величина се измерва от датчика Д. Чрез дистанционна система показанията на датчика могат да бъдат предадени към вторичен уред ВУ. Материал или енергия към обекта постъпва от източника. И през регулиращия орган РО. Законът на регулиране се формира от регулатора Р, който от своя страна се състои от редица блокове.

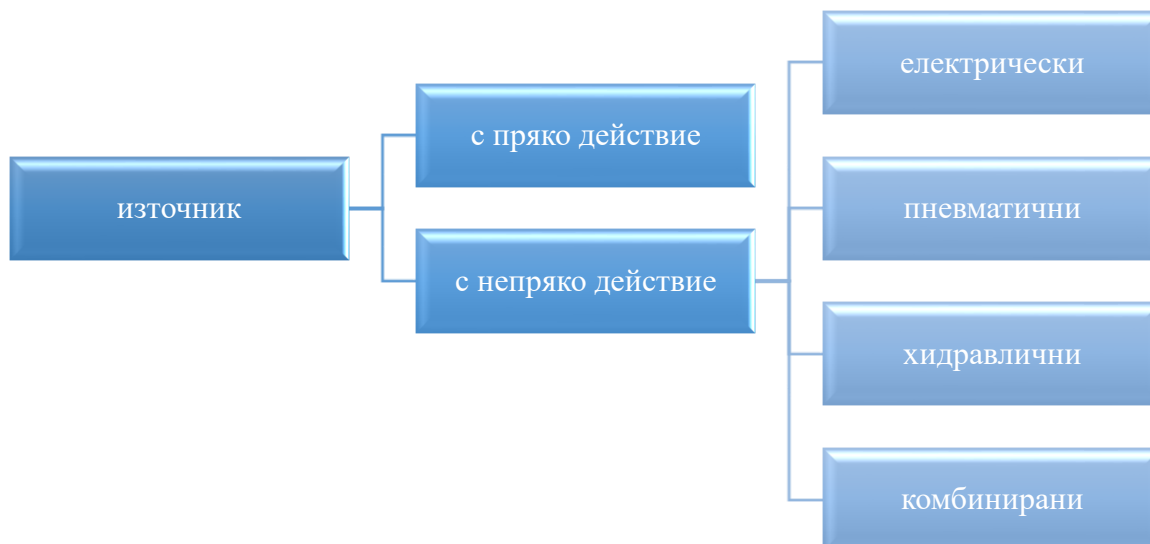
Със задатчика ЗБ се задава стойността на регулируемата величина x_3 . Сравняващият блок СБ определя отклонението на текущата стойност от зададената стойност и го подава към функционалния блок ФБ. При положение 2 на ключа SA1 сравнението става с величината x_k , постъпваща например от друг регулатор. Функционалният блок ФБ преработва информацията за състоянието на процеса и в зависимост от заложения алгоритъм управлява изпълнителния механизъм ИМ. В положение 2 на ключа SA2 се преминава към ръчно управление, чрез блока за ръчно управление БРУ. Най-често функционалният блок и изпълнителният механизъм работят с енергия, постъпваща от външен източник Е. Посредством индикаторните елементи И1, И2 и И3 се контролира съответно зададената и текущата стойности на регулируемата величина и положението на регулиращия орган РО.

Съгласно схемата от фигурата, понятието „регулатор“ се отъждествява с понятието „управляваща част на системата за управление“. В действителност изпълнителният механизъм е устройство, физически различно от регулатора. Алгоритъмът на управление се формира от регулатора, а алгоритъмът, в зависимост от типа на системата, се определя и от ИМ.

✓ Класификация

Класификацията на регулаторите може да се извърши според различни критерии:

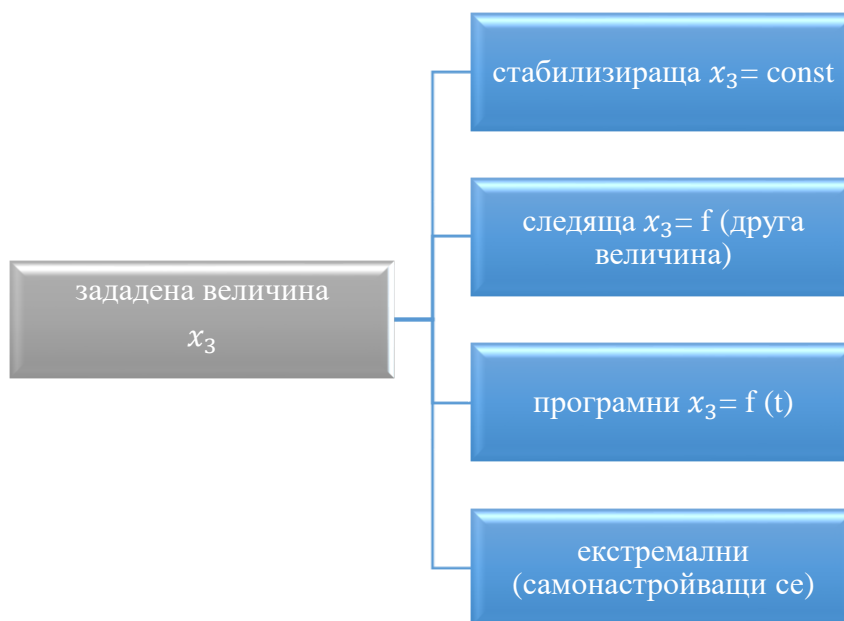
➤ По вида на спомагателната енергия. На схемата от *фиг. 118* е показано наличието на източник на спомагателна енергия Е, предназначен за захранване на регулатора. Регулаторите, работещи с външен източник на енергия, се наричат регулатори с непряко действие. Ако действието на регулатора се осъществява за сметка на енергията на източника, то такъв регулатор се отнася към регулаторите с пряко действие. Видът на спомагателната енергия може да е еднакъв или различен с вида на основния енергиен канал.



фиг. 118. Класификация по вида на спомагателната енергия

Като комбинирани се срещат електропневматични и електрохидравлични регулатори.

➤ По вида на задаващата величина. Стабилизиращи са тези регулатори, при които задаващата величина се запазва постоянна по време на протичането на технологичния процес. При програмните регулатори задаващата величина се променя във времето по определена програма (предварително известна).

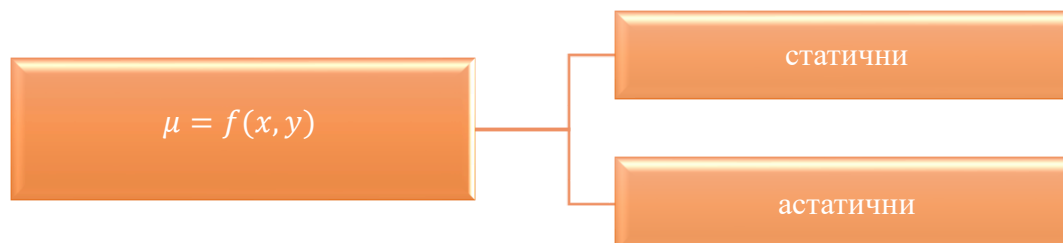


фиг. 119. Класификация по вида на задаващата величина

Задаващата величина на следящите регулатори се променя във функция от големината на някаква друга водеща величина или параметър (фиг. 119). Екстремалните регулатори сами формират задаващата величина.

➤ По крайния резултат от въздействието върху регулираната величина. Разделят се на статични и астатични (*фиг. 120*).

При статичните регулатори изходната величина μ зависи от грешката в установен режим, т.е. от статичната грешка. Нейното наличие е предпоставка за работата на регулаторите от този вид.



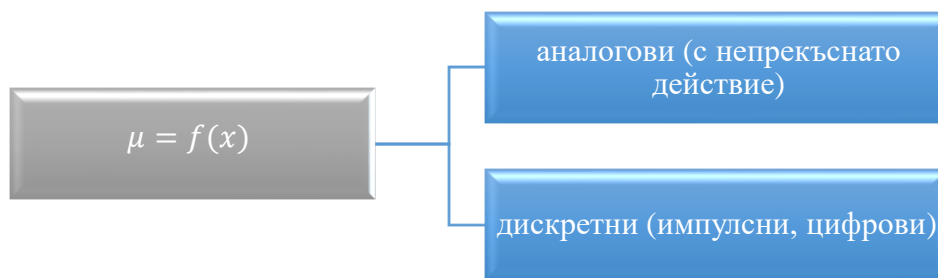
фиг. 120. Класификация на крайния резултат от въздействието

➤ По алгоритъма на функциониране (*фиг. 121*).



фиг. 121. Класификация по алгоритъма на функциониране

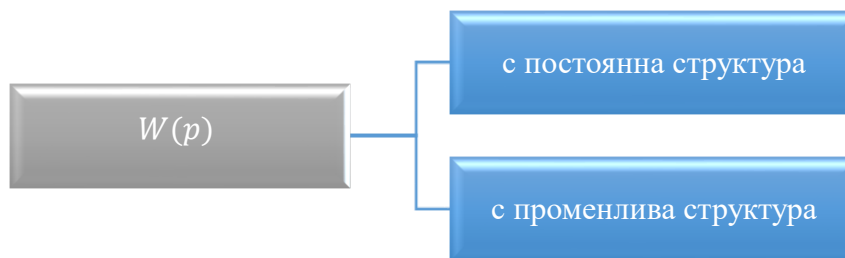
Този признак е основен за класификация на регулаторите и той ще определи по-нататък реда, по който те ще бъдат разглеждани. По еднакъв начин, въз основа на посочения признак, могат да бъдат подредени както аналоговите (с непрекъснато действие), така и дискретните (импулсни и цифрови) регулатори (*фиг. 122*).



фиг. 122. Класификация според вида на сигнала

➤ По структура - има регулатори, които по време на преходния процес променят своята предавателна функция $W(p)$. Това са регулаторите с променлива структура.

Преобладаващата част, от използваните сега в практиката, регулатори запазват неизменна своята предавателна функция и представляват регулатори с постоянна структура (фиг.123).



фиг. 123. Класификация по структурата на регулатора

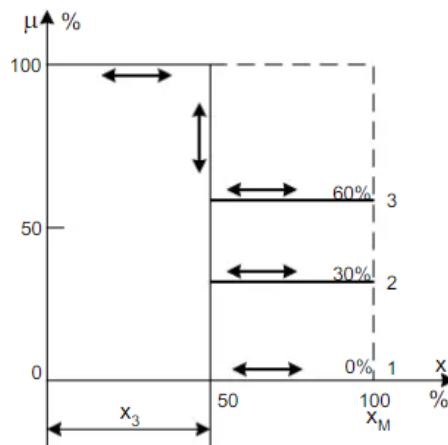
В зависимост от функционалното предназначение на регулаторите в технологичния поток, можем да разграничим още регулатори: на налягане, на температура, на влажност, на ниво, на разход и т.н.

3.1.3. ПОЗИЦИОННИ РЕГУЛАТОРИ

Позиционните регулатори са нелинейни. При тях регулиращото въздействие не се променя плавно, а добива само определени стойности. Прието е тези фиксирани стойности да се наричат позиции. Броят на позициите е типична характеристика за регулаторите от този вид и според това те биват: двупозиционни, трипозиционни и т.н. Когато позициите са повече от три, регулаторите се наричат многопозиционни. Най-разпространени са дву- и трипозиционните регулатори. Като правило позиционните регулатори съдържат в структурата си релеен елемент.

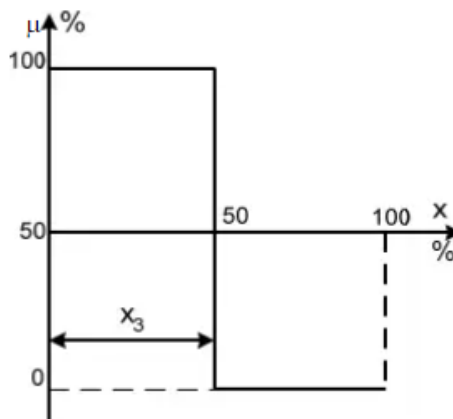
При двупозиционните регулатори регулиращият орган приема само две положения: включено и изключено. Ако положение „ включено“ съответства на максимално ниво, то положение „ изключено“ може да съответства на нулево ниво или на друга стойност (по-голяма от нула и по-малка от максималната) на регулиращата величина.

На *фиг. 124* е изобразена статичната характеристика на двупозиционен регулатор. Регулаторът може да е с две състояния: включено - изключено, а регулиращият орган да заема съответно положенията: включено 100% и включено, например 60%. В този случай характеристиката е несиметрична. При стойност на регулираната величина по-малка от зададената x_3 (в случая $x_3 = 50\%$ от x_M), регулиращият орган е максимално отворен ($\mu = 100\%$). Когато x надхвърли x_3 , μ става например 30% .



фиг. 124. Статични характеристики на двупозиционен регулатор (несиметрични) [57]

Ако за изходно състояние на регулиращия орган се приеме средното положение ($\mu = 50\%$), статичната характеристика става симетрична (*фиг. 125*).



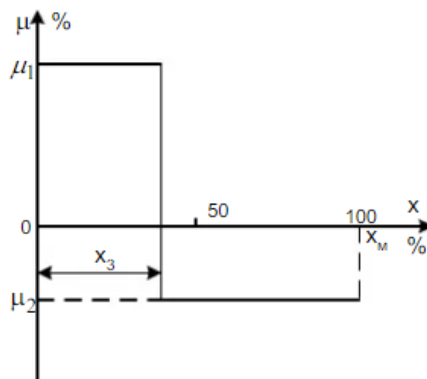
фиг. 125. Симетрична статична характеристика на двупозиционен регулатор [57]

За симетрична характеристика може да се запише :

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(x_3 - x)$$

Когато μ_1 и μ_2 по абсолютна стойност са различни (фиг. 126), μ_M се определя по израза:

$$\mu_M = \left| \frac{\mu_1 - \mu_2}{2} \right|$$



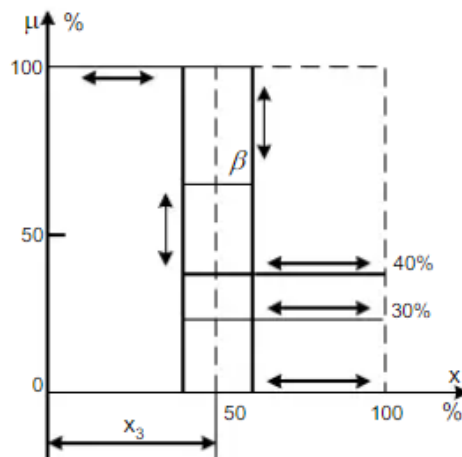
фиг. 126. Статична характеристика на двупозиционен регулатор ($\mu_1 \neq \mu_2$) [57]

Всъщност, μ_M представлява половината от диапазона на изменение на μ (интервала по ординатната ос между μ_1 и μ_2).

При транспонирана надясно ординатна ос на разстояние x_3 , уравнението добива вида:

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(-x)$$

Характеристиките, показани на фиг. 1, 2 и 3 се отнасят за идеален регулатор. Реалните регулатори притежават статична характеристика с хистерезисна зона - зона на нееднозначност β (фиг. 127).



фиг. 127. Статични характеристики на реален двупозиционен регулатор (с хистерезисна зона) [57]

Уравненията на реалния двупозиционен регулатор за симетрична характеристика (фиг.128) добиват вида:

$$\mu = \mu_M$$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(x_3 + \beta - x) \text{ при } \frac{dx}{dt} > 0$$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(x_3 - \beta - x) \text{ при } \frac{dx}{dt} < 0$$

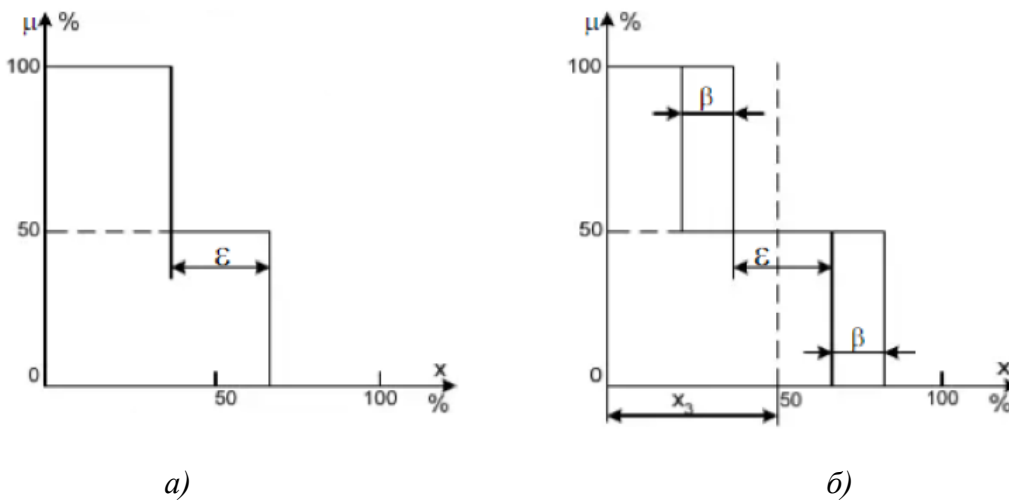
Когато $x_3 = 0$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(\beta - x) \text{ при } \frac{dx}{dt} > 0$$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}[-(\beta + x)] \text{ при } \frac{dx}{dt} < 0$$

В промишлените регулатори β обикновено не надхвърля 1% от максималната стойност на $x = x_M$. Ако технологичният процес изисква, хистерезисната зона може да се направи регулируема.

За трипозиционните регулатори са възможни три стойности на регулиращата величина – например, включено 100 %, включено $k_1 \cdot 100$ %, изключено (или включено $k_2 \cdot 100$ %). Тук k_1 и k_2 са числа, по-малки от 1 и положителни. Трипозиционните регулатори са удобни за комплектуване с изпълнителни механизми, които работят в три режима: движение в посока „увеличение“, движение в посока „намаление“ и „покой“. На **фиг. 128** са изобразени статичните характеристики на идеален *a)* и реален *б)* трипозиционен регулатор. С ε е означена зоната на нечувствителност на регулатора.



фиг. 128. Статични характеристики на идеален (а) реален

(б) трипозиционен регулатор [57]

За реален регулатор със симетрична характеристика (**фиг.128, б**) могат да се запишат следните уравнения:

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(x_3 - \frac{\varepsilon}{2} - x) \text{ при } x < x_3 < -\frac{\varepsilon}{2}$$

$$\mu = 0 \text{ при } x_3 - \frac{\varepsilon}{2} < x < x_3 + \frac{\varepsilon}{2} + \beta$$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(x_3 + \frac{\varepsilon}{2} + \beta - x) \text{ при } x > x_3 + \frac{\varepsilon}{2} + \beta, \text{ за } \frac{dx}{dt} > 0$$

Когато $x_3 = 0$, или когато ординатната ос μ е транслирана на разстояние x_3 , горните уравнения добиват вида:

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(-\frac{\varepsilon}{2} - x) \text{ при } x < -\frac{\varepsilon}{2}$$

$$\mu = 0 \text{ при } -\frac{\varepsilon}{2} < x < \frac{\varepsilon}{2} + \beta \frac{dx}{dt} > 0$$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(\frac{\varepsilon}{2} + \beta - x) \text{ при } x > -\frac{\varepsilon}{2} + \beta$$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(\frac{\varepsilon}{2} - x) \text{ при } x > \frac{\varepsilon}{2}$$

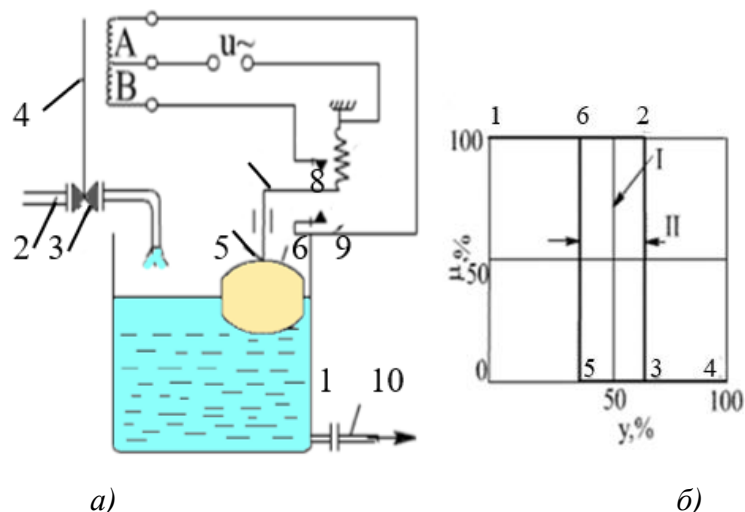
$$\mu = 0 \text{ при } -\frac{\varepsilon}{2} - \beta < x < \frac{\varepsilon}{2} \frac{dx}{dt} < 0$$

$$\mu = \mu_M \cdot \text{sign}(-\frac{\varepsilon}{2} - \beta - x) \text{ при } x < -\frac{\varepsilon}{2} - \beta$$

В показващите и записващите уреди за измерване на технологични величини могат да бъдат вградени допълнителни устройства с контактен електрически изход за дву-, три-, или многопозиционно регулиране. По начина на действие и по устройство, двупозиционните регулатори са едни от най-простите, в сравнение с другите видове регулатори. По принципа на задействане на контактната система, различаваме следните видове:

- електромеханични;
- фотоелектрически;
- индуктивни.

За контролерите за включване и изключване, в зависимост от знака на отклонението на управляемата променлива, управляващият елемент е или напълно отворен, или напълно затворен. При регулаторите с две позиции, в допълнение към двата крайни, регулиращият орган има още едно (средно) положение, което допринася за по-плавна промяна в контролираната стойност и намаляване на броя на задействанията на регулиращото тяло на единица от време.



фиг. 129. Регулатор позиционер [55]

а) 1 - обект; 2 - 10 тръби; 3 - регулиращ вентил; 4 - котва; 5 - прът; 6 - поплавок; 7 - лостов контакт; 8,9 - подвижни ограничители - контакти; 11 - пружинен

б) I - зададена стойност; II - неутрална зона; 1 - 6 точки от характеристиката

В обекта за управление - резервоар 1, течността се подава през тръба 2, а през тръба 10 се консумира от потребителя (фиг. 129, а). Чувствителният елемент на регулатора - поплавокът 6, измерва нивото в резервоара. Текущата стойност на нивото се определя от положението на пръта 5 и лоста, здраво свързан с него - контакт 7, който е свързан към захранването, чрез напрежение през пружината 11 U. Зададените стойности на горното и долното ниво се определят от положението на подвижните ограничители - контакти 8 и 9, зададени ръчно.

Когато нивото се повиши над зададената точка, контакт 7 ще се затвори с контакт 8 и намотката ще се захрани, поради което сърцевината 4 моментално ще се премести нагоре, което ще доведе до затваряне на регулиращото тяло 3 (вентил). Когато нивото падне под предварително определено ниво, контакт 7 ще се затвори с контакт 9, намотката ще се захрани, котвата 4 ще се движи надолу, което ще доведе до отваряне на регулиращото тяло. Горната диаграма е пример за двупозиционно управление.

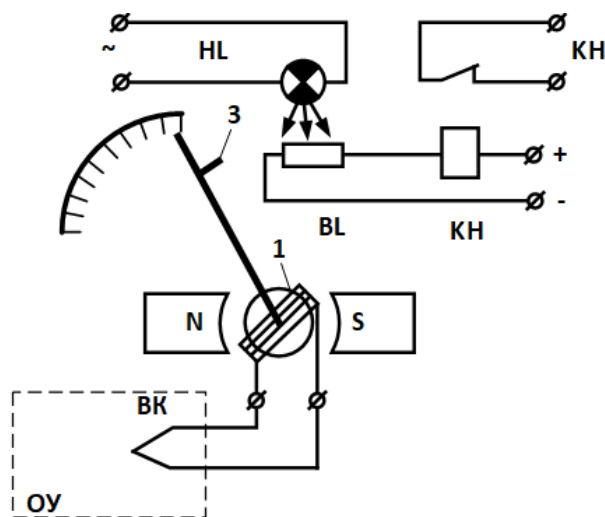
Уравнения на регулатора:

$$\mu = 0 \text{ за } \Delta y > 0 \text{ и } \mu = 1 \text{ за } \Delta y < 0.$$

От статичната характеристика на регулатора с две позиции (фиг. 129, б) може да се види, че увеличаването на нивото в резервоара съответства на движението по точки 1, 2, 3, 4; точки 2 и 3 съответстват на моменталното движение на регулиращото тяло от „отворено“ положение

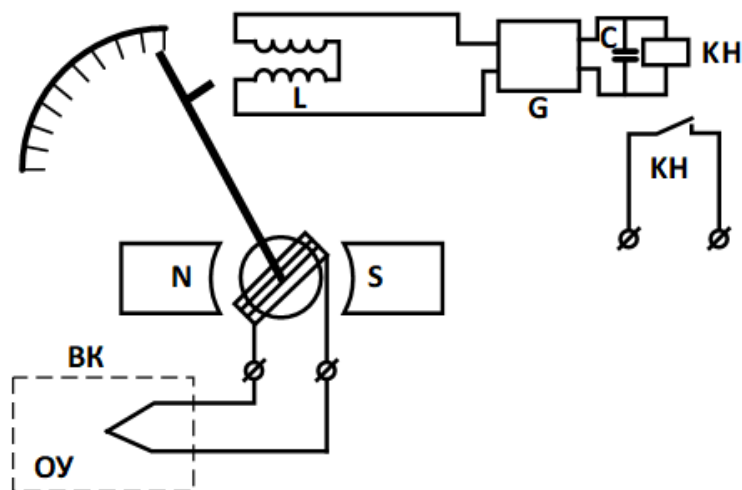
в „затворено“ положение, когато контактите 7 и 8. Намалването на нивото съответства на движението по точки 4, 5, 6, 1 от статичната характеристика.

Двупозиционен регулатор с фотоелектрическа система е изобразен на *фиг. 130*. По същество той представлява едно фотореле, пригодено конструктивно за вграждане в показващи или записващи уреди. Изобразеният на фигурата пирометричен милivolтметър 1 има присъединено към стрелката си екран - флагче 3. Когато флагчето се премести надясно, то прекъсва светлинния поток от лампичката HL и затъмнява фотосъпротивлението BL. Токът във веригата на BL силно намалява, релето КН отпуска своята котва и контактът му КН прекъсва веригата на управлявания електрически консуматор. Стрелката на милivolтметъра се премества при промяна е. д. н. на термодвойката ВК, разположена в обекта, чиято температура се управлява.



фиг. 130. Двупозиционен регулатор с фотоелектрическа система

Може да се използва и индуктивен преобразувател, включен във веригата, например, на високочестотен генератор G (*фиг. 131*). Режимът на генерации на G може да се променя чрез индуктивността на двусекционната бобина - преобразувател L. Между двете секции на бобината минава екран - флагче, закрепен към стрелката на измервателната система. Когато флагчето е извън бобината, условия за възбуждане на генератора не съществуват.



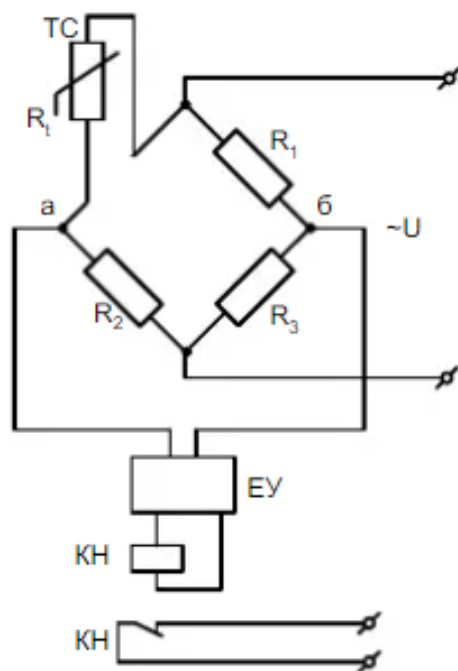
фиг. 131. Двупозиционен регулатор с индуктивен преобразувател

Тогава релето КН е задействано. Кондензаторът С изпълнява функцията на изглаждащ филтър. Когато алуминиевото флагче влезе в бобината L, нейната индуктивност намалява. Създават се условия за възбуждане на генератора.

При това токът през бобината на релето КН намалява силно и то отпуска котвата си. Чрез промяна положението на бобината (посредством преместване) се изменя и зададената стойност на регулираната величина. Контактът КН управлява изпълнителния механизъм, а чрез него се въздейства и на регулираната величина.

В практиката все по-широко разпространение намират двупозиционните регулатори с усилвател и релеен изходен елемент. Примерна схема на такъв регулатор е показана на **фиг. 132.**

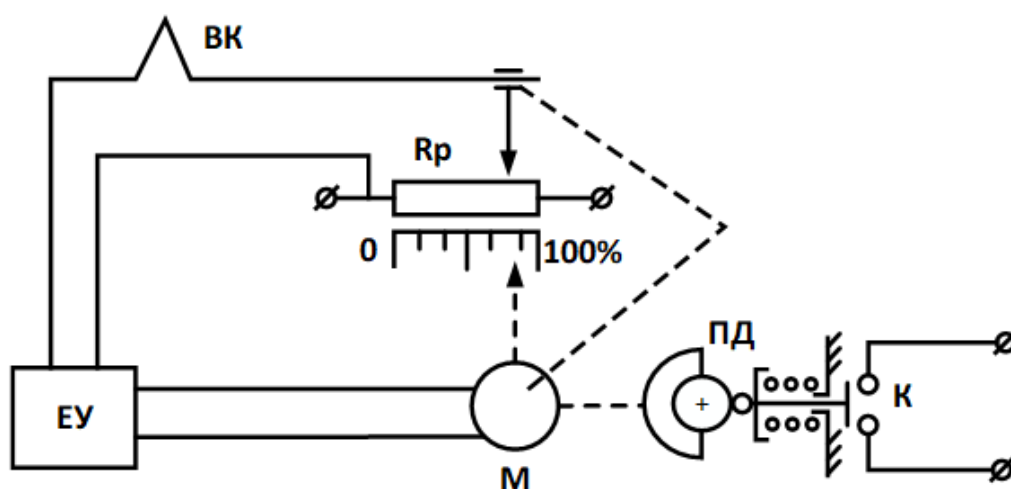
В едно от рамената на измервателния мост е включено термосъпротивление R_t (ТС). Загриването на R_t води до разсъгласуване на моста. Появилата се потенциална разлика между точките **а** и **б** се подава към електронен усилвател ЕУ. При достатъчно разсъгласуване, ЕУ предизвиква сработване релето КН, чийто контакт се използва за формиране сигнала за регулиране. Поради минималния брой елементи с механично движение (само контактната система на релето КН), този тип регулатор е с висока сигурност в експлоатацията.



фиг. 132. Двупозиционен регулатор с усилвател и релеен изход [57]

Двупозиционно регулиране може да се осъществи и с помощта на автоматични мостове и потенциометри.

Към автоматичния уред (фиг. 133) за измерване на температура чрез термодвойката ВК, състоящ се от електронен усилвател ЕУ, реверсивен двигател М, измервателна схема с реохорд R_p , се прибавя още профилният диск ПД и контактната система К. Профилният диск е твърдо съединен чрез редуктор с реверсивен двигател М. Подвижната част на контактната система има шарнирна връзка с профилния диск.



фиг. 133. Двупозиционно регулиране с автоматичен потенциометър (мост)

Когато регулираната величина е по-малка от заданието, контактът К е затворен и веригата към входа на обекта е осъществена. При достигане на зададената стойност, палецът на контакта К пропада в скосената част на диска и по този начин веригата към входа на обекта се прекъсва. По време на работа регулираната величина ще се колебае около зададената си стойност.

Релейните електронни регулатори без обратна връзка работят като двупозиционни регулатори или като регулатори с постоянна скорост.

3.1.4. СТРУКТУРА И ДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА АНАЛОГОВИ РЕГУЛАТОРИ, РЕАЛИЗИРАЩИ ЛИНЕЙНИ ЗАКОНИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

✓ Пропорционален (П) регулатор

Пропорционалният (П) регулатор генерира сигнал, пропорционален на отклонението от заданието. Ако отклонението (грешката) x_0 е голямо, стойността на манипулираната променлива y_0 също е голяма. Съответно при малко отклонение тази стойност е малка. Времевата характеристика на П регулатора в идеалния случай е същата като на входната променлива.

Пропорционален е този регулатор, при който изменението на изходната величина е пропорционално на изменението на входната, т.е.

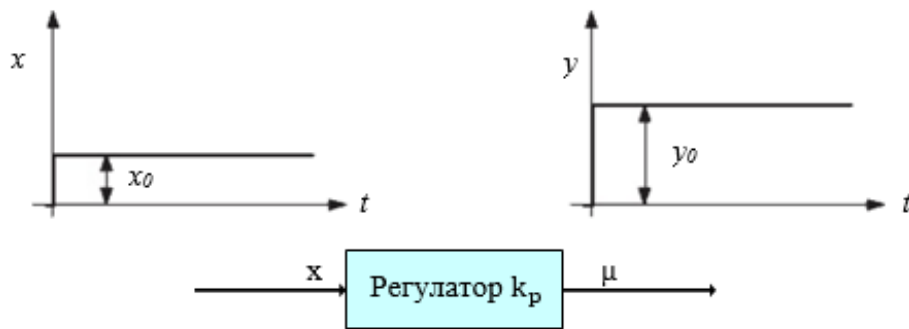
$$\Delta\mu = k_p \cdot \Delta x$$

Ако нарастването започва от нулево изходно положение, уравнението на П-регулаторите има вида:

$$\mu(t) = k_p \cdot x(t)$$

където k_p е коефициент на пропорционалност на регулатора и представлява единствения параметър за настройка на този регулатор. Обратната величина $\frac{1}{k_p}$ изразена в проценти ($\frac{1}{k_p} \cdot 100\%$), е прието да се нарича зона на регулиране или коефициент на дроселиране.

Структурната схема на идеален П- регулатор има вида, показан на **фиг. 134**.



фиг. 134. Структурна схема на идеален П- регулатор

Структурната схема на идеален П- регулатор съвпада с тази на пропорционално звено.

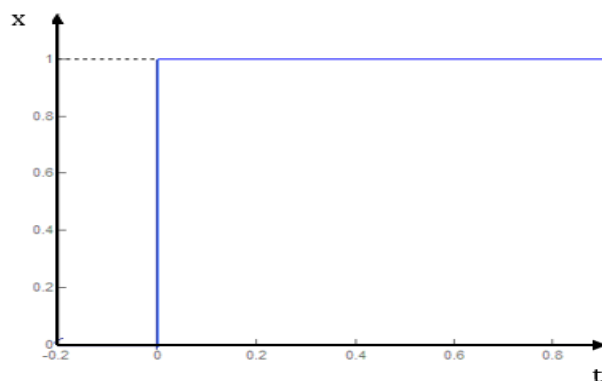
Предавателната функция на пропорционалните регулатори съвпада с k_p

$$W_p = k_p$$

Преходната характеристика има вида:

$$h(t) = k_p$$

Преходната характеристика на идеален П- регулатор е показана на **фиг. 135**. Тя съвпада с входния сигнал, а амплитудата ѝ зависи от стойността на k_p .

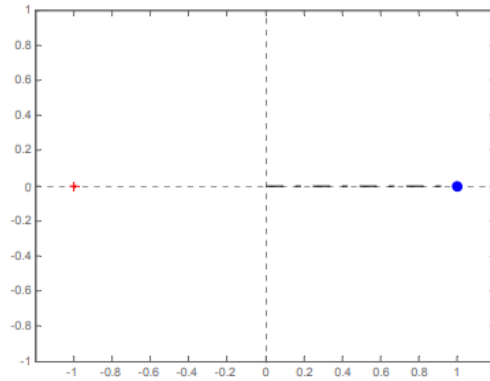


фиг. 135. Преходна характеристика на идеален П регулатор при $k_p = 1$ [57]

Изразът за амплитудно-фазово честотната характеристика (АФЧХ) е:

$$W(j\omega) = k_p$$

АФЧХ на идеален П- регулатор е показана на **фиг. 136**.

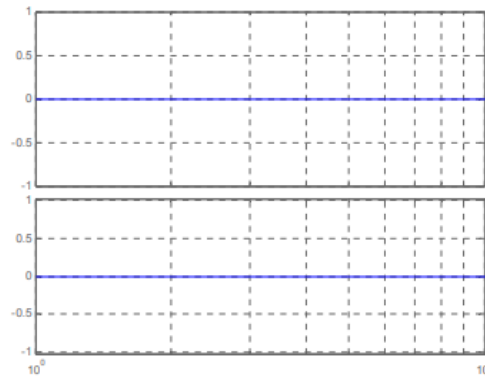


фиг. 136. АФЧХ на идеален П- регулатор при $k_p = 1$ [57]

Изразът за логаритмичната амплитудно-честотна характеристика ЛАЧХ е:

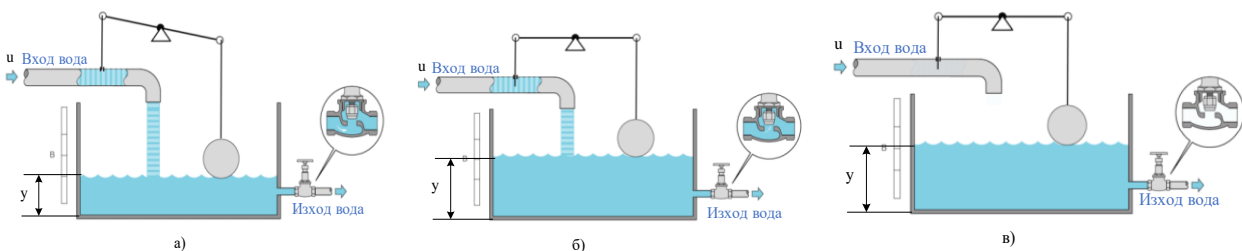
$$L(\omega) = 0$$

ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален П- регулатор са показани на *фиг. 137*.



фиг. 137. ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален П- регулатор при $k_p = 1$ [57]

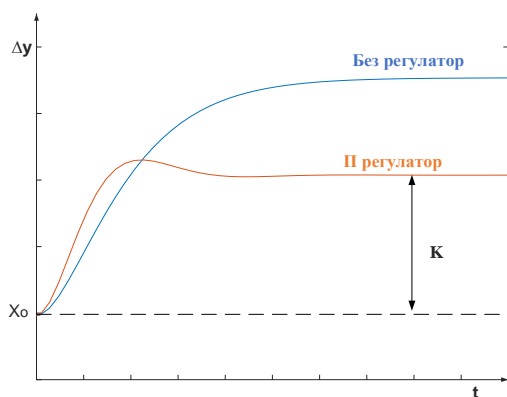
На *фиг.138* П- регулатор е лостовата система, на която, от едната страна, е закачен шибърът за пълнене на резервоара за вода, а от другата - поплавъкът.



фиг. 138. П- регулатор е лостовата система

Регулируемо въздействие е нивото на водата в резервоара, а регулиращо - положението на шибъра. Задаващо въздействие ще бъде вместимостта на резервоара или подходящо оразмеряване на сечението на тръбите за пълненето и празненето му. Ако изтичането на водата е по-голямо, нейното ниво спада, поплавъкът, с помощта на лостовата система, повдига

шибъра. С това се увеличава притокът на вода към резервоара, нивото на водата се покачва и спира, щом като изтичането ѝ се компенсира от пълненето (с помощта на увеличаване на сечението на водния поток, чрез придвижване на шибъра нагоре). Между това сечение и положението на поплавъка съществува пропорционална зависимост - на всяко сечение на течащия към резервоара поток (въздействие u) съответства определена височина на водната повърхност (въздействие y). Но за да започне да се увеличава това сечение, е необходимо нивото на водата да бъде под изискваното (задаващо въздействие x_0). И обратно, при намаляване на водния приток към резервоара, нивото на водата в резервоара се покачва над изискваното, следователно сечението на водния приток трябва да се намали посредством шибъра. За да стане това обаче, е необходимо в установеното състояние нивото да бъде над изискваното. Следователно изходният сигнал на регулатора и зависи от сигнала на разсъгласуването Δy . Тази определена (твърда) зависимост има за последиствие наличието, във всяко установено състояние на системата, на едно постоянно отклонение на регулируемо въздействие от задаващото. Казва се още, че П- регулаторът притежава статична грешка. Затова П- регулаторът се нарича още и статичен, а автоматичната система - статична. Горните изводи са илюстрирани на **фиг. 139**, където е отбелязано смущаващото въздействие, под формата на скок (такъв е случаят, когато внезапно се отвори шибърът на долния тръбопровод).

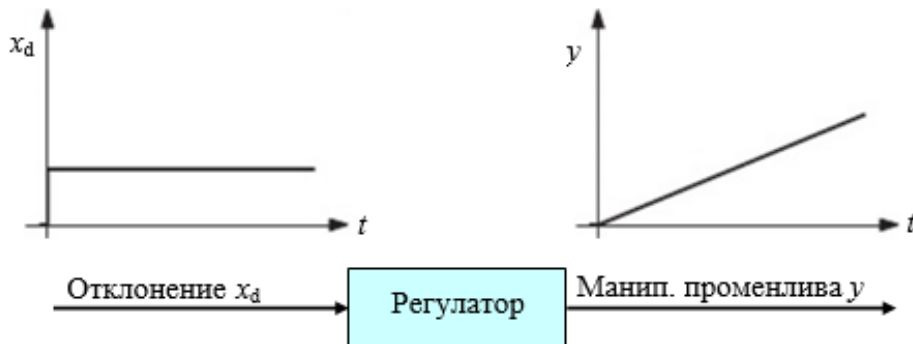


фиг. 139. Смущаващо въздействие

✓ Интегрален (И) регулатор

Интегралният регулатор интегрира системното отклонение (сумира стойности те му във времето при дискретните системи). В резултат на степента на изменение на манипулаторната променлива (а не абсолютната ѝ стойност) е пропорционална на отклонението. Това се вижда ясно от преходната функция на И- регулатора - ако отклонението „сочи“ от 0 до определена стойност, манипулираната променлива започва да се увеличава непрекъснато (**фиг. 140**). Колкото по-голямо е отклонението, толкова по-стръмно ще нараства характеристиката на

манипулираната променлива. Колкото по-голямо е отклонението, толкова по-стръмно ще нараства характеристиката на манипулираната променлива.



фиг. 140. Характеристика на И- регулатор

По тази причина И- регулаторът не е подходящ, ако е необходимо пълното компенсиране на отклонението. Ако то е голямо, манипулираната променлива ще се изменя бързо. В резултат отклонението ще става по-малко, съответно и манипулираната променлива ще се изменя по-бавно до достигане на равновесие. Интегралният регулатор не е подходящ за повечето управлявани системи, тъй като той или предизвиква колебания, в затворената система или реагира прекалено бавно на отклонението от заданието в системи с големи преходни процеси. На практика почти не се използват чисти И регулатори.

Интегралният регулатор осигурява пропорционална зависимост между скоростта на преместване на изпълнителния механизъм $\frac{d\mu}{dt}$ и входното въздействие e . Законът за регулиране се описва със следното уравнение:

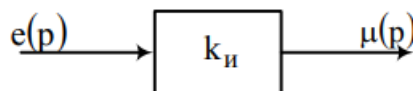
$$\frac{d\mu(t)}{dt} = k_{\text{и}} e(t)$$

Или

$$d\mu(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int e(t) dt$$

Тук $T_{\text{и}}$ е времеконстанта на интегриране.

Структурната схема на И- регулатор има вида показан на **фиг. 141**.



фиг. 141. Структурна схема на идеален И- регулатор

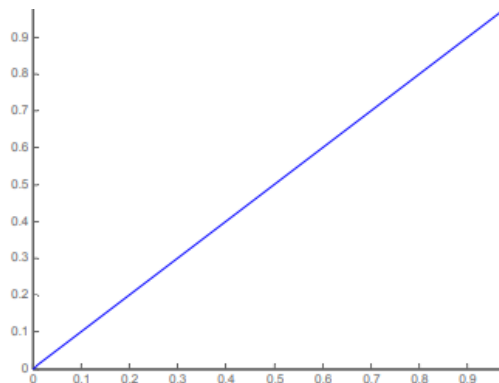
Предавателната функция на И- регулатор има вида:

$$W(p) = \frac{k_{\text{и}}}{p}$$

Преходната характеристика има вида:

$$h(t) = k_{\text{и}}p$$

Преходната характеристика на идеален И- регулатор е показана на **фиг. 142**.

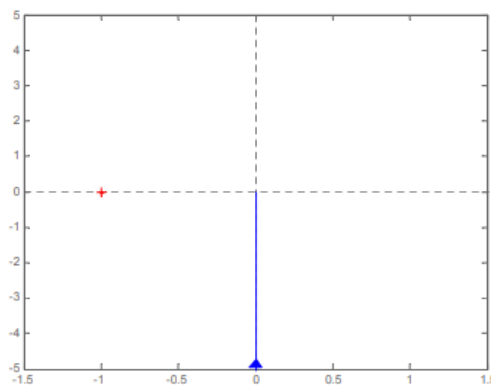


фиг. 142. Преходна характеристика на идеален И- регулатор при $k_{\text{и}} = 1$ [57]

Изразът за АФЧХ има вида:

$$W(j\omega) = \frac{k_{\text{и}}}{j\omega} = \frac{k_{\text{и}}}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

АФЧХ на идеален И- регулатор е показана на **фиг. 143**.



фиг. 143. АФЧХ на идеален И- регулатор при $k_{\text{и}} = 1$ [57]

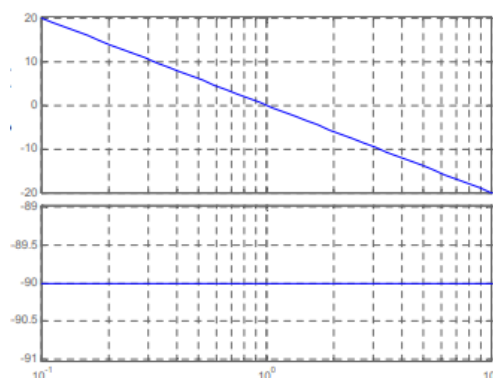
Изразът за ЛАЧХ е:

$$L(\omega) = 20\lg k_{\text{и}} + 20\lg \omega$$

Изразът за ЛФЧХ е:

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

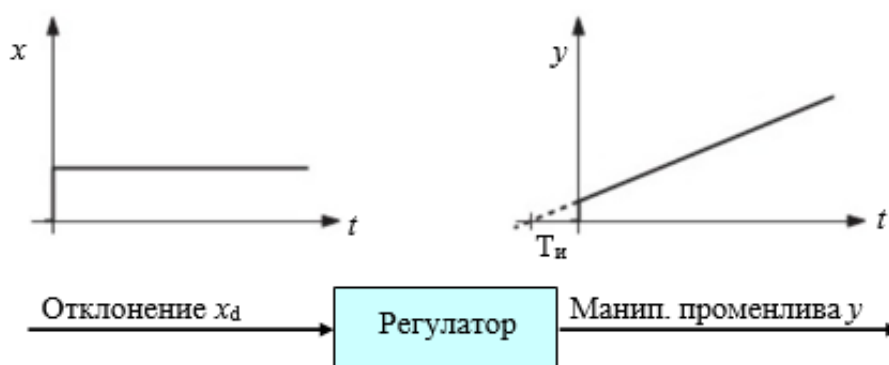
ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален И- регулатор са показани на *фиг. 144*.



фиг. 144. ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален И- регулатор при $k_{и} = 1$ [57]

✓ Пропорционално- интегрален (ПИ) регулатор

ПИ- регулаторът комбинира поведението на П и на И- регулаторите. Това позволява съответно и съчетаване на предимствата на двата регулатора: бърза реакция и компенсиране на грешката в установен режим. По тази причина ПИ- регулаторът се използва при голям брой системи за управление. Освен коефициента на усилване (пропорционалната съставяща), ПИ- регулаторът има още един коефициент, който характеризира поведението на И компонентата - времеконстантата на интегриране $T_{и}$. Времеконстантата $T_{и}$ е мярка за това колко бързо регулаторът ще промени манипулираната променлива (в допълнение към генерирането на манипулираната променлива от П съставящата) за да компенсира грешката в установен режим. С други думи: $T_{и}$ е степента, с която един ПИ- регулатор е по-бърз от чистия И- регулатор. Поведението на ПИ- регулатора може да се види на *фиг. 145*.



фиг. 145. Времева характеристика на ПИ регулатор

Времеконстантата е функция на коефициента k_p , тъй като скоростта на промяна на манипулираната променлива е по-бърза за по-големи стойности на k_p . При големи времеконстанти ефектът на интегралната съставяща е малък, тъй като сумирането на

стойностите на отклонението ще се извършва бавно. Обратно, при малки времеконстанти ефектът на интегралната компонента е голям.

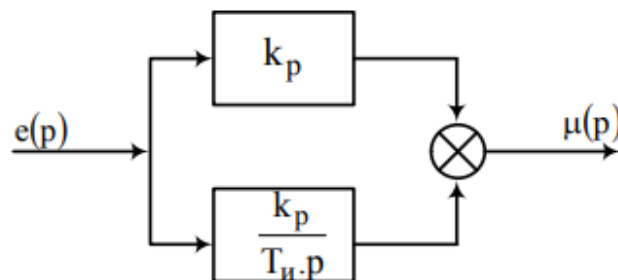
Ефективността на ПИ- регулатора нараства при увеличаване на коефициента на усилване на пропорционалната съставяща k_p , както и при увеличаване на И съставящата (т.е. намаляване на времеконстантата T_i). От друга страна, ако тези два коефициента са прекалено големи, работата на ПИ- регулатора ще бъде прекалено „груба“ и в цялата затворена система ще възникнат разходящи колебания, т.е. системата ще стане неустойчива. Затова е необходимо предварително да се изчислят граничните стойности на коефициентите, при надхвърлянето на които системата ще стане неустойчива.

На изхода си ПИ- регулатора реализира величина, пропорционална на отклонението на регулираната величина и на нейния интеграл във времето.

$$\mu(t) = k_p + \left(e + \frac{1}{T_i} \int edt \right)$$

В това уравнение k_p е коефициент на пропорционалност на регулатора, а T_i е времеконстанта на интегриране.

Структурната схема на ПИ- регулатор има вида показан на *фиг. 146*.



фиг. 146. Структурна схема на идеален ПИ- регулатор

ПИ- регулаторът има два параметъра за настройка - k_p и T_i . Ако времеконстантата T_i е с много голяма стойност, ПИ- регулаторът се превръща в П регулатор. Ако едновременно k_p и T_i са малки по стойност - той практически се доближава до И- регулатор, с предавателен коефициент $\frac{k_p}{T_i}$. Може да се постигне устойчива работа при обекти, които с И- регулатор са неработоспособни.

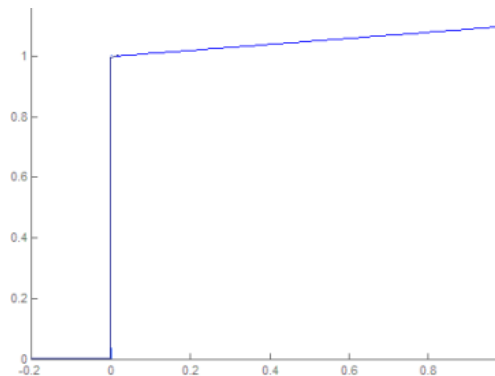
Съгласно диференциалното уравнение, предавателната функция на ПИ- регулатора е:

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$$

Преходната характеристика има вида:

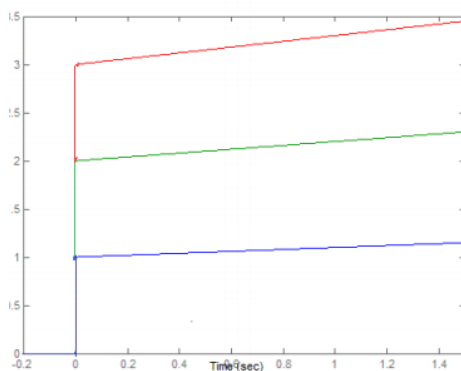
$$h(t) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i} t\right)$$

Преходна характеристика на идеален ПИ- регулатор е показана на *фиг. 147*.



*фиг. 147. Преходна характеристика на идеален ПИ- регулатор,
при $k_p = 1$, $T_i = 10$ s [57]*

На *фиг. 148* са показани преходни характеристики на идеален ПИ- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност и при постоянна стойност на времеконстантата на интегриране T_i и при увеличаване на k_p се повишава амплитудата на преходната му характеристика, без да се променя наклона ѝ.



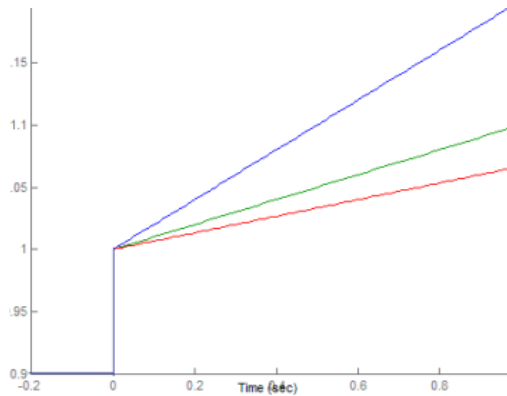
*фиг. 148. Преходни характеристики на идеален ПИ- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_i = 10$ s [57]*

На *фиг.149* са показани преходни характеристики на идеален ПИ- регулатор при различни стойности на времеконстантата на интегриране ϵ и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p . При увеличаване на T_i се намалява наклона на преходната му характеристика спрямо абсцисната ос.

За добрите динамични показатели на ПИ- регулатора може да се съди по АФЧХ, която е права линия.

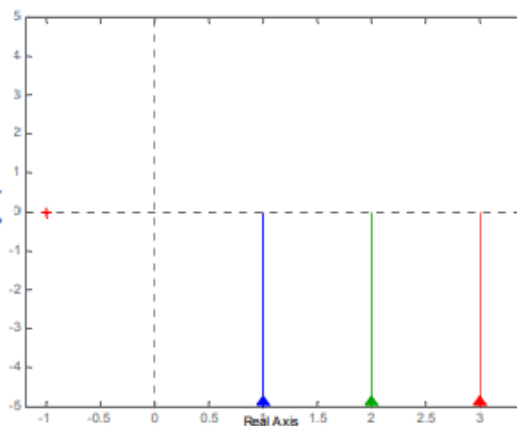
$$W(j\omega) = k_p \sqrt{1 + \left(\frac{1}{T_i\omega}\right)^2} \cdot e^{j(\arctg T_i\omega - \frac{\pi}{2})}$$

Запасът на устойчивост на фаза е по-голям, отколкото при И- регулатора. Дефазирането е по-малко с $\arctg T_i\omega$.



фиг. 149. Преходни характеристики на идеален ПИ- регулатор, при $k_p = 1; T_i = 5, 10, 15s$ [57]

На **фиг. 150** са показани АФЧХ на идеален ПИ- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност k_p и при постоянна стойност на времеконстантата на интегриране T_i . При увеличаване на k_p АФЧХ се измества надясно спрямо точката с координати $(-1, j0)$.



фиг. 150. АФЧХ на идеален ПИ- регулатор, при $k_p = 1, 2, 3; T_i = 10s$ [57]

Съгласно израза за АФЧХ, изменението на времеконстантата на интегриране $T_{\text{и}}$, при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p , няма да променя характеристиката.

Коефициентът на усилване на ПИ-регулатора k_y е променлива величина и зависи от честотата на входния сигнал.

$$k_y = k_p \sqrt{1 + \left(\frac{1}{T_{\text{и}}\omega}\right)^2}$$

При малки честоти той се стреми към $\frac{k_p}{T_{\text{и}}\omega}$, а за големи честоти - практически е равен на k_p - когато честотата на входния сигнал е ниска, той се приближава до И- регулатор, а при големи честоти се превръща в П- регулатор.

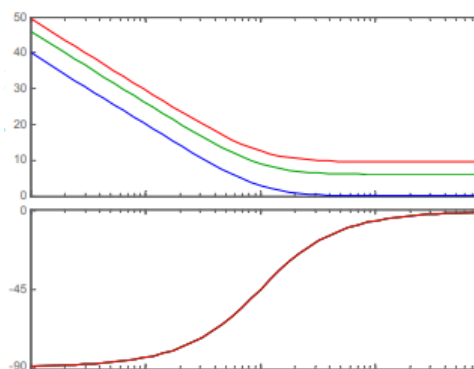
Изразът за ЛАЧХ е:

$$L(\omega) = 20 \lg k_p \sqrt{\left(\frac{1}{T_{\text{и}}\omega}\right)^2}$$

а изразът за ЛФЧХ е:

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} T_{\text{и}}\omega - \frac{\pi}{2}$$

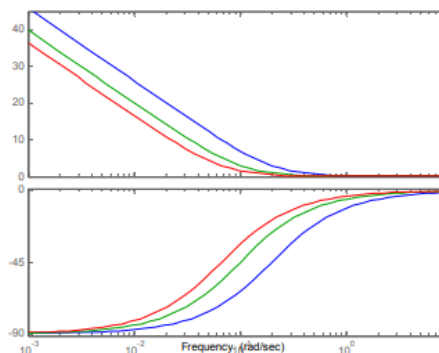
На **фиг. 151** са показани ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПИ- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност k_p и при постоянна стойност на времеконстантата на интегриране $T_{\text{и}}$. При увеличаване на коефициента на пропорционалност k_p се повишава стойността на амплитудата на ЛАЧХ, а стойността на фазата на ЛФЧХ не се променя.



**Фиг. 151. ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПИ- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_{\text{и}} = 10 \text{ s}$ [57]**

На **фиг. 152** са показани ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПИ- регулатор при различни стойности на времеконстантата на интегриране $T_{\text{и}}$ и при постоянна стойност на коефициента

на пропорционалност k_p . При увеличаване на T_i сенамаляват стойностите на амплитудата на ЛАЧХ и на фазата на ЛФЧХ.

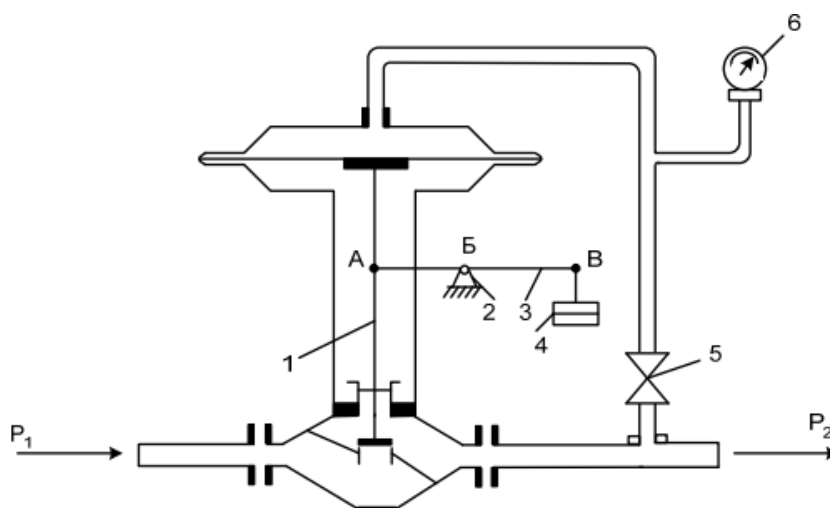


фиг. 152. ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПИ-регулатор,
при $k_p = 1$; $T_i = 5, 10, 15$ s [57]

Недостатък на интегралните регулатори е ниското ъм бързодействие, което е толкова по-малко, колкото е по-голяма интегриращата времеконстанта T_i .

И- регулаторите не могат да бъдат използвани при обекти без саморегулиране, защото получената САР в този случай е неустойчива.

На **фиг. 153** е показана схема на И- регулатор на налягане с пряко действие. От П-регулатора на налягане той се отличава по това, че противодействащата сила се създава не от пружина, а от тежест 4. Тежестта е окачена на лоста 3, който може да се завърта около опората 2. Другият край на лоста 3 е шарнирно свързан в точка А с лоста 1.



фиг. 153. И- регулатор на налягане с пряко действие [57]

Регулаторът и системата за регулиране, като цяло, се намират в равновесие, когато са равни моментите (относно опора 2) от силите, приложени в точки А и В. Когато моментът,

създаван от силата, в следствие налягането на газа върху мембраната, нарастне, регулиращият орган се спуска надолу, а когато моментът, създаден от тежестта 4, е по-голям - регулиращият орган се измества нагоре.

За равновесно състояние, уравнението на регулатора има вида:

$$p \cdot s \cdot |AB| = G |BB|$$

$$\text{или } p = \frac{G}{s} \cdot \frac{|BB|}{|AB|}$$

където p е налягането на газа върху мембраната; s - площ на мембраната; G - маса на тежестта; $|AB|$, $|BB|$ - рамена на лоста 3, относно опора 2.

Смяна на равновесното състояние с друго може да стане чрез изменение на тежестта 4, а най-лесно като се променя дължината на рамото $|BB|$. По такъв начин се настройва зададената стойност на регулираното налягане.

За разлика от П- регулатора, който може да заема равновесно положение при всяка стойност на входната величина, И- регулаторът остава в равновесие само в едно положение, съответстващо на зададената стойност на регулираната величина. Положението на регулиращия орган на И- регулатора не зависи от стойностите на регулираното налягане. Предимство на И-регулатора е това, че той осъществява регулиране без остатъчно отклонение на регулираната величина.

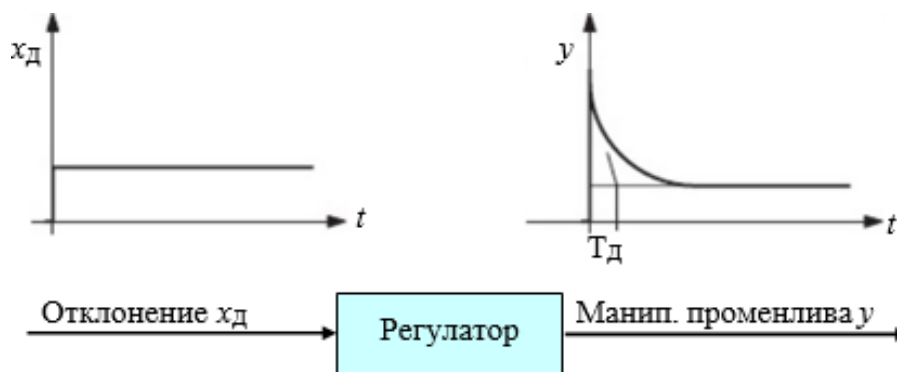
✓ *Пропорционално-диференциален (ПД) регулатор*

Когато към пропорционалната компонента на закона на регулиране се добави интегрална, се постига подобряване на статичните качества на САР. Подобряване на динамичните качества се осигурява с въвеждане в закона на регулиране на производната от входното въздействие. Този подход способства за намаляване на колебанията и ускоряване на затихването на преходния процес.

ПД- регулаторът (и още наречен статичен регулатор с изпреварване) е комбинация от П и Д регулатори. Д съставлящата му описва скоростта на промяна на отклонението от заданието. Колкото по-голяма е тази скорост, толкова по-голяма е и Д компонентата. В допълнение към стандартната реакция на П- регулатор, при ПД- регулатора на големи стойности на отклонението се реагира с много кратки, но големи реакции. Д съставлящата се характеризира с времеконстанта на диференциране T_D .

Времеконстантата на диференциране T_D е мярка за това колко по-бързо един ПД регулатор компенсира промяната в управляваната променлива спрямо чистия П регулатор. Скокът в изменението на манипулираната променлива ще компенсира голяма част от

отклонението, преди съответният чист П- регулатор още да е достигнал до тази стойност. Така при ПД- регулатора П съставящата реагира T_D пъти по-бързо (*фиг. 154*).



фиг. 154. Времева характеристика на ПД- регулатор

Сигнал, пропорционален на скоростта на изменение на входната величина, формират устройства, наречени диференциатори. Те представляват диференциращи звена (идеални и реални). При диференциаторите, ако на входа настъпи промяна на въздействието със скок, регулиращото въздействие се променя практически мигновено изпреварва регулиращата величина и започва да я потиска и връща към установената ѝ стойност.

ПД- регулаторът се използва рядко заради два свои основни недостатъка. Първо, той не може да компенсира изцяло остатъчната грешка (*фиг. 154*). Второ, много малко нарастване на Д съставящата може да причини неустойчивост на затворената система, при което в нея ще възникнат колебания (осцилации).

Законът на регулиране се описва с уравнението:

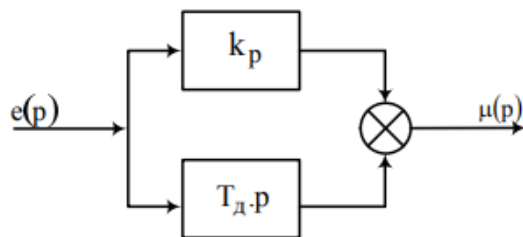
$$\mu(t) = k_p \left(x + \frac{dx}{dt} T_D \right)$$

Тук k_p е коефициент на пропорционалност на регулатора, а T_D е диференцираща времеконстанта. Това са двата параметъра за настройка на ПД- регулатора.

Ако се предположи, че входният сигнал x нараства по експоненциален закон, скоростта, с която той нараства $\frac{dx}{dt}$ представлява също експонента .

Всъщност $\frac{dx}{dt}$ се изразява чрез тангенса от ъгъл на наклона на допирателната в съответната точка от експонентата и има своя максимум в началния момент, когато x започва да се изменя.

Структурната схема на ПД- регулатор има вида показан на *фиг. 155*.



фиг. 155. Структурна схема на идеален ПД- регулатор

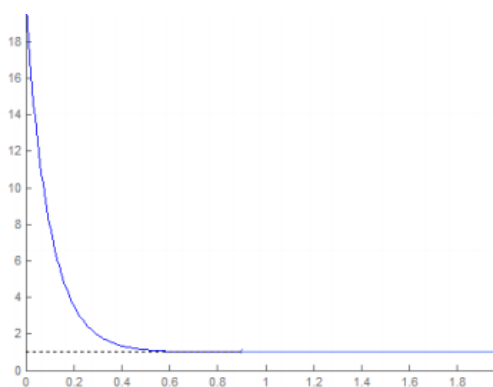
Предавателната функция на ПД- регулатор има вида:

$$W(p) = k_p(1+T_d \cdot p)$$

Преходната характеристика има вида:

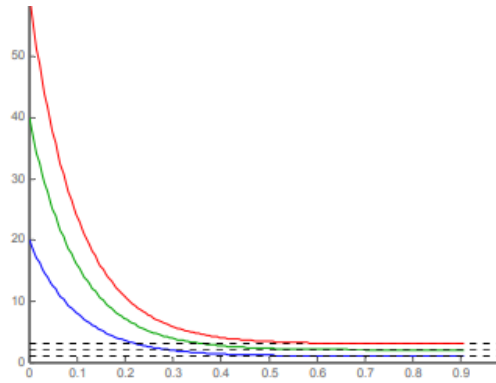
$$h(t) = k_p \left(1 + \frac{T_d}{1} \right).$$

Преходната характеристика на идеалния ПД- регулатор е показана на **фиг. 156**. При стъпаловидно въздействие на входа, изходната величина нараства със скок до максимално възможната си стойност и след това се връща към своята нова установена стойност.



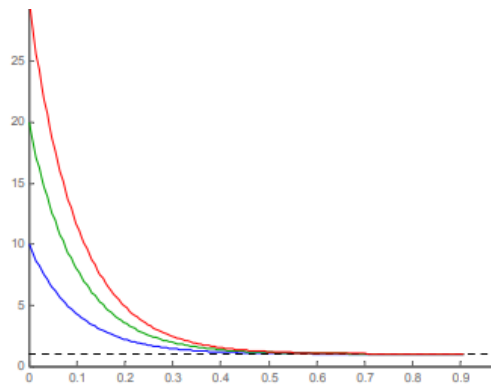
фиг. 156. Преходна характеристика на идеален ПД- регулатор,
при $k_p = 1$; $T_d = 2s$ [57]

На **фиг. 157**. са показани преходни характеристики на идеален ПД- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност и при постоянна стойност на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на k_p се повишава амплитудата на преходната характеристика.



**фиг. 157. Преходни характеристики на идеален ПД- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_d = 2s$ [57]**

На **фиг. 158** са показани преходни характеристики на идеален ПД- регулатор при различни стойности на времеконстантата на диференциране T_d и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p . При увеличаване на T_d се повишава амплитудата на преходната характеристика.

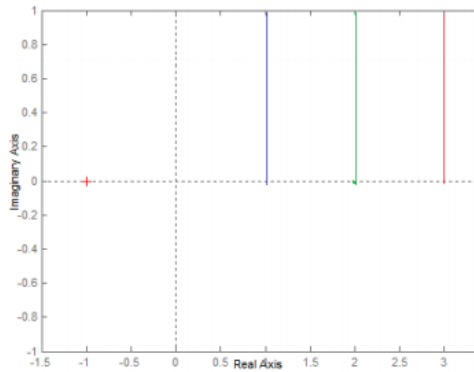


**фиг. 158. Преходни характеристики на идеален ПД- регулатор,
при $k_p = 1$; $T_d = 1, 2, 3s$ [57]**

Изразът за АФЧХ е:

$$W(j\omega) = k_p \sqrt{1 + (\omega T_d)^2} \cdot e^{j(\arctg T_d \omega - \frac{\pi}{2})}$$

На **фиг. 159** са показани АФЧХ на идеален ПД- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност k_p и при постоянна стойност на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на k_p АФЧХ се измества надясно спрямо точката с координати $(-1, j0)$.



фиг. 159. Фиг. 20. АФЧХ на идеален ПД- регулатор, при $k_p = 1, 2, 3; T_d = 2s$ [57]

Съгласно израза за АФЧХ, изменението на времеконстантата на диференциране T_d , при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p , няма да променя характеристиката.

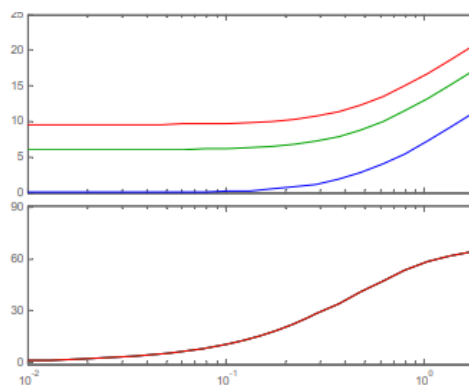
Изразът за ЛАЧХ е:

$$L(\omega) = 20 \lg k_p \sqrt{1 + (T_d \omega)^2}$$

Изразът за ЛФЧХ е:

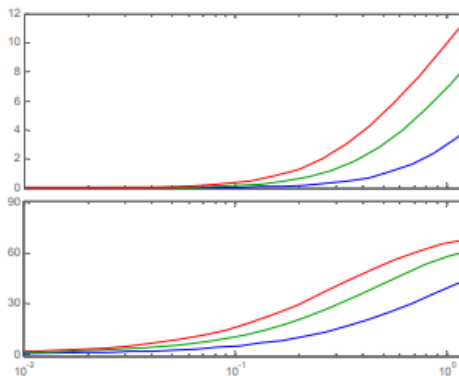
$$\varphi(\omega) = \text{arctg} T_d \omega$$

На **фиг.160** са показани ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПД- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност k_p и при постоянна стойност на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на коефициента на пропорционалност k_p се повишава стойността на амплитудата на ЛАЧХ, а стойността на фазата на ЛФЧХ не се променя.



фиг. 160. ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПД- регулатор, при $k_p = 1, 2, 3; T_d = 2s$ [57]

На *фиг.161* са показани ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПД- регулатор при различни стойности на времеконстантата на диференциране T_D и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p . При увеличаване на T_D се повишават стойностите на амплитудата на ЛАЧХ и на фазата на ЛФЧХ.

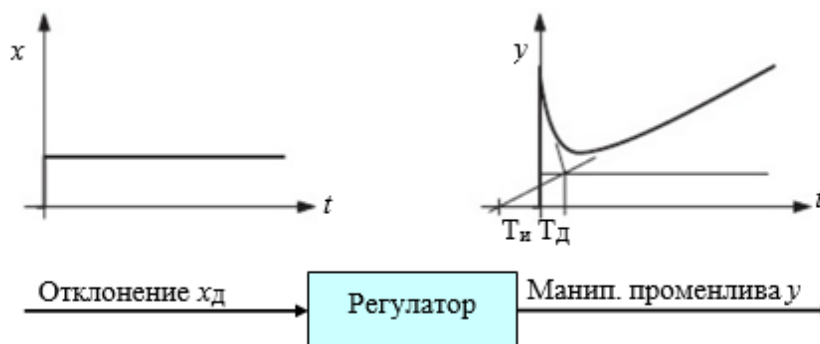


*фиг. 161. ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПД- регулатор,
при $k_p = 1$; $T_D = 1, 2, 3$ s [57]*

✓ Пропорционално- интегрално- диференциален (ПИД) регулатор

ПИД регулаторът съчетава предимствата на ПИ- регулатора с тези на Д- регулатора. Отчита се степента на изменение на отклонението от заданието. Ако отклонението е голямо, Д съставящата осигурява моментна много голяма промяна на стойността на манипулираната променлива. Докато влиянието на Д съставящата пада веднага след това, под влиянието на И съставящата стойността на манипулираната променлива бавно ще нараства. Ако отклонението е малко, влиянието на Д съставящата е пренебрежимо малко.

Този тип поведение има две предимства - по-бърза реакция и по-бързо компенсиране на отклонението в случай, че се промени стойността на заданието или стойността на смущаващия сигнал. Недостатъкът е, че управляващият контур е предразположен към възникване на осцилации и затова настройката е по-трудна. На *фиг. 162* е показана характеристиката на ПИД регулатор.



фиг. 162. Времева характеристика на ПИД регулатор

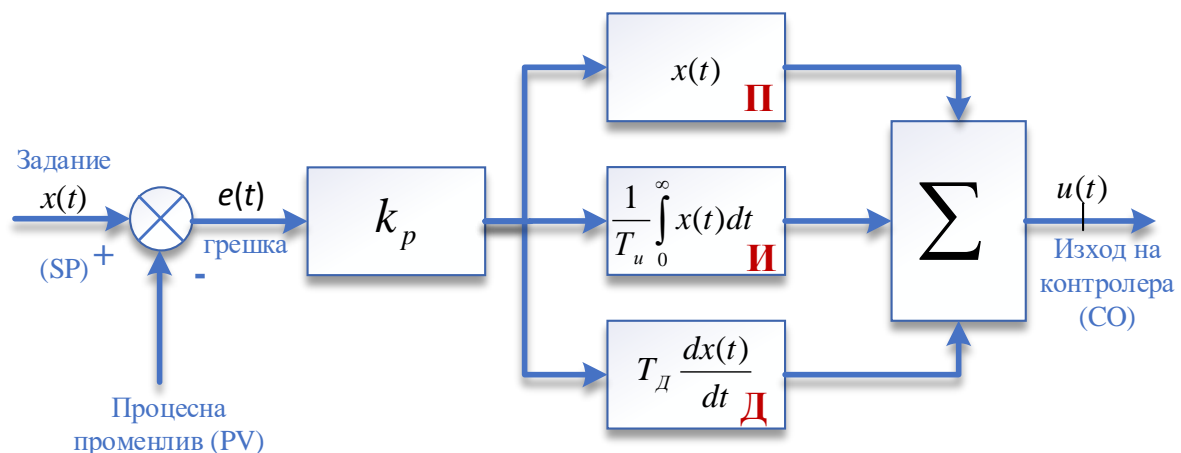
Под влиянието на Д съставящата този регулатор е по-бърз от П- и ПИ- регулаторите. Времеконстантата на диференциране T_d е мярка за това колко по-бърз е един ПИД регулатор спрямо съответен ПИ- регулатор.

Пропорционално- интегрално- диференциалният регулатор формира на изхода си сигнал, пропорционален на входната величина, на интеграла и по отношение на времето и на нейната производна. Този тип регулатор се нарича още изодромен с изпреварване. Той е съставен регулатор и обединява в себе си П- регулатор, И- регулатор и диференциатор. Законът на регулиране се описва с уравнението:

$$\mu(t) = k_p x(t) + \frac{k_p}{T_i} \int x(t) dt + k_p T_d \frac{dx(t)}{dt}$$

където k_p е коефициент на пропорционалност, T_i е времеконстанта на интегриране, а T_d е времеконстанта на диференциране. Посочените параметри представляват параметри за настройка на ПИД- регулатора. Универсалността на този регулатор се потвърждава от възможността да бъдат получени, чрез вариране с параметрите за настройка, и други закони на регулиране. Ако се зададе $T_d = 0$ и $T_i \rightarrow \infty$, се получава П- регулатор. При достатъчно малки стойности на k_p и T_i , но такива, отношението $\frac{k_p}{T_i}$ да се получава с определена крайна стойност, и ако $T_d = 0$, регулаторът се превръща в И-регулатор. За да се получи ПИ- закон на регулиране, е достатъчно T_d да е нула, а k_p и T_i да имат крайни стойности.

Чрез ПИД- регулатор се обединяват в едно устройство предимствата на съставните компоненти П, И, Д. Този регулатор може да се разглежда като система, състояща се от три паралелно съединени звена - усилвателно, интегриращо и идеално диференциращо, така както е показано на **фиг. 163**.



фиг. 163. Структурна схема на идеален ПИД- регулатор

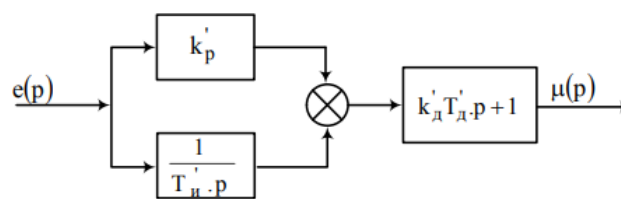
От структурната схема може да се получи предавателната функция на ПИД- регулатора

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$$

При нарастване на честотата, изоставането по фаза намалява и при определена честота се създава изпреварване.

За обекти с определено закъснение и бързо изменящи се смущаващи въздействия, ПИД- регулаторът притежава най-добри качества относно преходния процес. Когато обектът притежава малка инертност, диференциращата част в регулатора може да предизвика резки ускорения на регулирания орган, което е нежелателно. Във връзка с това, че техническата реализация на идеално диференциращо звено практически е неосъществима, ПИД- регулаторите най-често се изпълняват със структура, съответстваща на схемата от **фиг. 164**. Тук към ПИ- регулатора (структурата до сумиращия възел) последователно се съединява реално диференциращо звено с предавателна функция

$$W_d(p) = k'_d T'_d \cdot p + 1.$$



фиг.164. Структурна схема на реален ПИД- регулатор

За общата предавателна функция може да се запише:

$$W(p) = \frac{k'_p T'_i p + 1}{T'_i p} (k'_d T'_d p + 1) = \frac{k'_p k'_d T'_i T'_d p^2 + (k'_d T'_d + k'_p T'_i) p + 1}{T'_i p}$$

Ако се замести $T_i T_d = k'_p k'_d T'_i T'_d$, $T_i k_p = k'_d T'_d + k'_p T'_i$, $T_i = T'_i$, функцията добива

вида:

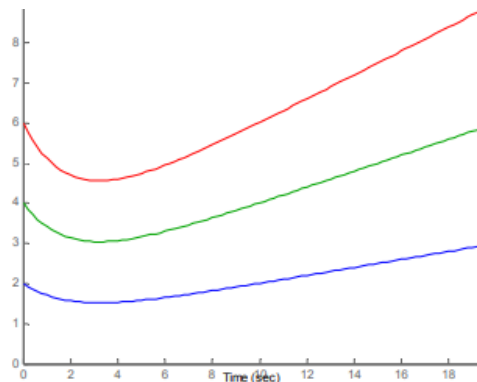
$$W(p) = \frac{T_i T_d p^2 + T_i k_p p + 1}{T_i p} = k_p + \frac{1}{T_i p} + T_i$$

Преходната характеристика има вида:

$$h(t) = k_p \left(1 + \frac{t}{T_i} + \frac{T_d}{t} \right)$$

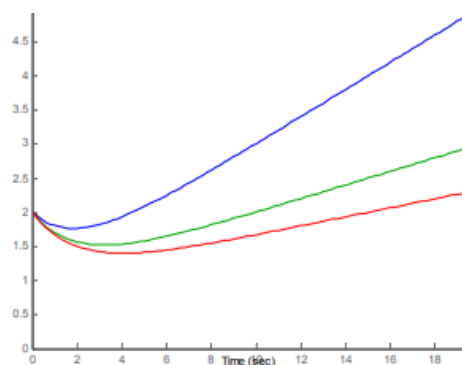
На **фиг.165** са показани преходни характеристики на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност и при постоянна стойност на времеконстантата на интегриране T_i и на времеконстантата на диференциране T_d . При

увеличаване на коефициента на пропорционалност k_p на ПИД- регулатор се повишава амплитудата на преходната му характеристика.



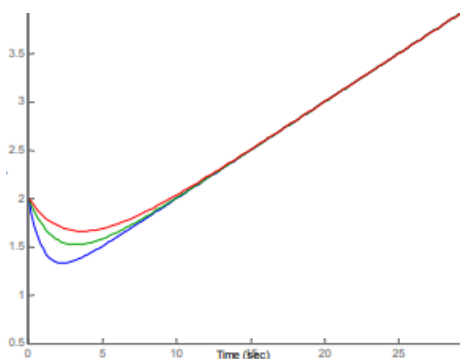
**фиг. 165. Преходни характеристики на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_i = 10s$, $T_d = 2s$ [57]**

На **фиг.166** са показани преходни характеристики на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на времеконстантата на интегриране T_i и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p и на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на времеконстантата на интегриране T_i на ПИД- регулатор се намалява наклона на преходната му характеристика спрямо абсцисата.



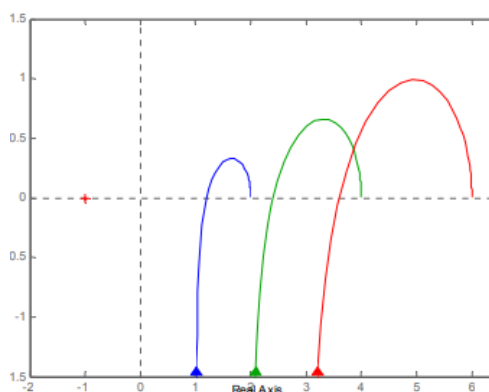
**фиг. 166. Преходни характеристики на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1$; $T_i = 5, 10, 15s$, $T_d = 2s$ [57]**

На **фиг. 167** са показани преходни характеристики на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на времеконстантата на диференциране T_d и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p и на времеконстантата на интегриране T_i . При увеличаване на времеконстантата на диференциране T_d на ПИД- регулатор се повишава амплитудата на преходната му характеристика.



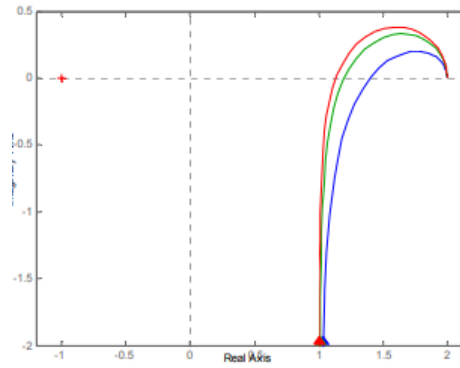
*фиг.167. Преходни характеристики на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1$; $T_i = 10$; $T_d = 1, 2, 3s$ [57]*

На *фиг. 168* са показани АФЧХ на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност и при постоянна стойност на времеконстантата на интегриране T_i и на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на коефициента на пропорционалност k_p на ПИД- регулатор, АФЧХ се измества надясно, спрямо точката с координати $(-1, j0)$.



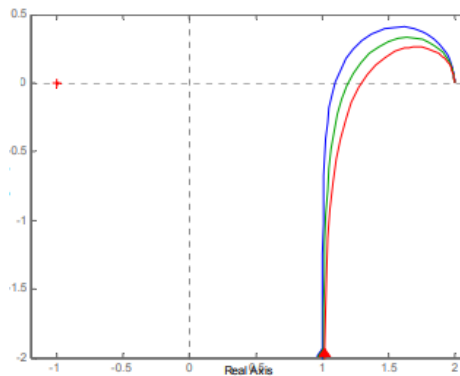
*фиг. 168. АФЧХ на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_i = 10s$; $T_d = 2s$ [57]*

На *фиг. 169* са показани АФЧХ на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на времеконстантата на интегриране T_i и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p , и на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на времеконстантата на интегриране T_i на ПИД- регулатор АФЧХ практически не се променя.



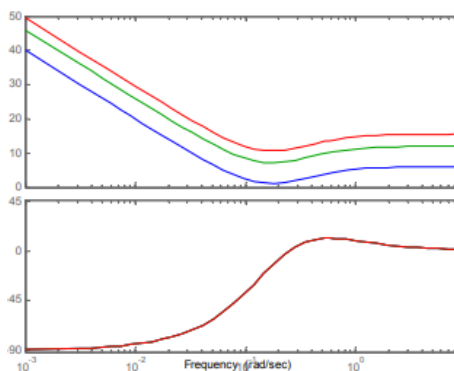
**фиг. 169. АФЧХ на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_i = 5, 10, 15s$; $T_d = 2s$ [57]**

На **фиг. 170** са показани АФЧХ на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на времеконстантата на диференциране T_d и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p и на времеконстантата на интегриране T_i . При увеличаване на времеконстантата на диференциране T_d на ПИД- регулатор, АФЧХ практически не се променя.



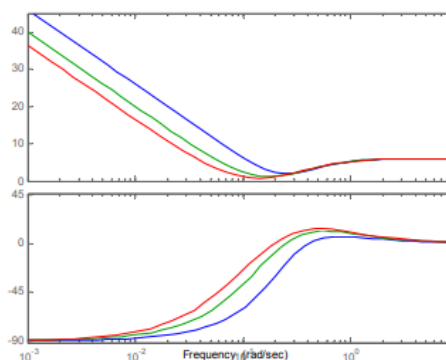
**фиг. 170. АФЧХ на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1$; $T_i = 10s$; $T_d = 1, 2, 3s$ [57]**

На **фиг. 171** са показани ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на коефициента на пропорционалност и при постоянна стойност на времеконстантата на интегриране T_i и на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на коефициента на пропорционалност k_p на ПИД- регулатор се повишава стойността на амплитудата на ЛАЧХ, а стойността на фазата на ЛФЧХ се запазва.



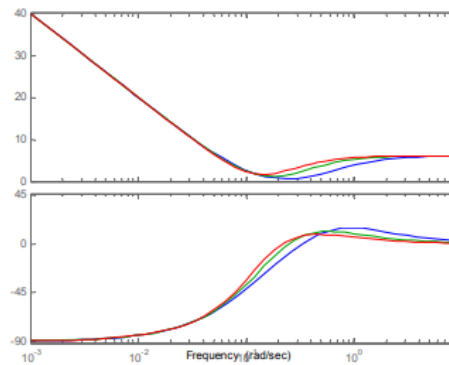
**фиг. 171. ЛАЧХ и ЛФЧХ на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_i = 10s$; $T_d = 2s$ [57]**

На **фиг. 172** са показани ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПИД регулатор при различни стойности на времеконстантата на интегриране T_i и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p и на времеконстантата на диференциране T_d . При увеличаване на времеконстантата на интегриране T_i на ПИД регулатор се намаляват стойностите на амплитудата на ЛАЧХ и на фазата на ЛФЧХ.



**фиг. 172. ЛАЧХ и ЛФЧХ на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_i = 5, 10, 15s$; $T_d = 2s$ [57]**

На **фиг. 173** са показани ЛАЧХ и ЛФЧХ на идеален ПИД- регулатор при различни стойности на времеконстантата на диференциране T_d и при постоянна стойност на коефициента на пропорционалност k_p , и на времеконстантата на интегриране T_i . При увеличаване на времеконстантата на диференциране T_d на ПИД- регулатор се повишават стойностите на амплитудата на ЛАЧХ и фазата на ЛФЧХ.



фиг. 173. ЛАЧХ и ЛФЧХ на ПИД- регулатор,
при $k_p = 1, 2, 3$; $T_i = 10s$; $T_d = 1, 2, 3s$ [57]

3.1.5. ОСОБЕНОСТИ НА РЕАЛНИТЕ ПРОМИШЛЕНИ РЕГУЛАТОРИ

Поради несъвършенството на елементната база, от която се изграждат регулаторите, законите, които те формират, се отличават от идеалните закони, заложиени в тях. Степента на отдалечаване на реалния закон от идеалния се характеризира чрез честотната област на нормална работа на регулатора. Областта на нормална работа е оценка, която може да се използва за сравнение между два еднотипни регулатора, изградени по различни структурни схеми.

Промислените регулатори са реални устройства. Техните преходни и честотни характеристики се различават от тези на идеалните регулатори. Предавателната функция на реален регулатор $W_p(p)$ може да бъде представена като произведение от предавателната функция на идеален регулатор $W_n(p)$ и предавателната функция на едно баластно (паразитно) звено $W_b(p)$:

$$W_p(p) = W_n(p)W_b(p)$$

Баластното звено е това, което изкривява характеристиките. При различни честоти изкривяването е различно.

Областта от честоти, в която АЧХ и ФЧХ на реалния регулатор не се различават от съответните характеристики на идеалния регулатор с повече от предварително зададени стойности, се нарича област на нормална работа (ОНР). Тези стойности са нормирани и по модул, и по фаза са в границите:

$$\Delta A_H(\omega) = \pm 10\%$$

$$\Delta \varphi_H(\omega) = \pm(10 \div 15)^\circ$$

Решението на системата уравнения определя ОНР.

$$\Delta A(\omega) \leq \Delta A_H(\omega)$$

$$\Delta \varphi_H(\omega) \leq \Delta \varphi_H(\omega)$$

$$\Delta A(\omega) = \frac{A_H(\omega) - A_p(\omega)}{A_H(\omega)}$$

$$\Delta \varphi(\omega) = \varphi_H(\omega) - \varphi_p(\omega)$$

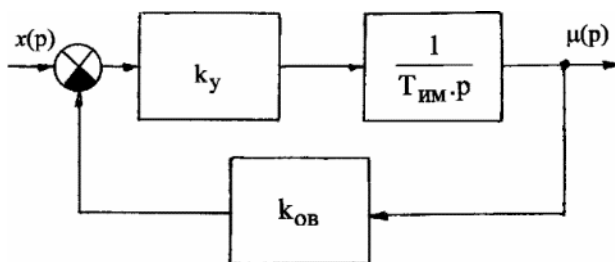
$A_H(\omega), \varphi_H(\omega), A_p(\omega), \varphi_p(\omega)$ са съответните амплитудно-честотна и фазо-честотна характеристики на идеалния и реалния регулатори.

Ако областта на нормална работа ОНР на регулатора покрива диапазона от честоти $\omega = 0 \div \omega_{cp}$ на затворената система за регулиране, работата на промишления регулатор се покрива с работата на идеален регулатор със същия закон на регулиране. ОНР е честотна област и се отнася само към реални честоти. Във връзка с ОНР съществуват два вида задачи. Едната, е така наречената права задача. При нея се търси ОНР, като е известна предавателната функция на регулатора, всички негови параметри и допустимата грешка по модул и фаза. Втората задача, наречена обратна, дава възможност да се определи някой от параметрите на регулатора при известна ОНР и грешка по модул и фаза.

Пример:

Права задача

Условие: Да се определи ОНР на реален П- регулатор със структурна схема, показана на **фиг. 174**, при следните параметри: $k_y = 2 \cdot 10^3$, $T_{им} = 50s$, $k_{об} = 5 \cdot 10^{-2}, V$ и допустими отклонения по модул и фаза съответно: $\Delta A_H(\omega) = 10\%$ и $\Delta \varphi_H(\omega) = 10^\circ$



фиг. 174. Структурна схема на П- регулатор

Решение: От структурната схема се определя предавателната функция $W_p(p)$ на регулатора, за да се получи предавателната функция за реален П- регулатор.

$$W_p(p) = \frac{k_y \frac{1}{T_{ИМ} p}}{1 + k_y k_{ОВ} \frac{1}{T_{ИМ} p}} = \frac{k_y}{(T_{ИМ} p + 1) k_y k_{ОВ}} = \frac{1}{k_{ОВ}} \frac{1}{\frac{T_{ИМ}}{k_y k_{ОВ}} p + 1}$$

$W_{И}(p) = \frac{1}{k_{ОВ}} = k_p$ – предавателната функция на идеалния регулатор

$W_{\delta}(p) = \frac{1}{\frac{T_{ИМ}}{k_y k_{ОВ}} p + 1} = \frac{1}{T_{\delta} p + 1}$ – предавателната функция на баластното звено

където: $T_{\delta} = \frac{T_{ИМ}}{k_y k_{ОВ}}$.

Амплитудно-честотната (АЧХ) и фазо-честотната (ФЧХ) характеристики на идеалния регулатор са: $A_{\delta}(\omega) = k_p$ и $\varphi_{И} = 0$.

АЧХ и ФЧХ на баластното звено са:

$$A_{\delta}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2}}$$

$$\varphi_{\delta}(\omega) = -\arctan \omega T_{\delta}$$

АЧХ и ФЧХ на реалния регулатор са:

$$A_p(\omega) = A_{И}(\omega) A_{\delta}(\omega) = k_p \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2}} = \frac{k_p}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2}}$$

$$\varphi_p(\omega) = \varphi_{И}(\omega) \varphi_{\delta}(\omega) = 0 + (-\arctan \omega T_{\delta}) = -\arctan \omega T_{\delta}$$

От условието $\Delta A(\omega) \leq \Delta A_{И}(\omega)$ се получава: $\Delta A(\omega) \leq 0,1$.

$$\Delta A(\omega) = \frac{A_{И}(\omega) - A_p(\omega)}{A_{И}(\omega)} \leq 0,1$$

$$\frac{k_p - \frac{k_p}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2}}}{k_p} \leq 0,1$$

$$\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2}}}{k_p} \leq 0,1$$

$$\sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2} - 1 \leq 0,1 \sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2}$$

$$\sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2} - 0,1 \sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2} \leq 1$$

$$0,9 \sqrt{1 + \omega^2 T_{\delta}^2} \leq 1$$

$$0,81(1 + \omega^2 T_6^2) \leq 1$$

$$0,81 + 0,81\omega^2 T_6^2 \leq 1$$

$$0,81\omega^2 T_6^2 \leq 1 - 0,81$$

$$0,81\omega^2 T_6^2 \leq 0,19$$

$$\omega \leq \sqrt{\frac{0,19}{0,81T_6^2}}$$

$$T_6 = \frac{T_{\text{ИМ}}}{k_y k_{\text{ОВ}}} = \frac{50}{2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 0,5 \text{ s}$$

$$\omega \leq \sqrt{\frac{0,19}{0,81 \cdot 0,25}} 0,97 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_{\Delta A} \leq 0,97 \text{ s}^{-1}$$

От условието $\Delta\varphi(\omega) \leq \Delta\varphi_{\text{и}}(\omega)$ се получава: $\Delta\varphi(\omega) \leq 10^0$

$$\Delta\varphi(\omega) = \varphi_{\text{и}}(\omega) - \varphi_{\text{р}}(\omega) \leq 10^0$$

$$0 - (-\arctan \omega T_6) \leq 10^0$$

$$\arctan \omega T_6 \leq 10^0$$

$$\omega T_6 \leq 0,1763$$

$$\omega \leq \frac{0,1763}{T_6} = \frac{0,1763}{0,5}$$

от където $\omega_{\Delta\varphi} \leq 0,35 \text{ s}^{-1}$.

Стойността $\omega_{\Delta\varphi} \leq 0,35 \text{ s}^{-1}$ е решение на системата, защото е по-малката от двете стойности. Тази стойност определя ОНР.

Обратна задача

Условие: За реален П- регулатор, чиято структурна схема е показана на **фиг. 174.**, да се построи зависимостта $T_{\text{ИМ}} = f(\omega)$. Честотата ω се определя за областта на нормална работа, която е от 0 до $0,35 \text{ s}^{-1}$. Числените стойности на параметрите са: $k_y = 2 \cdot 10^3$ и $k_{\text{ОВ}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ V}$, а допустими отклонения по модул и фаза съответно $\Delta A_p(p) = 10\%$ и $\Delta\varphi_p(p) = 10^0$.

Решение: От структурната схема се определя предавателната функция $W_p(p)$ на регулатора, за да се получи стандартна форма на предавателната функция за реален П- регулатор.

$$W_p(p) = \frac{k_y \frac{1}{T_{\text{ИМ}} p}}{1 + k_y k_{\text{ОВ}} \frac{1}{T_{\text{ИМ}} p}} = \frac{k_y}{(T_{\text{ИМ}} p + 1) k_y k_{\text{ОВ}}} = \frac{1}{k_{\text{ОВ}}} \frac{1}{\frac{T_{\text{ИМ}}}{k_y k_{\text{ОВ}}} p + 1}$$

$W_{и}(p) = \frac{1}{k_{ОВ}} = k_p$ – предавателната функция на идеалния регулатор

$W_{\zeta}(p) = \frac{1}{\frac{T_{ИМ}}{k_y k_{ОВ}} p + 1} = \frac{1}{T_{\zeta} p + 1}$ – предавателната функция на баластното звено

където: $T_{\zeta} = \frac{T_{ИМ}}{k_y k_{ОВ}}$.

АЧХ и ФЧХ на идеалния регулатор са: $A_{и}(\omega) = k_p$ и $\varphi_{и}(\omega) = 0$.

АЧХ и ФЧХ на баластното звено са:

$$A_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2}},$$

$$\varphi_{\zeta}(\omega) = -\arctg \omega T_{\zeta}.$$

АЧХ и ФЧХ на реалния регулатор са:

$$A_p(\omega) = A_{и}(\omega) \cdot A_{\zeta}(\omega) = k_p \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2}} = \frac{k_p}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2}},$$

$$\varphi_p(\omega) = \varphi_{и}(\omega) + \varphi_{\zeta}(\omega) = 0 + (-\arctg \omega T_{\zeta}) = -\arctg \omega T_{\zeta}.$$

От условието $\Delta A(\omega) \leq \Delta A_{и}(\omega)$ се получава: $\Delta A(\omega) \leq 0,1$

$$\Delta A(\omega) = \frac{A_{и}(\omega) - A_p(\omega)}{A_{и}(\omega)} \leq 0,1$$

$$\frac{k_p - \frac{k_p}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2}}}{k_p} \leq 0,1$$

$$1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2}} \leq 0,1$$

$$\sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2} - 1 \leq 0,1 \cdot \sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2}$$

$$\sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2} - 0,1 \cdot \sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2} \leq 1$$

$$0,9 \cdot \sqrt{1 + \omega^2 T_{\zeta}^2} \leq 1$$

$$0,81 \cdot (1 + \omega^2 T_{\zeta}^2) \leq 1$$

$$0,81 + 0,81\omega^2 T_6^2 \leq 1$$

$$0,81\omega^2 T_6^2 \leq 1 - 0,81$$

$$0,81\omega^2 T_6^2 \leq 0,19$$

$$T_6 \leq \sqrt{\frac{0,19}{0,81 \cdot \omega^2}}$$

$$\frac{T_{им}}{k_y \cdot k_{об}} \leq \sqrt{\frac{0,19}{0,81 \cdot \omega^2}}$$

$$T_{им\Delta\Delta} \leq k_y \cdot k_{об} \cdot \sqrt{\frac{0,19}{0,81 \cdot \omega^2}}$$

От условието $\Delta\varphi(\omega) \leq \Delta\varphi_{и}(\omega)$ се получава: $\Delta\varphi(\omega) \leq 10^0$

$$\Delta\varphi(\omega) = \varphi_{и}(\omega) - \varphi_{р}(\omega) \leq 10^0$$

$$0 - (-\arctg\omega T_6) \leq 10^0$$

$$\arctg\omega T_6 \leq 10^0$$

$$\omega T_6 \leq 0,1763$$

$$T_6 \leq \frac{0,1763}{\omega}$$

$$\frac{T_{им}}{k_y \cdot k_{об}} \leq \frac{0,1763}{\omega}$$

$$T_{им\Delta\varphi} \leq k_y \cdot k_{об} \cdot \frac{0,1763}{\omega}$$

Резултатите от изчисленията са показани в таблицата.

ω, s^{-1}	0, 0 5	0, 1 5	0, 1 5	0, 2 5	0, 2 5	0, 3 5	0, 3 5
$T_{им\Delta\Delta}, s$	9 6 9	4 8 4	3 2 3	2 4 2	1 9 4	1 6 1	1 3 8
$T_{им\Delta\varphi}, s$	3 5 3	1 7 6	1 1 8	8 8 8	7 1 1	5 9 9	5 0 0

Стойностите на $T_{им\Delta\varphi}$ са решение на системата (1), защото те са по-малките стойности.

Поради това се построява само зависимостта $T_{им\Delta\varphi} = f(\omega)$.

Характерна оценка на реалните регулатори е и областта на нелинейни режими. Осъществява се сравнение между действителната честотна и линеаризираната честотна характеристики. За допустимо се приема отклонението по модул до 5 % и по фаза до 18 %.

Съществуват два основни начина за изграждане на структурната схема на реалните регулатори. Единият от начините, е директен и реализира закона по неговото описание с помощта на отделни функционални блокове. Вторият начин, се основава на синтезирането на подходящи обратни връзки. Той е по-лесен и се използва от всички фирми, производителки на регулатори.

В зависимост от избраната структурна схема, изменението (настройката) на параметрите на регулиране може да бъде независимо или зависимо, т.е. промяната на един от тях да води до промяна и на други. По-добри са схемите с независима настройка, но тяхната реализация е по-трудна.

Коефициентът на пропорционалност на регулаторите k_p се променя или чрез изменение дълбочината на обратната връзка, с която се формира П- компонентната, или чрез използването на делител на входния сигнал. Вторият начин влияе и на зоната на нечувствителност, което е нежелателно.

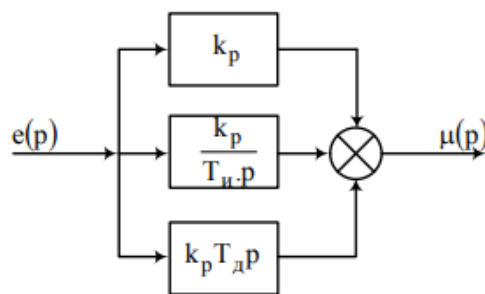
В общия случай, зоната на нечувствителност на реалните регулатори е нежелана. Тя се отразява върху областта на линейност на регулатора. Нечувствителност могат да внасят: измервателната схема, усилвателят, изпълнителният механизъм, регулиращият орган. В някои случаи се налага въвеждането на регулирана зона на нечувствителност, с което се стабилизира работата на определен вид системи. Основен критерий винаги трябва да бъде влиянието на зоната на нечувствителност върху качеството на регулиране.

Триенето и хлабините в реалните системи се отразяват върху зоната на нечувствителност. Характеристиките на регулатора не започват от нулата, а имат някакво начално изместване.

Насищането се проявява най-вече в усилвателните части на регулаторите. То увеличава динамичните грешки и като цяло влошава качеството на регулиране. Особено важно за даден регулатор е добре да се изяснят възможностите за достигане на зоната на насищане.

3.1.6. СТРУКТУРНИ СХЕМИ НА РЕГУЛАТОР, РЕАЛИЗИРАН ЧРЕЗ УСИЛВАТЕЛ, ОБХВАНАТ С ОБРАТНА ВРЪЗКА

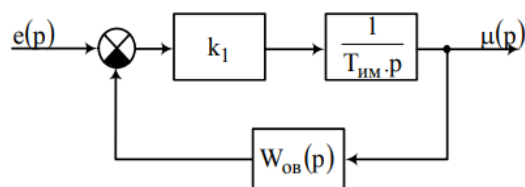
Изобразената на *фиг. 175* структурна схема на промишлен регулатор осигурява добри характеристики и лесна настройка. Тя представлява паралелно свързани П, И и Д звена. От гледна точка на елементната база и възможностите за лесна, проста и евтина реализация, тази схема не е удобна. По-целесъобразни са схемите, формиращи съответния алгоритъм с помощта на подходящи обратни връзки. При тях по-големи изисквания се предявяват към точността на елементите и звената, включени в обратната връзка. В основното направление, по което се движи сигналът, е достатъчно да има усилвател с голям коефициент на усилване. Наличието в основния тракт на елементи с невисока точност, и дори с определена нелинейност, не се отразява съществено на характеристиките на регулатора.



Фиг. 175. Структурна схема на идеален ПИД- регулатор

✓ *Структурна схема с усилвателно и интегриращо звено в правия тракт, обхванати с обратна връзка*

Това са регулаторите, при които изпълнителният механизъм, функционално представляващ интегриращо звено, е обхванат с обратна връзка (*фиг. 176*).



фиг. 176. Структурна схема на реален регулатор

За предавателната функция на структурна схема може да се запише:

$$W(p) = \frac{\mu(p)}{x(p)} = \frac{k_1 \frac{1}{T_{ИМ} p}}{1 + k_1 \frac{1}{T_{ИМ} p} W_{ОВ}(p)}$$

Това е предавателна функция на една реална структура на регулатор. Ако коефициентът на усилване k_1 е толкова голям, че да може да се допусне, че $k_1 \rightarrow \infty$, тогава се достига до една идеализирана структурна схема с предавателна функция.

$$W_{И} = \lim_{k_1 \rightarrow \infty} W(p) = \frac{1}{W_{ОВ}(p)}$$

Следователно, в този случай законът на регулиране ще се определя единствено от вида на обратната връзка.

За П- регулатор:

$$W_{ОВ}(p) = \delta; W_{И} = k_p(p)$$

където $k_p = \frac{1}{\delta}$.

За И- регулатор:

$$W_{ОВ}(p) = \delta T_{ОВ} p; W_{И}(p) = \frac{k_p}{T_{И} p}, \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta}; T_{И} = T_{ОВ}.$$

За ПИ- регулатор:

$$W_{ОВ}(p) = \frac{\delta T_{ОВ} p}{1 + T_{ОВ} p}; W_{И}(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{И} p} \right), \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta}; T_{И} = T_{ОВ}.$$

За ПД- регулатор:

$$W_{ОВ}(p) = \frac{\delta}{1 + T_{ОВ} p}; W_{И}(p) = k_p (1 + T_{Д}), \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta}; T_{Д} = T_{ОВ}.$$

За ПИД- регулатор:

$$W_{ОВ}(p) = \delta \frac{T_1 p}{T_1 T_2 p^2 + T_{12} p + 1}; W_{И}(p) = k_p \left(T_{Д} p + 1 + \frac{1}{T_{И} p} \right),$$

където $k_p = \frac{1}{\delta} \frac{T_{12}}{T_1}; T_{И} = T_{12}; T_{Д} = \frac{T_1 T_2}{T_{12}}; T_{12} = T_1 + T_2$.

Настройката на регулаторите става чрез съответните параметри $k_p, T_{И}, T_{Д}$. Те могат да се променят посредством промяната на $\delta, T_{ОВ}, T_1$ и T_2 . Тази промяна е независима за повечето регулатори (П, ПИ, ПД), като само за ПИД- закона е взаимно свързана, т.е. изменението на един от параметрите води до промяна и на останалите.

Реално в регулаторите, от съображение за достатъчна устойчивост, k_1 е винаги с крайна стойност. Това променя и вида на предавателните функции.

За П- регулатор:

$$W_{ОВ}(p) = k_p \frac{1}{T_6 p + 1}, \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta}; T_6 = \frac{T_{ИМ}}{\delta k_1}.$$

За И- регулатор:

$$W(p) = \frac{k_p}{T_{ип} p}, \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta}; T_{и} = T_{им} + T_{об}.$$

Гъвкавата обратна връзка, с която е обхванато интегриращото звено на изпълнителния механизъм, не влияе върху структурата на предавателната му функция. Времеkonстантата на интегриране $T_{и}$ нараства при отрицателна обратна връзка.

За ПИ- регулатор:

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{ип} p}\right) \frac{1}{T_6 p + 1}, \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta + \frac{T_{им}}{k_1 T_{об}}}; T_{и} = T_{об}; T_6 = \frac{T_{об}}{1 + \frac{\delta k_1 T_{об}}{T_{им}}}.$$

За ПД- регулатор:

$$W(p) = k_p (T_{д} p + 1) \frac{1}{T_6^2 p^2 + 2\zeta T_6 p + 1}, \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta}; T_{д} = T_{об}; T_6 = \sqrt{\frac{T_{об} T_{им}}{\delta k_1}}; \zeta = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\delta k_1 T_{об}}{T_{им}}}}.$$

За ПИД- регулатор:

$$W(p) = k_p \left(T_{д} p + 1 + \frac{1}{T_{ип} p}\right) \frac{1}{T_6^2 p^2 + 2\zeta T_6 p + 1}$$

$$\text{където } k_p = \frac{1}{\delta \frac{T_1}{T_{12}} + \frac{T_{им}}{k_1 T_{12}}}; T_{и} = T_{12}; T_{д} = \frac{T_1 T_2}{T_{12}}; T_{12} = T_1 + T_2; T_6 = \sqrt{\frac{T_1 T_2}{1 + \frac{\delta k_1 T_1}{T_{им}}}}; \zeta = \frac{T_{12}}{2\sqrt{T_1 T_2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\delta k_1 T_1}{T_{им}}}}.$$

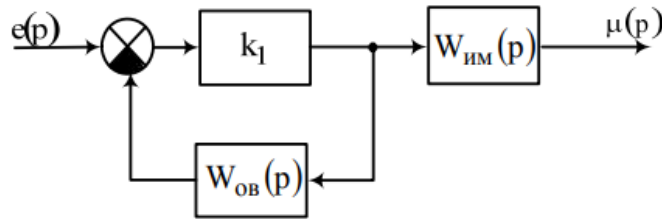
Всички регулатори се получават с баластни звена от I или II ред (без И- регулатора). T_6 става по-малка, когато k_1 расте. В същото време (за ПД- и ПИД- закони) намалява и коефициентът на демпфиране ζ , вследствие на което се увеличава колебателността на системата, респективно намалява запаса по устойчивост. Това е съществен недостатък.

✓ Структурна схема с усилвател в правия тракт, обхванат с обратна връзка

При електрическите регулатори изпълнителният механизъм може да представлява както интегриращо звено, така също и пропорционално звено. За сега се среща по-често първият вариант, но съществува тенденция чрез позициониране с помощта на обратна връзка по ъгъла на завъртане, интегриращите изпълнителни механизми да се трансформират в пропорционални звена. При пневматичните регулатори изпълнителният механизъм обикновено е пропорционално звено (например мембранен изпълнителен механизъм).

Ако се пренебрегне инертността на усилвателя, може да се използва структурната схема от **фиг. 177**, на която съответства предавателна функция:

$$W(p) = \frac{\mu(p)}{x(p)} = \frac{k_1 W_{им}(p)}{1 + k_1 W_{об}(p)}.$$



фиг.177. Структурна схема на реален регулатор

За случая, когато $W_{ИМ}(p) = 1$ и $k_1 \rightarrow \infty$, идеализираната предавателна функция силно се опростява:

$$W_{И}(p) = \lim_{k_1 \rightarrow \infty} W(p) = \frac{1}{W_{ОБ}(p)}.$$

Получаването на различни закони на регулиране (П, ПИ, ПД, ПИД) е аналогично, както във вече разглежданите случаи. Изпълнителният механизъм е пропорционално звено.

За реалните регулатори, когато $k_1 \ll \infty$, предавателната функция е:

$$W(p) = \frac{k_1}{1 + k_1 W_{ОБ}(p)}.$$

За различните закони на функциониране тя добива вида:

За П- регулатор:

$$W(p) = k_p, \text{ където } k_p = \frac{k_1}{1 + \delta k_1}.$$

ПИ- регулатор:

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{И}p} \right) \frac{k_6 T_6 p}{T_6 p}, \text{ където } k_1 = \frac{1}{\delta}; T_{И} = T_{ОБ}; k_6 = \frac{\delta k_1}{1 + \delta k_1}; T_6 = T_{ОБ}(1 + \delta k_1).$$

За ПД- регулатор:

$$W(p) = k_p (T_D p + 1) \frac{k_6}{T_6 p + 1}, \text{ където } k_p = \frac{1}{\delta}; T_D = T_{ОБ}; k_6 = \frac{\delta k_1}{1 + \delta k_1}; T_6 = \frac{T_{ОБ}}{1 + \delta k_1}.$$

За ПИД- регулатор:

$$W(p) = k_p \left(T_D p + 1 + \frac{1}{T_{И}p} \right) \frac{k_6 T_6 p}{T_6^2 p^2 + \zeta T_6 p + 1},$$

където $T_6 = \sqrt{T_1 T_2}; T_D = \frac{T_1 T_2}{T_{12}}; T_{И} = T_{12}; k_p = \frac{1}{\delta} \frac{T_{12}}{T_1}; T_{12} = T_1 + T_2; k_6 = \delta k_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}; \zeta = \frac{1}{2} \frac{T_{12} + \delta k_1 T_1}{\sqrt{T_1 T_2}}.$

Баластното звено внася деформация в честотната характеристика на регулаторите. За ПД- регулатора тази деформация е най-силна при високи честоти, а за ПИ и ПИД- регулатори - при ниски честоти.

Ако изпълнителният механизъм е интегриращо звено, за ПИ и ПИД- регулатори се използват обратни връзки от следния вид:

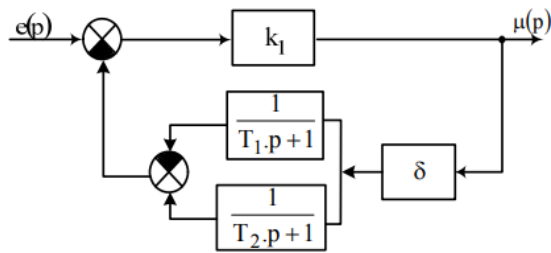
За ПИ- регулатор:

$$W_{OB}(p) = \frac{\delta}{T_{OB}p+1}$$

За ПИД- регулатор:

$$W_{OB}(p) = \frac{\delta}{T_1p+1} \frac{1}{T_2p+1}$$

Настройката на този регулатор при разглежданата структурна схема е също взаимно свързана.



фиг. 178. Структурна схема на реален регулатор

За ПИД- регулатор с пневматични елементи структурната схема може да бъде от вида, показан на **фиг. 178**. Обратната връзка съдържа две апериодични звена, чиито изходни сигнали се изваждат един от друг.

При стойности на коефициента на усилване $k_1 \ll \infty$, може да се запише:

$$W(p) = \frac{\mu(p)}{x(p)} = \frac{k_1}{1 + \delta k_1 \left(\frac{1}{1 + T_2 p} - \frac{1}{1 + T_1 p} \right)}$$

или
$$W(p) = k_p \left(1 + T_D p + \frac{1}{T_I p} \right) k_6 \frac{T_6}{T_6^2 p^2 + \zeta T_6 p + 1}$$

където $k_p = \frac{1}{\delta} \frac{T_1 + T_2}{T_1 - T_2}$; $T_D = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$; $T_I = T_1 T_2$; $k_6 = \delta k_1 \frac{T_1 - T_2}{\sqrt{T_1 T_2}}$; $T_6 = \sqrt{T_1 T_2}$; $\zeta = \frac{1}{2} \frac{T_1 + T_2 + \delta k_1 (T_1 - T_2)}{\sqrt{T_1 T_2}}$.

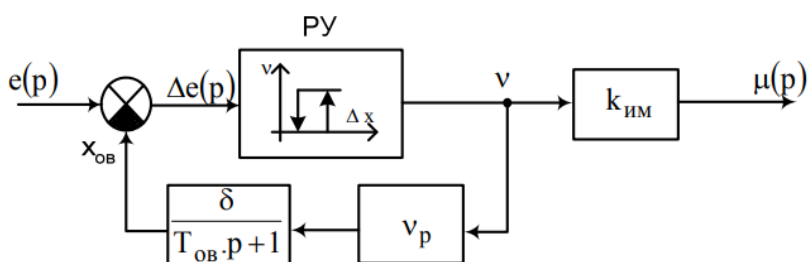
✓ **Структурни схеми с релеен усилвател, обхванат с обратна връзка**

Регулаторът формира непрекъснат във времето изходен сигнал, който след усилване действа чрез регулиращия орган на обекта. Усилвателите на непрекъснат сигнал са по-сложни и по- скъпи устройства (например постоянно-токовите усилватели) в сравнение с релейните усилватели. С цел да се намалят габаритите на регулатора, да се отслаби влиянието на товара от регулиращия орган върху характеристиката на регулатора, се използват структурни схеми на регулатори с релейни усилватели.

Тези усилватели могат да бъдат двупозиционни и трипозиционни. Техническото изпълнение на релейните регулатори е по-просто, отколкото тези с непрекъснато действие, т.е. линейните регулатори.

Релейните електронни регулатори, в зависимост от местните обратни връзки, могат да функционират като линейни и като позиционни (нелинейни). Известно е, че една система е нелинейна, когато съдържа поне едно нелинейно звено. От гледна точка на ТАУ, линейният регулатор не би трябвало да може да формира линеен закон на регулиране. В действителност чисто линеен закон той не може да формира, но приближението, с което го реализира, е напълно достатъчно за нуждите на практиката. Местните обратни връзки, които се използват, способстват за формиране на линейни закони на регулиране.

Нека бъде разгледана структурна схема на двупозиционен релейен усилвател, обхванат с обратна връзка - апериодично звено (*фиг. 179*).



фиг. 179. Структурна схема на релейен регулатор [57]

Последователно на релейния усилвател РУ е включено пропорционално звено с коефициент на пропорционалност $k_{им}$. Този коефициент е равен на големината на технологичната величина. Величината v е безразмерна и приема само две стойности - $v = 0$ и $v = 1$.

Идеализираната характеристика на регулатор с линеен усилвател ($k_1 \rightarrow \infty$), обхванат с обратна връзка, има вида:

$$W(p) = \frac{1}{W_{об}(p)}$$

Въз основа на структурната схема от *фиг. 1* може да се запише следната предавателна функция:

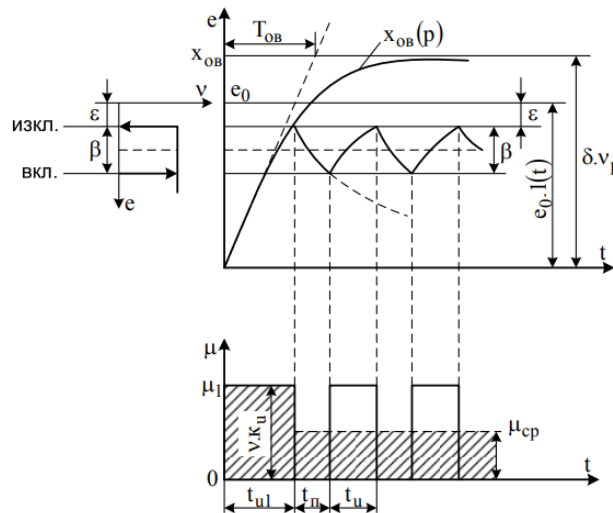
$$W(p) = \frac{\mu(p)}{\mu(x)} = \frac{1}{W_{об}(p)} k_{им}$$

Или

$$W(p) = \frac{k_{им}(T_{об}p + 1)}{\delta v_p} = k_p(T_D p + 1),$$

където $k_p = \frac{k_{ИМ}}{\delta v_p}$; $T_D = T_{ОВ}$.

Тази предавателна функция съответства на ПД- регулатор. Това лесно се потвърждава, ако се разгледат преходните процеси (*фиг. 180*).



фиг. 180. Преходни процеси в регулатор с релеен усилвател [57]

В момента $t = 0$, входният сигнал x нараства до стойност $x = x_0$ и релейният усилвател се задейства. На изхода му се появява сигнал $\mu = \mu_1$ за времето $t_{И1}$.

Вследствие на отрицателната обратна връзка (ОВ), сигналът на входа на релейния усилвател $\Delta x = x_0 - x_{ОВ}$, с течение на времето намалява и при $x_0 = x_{ОВ}$ той трябва да изключи. Всъщност изключването става малко по-рано, при разсъгласуване $\Delta x = \epsilon$ или при сигнал от обратната връзка $x_{ОВ} = x_0 - \epsilon$. Тук ϵ е зона на нечувствителност на релейния усилвател (РУ). След изключване изходната величина μ (респективно ν) става нула и сигналът от ОВ започва по експонента да намалява. При разсъгласуване $\Delta x = x_0 - x_{ОВ} = \epsilon + \beta$ (β е хистерезисна зона на РУ), т.е. когато на входа на РУ постъпи сигнал, съответстващ на неговия праг на задействане, той се превключва. $x_{ОВ}$ отново започва да нараства. РУ повторно се изключва и т.н. Този пулсиращ режим продължава докато на входа на регулатора има сигнал.

За нормален режим на работа е необходимо да бъде изпълнено условието:

$$\epsilon + \beta = x_{зад} < x < \delta v_p$$

Изменението на изходния сигнал μ се представя във вид на импулсна поредица, за която лесно може да се види, че

$$\mu_{cp} = \frac{\mu_1 t_{И}}{t_{И} + t_{П}} = \frac{\nu k_{ИМ} t_{И}}{t_{И} + t_{П}} = k_p x,$$

$$\frac{S_d}{\mu_{cp}} = \frac{vk_{им}t_{и1}}{\mu_{cp}} = T_d = \frac{vk_{им}t_{и1}}{\frac{vk_{им}t_{и1}}{t_{и1} + t_{п}}} = \frac{t_{и1}}{t_{и1} + t_{п}} = cT_{пЕР}$$

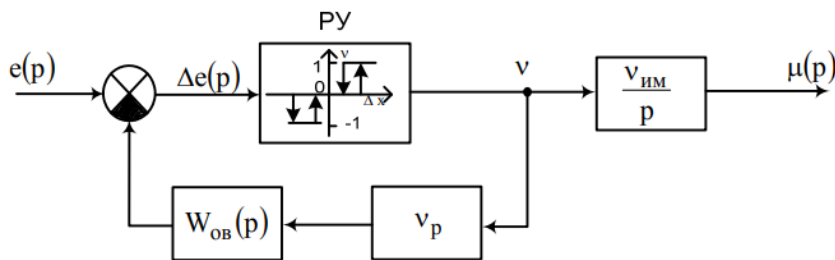
където μ_{cp} е средната стойност на импулсите без първия, S_d - площта на първия импулс, T_d - диференцираща времеконстанта.

Двупозиционният релеен усилвател, обхванат с обратна връзка, действа като широчинно- импулсен модулатор.

В характера на изменение на изходния сигнал във времето се забелязва прилика с характеристиката на ПД- регулатор с непрекъснато действие. При скокообразно изменение на входния сигнал x , на изхода се появява един по-дълъг импулс в началото, както е при ПД- регулаторите (фиг. 2, щрихованата част). Параметри за настройка на регулатора са k_p и T_d .

Чрез друг вид обратна връзка може да бъде получен и друг закон на регулиране.

На **фиг. 181** е показана структурна схема на регулатор с трипозиционен релеен усилвател, обхванат с обратна връзка. За разлика от схемата на **фиг. 179**, тук изходът на релейния усилвател се подава на интегриращ изпълнителен механизъм (ИМ). Изходният сигнал на РУ може да приема три стойности: $v = \pm 1$ и $v = 0$. ИМ е с постоянна скорост на движение, числено равна на $V_{им}$.



фиг. 181. Структурна схема на реален регулатор

Обикновено обратната връзка представлява едно или две апериодични звена. Нека тази ОВ е следното апериодично звено от първи ред:

$$W_{об}(p) = \frac{\delta}{T_{об}p + 1}$$

Ако се допусне, че зоните на нечувствителност и хистерезис са малки, т.е. $\varepsilon + \beta \rightarrow 0$ може да се замени релейният усилвател с линеен, чийто коефициент на усилване $k_1 \rightarrow \infty$. Тогава предавателната функция на релейния усилвател ще бъде:

$$W_{ру}(p) = \frac{v(p)}{x(p)} = \frac{k_1}{1 + v_p W_{об}(p) k_1}$$

$$W_{py}(p) \approx \lim_{k_1 \rightarrow \infty} \frac{k_1}{1 + v_p W_{OB}(p) k_1} = \frac{1}{v_p W_{OB}(p)}$$

За предавателната функция на регулатора може да се запише:

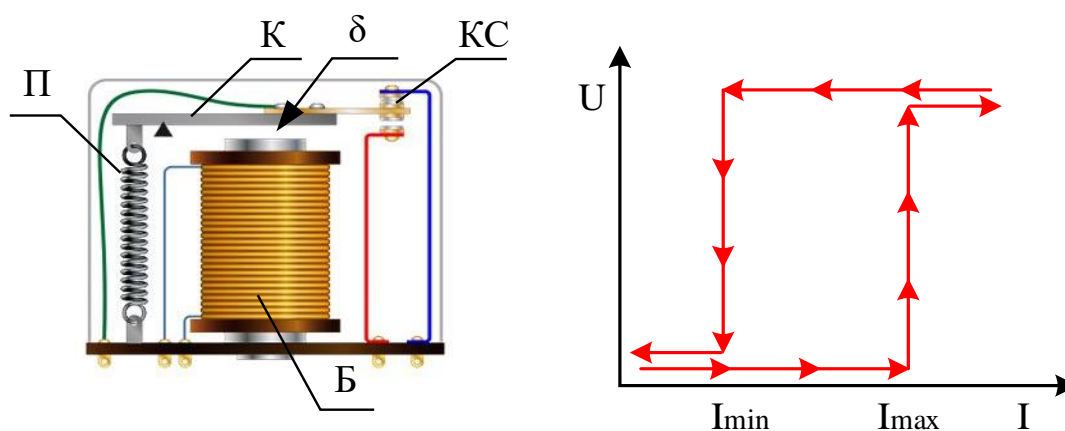
$$W(p) = \frac{\mu(p)}{x(p)} = \frac{W_{py}(p) V_{ИМ}}{p}, \text{ където } W_{py}(p) = \frac{1}{v_p W_{OB}(p)}; W_{OB}(p) = \frac{\delta}{T_{OB} p + 1}.$$

След заместване:

$$W(p) = \frac{(T_{OB} p + 1) V_{ИМ}}{p \delta v_p} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{ИП}} \right), \text{ където } k_p = \frac{V_{ИМ} T_{OB}}{\delta v_p}; T_{И} = T_{OB}.$$

На *фиг. 182* е показана схемата на електромагнитно реле и релейната характеристика.

За изходна величина е прието напрежението на товара, а за входна - токът през бобината.

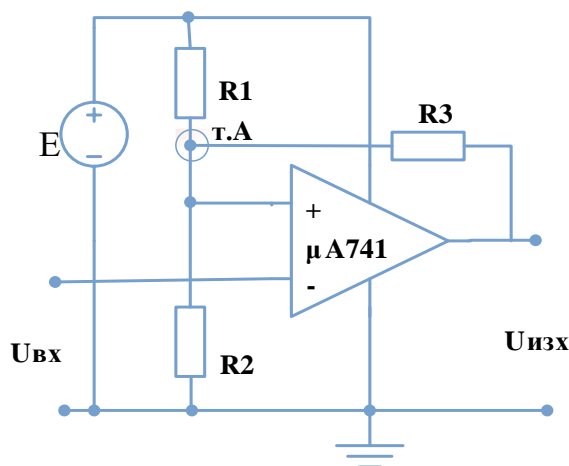


фиг. 182. Схема на електромагнитно реле и релейна характеристика [56]

Магнитопроводът МП осигурява магнитна верига, която включва още котвата К и въздушната междина δ . Ако токът през бобината започне да се увеличава, той трябва да достигне определена стойност I_{max} , за да може силата на електромагнита да преодолее противодействащата сила на пружината П. Тогава котвата се привлича и въздушната междина δ клони към нула. Контактната система КС включва веригата на товара. Електромагнитната система преминава в ново състояние, в което няма въздушна междина. Магнитното съпротивление на магнитната верига става по-малко и вече не е нужен толкова силен ток като I_{max} , за да бъде задържана котвата в това състояние, т.е. да бъде преодоляна силата на пружината. Следователно, ако токът се намалява под I_{max} , електромагнитното реле няма веднага да изключи. Това ще стане, когато токът през бобината му достигне стойност I_{min} , която е по-малка от I_{max} .

На *фиг. 183* е показана електронна схема, която притежава релейна характеристика. Напрежението в т. А се определя от съпротивления на делителя R_1 и R_2 . Ако тези съпротивления са равни, напрежението в точка А би било наполовина. Във всеки момент от

времето обаче съпротивлението R_3 се явява паралелно на едно от другите две съпротивления. Когато R_3 е паралелно на R_2 , долното съпротивление на делителя се определя от еквивалентното им съпротивление, което е по-малко от R_2 и за това напрежението на т. А ще намалее под средната стойност на захранващото напрежение. Така ще се формира стойност U_{amin} . Стойността U_{amax} се формира, когато R_3 се яви паралелно R_1 .



фиг. 183. Електронна схема с релейна характеристика

Защо R_3 да се явява паралелно на съпротивленията на делителя? Защото операционният усилвател (ОУ) работи като компаратор, т.е. работи с максималния си коефициент на усилване, при което той е винаги в едно от двете си наситени състояния. За едното състояние може да се смята, че $U_{изх} \approx E$, а за другото може да се смята, че $U_{изх} \approx 0$. Именно при тези състояния съпротивлението R_3 се свързва от компаратора ту към плюса, ту към минуса на захранващия източник.

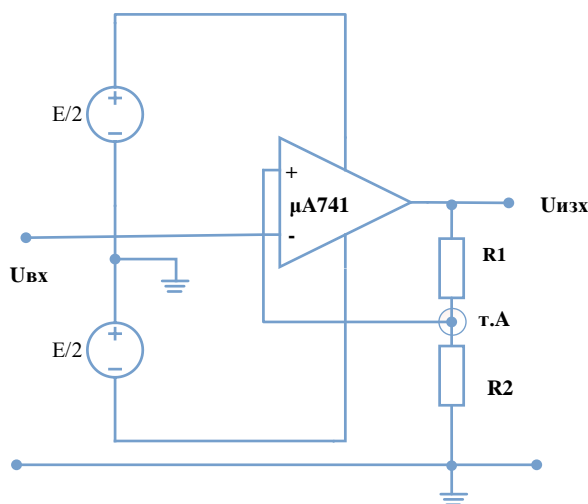
Нека $U_{вх}$ в схемата е 0 и започне да нараства. Напрежението $U_{изх}$ ще бъде +E, защото входното напрежение се прилага на инвертиращия вход. Следователно напрежението в т. А ще има стойност U_{amax} .

Това, че входното напрежение е започнало да нараства и не е нула, все още не дава основание да се промени състоянието на изхода на операционният усилвател (ОУ). За да настъпи промяна, то трябва да достигне U_{amax} и да стане съвсем малко по-голямо от него. Тогава инвертиращият вход на ОУ става по-положителен от неинвертиращия, разликата се усилва около 100000 пъти и на изхода се формира напрежение $U_{изх} \approx 0$.

В този момент съпротивлението R_3 се включва паралелно на R_2 и напрежението в т. А става U_{amin} . За да се възстанови високото напрежение на изхода, напрежението на инвертиращия вход не е достатъчно да стане по-малко от U_{amax} , а трябва да достигне U_{amin} и

да стане съвсем малко по-ниско от него. Едва тогава изходното напрежение би станало $U_{\text{изх}} \approx E$, при което R_3 ще се яви паралелно на R_1 и напрежението в т. А ще стане U_{amax} .

Тук се наблюдава действието на положителна обратна връзка, която води до така наречения лавинообразен процес, т.е. изключително бърз преход от едното състояние в другото. Причината е това, че при нарастване и при намаляване на напрежението в т. А, ОУ, макар и за кратко, преминава през активен режим. Тогава изходното напрежение навлиза в някакво междинно състояние, при което потенциала на т. А се променя, а входният потенциал остава непроменен. От това се увеличава разликата на диференциалния вход на ОУ, от което изменението на изходното напрежение се увеличава. Това води до нова промяна на напрежението в т. А, от което разликата на диференциалния вход нараства още повече, изходното напрежение също, и така, докато се стигне до наситеното състояние на ОУ.



фиг. 184. Тригер на Шмит с ОУ

От времето на ламповата електроника всички устройства с един вход и с релейна характеристика носят името тригер на Шмит. С други думи показаната схема е тригер на Шмит с ОУ и несиметрично захранващо напрежение. На **фиг. 184** е показан тригер на Шмит с ОУ и симетрично захранващо напрежение.

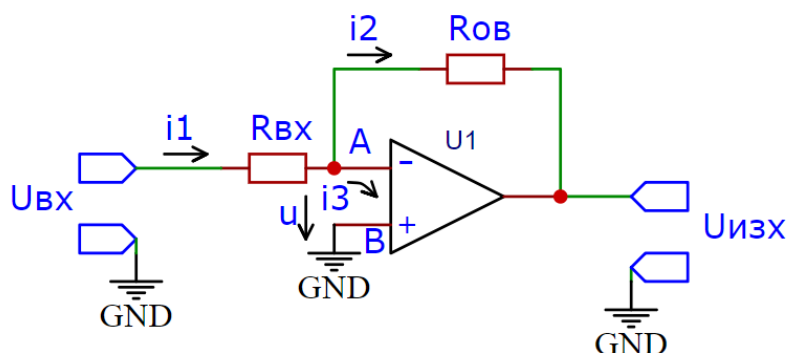
Действието на схемата е аналогично, с тази разлика, че изходът на ОУ директно управлява делителя R_1R_2 . Когато изходът е в състояние $+E$, то напрежението в т. А е $+U_a$, а когато е $-E$, напрежението е $-U_a$. Именно това са двете стойности за сравнение, които определят зоната на хистерезиса. За да се преобърща тригера, входното напрежение също трябва да бъде двуполярно.

3.2. ЕЛЕКТРОННИ РЕГУЛАТОРИ

3.2.1. ЕЛЕМЕНТИ И ВЪЗЛИ НА ЕЛЕКТРОННИТЕ РЕГУЛАТОРИ

✓ Линеен усилвател с обратна връзка

Операционният усилвател (ОУ) притежава много голям коефициент на усилване по напрежение и стръмна статична характеристика. Незначителен входен сигнал е в състояние да доведе операционния усилвател до насищане. За да се намали коефициентът на усилване до стойности, подходящи за нуждите на електронните регулатори, се въвежда т. нар. отрицателна обратна връзка.



фиг. 185. Операционен усилвател (ОУ) с обратна връзка

На **фиг. 185** е показана схема на операционен (линеен) усилвател, обхванат с обратна резисторна връзка. Входното съпротивление на операционния усилвател е много голямо и следователно токът i_3 има много малка стойност.

В случая може да се запише следното уравнение:

$$i_1 = i_2 + i_3,$$

$$u \approx 0, i_3 \approx 0.$$

Следователно $i_1 \approx i_2$.

От друга страна,

$$i_1 = \frac{u_{вх}}{R_{об}}, i_2 = \frac{u_{изх}}{R_{об}}, i_3 = \frac{u_{изх}}{R_{вх}}.$$

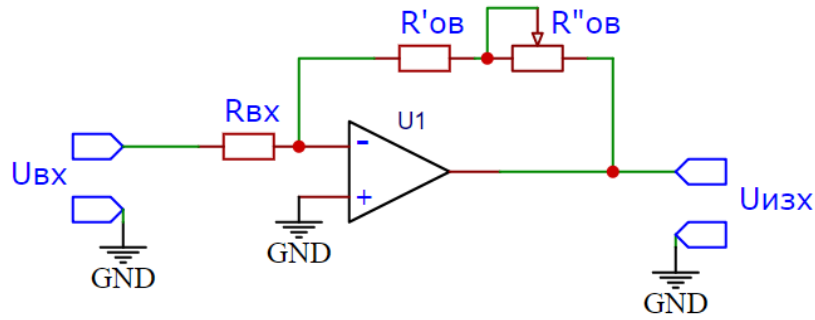
Замества се и се получава:

$$u_{вх} = i_1 R_{вх}, u_{изх} = i_2 R_{об}.$$

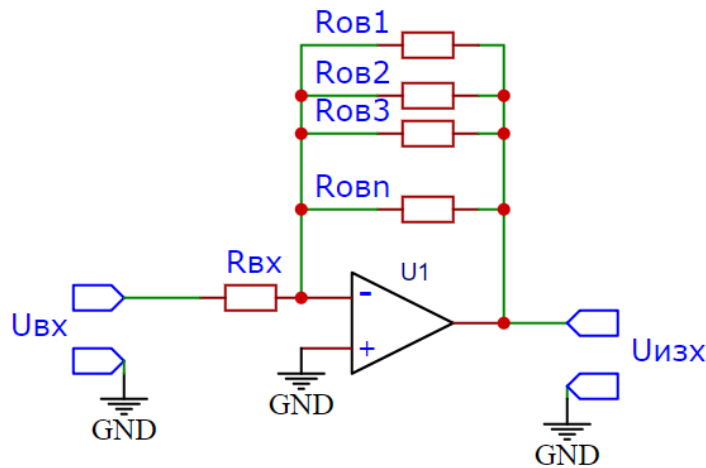
Замества се в $k_y = \frac{i_2 R_{об}}{i_1 R_{вх}} = \frac{R_{об}}{R_{вх}}$.

Вижда се, че коефициента на усилване k_y се получава с отрицателен знак. Това идва от факта, че входното $u_{вх}$ и изходното $u_{изх}$ напрежения са с противоположен поляритет.

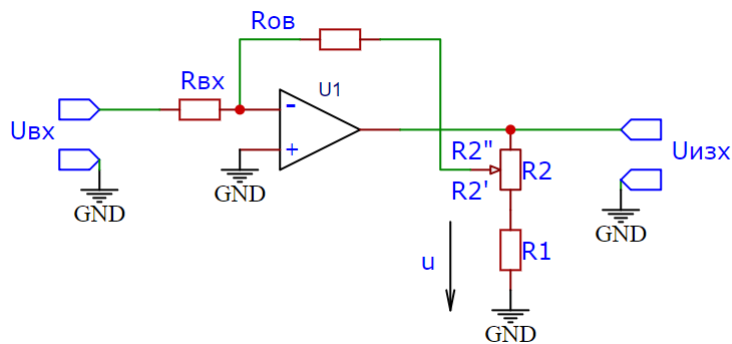
Когато $R_{ОВ} = R_{ВХ}$, коефициентът на усилване е единица. Усилвателят работи като инвертор.



а)



б)



в)

фиг. 186. Схеми на ОУ с регулируем коефициент на усилване

Регулиране стойността на k_y може да става плавно (*фиг. 186, а и в*) или стъпално (*фиг. 186, б*). Променят се стойностите на съпротивлението в обратната връзка. За схемата от *фиг.186, в* може да се запише:

$$u = u_{\text{изх}} \cdot \frac{R_1 + \beta R_2}{R_1 + R_2},$$

където $\beta = \frac{R_2'}{R_2}$ ($0 \leq \beta \leq 1$).

При условие, че $R_1 = R_2$

$$u = u_{\text{изх}} \cdot \frac{R_1 + \beta R_1}{R_1 + R_1} = u_{\text{изх}} \cdot \frac{1 + \beta}{2}.$$

Определя се $u_{\text{изх}}$

$$u_{\text{изх}} = u \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \beta R_2}.$$

Замества се $\frac{R_1 + R_2}{R_1 + \beta R_2} = \alpha \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \geq \alpha \geq 1 \right)$.

За k_y се получава $k_y = \frac{R_{\text{ОВ}}}{R_{\text{ВХ}}} \cdot \alpha$.

Напрежението u , което се предава чрез обратната връзка към инвертиращия вход е по-малко от $u_{\text{изх}}$. Като се увеличава R_2 и намалява, а оттам коефициентът на усилване k_y расте. От условието $R_1 = R_2$

$$k_y' = \frac{u_{\text{изх}}}{u} = \frac{u_{\text{изх}}}{u_{\text{ВХ}} \cdot \frac{1 + \beta}{2}} = \frac{u_{\text{изх}}}{u_{\text{ВХ}}} \cdot \frac{2}{1 + \beta} = k_y \cdot \frac{2}{1 + \beta}.$$

Когато β има стойност нула

$$k_y' = 2 \cdot k_y,$$

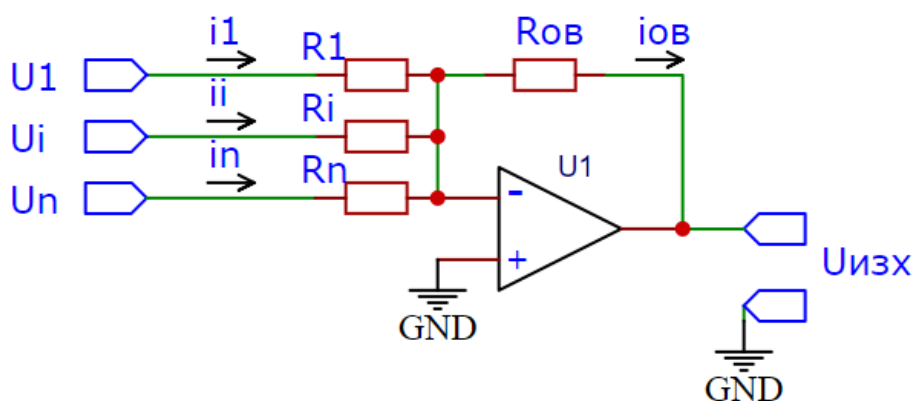
а когато стойността на β е единица

$$k_y' = k_y.$$

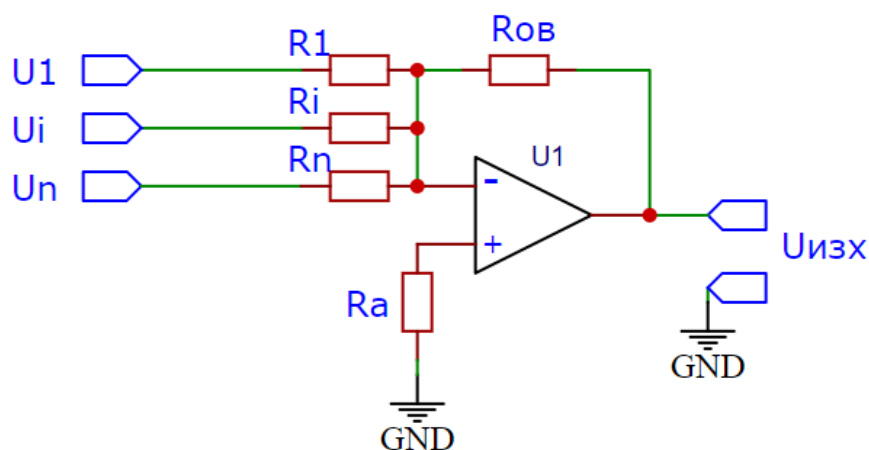
С други думи, формираният коефициент на усилване k_y може плавно (чрез R_2) да се променя от k_y до $2.k_y$.

✓ *Сумиране и усредняване на сигнали (чрез усилвател с обратна връзка).*

С помощта на операционни усилватели с обратна връзка може лесно да се извършва едновременно сумиране на повече входни сигнали. На *фиг. 187* е показана инвертираща схема за сумиране и усредняване на напрежения.



а)



б)

фиг. 187. Схеми на суматор-усилватели

Тъй като в схемата неинвертиращият вход има потенциал маса, то инвертиращият вход и дясната страна на входните резистори $R_1 - R_n$ са условно също замасени. Съгласно закона на Ом, токовете през входните резистори могат да бъдат изразени както следва:

$$i_1 \approx \frac{u_1}{R_1}; \quad i_i \approx \frac{u_i}{R_i}; \quad i_n \approx \frac{u_n}{R_n}.$$

Токът $i_{\text{ОВ}}$ зависи от $R_{\text{ОВ}}$

$$i_{\text{ОВ}} = \frac{u_{\text{ИЗХ}}}{R_{\text{ОВ}}}.$$

За точката на разклонение (при пренебрежимо малка стойност на тока през операционния усилвател към маса) :

$$i_{\text{ОВ}} \approx i_1 + \dots + i_i + \dots + i_n; \quad i_{\text{ОВ}} \approx \sum_{i=1}^n i_i.$$

или
$$-\frac{u_{\text{ИЗХ}}}{R_{\text{ОВ}}} \approx \frac{u_1}{R_1} + \dots + \frac{u_i}{R_i} + \dots + \frac{u_n}{R_n}.$$

Решава се уравнението спрямо $u_{\text{ИЗХ}}$

$$u_{\text{ИЗХ}} \approx -R_{\text{ОВ}} \left(\frac{u_1}{R_1} + \dots + \frac{u_i}{R_i} + \dots + \frac{u_n}{R_n} \right), \quad u_{\text{ИЗХ}} = -R_{\text{ОВ}} \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{R_i}.$$

Ако се приеме, че всички входни резистори са равни

$$R_1 = \dots = R_i = \dots = R_n = R,$$

тогава се получава изразът $u_{\text{ИЗХ}} = -\frac{R_{\text{ОВ}}}{R} \cdot (u_1 + \dots + u_i + \dots + u_n).$

Исходното напрежение $u_{\text{ИЗХ}}$ става равно на сумата от входните, при коефициент на усиление $k_y = 1$.

$$u_{\text{ИЗХ}} = -(u_1 + \dots + u_i + \dots + u_n), \quad u_{\text{ИЗХ}} = -\sum_{i=1}^n u_i.$$

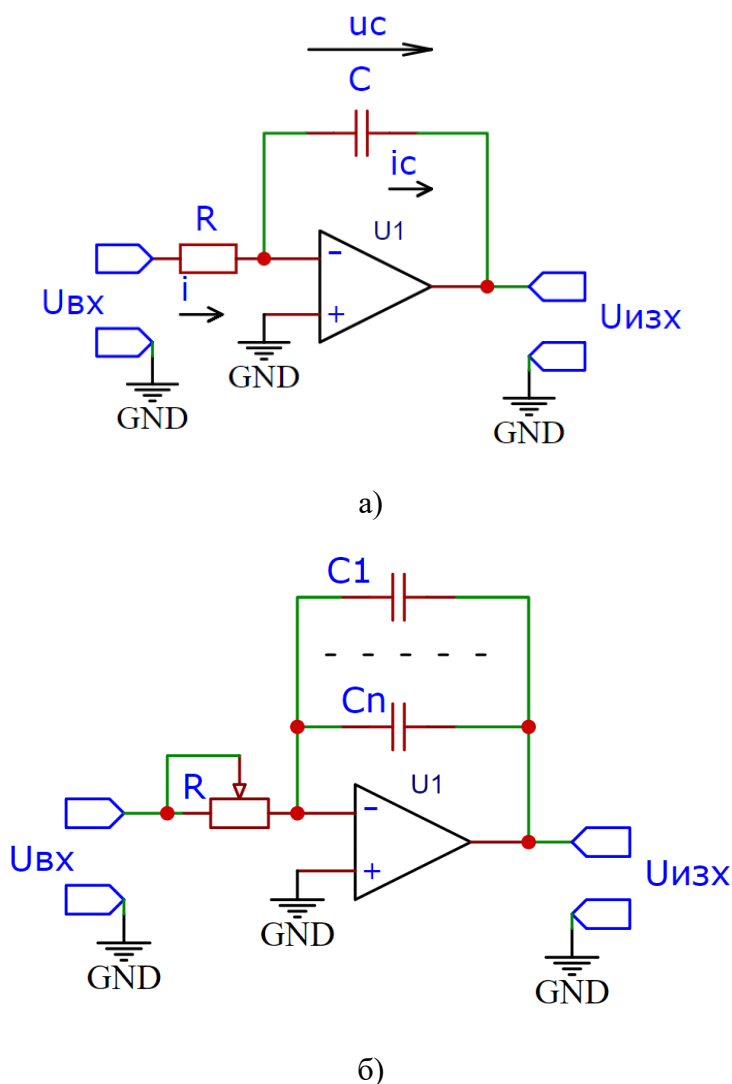
За стабилизация на работата на схемата от **фиг.187**, а, към неинвертиращия вход се присъединява резистор R_a (**фиг.187,б**), чиято стойност е равна на еквивалентното съпротивление от стойностите на входните резистори $R_1 \div R_n$ и $R_{\text{ОВ}}$

$$R_a = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_i} + \dots + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{\text{ОВ}}}}.$$

При различни стойности на резисторите от входа и обратната връзка, схемата извършва усредняване и едновременно усилване.

✓ *Интегриране на сигнали (чрез усилвател с обратна връзка)*

В схемата от **фиг. 188, а)** вместо резистор, във веригата за обратна връзка е поставен кондензатор. В този случай, изходното напрежение по форма представлява отрицателен интеграл от входното напрежение.



фиг. 188. Схеми на интегратор

И тук се извършват същите допускания, както в преди това разгледаните схеми. Потенциалът на отрицателния вход на ОУ е равен на потенциала на масата. Тогава може да се запише:

$$i = \frac{u_{\text{ВХ}}}{R}.$$

Поради голямото съпротивление на инвертиращия вход, практически този ток преминава през кондензатора C и го зарежда.

Лявата плоча на кондензатора е практически замасена. Поради това, изходното напрежение на схемата е равно на напрежението върху кондензатора

$$\text{или } u_{\text{ИЗХ}} = -\frac{1}{R \cdot C} \int u_{\text{ВХ}} dt.$$

В последното равенство $T_{\text{и}} = R \cdot C$ е интегрираща времеконстанта. От операторния вид на уравнението

$$u_{\text{ИЗХ}} = -\frac{1}{T_{\text{и}} \cdot p} \cdot u_{\text{ВХ}}$$

може да се състави предавателната функция

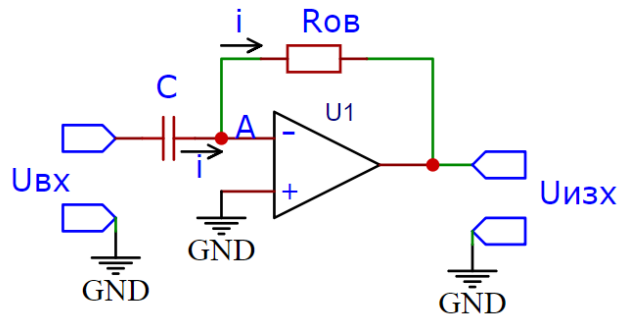
$$W(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} \cdot p}.$$

Регулирането на $T_{\text{и}}$ може да става плавно (чрез R) и стъпално посредством превключване на $C_1 \div C_n$.

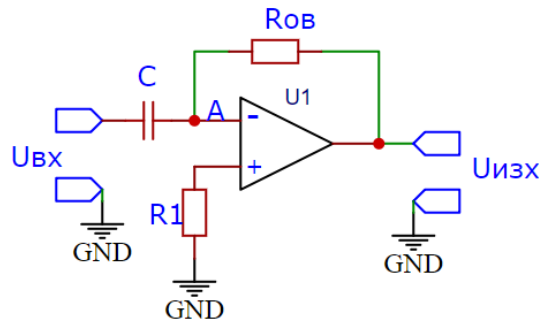
✓ *Диференциране на сигнали (чрез усилвател с обратна връзка).*

За осъществяване на операцията диференциране, във входната верига на усилвателя се свързва кондензатор C (*фиг. 189*). Изходното напрежение, в този случай, представлява производна на входното напрежение. Точката A практически е замасена. Токът i през кондензатора C и през резистора $R_{\text{ОВ}}$ е един и същ. Тогава

$$i = C \frac{du_c}{dt}.$$



а)



б)

фиг. 189. Схеми на диференциатор

Дясната плоча на кондензатора е замасена, поради това

$$u_{\text{вх}} = u_c \text{ ,}$$

От друга страна, $u_{\text{изх}} = i \cdot R_{\text{ов}}$.

След заместване

$$\frac{u_{\text{изх}}}{R_{\text{ов}}} = -C \frac{du_{\text{вх}}}{dt}$$

или

$$u_{\text{изх}} = -R_{\text{ов}} \cdot C \frac{du_{\text{вх}}}{dt} \text{ .}$$

От операторния вид на последното уравнение

$$u_{\text{изх}} = -T_{\text{д}} \cdot p \cdot u_{\text{вх}} \text{ ,}$$

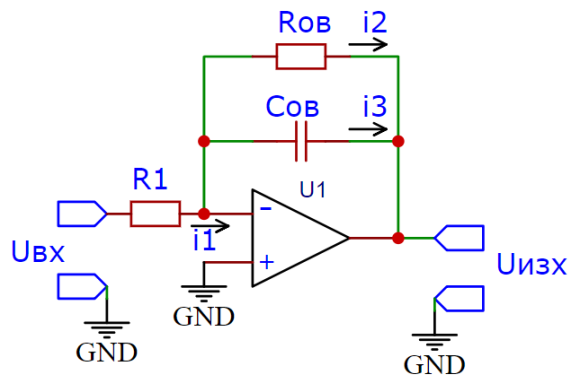
където $T_{\text{д}} = R_{\text{ов}} \cdot C$ е времеконстанта на диференциране, може да се състави предавателната функция

$$W(p) = T_{\text{д}} \cdot p \text{ .}$$

Схемата от **фиг. 189, б)** има по-добри показатели при $R_1 = R_{\text{ов}}$.

✓ *Филтриране на сигнали (чрез усилвател с обратна връзка).*

Филтриране на пулсациите с по-висока честота на входния сигнал се постига посредством включване на паралелно съединени резистор и кондензатор (фиг. 190).



фиг. 190. Схема на електронен филтър

Замества се

$$\frac{u_{\text{ВХ}}}{R_1} = \frac{u_{\text{ИЗХ}}}{R_{\text{ОВ}}} + C_{\text{ОВ}} \frac{du_{\text{ИЗХ}}}{dt}.$$

Преобразува се

$$T_a \frac{du_{\text{ИЗХ}}}{dt} + u_{\text{ИЗХ}} = k \cdot u_{\text{ВХ}},$$

където $T_a = R_{\text{ОВ}} \cdot C_{\text{ОВ}}$ е времеконстанта, $k = \frac{R_{\text{ОВ}}}{R_1}$ е предавателен коефициент.

Представя се уравнението в операторен вид

$$(T_a \cdot p + 1)u_{\text{ИЗХ}} = k \cdot u_{\text{ВХ}}$$

От уравнението съставяме предавателната функция

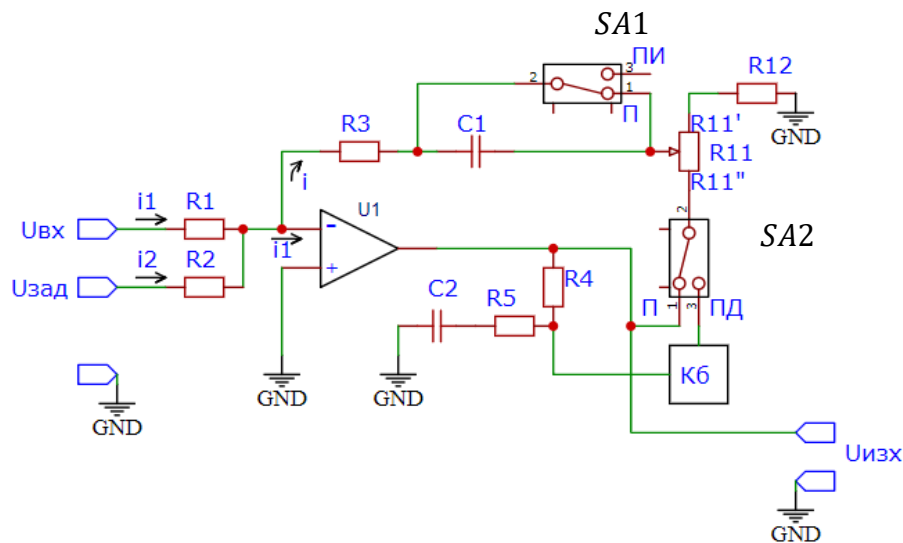
$$W(p) = \frac{k}{T_a \cdot p + 1}.$$

3.2.2. СХЕМА НА ЕЛЕКТРОННИТЕ РЕГУЛАТОРИ

С помощта на операционен усилвател, буферен възел (изпълнен на транзистори) и набор от съпротивления и кондензатори, може да бъде изградена сравнително проста схема на

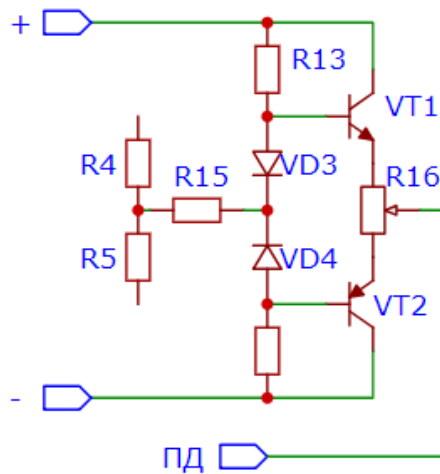
електронен ПИД- регулатор. Чрез превключване се осигурява възможност за формиране и на други закони (П, ПИ и ПД).

На *фиг. 191* е изобразена принципната схема на регулатора.



фиг. 191. Принципна схема на регулатора

На *фиг. 192* е показана схемата на буфера.



фиг. 192. Принципна схема на буфера

Буферът K_{δ} има високо входно и ниско изходно съпротивление. Той не е обхванат с обратна връзка. Изпълнен е с комплементарни транзистори VT1 и VT2. Диодите VD3 и VD4 създават преднапрежение за базите на транзисторите. Съпротивлението R16 ограничава токовете през емитер - колекторните вериги на VT1 и VT2.

✓ *Формиране на пропорционален (П) закон.*

Превключвателите SA1() и SA2 се поставят в положение „П“.

В този случай, кондензаторът C1 се шунтира, а обратната връзка (ОВ) се присъединява направо към изхода на операционния усилвател DA.

Операционният усилвател изпълнява функциите на суматор. Той формира входното разсъгласуване Δu

$$u = u_{\text{вх}} + u_{\text{зад}}.$$

Входният и задаващият сигнали са с противоположна полярност. При условие $R_1 = R_2$, може да се запише следния израз:

$$u_{\text{изх}} = \frac{R_3}{R_1} (u_{\text{вх}} + u_{\text{зад}}) \cdot \alpha,$$

$$\text{където } \alpha = \frac{R_{11} + R_{12}}{R'_{11} + R_{12}}; \quad \frac{1}{\alpha} = \frac{R'_{11} + R_{12}}{R_{11} + R_{12}}; \quad R'_{11} = \beta R_{11}; \quad \beta = \frac{R'_{11}}{R_{11}}.$$

Коефициентът на регулатора k_p може да се променя стъпално чрез R_3 и да се настройва плавно с R_{11} .

$$k_p = \frac{R_3}{R_1} \cdot \alpha.$$

Предавателната функция на П регулатора по разгледаната схема ще бъде

$$W(p) = k_p.$$

✓ *Формиране на пропорционално-интегрален (ПИ) закон.*

Превключвателите SA1 и SA2 се поставят в положения, както следва: SA1- ПИ, SA2- П.

Във веригата на обратната връзка кондензаторът C1 се оказва свързан последователно на съпротивлението R3. Тогава относно връзката на изходното с входните напрежения, в операторен вид, можем да запишем

$$u_{\text{изх}} = - \left(\frac{R_3 + \frac{1}{pC_1}}{R_1} \right) \cdot (u_{\text{вх}} + u_{\text{зад}}) \cdot \alpha, \quad (u_{\text{вх}} + u_{\text{зад}} = \Delta u),$$

$$u_{\text{изх}} = -\frac{R_3}{R_1} \cdot \alpha \left(1 + \frac{1}{pR_3C_1} \right) \cdot \Delta u,$$

където $k_p = -\frac{R_3}{R_1} \cdot \alpha$, а $T_{\text{и}} = R_3C_1$ е времеконстанта на интегриране.

От операторния вид на уравнението може да се премине към съответната предавателна функция.

$$u_{\text{изх}} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} \cdot p} \right) \cdot \Delta u,$$

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} \cdot p} \right).$$

В този случай настройката на k_p се извършва чрез R_{11} , а $T_{\text{и}}$ може да се променя посредством R_3 и C_1 .

✓ *Формиране на пропорционално- диференциален (ПД) закон.*

Превключвателите SA1 и SA2 се превключват в следните положения: SA1- П, SA2- ПД. В схемата от *фиг. 191*, кондензаторът C1 отново се дава накъсо. Изходът (краят) на обратната връзка през буфера k_{δ} се присъединява към точката с потенциал u_2 . Коефициентът на усилване на буфера е приблизително единица ($k_{\delta} \approx 1$).

Напрежението u_2 може да се определи по израза

$$u_2 = u_{\text{изх}} \frac{R_5 + \frac{1}{pC_2}}{R_4 + R_5 + \frac{1}{pC_2}}.$$

Токът през веригата на обратната връзка i представлява сумата от токовете i_1 и i_2 (пренебрегва се токът през операционния усилвател).

$$i = i_1 + i_2$$

или $i = \frac{\Delta u}{R_1}$ (при условие $R_1 = R_2$).

В предвид, че $k_\delta \approx 1$, то

$$u_2^* \approx u_2 = -i \cdot Z_{\text{об}} \cdot \alpha,$$

където $Z_{\text{об}}$ е общо означение на съпротивлението в обратната връзка. В конкретния случай тук $Z_{\text{об}} = R_3$.

След заместване се получава

$$u_2^* = -\frac{\Delta u}{R_1} \cdot Z_{\text{об}} \cdot \alpha = u_{\text{изх}} \frac{R_5 + \frac{1}{pC_2}}{R_4 + R_5 + \frac{1}{pC_2}}.$$

Решава се уравнението спрямо $u_{\text{изх}}$

$$u_{\text{изх}} = -\frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{R_4 + R_5 + \frac{1}{pC_2}}{R_5 + \frac{1}{pC_2}} \cdot \alpha \cdot \Delta u, \quad Z_{\text{об}} = R_3,$$

$$u_{\text{изх}} = -\frac{R_3}{R_1} \cdot \alpha \left(1 + \frac{R_4}{R_5 + \frac{1}{pC_2}} \right) \cdot \Delta u,$$

$$u_{\text{изх}} = \frac{R_3}{R_1} \cdot \alpha \left(1 + \frac{p \cdot C_2 R_4}{pC_2 R_5 + 1} \right) \cdot \Delta u.$$

Второто събираемо в скобите представлява реално диференциращо звено

$$\frac{pC_2 R_4}{pC_2 R_5 + 1} = \frac{T_d \cdot p}{T_{d1} \cdot p + 1},$$

където T_d е времекопстанта на диференциране ($T_d = C_2 \cdot R_4$); $T_d = T_{d1}$ при условие $R_4 = R_5$.

Уравнението добива вида:

$$u_{\text{изх}} = k_p \left(1 + \frac{T_d \cdot p}{T_d \cdot p + 1} \right) \Delta u.$$

По него се съставя предавателната функция на ПД- регулатора

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{T_d \cdot p}{T_d \cdot p + 1} \right).$$

Времеконстантата може да се променя стъпално или плавно чрез стойностите на елементите, които я формират ($T_d = C_2 R_4$).

✓ *Формиране на пропорционално-интегрално-диференциален (ПИД) закон.*

Превключвателите SA1 и SA2 се поставят в положения съответно: SA1- ПИ, SA2- ПД. Във веригата на обратната връзка се включват кондензаторът C1 и буферът k_δ .

$$u_2 = u_{\text{изх}} \frac{R_5 + \frac{1}{pC_2}}{R_4 + R_5 + \frac{1}{pC_2}}, \quad (k_\delta \approx 1),$$

$$i = \frac{\Delta u}{R_1}; \quad (R_1 = R_2), \quad u_2^* \approx u_2 = -i \cdot Z_{\text{об}} \cdot \alpha.$$

За разглеждания вариант $Z_{\text{об}} = R_3 + \frac{1}{pC_1}$. След заместване се получава:

$$\Delta u \cdot \frac{R_3 + \frac{1}{pC_1}}{R_1} \cdot \alpha = -u_{\text{изх}} \frac{R_5 + \frac{1}{pC_2}}{R_4 + R_5 + \frac{1}{pC_2}}.$$

Решава се уравнението спрямо $u_{\text{изх}}$

$$u_{\text{изх}} = -\frac{R_3 + \frac{1}{pC_1}}{R_1} \cdot \frac{R_4 + R_5 + \frac{1}{pC_2}}{R_5 + \frac{1}{pC_2}} \cdot \alpha \cdot \Delta u.$$

След преобразуване се достига до израза:

$$u_{\text{изх}} = -\alpha \frac{R_3}{R_1} \left(1 + \frac{1}{R_3 C_1 p} \right) \left(1 + \frac{R_4 C_2 p}{R_5 C_2 p + 1} \right) \Delta u,$$

$$u_{\text{изх}} = -\alpha \frac{R_3}{R_1} \left[1 + \frac{R_4 C_2 p}{R_5 C_2 p + 1} + \frac{1}{R_3 C_1 p} + \frac{R_4 C_2}{R_3 C_1 (R_5 C_2 p + 1)} \right] \Delta u.$$

В последното уравнение първото слагаемо (в скобите) съответства на пропорционално звено, второто - на реално диференциращо звено, третото - на интегриращо звено и четвъртото - на апериодично (паразитно) звено.

За $u_{\text{изх}}$ може да се запише:

$$u_{\text{изх}} = -k_p \left(1 + \frac{T_d \cdot p}{T_{d1} \cdot p + 1} + \frac{1}{T_i \cdot p} + \frac{k_a}{T_a \cdot p + 1} \right) \Delta u,$$

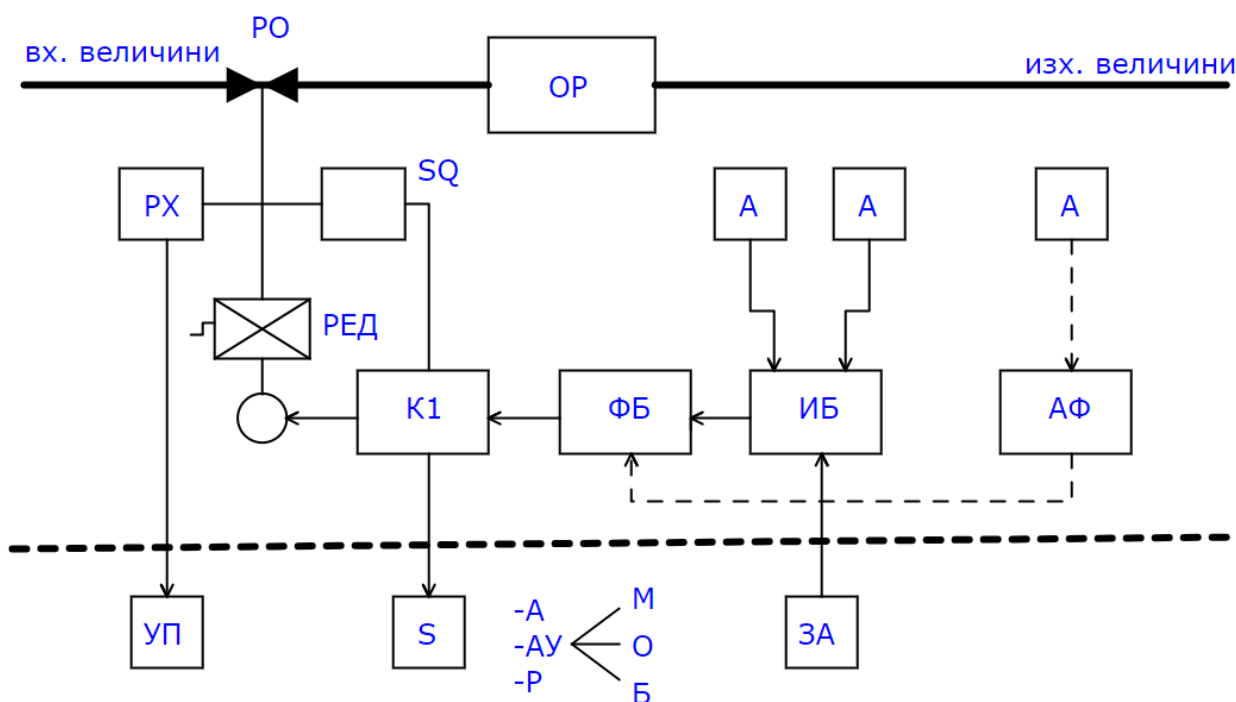
където: $k_p = \frac{R_3}{R_1} \cdot \alpha$; $T_d = R_4 C_2$; $T_{d1} = T_a = R_5 C_2$; $T_i = R_3 C_1$; $k_a = \frac{R_4 C_2}{R_3 C_1} = \frac{T_d}{T_i}$.

Предавателната функция на ПИД- регулатора ще има следния вид:

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{T_d \cdot p}{T_{d1} \cdot p + 1} + \frac{1}{T_i \cdot p} + \frac{k_a}{T_a \cdot p + 1} \right).$$

3.2.3. ЕЛЕКТРОННИ РЕГУЛАТОРИ

Всички промишлени регулатори съдържат еднакви функционални блокове. Какви са те се вижда от изобразената на **фиг. 193**. блокова схема. Регулаторът е включен в едноконтурна САУ, заедно с обекта на регулиране ОР.

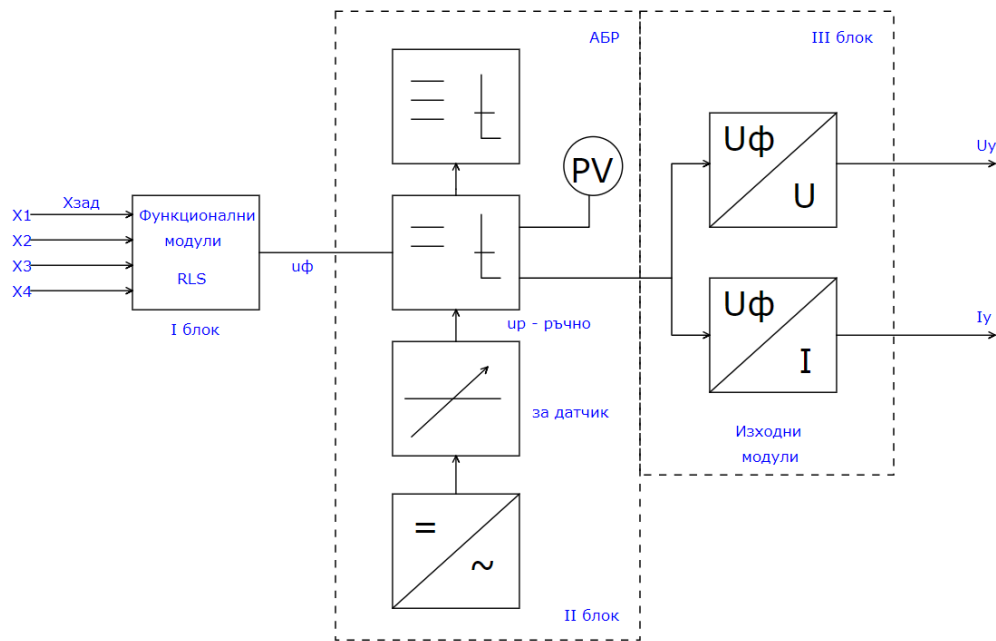


фиг. 193. Блокова схема на промишлен електронен регулатор

Измерените от датчиците Д изходни величини от обекта за регулиране ОР постъпват към измервателния блок ИБ и към диференциатора ДФ (ако има такъв). Разликата от сумираните сигнали от датчика и от задаващото устройство ЗА във вид на разсъгласуване се предава към функционалния блок ФБ. Чрез реверсивния контактор К1 се включва или изключва за движение в една или друга посока асинхронният двигател АД на изпълнителния механизъм. Регулацият орган РО се привежда в движение от АД посредством редуктора РЕД. Крайните положения на РО са блокирани електрически от крайните изключватели SQ. Положението на регулация орган се следи чрез реохорда РХ и може да се наблюдава по указателя на положението УП. С превключвателя S се задава режимът на работа на регулатора. В ръчен режим Р, РО може да се премества посредством ръкохватката на редуктора. При дистанционно управление ДУ, РО може да се премества в посока нарастване (Б), намаляване (М) или да се намира в покой (О). Получаването на П- закон може да стане, ако се въведе твърда обратна връзка към ФБ по положение на РО чрез реохорда РХ. По-сложен закон може да се формира при включване в системата на диференциатор ДФ.

✓ *Аналогови регулатори.*

Това са универсални регулатори. Използват се за регулиране на температура, налягане, разход, концентрация и др. Като блокова схема регулаторът има вида показан на *фиг. 194*.



фиг. 194. Блокова схема на регулатор

I^{ви} блок е звено, в което се изработва μ в съответствие със зададения закон за регулиране.

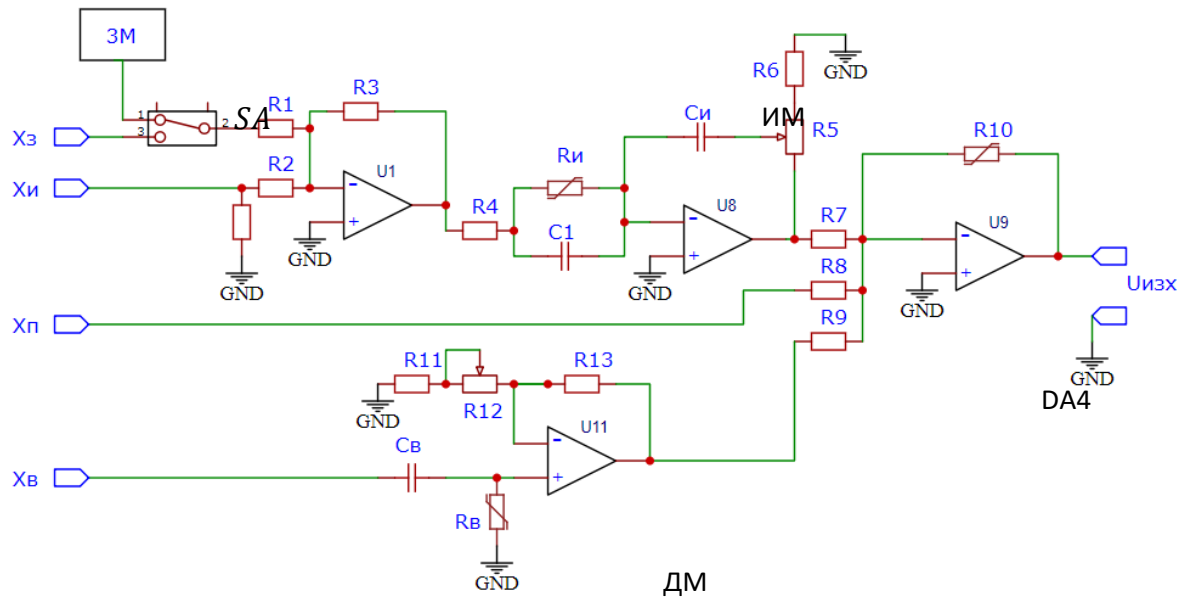
II^{ри} и III^{ти} блокове са самостоятелни. АБР (II^{ри} блок) служи за безударно преминаване от автоматичен режим в ръчен и обратно. Втори блок съдържа “задатчик”, който изработва u_p за ръчно водене на процеса.

III^{ти} блок- изходни модули. Това са схеми, които преобразуват управляващото въздействие μ и u_f в нормиран токов и напреженов сигнал.

Функционалният модул формира закона на регулиране. Той е в състояние да изработва П, ПИ, ПД и ПИД- закони. На **фиг. 195** е показана принципната схема (опростена) на модула (I^{ви} блок).

Входният модул възприема регулираната величина x_n във вид на унифициран напреженов или токов сигнал и го сравнява със зададената величина x_3 , идваща от задаващия модул (ЗМ) или отвън. Входът се превключва чрез превключвателя SA. Операционният усилвател U_1 работи в режим на повторител и формира на изхода си разсъгласуването Δx .

$$\Delta x = u_{изх1} = x_3 - x_n.$$



фиг. 195. Принципна схема (опростена) на функционалния модул

Операционният усилвател U_8 работи като интегратор.

Предавателната функция се получава от вида

$$W(p) = k + \frac{1}{T_i \cdot p},$$

където $k = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{C_1}{C_u}$ е коефициент на пропорционалност, $\alpha = \frac{2}{1 + \beta}$,

$T_i = C_u R_5 \cdot \frac{1 + \beta}{2}$ е времеконстанта на интегриране.

Диференциращата съставка се формира в модула за диференциране ДМ. Той реализира диференциалното уравнение:

$$C_8 \cdot R_8 \frac{du_{изх3}}{dt} + u_{изх3} = C_8 R_8 \cdot k_y \frac{dx}{dt}$$

или $(T_d \cdot p + 1)u_{изх3} = T_d k_y p \cdot u_d,$

където $T_d = C_8 R_8$ е времеконстанта на диференциране,

k_y е коефициент на усилване на операционния усилвател DA3.

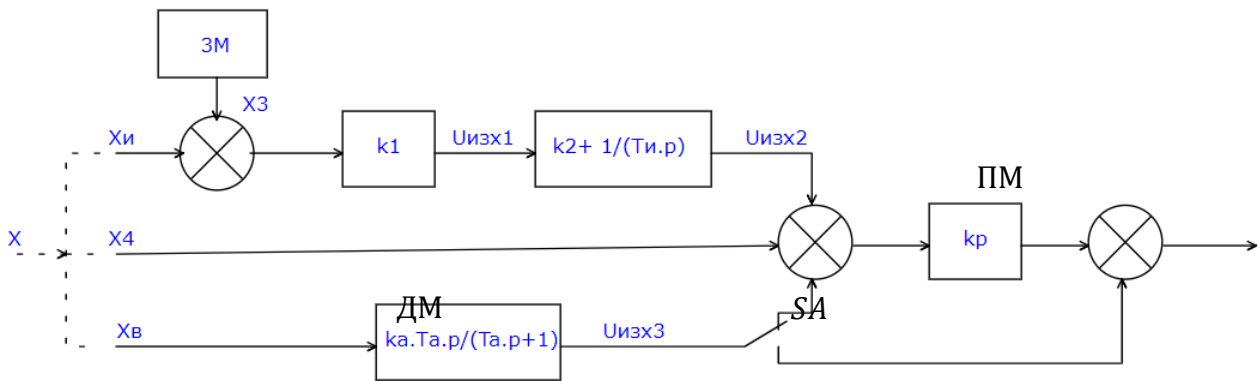
Времеконстантата T_d може да се изменя чрез R_8 .

Предавателната функция на диференциращия модул е от вида:

$$W(p) = \frac{k_y \cdot T_d \cdot p}{T_d \cdot p + 1}$$

Операционният усилвател DA4 изпълнява функциите на сумиращ усилвател (пропорционален модул ПМ). На неговия вход постъпват сигналите от изходите на интеграцията и диференциращите модули, както и сигнала x_n . Чрез R_{10} може да се променя коефициентът на усилване k_p на ПМ.

На **фиг. 196** е показана структурната схема на регулатора.

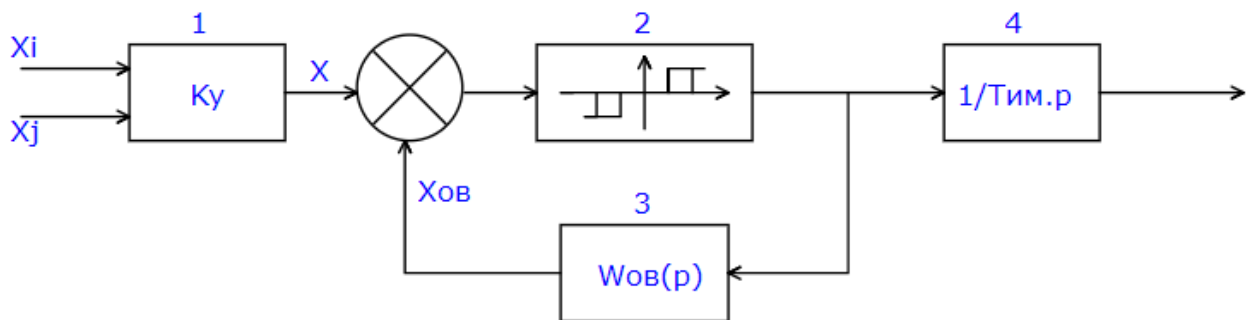


фиг. 196. Структурна схема на регулатора

Диференциращият модул ДМ, чрез SA, може да се превключва или към входа на пропорционалния модул ПМ или към изхода на регулатора.

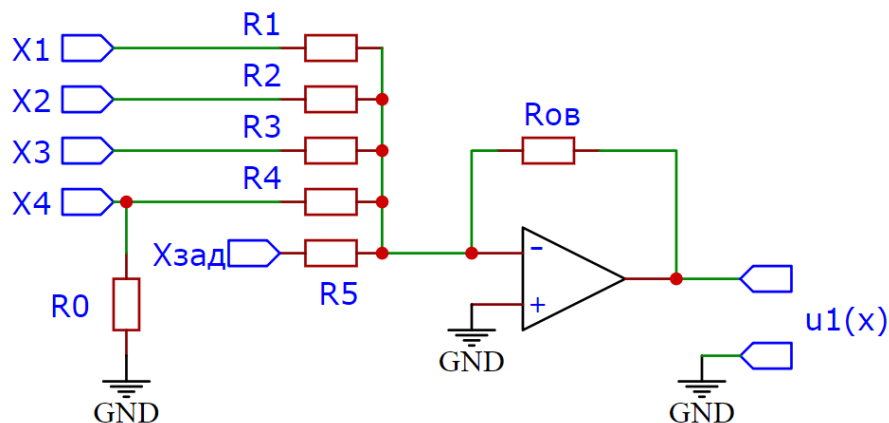
✓ **Електронни релейни регулатори**

Този вид регулатори се използват като стабилизиращи при обекти с по-голяма инертност. Изградени са по типова структурна схема - релеен усилвател, обхванат с обратна връзка. Структурната схема на тези регулатори е показана на **фиг. 197**. Състои се от четири самостоятелно изпълнени модула: входен модул 1, релеен усилвател 2, модул за обратна връзка 3 и модул на изпълнителния механизъм 4.



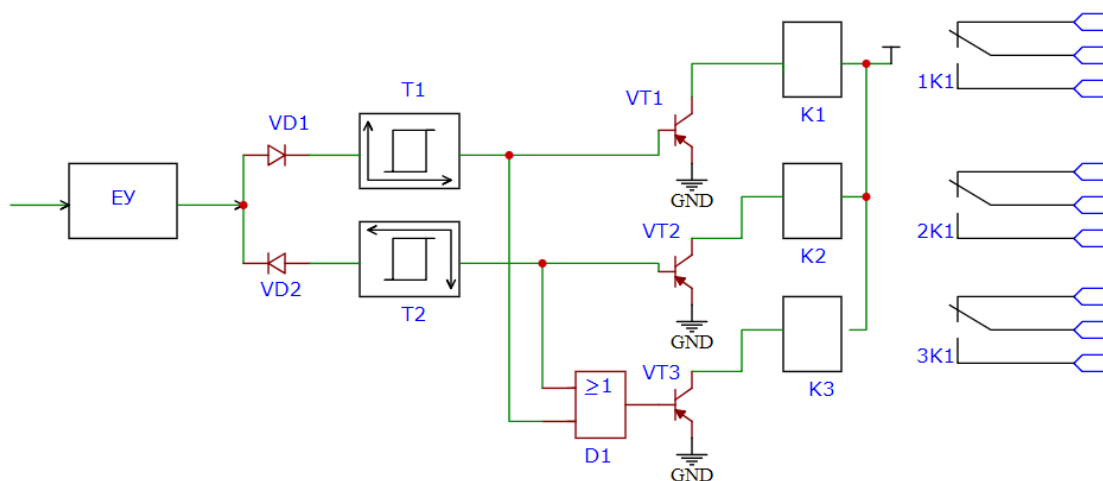
фиг. 197. Структурна схема на регулатора

Входният модул е операционен усилвател (*фиг. 198*), работещ в сумиращ и усилвателен режим. Входните сигнали могат да бъдат до четири независими. Те се сравняват със заданието $X_{зад}$. При токов вход се използва съпротивление на входа R_0 , свързано с масата. Изходният сигнал u_1 е напреженов.



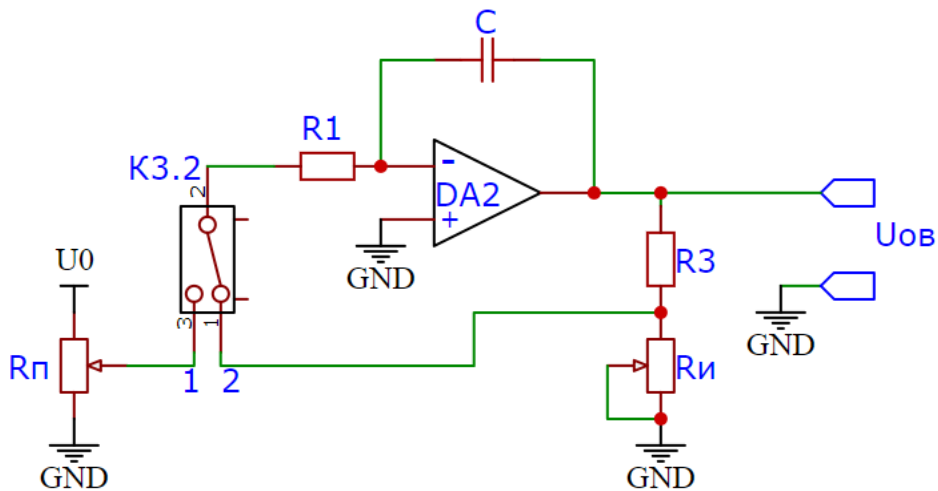
фиг. 198. Принципна схема на суматор на регулатора

Модулът на релейния усилвател е показан на *фиг. 199*. Той се състои от електронен усилвател ЕУ, два тригера Т1 и Т2 и изходни транзисторни стъпала (VT1, VT2, VT3). Логическата схема D1 формира сигнал за VT3 за управление на оперативното реле К3. Модулът притежава релейна статична характеристика с трипозиционен изход. Операционното реле К3 се задейства, когато е задействан кой да е от изходите (VT1 или VT2).



фиг. 199. Схема на релейния усилвател

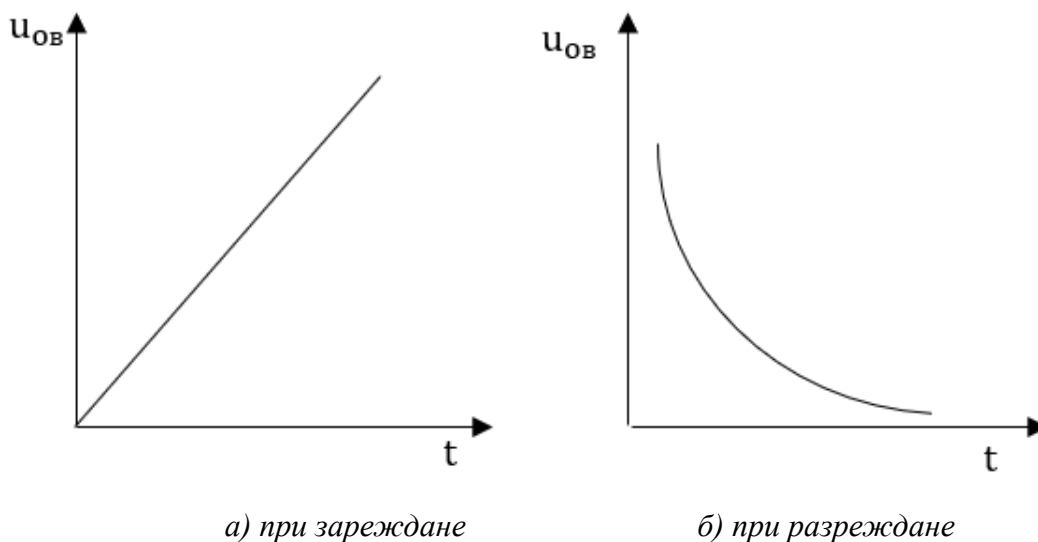
Обратната връзка в схемата на регулатора е активна. Изпълнена е на операционен усилвател (*фиг. 200*).



фиг. 200. Схема на обратната връзка

Оперативното реле К3 управлява режима на работа на операционния усилвател DA2. В положение 1, на контакта на релето К3.2, към входа на DA2 се подава напрежение βU_0 ($0 \leq \beta \leq 1$). Поради кондензатора С в обратната връзка, DA2 работи като интегратор. Изходното напрежение $u_{ов}$ нараства по линеен закон. При изключено оперативно реле К3, контактът му К3.2 заема положение 2. По този начин се осигурява паралелна верига за разреждане на кондензатора С (чрез R_1 и R_3). Напрежението на изхода $u_{ов}$ намалява по експоненциален закон.

Зависимостта $u_{ов} = f(t)$ при зареждане и разреждане на С са показани на *фиг. 201*.



фиг. 201. Зависимост $u_{ов} = f(t)$ при зареждане и разреждане на С

Времоконстантите съответно ще бъдат:

$$T_{\text{зар}} = R_1 C,$$

$$T_{\text{разр}} = (R_1 + R_3) \cdot C.$$

3.2.4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОПЕРАЦИОННИТЕ УСИЛВАТЕЛИ В ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ

Усилвателните схеми намират изключително широко приложение в различни уреди и устройства в автоматиката и измервателната техника. Това е така, тъй като обикновено сигналите от сензорите се нуждаят от допълнителна аналогова обработка. В болшинството от случаите съвременните измервателни уреди съдържат основните елементи, представени на *фиг. 202*.



фиг. 202. Основни елементи на една измервателна система

Сензорите представляват елементи за преобразуване на определена физична, химична или биологична величина в електрически сигнал.

Сигналите от сензорите обикновено се нуждаят от допълнителна обработка, която може да бъде усиляване, атенюация (намаляване амплитудата на сигнала), линеаризация и др. Тази допълнителна обработка се реализира най-често с помощта на схеми, базирани на операционни усилватели. Тяхната задача е да премахнат нежеланите честотни съставлящи в сигналите, идващи от сензорите.

В съвременните измервателни системи основните обработки на сигналите от сензорите се осъществяват по програмен път, в софтуера на микроконтролер. Преди тази цифрова обработка е необходимо да се извърши преобразуване на аналоговите сигнали от сензорите в цифров вид. За целта се използват аналогово-цифрови преобразуватели (АЦП), които извършват т. нар. дискретизация на сигнала, т.е. преобразуването на електрическите напрежения на сигнала в цифрови данни.

Обработените от микроконтролера сигнали се преобразуват в стойност на измерваната величина, която се визуализира на дисплея на прибора или може да се изпрати посредством цифров интерфейс към персонален компютър или програмируем логически контролер.

Ролята на операционните усилватели при измервателните уреди и системи в автоматизацията е ключова. Без тяхна помощ е трудно и дори невъзможно да се извърши обработката на сигнали от различни типове сензори. Приложението на схеми, на базата на операционни усилватели в измервателните системи, може да бъде класифицирано в зависимост от типа на сензорите, за свързването на които ще се използват.

Най-разпространените схеми на свързване за сензори, на базата на операционни усилватели са:

Свързване на сензори за температура.

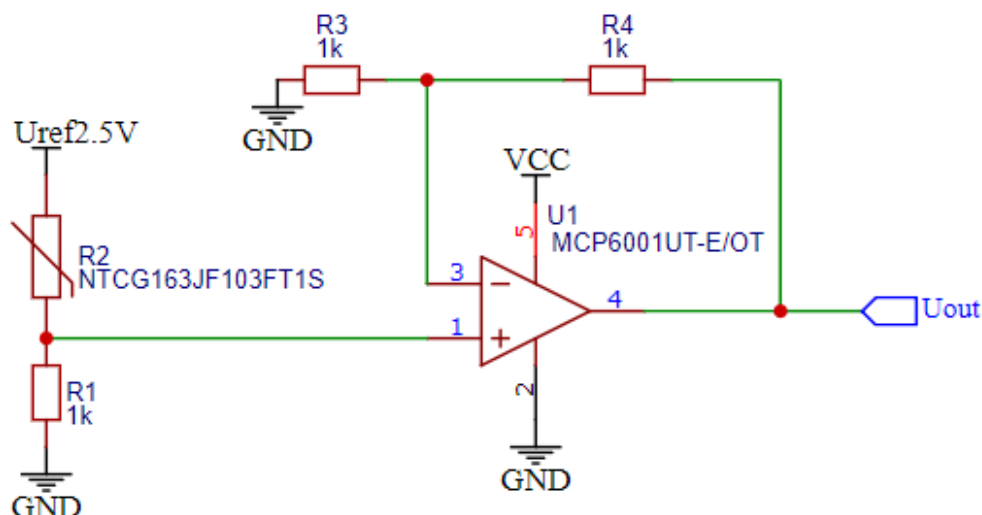
➤ *Свързване на термистори.*

Термисторът е вид резистор, чието съпротивление силно зависи от температурата. Той е комбинация от термичен и резисторен. Термисторите са широко използвани като евтини температурни сензори. Те биват два типа - с отрицателен температурен коефициент или тип NTC (Negative Temperature Coefficient); и с положителен температурен коефициент или PTC (Positive Temperature Coefficient) тип. При термисторите от тип NTC съпротивлението намалява с повишаване на температурата, докато при термисторите от тип PTC съпротивлението се увеличава с повишаване на температурата.

Диапазонът на измерваната температура с термисторите зависи от типа им и материала, от който са изготвени и обикновено е от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На *фиг. 203* е представена схема на свързване на NTC термистор, на базата на неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване равен на 2. Термисторът участва заедно със съпротивлението R_1 в схема на делител на напрежение. Като опорно напрежение в случая $U_{ref} 2.5V$ е избрано напрежение от 2.5 V . Изходът на схемата U_{out} може да се свърже към аналогово-цифров усилвател за преобразуване на сигнала от термистора в цифров вид.

Напрежението на изхода U_{out} се увеличава с нарастване на температурата, тоест с намаляване на съпротивлението на NTC термистора.

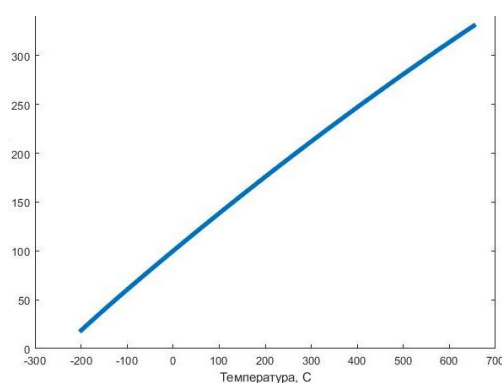


фиг. 203. Примерна схема на свързване на NTC термистор

➤ *Свързване на сензор от тип Pt100.*

Сензорът от тип Pt100 е най-често срещаният тип сензор за температура на базата на платина. Наименованието Pt100 се интерпретира по следния начин - при 0°C сензорът има съпротивление 100Ω.

Pt100 се използва за измерване на температура с висока точност, тъй като той има почти линейна характеристика на изменение на съпротивлението с промяна на температурата (фиг. 204).

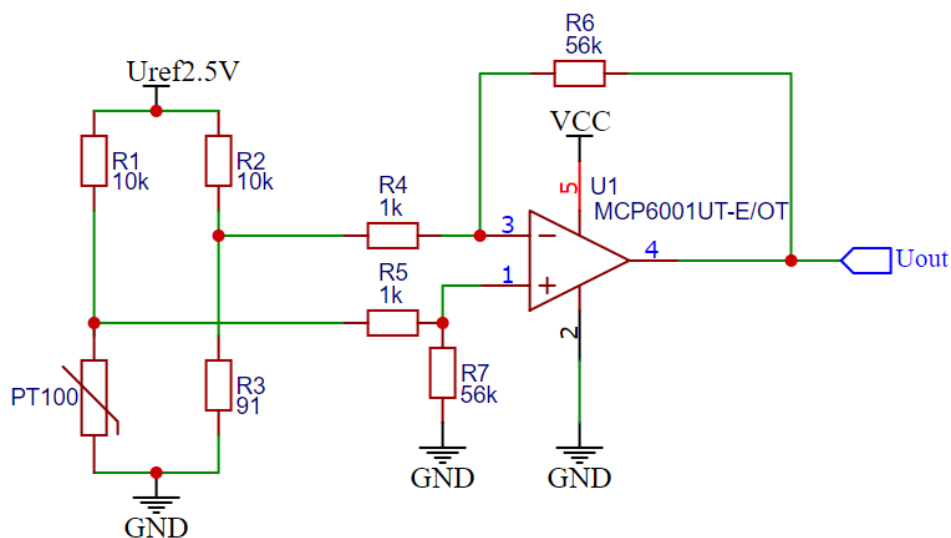


фиг. 204. Изменение на съпротивлението на Pt100 сензор в зависимост от температурата

На *фиг. 205* е представена двупроводна схема на свързване на сензор Pt100. Схемата съдържа две основни части - мост на Уитстън и диференциален усилвател. Мостът на Уитстън

включва съпротивленията R1, R2 и R3, както и сензора Pt100, свързани по показания начин. Двете рамена на моста (R1, Pt100 и R2,R3) могат да се разглеждат като делители на напрежение. Диференциалният усилвател извършва изваждане на двете напрежения от моста, като също така усилва полученото напрежение с коефициента си на усилване - в случая с представената схема този коефициент е равен на 56.

С описаната схема на базата на Pt100 могат да бъдат измервани температури в диапазона от - 20 до 460 градуса (при захранващо напрежение VCC = 5V).



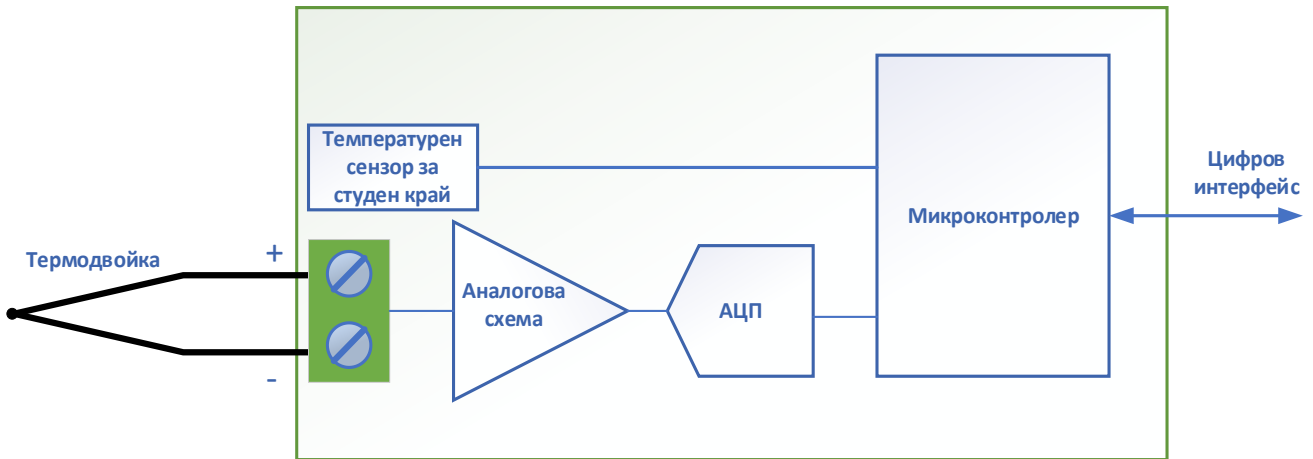
фиг. 205. Схема на свързване на Pt100

Когато сензорът Pt100 се налага да бъде отдалечен от измервателния уред, се прилага използването на трижична или на четирижична схема на свързване, с цел да се компенсира съпротивлението на проводниците между сензора и измервателния уред.

➤ *Свързване на сензор от тип термодвойка.*

Термодвойките са едни от най-често срещаните температурни сензори, използвани в практиката.

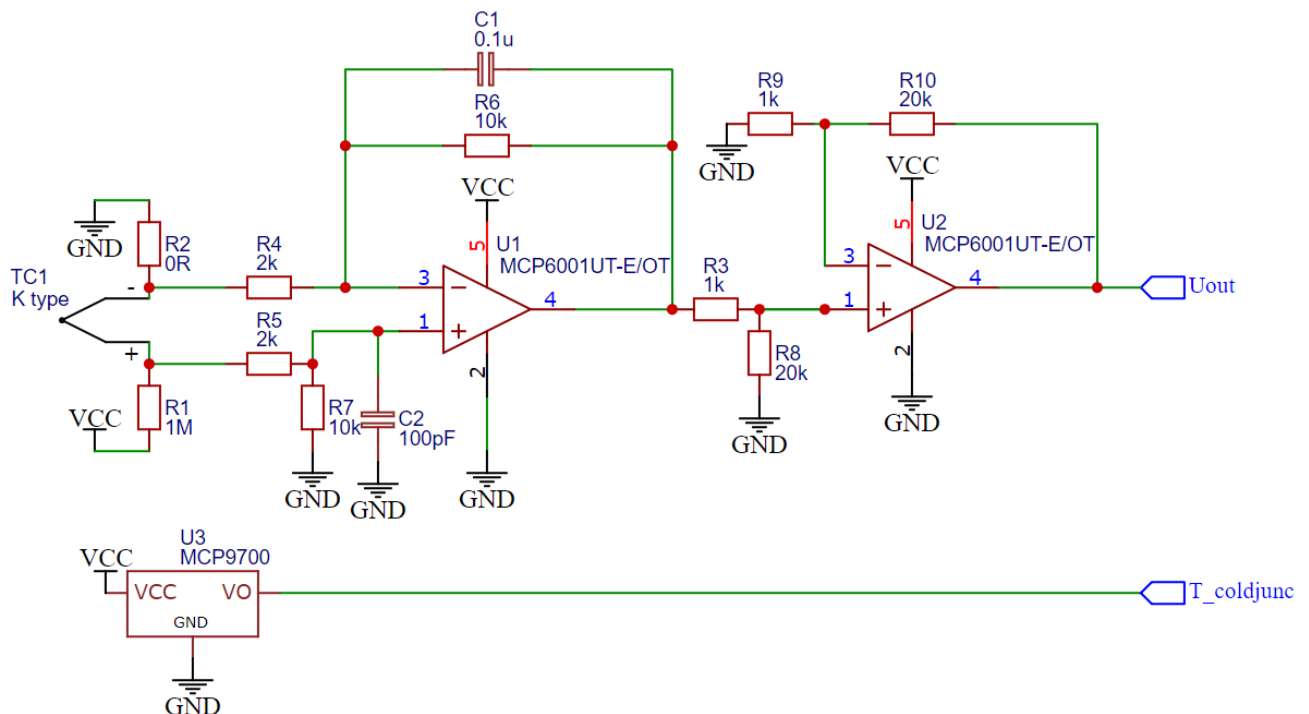
На *фиг. 206* е представена примерна схема на свързване на съвременна система за измерване на температура, на базата на термодвойка.



фиг. 206. Система за измерване на температура с термодвойка

На *фиг. 207* е представена схема за обработка на сигнала от К тип термодвойка. Схемата се състои от два последователно свързани диференциални усилвателя (U1,U2), като общият коефициент на усилване е равен на 100. Представената схема е възможно да се използва при измерване на температура в границите от 0°C до 1200 °C.

Компенсирането на температурата на студения край е реализирано с използването на полупроводников интегрален сензор за температура (U3).



фиг. 207. Схема за свързване на К тип термодвойка

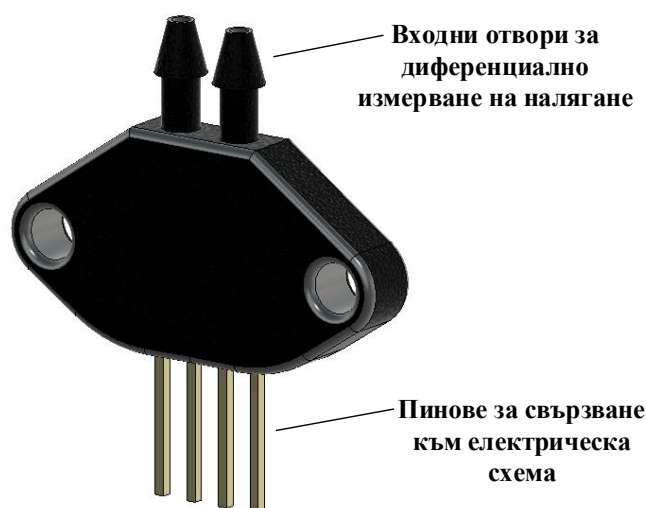
✚ Свързване на сензори за измерване на налягане.

Измерването на налягане е, подобно на температурата, широко разпространен процес в индустрията. За измерванията се използват съответните уреди и устройства, съдържащи сензори за налягане. Сензорите за налягане се предлагат за абсолютно измерване или за диференциално измерване на налягане.

Абсолютното налягане се осъществява спрямо перфектен вакуум, като резултатът представлява абсолютната стойност на измерваното налягане.

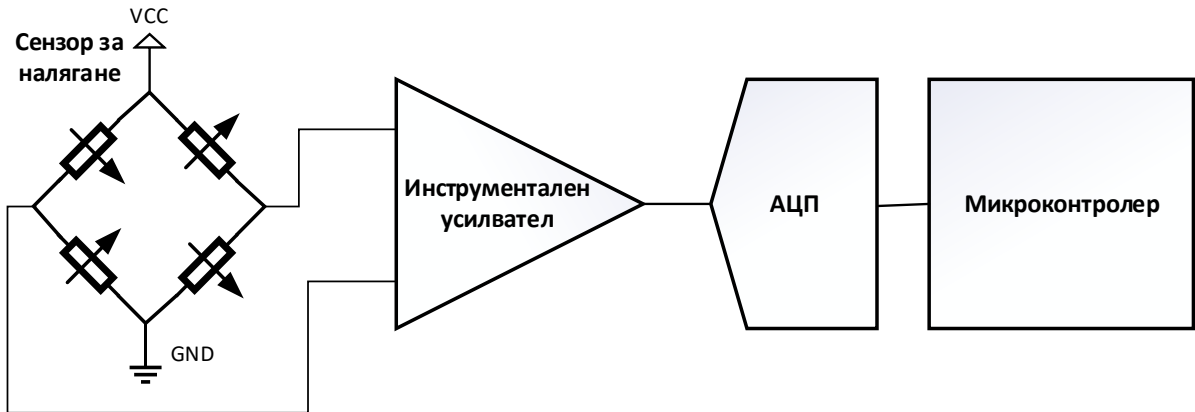
Диференциалното измерване на налягане представлява измерване на разликата в наляганята между две точки. Като частен случай на диференциалното измерване е измерване на налягане спрямо атмосферното.

Диференциалното налягане обикновено се използва в промишлените системи. Сензорите за диференциално измерване на налягане имат два входящи отвора - на единия постъпва газ или флуид със съответното налягане, което ще се измерва, а на другия отвор постъпва опорно (референтно) налягане, спрямо което се извършва измерването (*фиг. 208*).



фиг. 208. Сензор за налягане в интегрално изпълнение

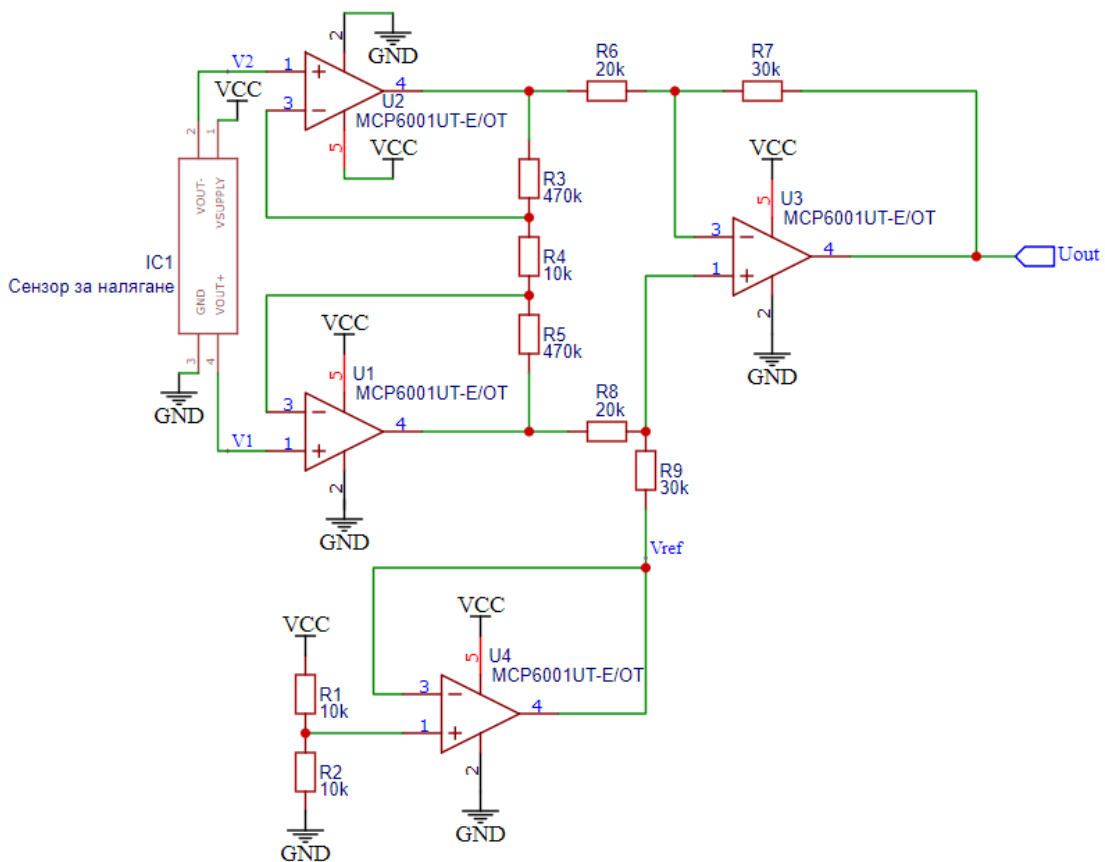
В блоков вид една съвременна схема на свързване на сензор за налягане се състои от самия сензор (представен като мостова схема на променящи се от налягането съпротивления), инструментален усилвател - използван за усилване на диференциалната разлика в напреженията, отговарящи за основното и референтно налягане, аналогово-цифров преобразувател и микроконтролер за цифрова обработка на получените данни (*фиг. 209*).



фиг. 209. Блокова схема на свързване на диференциален сензор за налягане

Схемата за аналогова обработка на сигналите от сензора може да има следния вид, представен на *фиг. 210*.

Трите операционни усилвателя (U1, U2, U3), заедно с включените към тях съпротивления, изграждат т. нар. инструментален усилвател. Принципът на работа на инструменталния усилвател е да усилва разликата на две напрежения, постъпващи на входовете му.



фиг. 210. Схема на свързване на сензор за налягане

В случая с *фиг. 210*, формулата, по която се получава изходното напрежение на схемата U_{out} е следната:

$$U_{out} = (V1 - V2) \left(1 + \frac{2R3}{R4}\right) \left(\frac{R7}{R6}\right) + V_{ref}$$

За конкретните избрани стойности на съпротивленията, коефициентът на усилване на инструменталния усилвател се получава: $(1 + 2 \cdot 470k/10k) \cdot (30k/20k) = 142.5$.

Двете съпротивления $R1$ и $R2$, заедно с операционния усилвател $U4$, изграждат източник на опорно напрежение V_{ref} , което при $VCC=5V$ ще бъде $2.5V$ в конкретния случай.

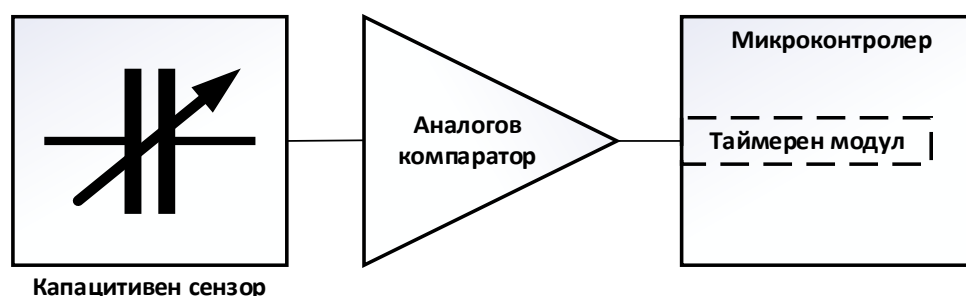
Сигналът на изхода на схемата ще се изменя под и над $2.5V$, в зависимост дали измерваното налягане е по-малко, или е по-голямо от опорното.

- свързване на сензори от капацитивен тип

Измерването на изменението на капацитет често се използва като подход при различни сензори - за относителна влажност, поток, налягане, ниво на течност, разстояние и др.

Капацитивният сензор действа по подобие на обикновен кондензатор. При промяна на разстоянието между двете плочи на кондензатора, типът на диелектрика между тях или други негови характеристики, вследствие влиянието на измерваната величина, се променя и капацитетът на сензора.

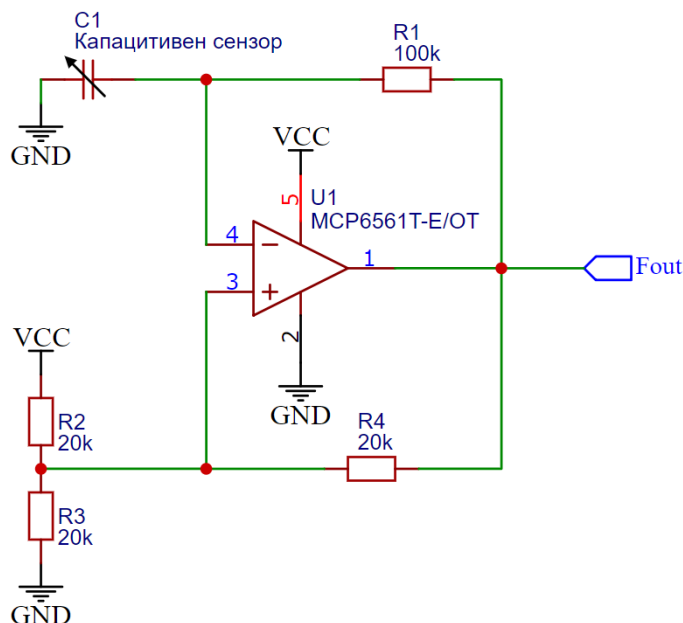
Свързването на един капацитивен сензор в измервателна схема е възможно да се реализира с помощта на аналогов компаратор. При използване на подобна схема на изхода ѝ се получава правоъгълен честотен сигнал, който може да бъде дискретизиран (преобразуван в цифров вид) от микроконтролер софтуерно или с помощта на таймерен модул (*фиг. 211*).



фиг. 211. Блокова схема на свързване на капацитивния сензор

Схемата на свързване (*фиг. 212*) на капацитивния сензор представлява т.нар. нестабилен мултивибратор. Посредством времезадаващата верига – $R1C1$, се определя честотата на

генерирания на изхода сигнал F_{out} . С промяна на измерваната величина се променя капацитетът на сензора и оттам изходната честота на схемата.



фиг. 212. Схема на свързване на капацитивен сензор

Съпротивлението R_4 представлява положителна обратна връзка на аналоговия компаратор. С помощта на него се задава т.нар. хистерезис на схемата (отместване във входните нива на превключване на компаратора, в зависимост от състоянието на изхода му).

На *фиг. 213* е представен сигналът на изхода на представената схема.



фиг. 213. Изходен честотен сигнал от схемата за свързване на капацитивния сензор

Честотният сигнал, в сравнение с напреженовия сигнал, има следните предимства

- по-висока шумоустойчивост,

- възможност за предаване на сигнала на по-големи разстояния,
- без загуба в точността на предаваните данни,
- отпада необходимостта от използване на аналогово-цифров преобразувател за дискретизиране на пренасяната от сигнала информация.

3.3. ПНЕВМАТИЧНИ РЕГУЛАТОРИ

3.3.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

Пневматичното оборудване е конструирано да работи при определено налягане, което на практика често се различава от налягането в системата. Предназначението на пневматичния регулатор на налягане, известен още като редукиционен клапан, е да установи определено вторично работно налягане на изхода си и да го поддържа постоянно. Задача на пневматичния регулатор е стойността на работното му налягане да не се влияе от колебанията на дебита и захранващото, т.е първичното налягане, което е по-високо. Типични приложения на редукиционния клапан са регулиране на необходимото налягане за пневматични инструменти и всички приложения в индустрията, в които се изисква регулиране на налягането.

Предимствата от използването на пневматичен регулатор биха могли да се систематизират в няколко основни направления. Сред тях са:

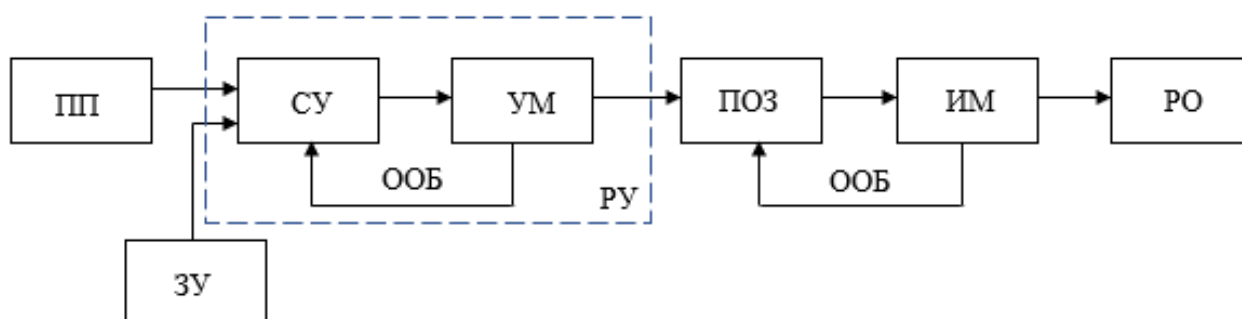
- С един източник на налягане могат да се захранват консуматори с различни изисквания по отношение на работното налягане;
- Системата работи по-икономично, защото загубите на сгъстен въздух, които биха се получили, ако се работи с налягане по-голямо от необходимото за конкретното приложение, се свеждат до минимум. Като правило, всяко увеличение на налягането с 0.1bar добавя 1% към енергийните разходи за сгъстен въздух;
- Увеличава се експлоатационният живот на компонентите, защото работа с налягане, по-голямо от препоръчаното, повишава износването;
- Повишава се безопасността на работа, чрез редуциране на налягането в отделните клонове.

Добре е да се има предвид, че повишението на работното налягане води до неефективно използване на енергията на въздуха и до повишено износване, но, от друга страна, ниското работно налягане съществено влошава ефективността на силовата верига на системата. Практически е установено, че оптималният икономически и технически компромис включва използване на наляганя с големина около 6 bar в силовата верига и 4 bar в управляващата

верига. Пневматичните регулатори обикновено се инсталират в комбинацията филтър - регулатор - омаслител, известна още и като пневмоподготвяща група. Както личи от наименованието ѝ, тя е предназначена да подготви сгъстения въздух непосредствено преди подаването му към пневматичното оборудване или машината.

Съществуват много разновидности пневматични регулатори, конструирани както за най-общи, така и за специални приложения. Например пневматични регулатори за универсално използване, прецизни регулатори, регулатори с непряко (пилотно) управление, електропневматични регулатори, регулатори за газови бутилки, регулатори за природен газ и др.

✓ *Блокова схема на пневматичен регулатор фиг. 214.*



фиг. 214. Блокова схема

ПП - първичен преобразувател; ЗУ - задаващо устройство; РУ - регулиращо устройство; СУ - сравняващо устройство; УМ - усилвател на мощност; ПОЗ - позиционер; ООБ - отрицателна обратна връзка

За предаване на сигнала между блоковете на регулатора се използва унифициран пневматичен сигнал. Като зарядно устройство се използва редуктор или ръчен регулатор на налягането, с който можете да затворите или отворите мощни пневматични линии.

Математическите операции, необходими за възпроизвеждане на законите за регулиране, се извършват с помощта на пневматичен усилвател и елемент за сравнение, уловени от положителна или отрицателна обратна връзка.

Областта на приложение на пневматичните регулатори и системи в индустриалните системи е доста обширна. В зависимост от захранващото налягане на въздуха, те се класифицират по следния начин:

- за високо налягане (0.4–1.0 МПа) = 4–10 bar.
- за средно налягане (0.1–0.4 МПа) = 1–4 bar.

➤ за ниско налягане (по-малко 0.1 МРа) по-малко от 1bar до 0.01- 0.02bar.

Системи за високо налягане - в системите с високо налягане, заедно с елементите за въздухоразпределение, контрол и регулиране на въздуха, се използват и устройства за подготовка на въздуха, пневматични устройства за управление на високо налягане: сензори за положение, клапани за последователност, логически елементи и др.

Пневматични устройства с високо налягане се използват в системи с ниска сложност, съдържащи малък брой взаимодействащи се пневматични елементи. Предимствата се крият във факта, че се използва общ източник на захранване (цехова пневматична магистрала).

Широко се използват пневматични устройства от различни производители като FESTO (Австрия), SMC (Япония), CAMOZZI (Италия) и други.

Системи със средно налягане (мембранни елементи) - с нарастващата сложност на системите за управление се използват пневматични регулатори със средно налягане - елементи на мембранната технология. Те включват елементи, изпълняващи различни математични операции - сумиране, интегриране, диференциране, логически функции и т.н. Тези устройства са по-компактни и по-бързи. Всички елементи са изградени с помощта на гъвкави мембрани. С навлизането на електронните и микропроцесорни системи в индустрията мембранните елементи вече почти не се използват, с изключение на пневматичните регулатори на налягане.

Системи за ниско налягане (струйни елементи) - устройствата с ниско налягане-струйни елементи, работещи при налягане до 0.02МРа, се отличават с още по-голяма скорост и минимални размери. Тези устройства нямат механични движещи се части. Тяхната работа се основава на взаимодействието на струи въздух или течност. Експлоатационният им живот е практически неограничен.

Елементите могат да се комбинират в единични платки, подобни на електронните. Струйните елементи имат високо бързо действие, в сравнение с другите пневматични елементи. Те не са чувствителни към вибрации и температурни колебания. В настоящето, използването на струйни регулатори в промишлеността е силно ограничено.

3.3.2 . ПНЕВМАТИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ С НЕПРЕКЪСНАТО ДЕЙСТВИЕ

Аналогично на електрическите и електронните елементи, пневматичните елементи на автоматиката могат да бъдат аналогови и дискретни. Пневматични елементи с непрекъснато действие са тези елементи, при които изходното налягане е непрекъснатата функция, при непрекъснат входен сигнал. Към аналоговите елементи се отнасят пневматичните дросели (съпротивления), делители на налягане, повторители, усилватели, елементи за сравнение и др.

✓ Пневматични дросели

Пневматичните дросели (съпротивления) са основни конструктивни елементи и за пневматичните устройства. Чрез тези елементи се създава съпротивление за протичащия през тях въздух. Появява се разлика в наляганята Δp преди и след дросела, която може да се определи по израза:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \zeta \frac{\rho a^2}{2},$$

където p_1 и p_2 са съответно налягане преди и след дросела;

a - средна скорост на въздуха в дросела;

ρ - плътност на газа (въздуха);

ζ - коефициент на съпротивление при протичането на въздуха.

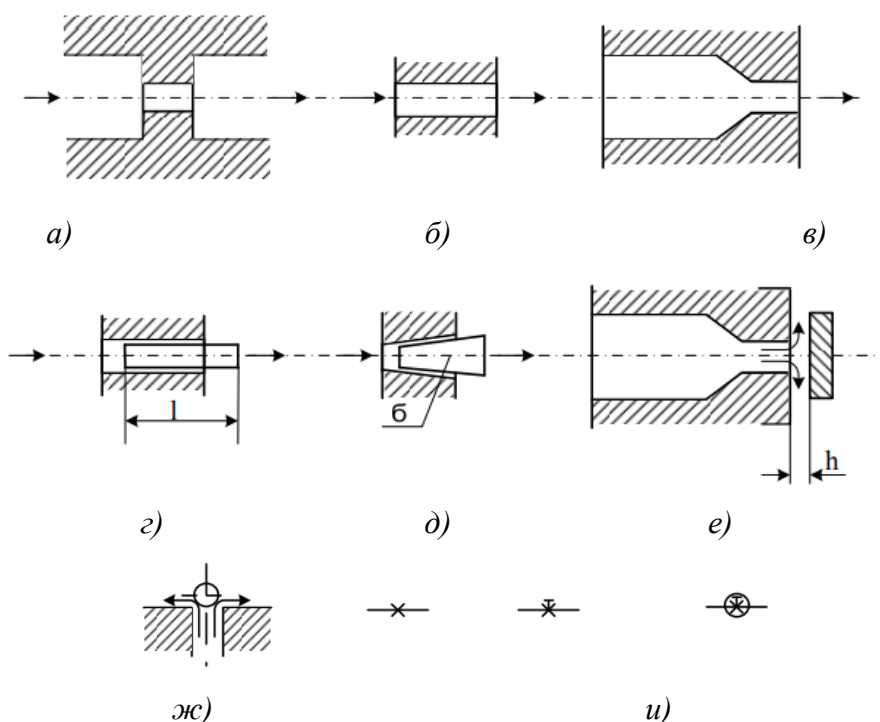
Статичната характеристика на един дросел представлява връзката между Δp и реализирания през него разход G . За дросели с линейна характеристика, тази връзка може да се изрази чрез равенството:

$$G = \alpha (p_1 - p_2),$$

където α е коефициент, характеризиращ проводимостта на дросела.

Пневматичните дросели биват постоянни и променливи. Те не променят сечението си при различни режими на работа на пневматичната система, но променят проходното сечение, а следователно и проводимостта на дросела. Когато промяната става ръчно, дроселът се нарича регулируем.

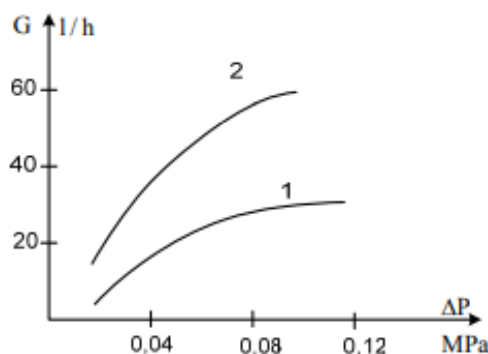
Различните дросели (условни графични означения) са показани на *фиг. 215*. На *фиг. 215*, а, б, в са постоянни и са: цилиндричен дросел с малка дължина, цилиндричен дросел с голяма дължина, цилиндричен дросел с голяма дължина и дюза. Дроселите от *фиг. 215*, г, д, е, ж са променливи и са: цилиндричен, коничен, дюза - преграда, сферичен.



фиг. 215. Постоянни и променливи пневматични дросели: [57]

а, б, в - постоянни; г, д, е, ж - променливи; и - условни графични означения

Статични характеристики на два цилиндрични дросела с голяма дължина могат да се видят на **фиг. 216**. Дроселите имат следните размери: еднаква дължина $L=1,5$ mm и диаметри на отворите $d_1 = 0,18$ mm и $d_2 = 0,3$ mm.



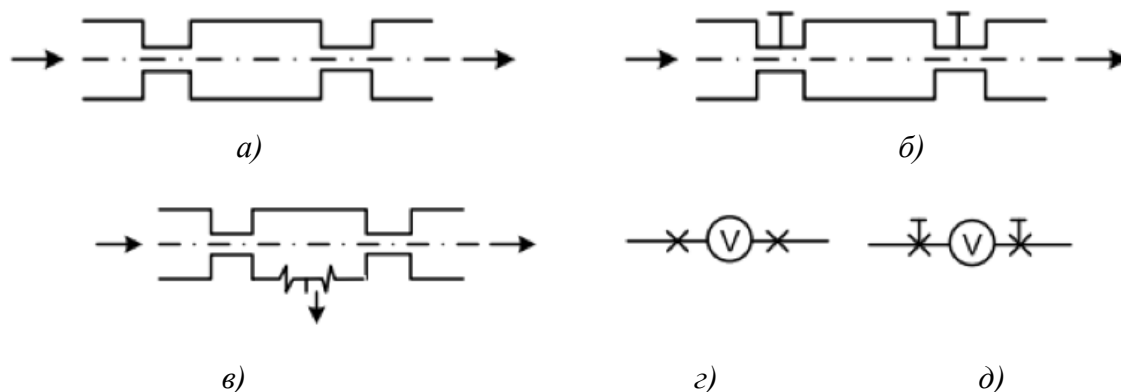
фиг. 216. Статични характеристики на постоянни дросели

Затвореният регулируем дросел не трябва да пропуска повече от 5 l/h въздух при максимално $\Delta p = 0,14$ MPa. Снабдените със скала дросели най-често се разграфяват в относителни единици или в проценти. Ако посредством такива дросели се формира времеконстанта, скалата им може да бъде разграфена в единици за време.

✓ *Пневматични камери*

Пневматичните камери (капацитети) намират много широко приложение като градивен елемент в базовите конструкции на пневматичните устройства. Делят се на две основни групи: проточни камери и глухи камери. Те могат да бъдат с постоянен и с променлив обем.

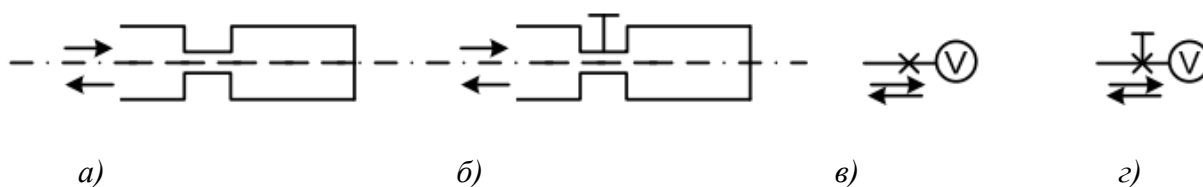
Проточните камери се характеризират с вход и изход (*фиг. 217*). Всички пневмокамери се използват съвместно с дросели. Пълненето на камерата става през един дросел, а изтичането на въздух става през друг. Дроселите могат да са постоянни показани на *фиг. 217*. а, б, г, д или променливи (*фиг. 217*. в). Обемът на проточната камера от *фиг. 217*. в е с променлив обем, понеже едната от стените на камерата представлява гъвкава подвижна мембрана. Обемът на постоянните камери е стандартизиран и за устройства, работещи със средно налягане. Пневматичната камера представлява цилиндър с обем 50 cm^3 .



фиг. 217. Проточни пневматични камери [57]

а, б, г, д - постоянни; в - променлива

Глухите камери са с един вход. Той също така е и изход. През входния дросел въздухът се движи от по-високото към по-ниското налягане. Тези камери могат да работят с постоянен или с регулируем дросел (*фиг. 218*). Последните два елемента от фигурата са условни графични изображения.

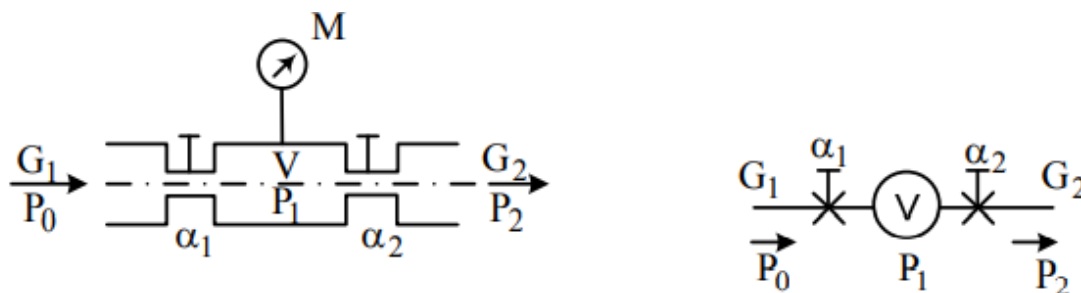


фиг. 218. Глухи пневматични камери [57]

✓ *Съвместна работа на пневматични камери с дросели*

Статичната характеристика на дроселите е нелинейна, но в границите от налягания 0,02-0,08МПа, тя е практически линейна. За схемата от **фиг. 219** може да се запише:

$$G_1 = \alpha_1 (p_1 - p_0), \quad G_2 = \alpha_2 (p_2 - p_1).$$

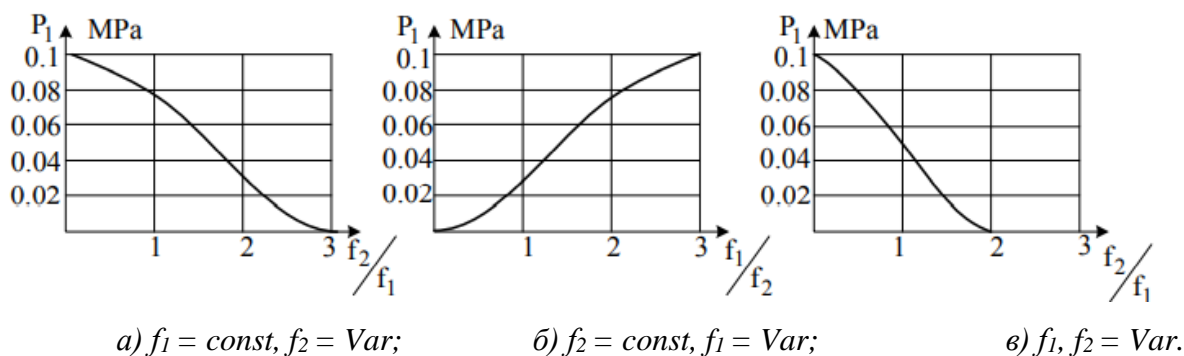


фиг. 219. *Съвместна работа на проходна камера с променливи дросели* [57]

В частност, налягането p_2 може да е равно на атмосферното, ако въздухът изтича в атмосферата. С V е означен обемът на пневмокамерата. Най-често интерес представлява налягането p_1 , което или се измерва, или се усилва по мощност, за да се използва в други пневматични устройства. Възможни са няколко комбинации на промяна на проходните сечения на дроселите. Ако се обозначи с f_1 проходното сечение на първия дросел, а с f_2 - на втория, то съществуват следните комбинации:

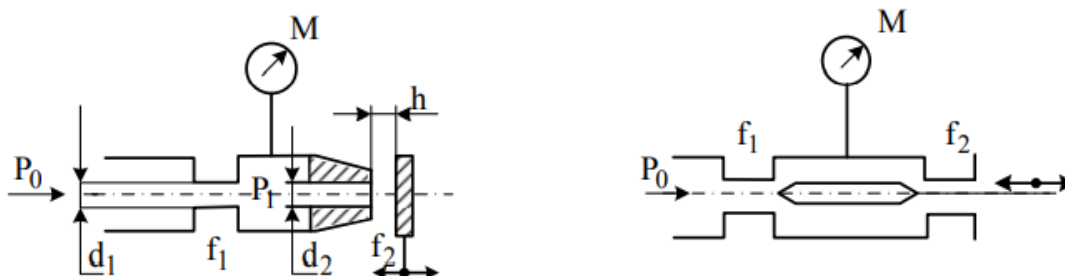
- $f_1 = \text{const}, f_2 = \text{Var}$;
- $f_2 = \text{const}, f_1 = \text{Var}$;
- $f_1 = \text{Var}, f_2 = \text{Var}$.

За последния случай, когато f_1 нараства, f_2 намалява или обратно. При такъв вариант характеристиката се получава по-стръмна. Графичните зависимости на налягането p_1 в камерното пространство от проходните сечения f_1 и f_2 на дроселите за трите случая, съответно са показани на **фиг. 220.** а, б, в.



фиг. 220. *Характеристики на система камера - дросели*

Характеристиката на системата дюза - преграда се свежда до тази, изобразена на *фиг. 221. а*). Налягането p_1 в камерата зависи от проходното сечение f_2 на променливия дросел дюза - преграда (*фиг. 221. а*), което пък, от своя страна, е свързано с преместването h на преградата, относно дюзата. Характеристиката на тази система се представя като функционална зависимост на p_1 от $hp_1 = f(h)$.



фиг. 221. Система дюза- преграда (а) и система с едновременна промяна на f_1 и f_2 [57]

Може да се запишат следните зависимости:

$$f_1 = \frac{\pi d_2^2}{4}, f_2 = \pi d_2 \cdot h.$$

Максималната стойност на h , до която има смисъл да се премества преградата, се определя от условието:

$$f_1 = f_2$$

$$\text{или } \frac{\pi d_2^2}{4} = \pi d_2 \cdot h_{\max},$$

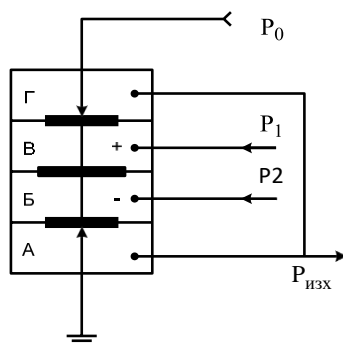
$$h_{\max} = \frac{d_2}{4}.$$

Обикновено диаметърът на отвора на постоянния дросел $d_1 = 0,1 - 0,2$ mm, а диаметърът на отвора на дюзата $d_2 = 0,4 - 0,5$ mm. Захранващото налягане $p_0 = 0,14$ МРа.

3.3.3. МЕМБРАННИ ПНЕВМАТИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

Мембранните пневматични елементи са основни градивни елементи на мембранните устройства. В тях конструктивно се формират две или повече камерни пространства, разделени помежду си с подвижна преграда (мембрана). Ако мембраните са две и повече, техните централни части се съединяват твърдо и формират мембранен блок. За да може да

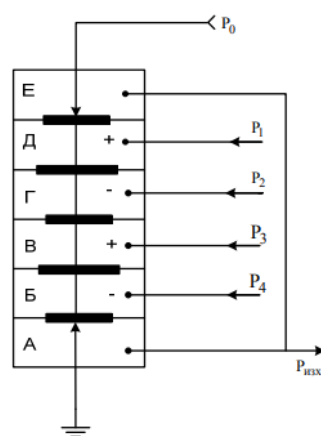
функционира един мембранен елемент с две и повече мембрани, като правило, мембраните, ограничаващи една камера, се изпълняват с различна активна площ. Корпусът на мембрания елемент се набира от метални пръстени или квадрати, между които се притягат мембраните. В мембранните елементи се изграждат и системи дюза - преграда, като преградата представлява някои от мембраните на елемента.



*фиг. 222. Мембранен пневматичен елемент: графичен символ
на тримембранен елемент [57]*

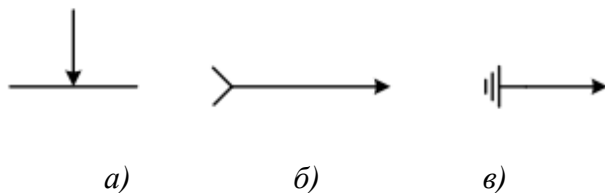
На *фиг. 222* е показано условно графично изображение на тримембранен елемент. Горната дюза е свързана с атмосферата, а долната - със захранващото налягане p_0 . Мембраните (горна и долна) са с малка активна площ, а средната - с голяма. Изградени са четири камери А, Б, В, Г. Изходното налягане $p_{изх}$ се формира едновременно в камери А и Г. p_1 и p_2 са управляващи налягания. Ако $p_{изх}$ нараства, когато p_1 нараства (при $p_2 = const$), то камерата се нарича „плюсова“. И обратно, ако $p_{изх}$ намалява, когато p_2 нараства (при $p_1 = const$), камерата Б в случая се нарича “минусова”.

Петмембранният елемент има аналогична конструкция и действие, както тримембранният (*фиг. 223*).



фиг. 223. Графичен символ на петмембранен елемент [57]

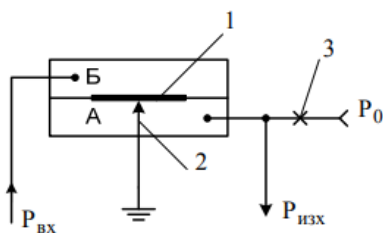
Разликата е в това, че мембраните и камерите са с две повече и могат да се подават към този елемент четири управляващи налягания p_1, p_2, p_3, p_4 . “Положителните” и “отрицателните” камери са по две.



фиг. 224. Фрагменти от условни графични означения на пневматични мембранни елементи

Уточнения в графичното означение на мембранните елементи се прави чрез **фиг. 224**. Първият символ означава система „дюза - преграда”, когато преградата е мембрана (**фиг. 224. а**). Вторият символ означава, че към елемента или към дюзата се подава захранващо налягане p_0 (**фиг. 224. б**), а третият символ означава връзка с атмосферата (**фиг. 224. в**).

На **фиг. 225** е показана принципна схема на мембранен повторител, който възпроизвежда на изхода си пневматичен сигнал, равен на големината на входния.



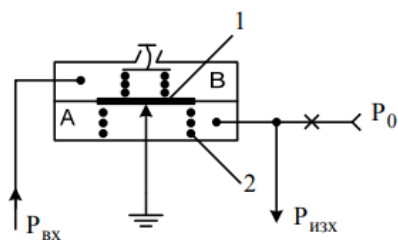
фиг. 225. Принципна схема на мембранен повторител [57]

Елементът се състои от две камери А и Б, отделени една от друга с гъвкава мембрана 1. Тази мембрана едновременно служи за преграда на дюзата 2 и образува с нея системата дюза - преграда. Камера А може да се свързва с атмосферата, посредством дюза 2. На линията за захранващо налягане p_0 за повторителя е свързан постоянният дросел 3 (с диаметър на отвора 0,3 mm). Конструктивно дроселът не е съставна част на повторителя. При промяна на $p_{вх}$, мембраната 1 се премества относно дюзата 2, вследствие на което се променя и $p_{изх}$. В равновесно състояние

$$p_{вх} \cdot S = p_{изх} \cdot s \quad \text{или} \quad p_{вх} = p_{изх} ,$$

където s е активната площ на мембраната.

Мембранен повторител с изместване е показан на **фиг. 226**.



фиг. 226. Принципно схема на повторител с изместване [57]

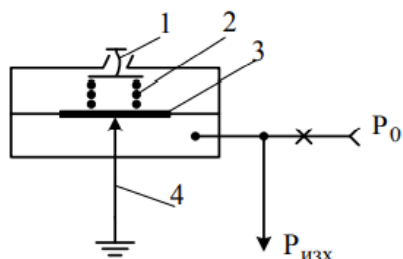
Той възпроизвежда на изхода си сигнал, различаващ се от входния с постоянна стойност (до 0,015 МРа). Съдържа допълнително, в сравнение с обикновения повторител, две пружини. В камера В се намира пружина 1, която може да се натяга или отпуска посредством ръкохватка с винт. В камера А е монтирана пружина 2. Големината на изместването може да се задава посредством споменатата ръкохватка. За равновесно състояние може да се запише равенството:

$$p_{\text{вх}} \cdot s + N_1 = p_{\text{изх}} \cdot s + N_2.$$

$$\text{Оттук } p_{\text{изх}} = p_{\text{вх}} + \frac{N_1 - N_2}{s},$$

където N_1 и N_2 са сили на натягане, съответно на пружина 1 и пружина 2.

На основата на последните схеми (фиг. 225 и фиг. 226) може да бъде изграден датчик (фиг. 227), който има предназначение да задава и стабилизира на изхода си определено налягане на въздух.

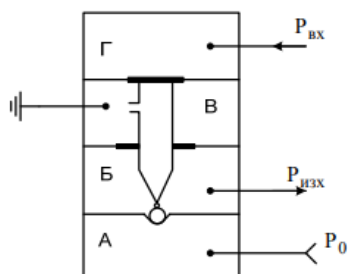


фиг. 227. Принципно схема на датчик [57]

Този въздух се подава най-често в глухи камери. Изходното налягане $p_{\text{изх}}$ се формира в долната камера, като вместо входно налягане е поставена пружина 2. Посредством ръкохватката 1 се въздейства върху пружината 2, а чрез нея и върху мембраната 3. Съпротивленията на постоянния дросел и променливия дросел дюза - преграда са съизмерими. При натягане на пружината 2, преградата (мембраната 3) се доближава до дюзата и я притваря. По този начин се затруднява изтичането на влезлия през дросела въздух през камера А и дюза

4 в атмосферата. В проточната камера се формира по-високо налягане, а това е налягането $p_{\text{изх}}$. Поради това, че $p_{\text{изх}}$ е маломощен сигнал, на практика разглежданият вид задатчици работят съвместно с пневматичен усилвател на мощност.

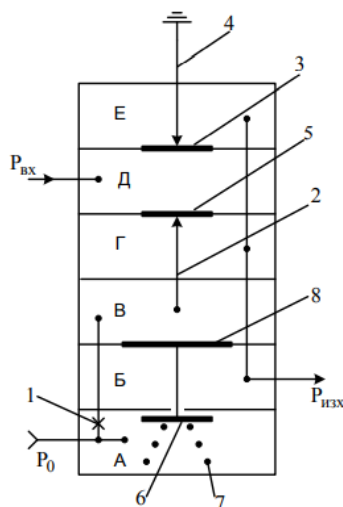
Значително усиление по мощност осигурява пневматичният усилвател, показан на **фиг. 228**.



фиг. 228. Принципна схема на пневматичен усилвател на мощност [57]

По абсолютна стойност налягането на входния сигнал $p_{\text{вх}}$ не се променя и то винаги е равно на $p_{\text{изх}}$. Усилвателят осигурява по-голям разход на въздух. Входният сигнал $p_{\text{вх}}$ постъпва в камера Г и действа на мембранен блок, управляващ сачмян клапан. Отдолу сачмата се притиска към гнездото от пружина. Отгоре действа сила, създадена от мембрания блок (двете мембрани са свързани с куха тръба, отворена в долния си край). Вътрешността на тръбата има връзка с камера В, а оттам и с атмосферата. Връзката на камера Б с атмосферата (през тръбата и камера В) се прекъсва, когато мембраният блок се спусне надолу и долният край на тръбата допре сачмата. Ако преместването надолу продължава, пружината се свива, сачмата се отделя от гнездото си и се формира проходното сечение. В камерата Б налягането е равно на входното, но значително усилено по мощност.

На **фиг. 229** е изобразен друг повторител - усилвател на мощност.



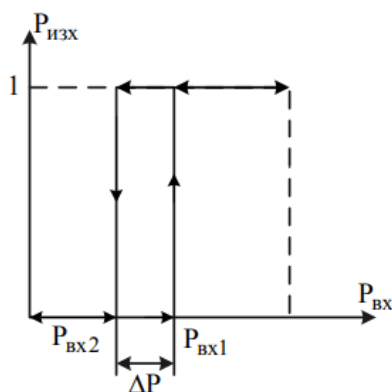
фиг. 229. Принципна схема на пневматичен повторител - усилвател на мощност [57]

Състои се от шест камери, образувани от мембрани и прегради. Камера Д е ограничена от мембрани 3 и 5. В тази камера се подава входният сигнал $p_{вх}$. Дюза 4 и мембрана 3, както и дюза 2 и мембрана 5, образуват променливи дросели. Захранващото налягане p_0 постъпва направо в камера А и през постоянния дросел 1 в камера В (проточна). Ако $p_{вх} = 0$, въздухът от камера В, през дюза 2, преминава в камера Г, а оттам през камера Е и дюза 4, в атмосферата. $p_{изх}$ също като $p_{вх}$ е равно на нула. Под действието на пружина 7, клапанът 6 е прилепнал към седлото си и връзка между камерите А и Б не съществува.

Ако се увеличи налягането $p_{вх}$, мембраната 3 притваря дюзата 4, като по този начин се затруднява изтичането на въздух в атмосферата. Налягането в камера В нараства. Мембраната 8 се премества надолу. Клапанът 6 започва да се отваря. Налягането в камера Б нараства за сметка на захранващото налягане p_0 , а всъщност това е изходното налягане $p_{изх}$.

При равновесно състояние, наляганията във всички камери (без камера А) са равни. Мембраните 3, 5 и 8 заемат междинно положение. Мощността на изходния сигнал е по-голяма от тази на входния, за сметка на по-големия разход на въздух в изходната линия (за сметка на захранващия със въздух източник).

Пневматични елементи с дискретно действие са тези елементи, които формират на изхода си сигнал с фиксирани стойности (най-често две-логическа “0” и логическа “1”), при плавно изменение на входния сигнал. Смяната на изходните състояния става със скок, т.е. статичната им характеристика е релейна (*фиг. 230*).



фиг. 230. Статична релейна характеристика

Когато $p_{вх}$ нараства, скокът става при $p_{вх1}$, а когато намалява - при $p_{вх2}$. $\Delta p = p_{вх1} - p_{вх2}$ е ширина на хистерезисната зона. За положителен хистерезис става дума, когато $p_{вх1} > p_{вх2}$. В обратния случай хистерезисът е отрицателен.

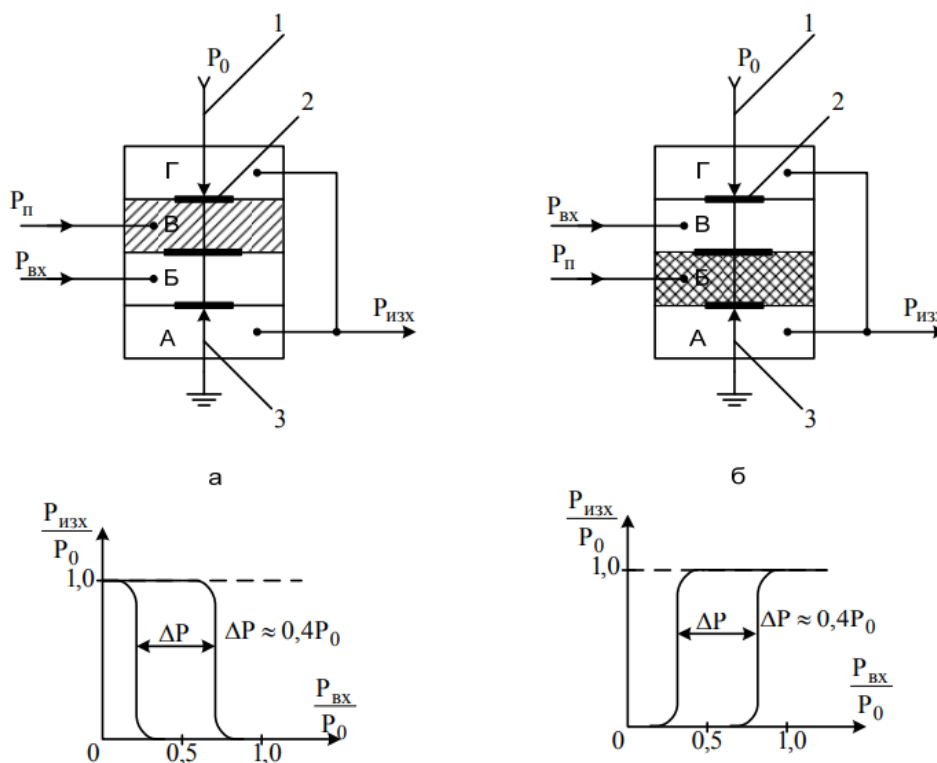
Пневматичният сигнал се счита за логическа нула при $p_{изх} < 0,3p_0$ (p_0 е захранващо налягане) и за логическа единица при $p_{изх} > (0,6 \div 0,7)p_0$.

Пневматичните елементи с дискретно действие отстъпват значително по бързо действие на съответните аналогични електронни елементи. Те са $10^3 \div 10^6$ пъти по-бавни. Струйните логически елементи имат време на превключване от порядъка на 1ms.

По-долу ще бъдат разгледани мембранни и струйни пневматични елементи с дискретно действие.

Към мембранните пневматични елементи с дискретно действие се отнасят: тримембранните релета, дву- и едномембранните клапани, електропневматичните и пневмоелектрическите преобразуватели и др.

Тримембранното реле е аналогично по конструкция с тримембрания пневматичен елемент за сравнение. Чрез него се решават елементарни логически задачи с дискретни пневматични сигнали. За стабилно фиксиране на изходното положение на мембрания блок (камера Б или камера В) се подава подпорно налягане p_p . То е високо, когато се подава в камера Б, и ниско, когато се подава в камера В. Подпорните налягания в двата случая са различни, защото паразитната сила, създавана в системата дюза 1, преграда 2 в случай *фиг. 231, а)* помага на $p_{вх}$ за преместване на мембрания блок надолу, а в случай *фиг. 231, б)* затруднява преместването.

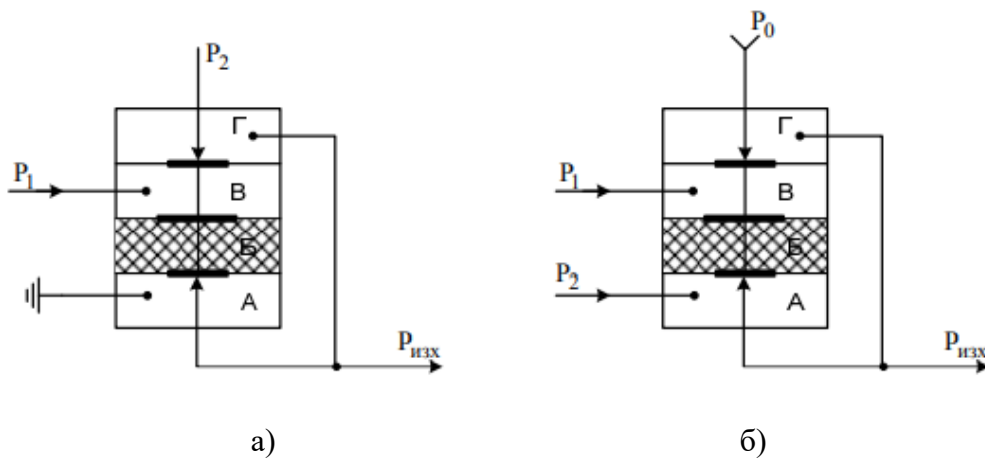


а), б) - графични символи на елементите; статични характеристики на елементите *фиг. 230. Логически мембранни елементи “не” и “да”* [57]

Статичните характеристики на двете релета съответно се виждат на **фиг. 231**. При ниско подпорно налягане и $p_{вх} = 0$, мембранный блок се изнася надолу. Дюза 1 се отваря, а дюза 3 се затваря. Камери А и Г се оказват свързани със захранващото налягане p_0 и на изхода се формира логическа единица (високо ниво). Когато $p_{вх}$ стане логическа единица, $p_{изх}$ сменя състоянието си и става ниско, т.е. логическа нула. В този случай пневматичното реле изпълнява функциите на логически елемент „инвертор“ (“не”).

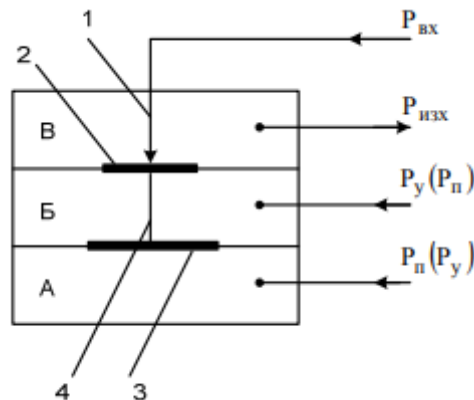
Схемата от **фиг. 232, б)** изпълнява функциите на елемент „повторител“ (“да”).

Посредством тримембранны пневматични релета могат да се реализират и логическите функции “и” (**фиг. 232, а)** и “или” (**фиг. 232, б)**).



фиг. 232. Мембранны логически елементи “и” и “или” [57]

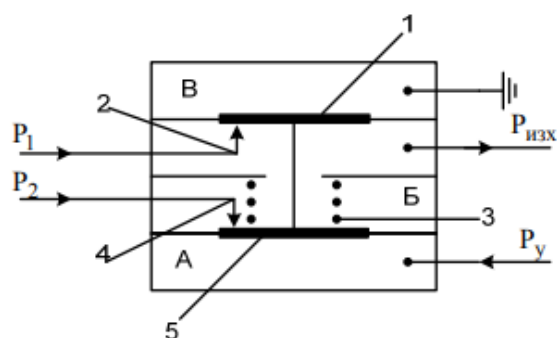
Двумембранный клапан е предназначен да комутира дискретни и непрекъснати пневматични сигнали. Две мембрани, 2 и 3, с различна активна площ, съединени в блок 4, формират три камери А, Б, В (**фиг. 233**). Системата дюза 1 - преграда 2, представлява пневматичен контакт. Този контакт се комутира посредством управляващото налягане p_y . Подпорното налягане p_n фиксира положението на мембранный блок, при $p_y = 0$.



фиг. 233. Двумембранен клапан [57]

При подпорно налягане p_n , подадено в камера Б, пневмоkontaktът 1, 2 е отворен. Когато p_y стане равно на логическа единица, пневматичната верига се прекъсва. В този случай мембранный блок 4 се издига нагоре и преградата 2 затваря дюзата 1. Когато се сменят местата на подаване на p_y и p_n (вариантът показан в скоби), логиката на действие на пневмоcontacta се инвертира.

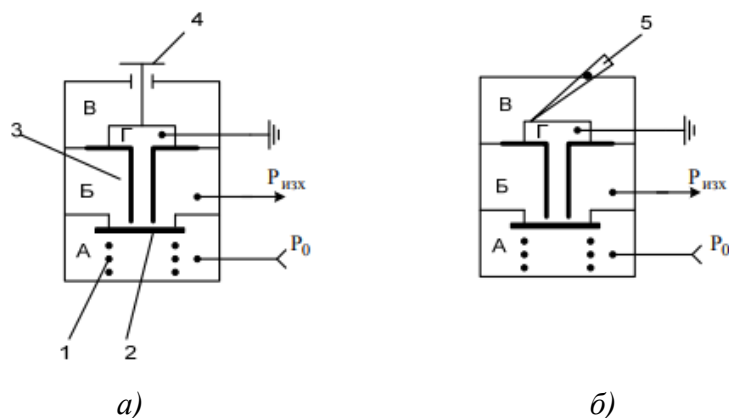
Свързването на един или друг пневматичен канал към трети, дистанционно става с помощта на превключващо пневмореле. То се състои от три камери А, Б, В, разделени чрез двете мембрани 1 и 5, съединени в блок, двете дюзи 2 и 4 и пружината 3 на фиксирание на нулевото състояние (фиг. 234).



фиг. 234. Превключващо реле [57]

Към камера А се подава управляващият сигнал p_y , а камера В е свързана с атмосферата. Към изхода, през камера Б се подава или входният сигнал p_1 , или входният сигнал p_2 . Когато $p_y = 0$, $p_{изх} = p_2$, при $p_y = 1$, $p_{изх} = p_1$. При $p_{изх} = p_1$ управляващият сигнал, чрез мембраната 5 и мембранный блок противодейства на пружината 3. Вследствие на това долната дюза 4 се затваря, а се отваря дюза 2.

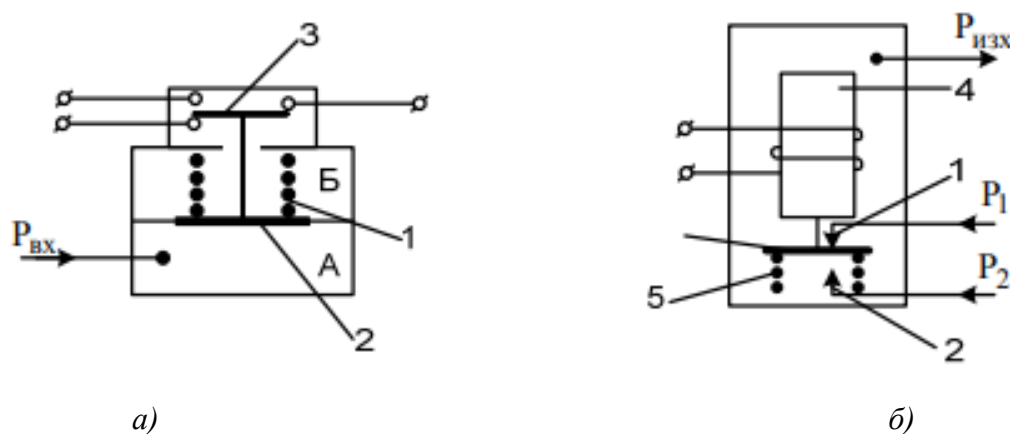
Пневматичните бутони и ключове са предназначени за ръчна комутация на пневматични вериги (фиг. 235).



фиг. 235. Схеми на пневматичен бутон (а) и пневматичен ключ (б) [57]

Налягането p_0 или $p_{вх}$ се предава към изхода, когато клапанът 2 е натиснат от кухия лост 3. При това условие камера А се оказва свързана с камера Б. В същото време връзката на камера Б с атмосферата (чрез камера Г и отвора на кухия лост 3) се прекъсва. При отпуснат бутон 4 (фиг. 235, а) или поставен в нулево положение ключ 5 (фиг. 235, б), клапанът 2 се освобождава от кухия лост 3 и под действието на пружина 1 ляга върху отвора на клапанното седло. Камера Б се оказва свързана с атмосферата и $p_{изх}$ става нула.

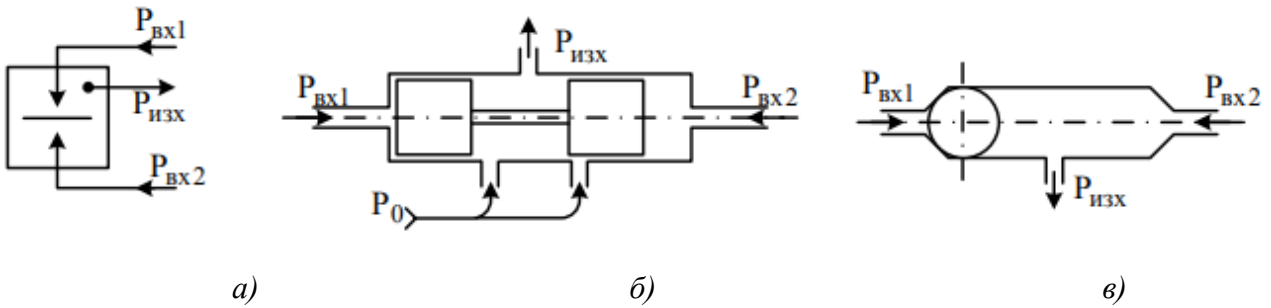
На фиг. 236 са изобразени схемите на пневмоелектрически и електропневматичен дискретни преобразуватели.



фиг. 236. Схеми на пневмоелектрически (а) и електропневматичен (б) преобразуватели [57]

В първия преобразувател (фиг. 236, а) с помощта на пневматичен управляващ сигнал $p_{вх}$ се превключва електрическият контакт 3. При $p_y = 0$, под действието на пружината 1 се затваря долната електрическа верига. Когато се подаде $p_y = 1$, чрез мембраната 2 контактът 3 се премества нагоре и осъществява горната електрическа верига. В схемата от фиг. 236. Б, с електрически управляващ сигнал I_y (U_y), се комутират две пневматични вериги и към изхода се подава или p_1 , или p_2 . При $I_y = 0$, пружината 5 изтласква преградата 3 нагоре и затваря дюзата 1, т.е. $p_{изх} = p_2$. Когато $I_y = 1$ и електромагнитът избуца котвата 4 надолу, дюзата 2 се затваря, а се отваря дюза 1. Към изхода се подава $p_{вх1}$, т.е. $p_{изх} = p_1$.

Логически функции могат да бъдат реализирани и с други конструкции пневматични дискретни елементи. На фиг. 237 са показани три схеми “или”, съответно на пневматичен елемент с летяща мембрана (фиг. 237, а), на бутален елемент (фиг. 237, б) и на елемент с метално топче (фиг. 237, в).

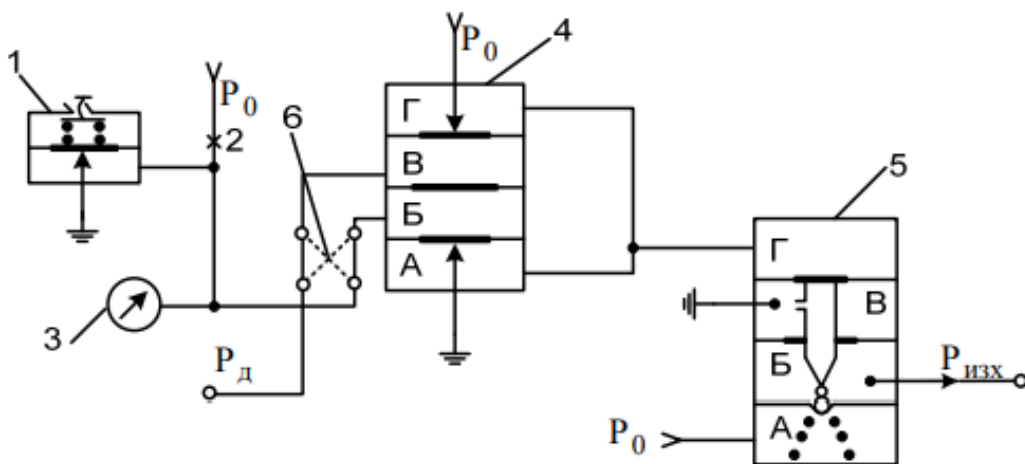


фиг. 237. Логически елементи: а - с летяща мембрана; б - бутален; в - с метално топче [57]

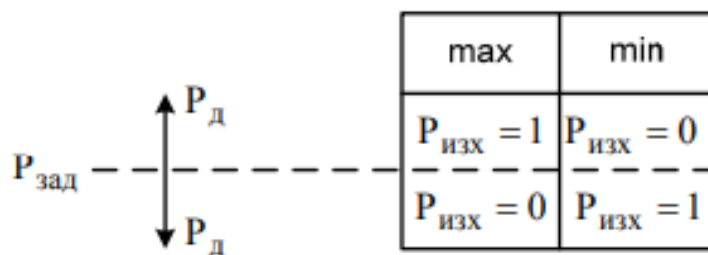
3.3.4. ПНЕВМАТИЧНИ ПОЗИЦИОННИ РЕГУЛАТОРИ ПР 1.5 И ПР 1.6

✓ Позиционен регулатор ПР 1.5

Пневматичният регулатор ПР 1.5 е двупозиционен. Той може да бъде включен да работи „на максимум“ или „на минимум“. Принципната схема на регулатора е показана на **фиг. 238**. При настройка на максимум, изходното налягане съответства на логическа 1, когато текущата стойност на налягането p_d (налягането, постъпващо от датчика) превиши зададеното налягане $p_{зд}$ (формирано чрез задатчика 1 и постоянния дросел 2). При настройка на минимум, е точно обратното (**фиг. 239**).



фиг. 238. Принципна схема на регулатор ПР1.5 [57]



фиг. 239. Схема за настройка на "min" и "max"

Превключването на схемата на регулатора става чрез размяна на входните камери Б и В на тримембрания суматор 4 (елемент за сравнение). За удобство се използва специален превключвател 6. Формираното след суматора 4 изходно налягане $p_{изх}$ се усилва по мощност в пневмоусилвателя 5. Големината на зададеното налягане $p_{зд}$ се отчита по скалата на манометъра 3.

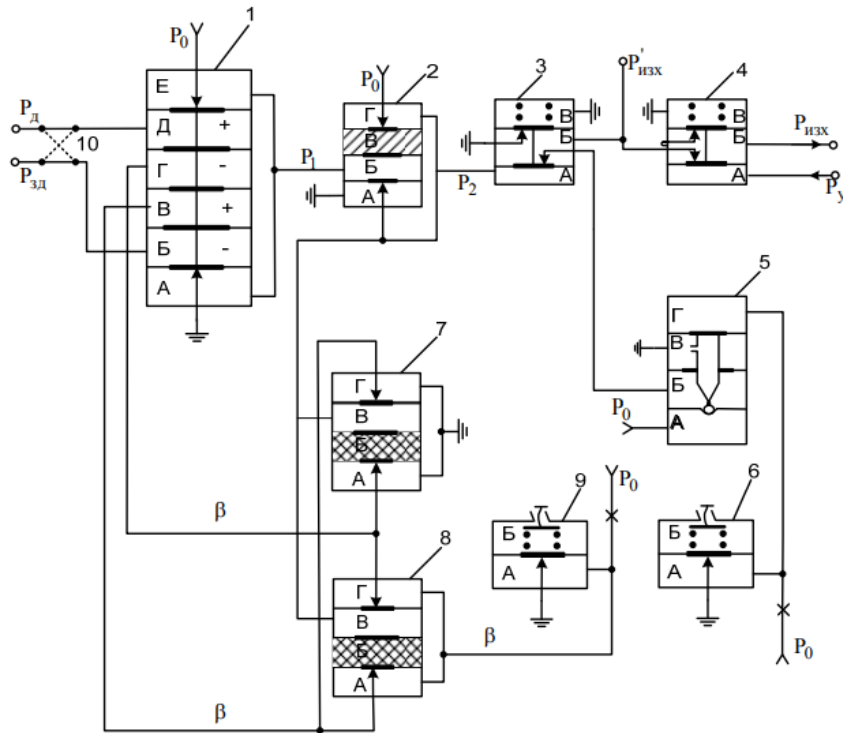
При настройка на минимум, превключвателят 6 се поставя така, че налягането p_d да постъпва в камера Б, а $p_{зд}$ - в камера В. Горният пневмоkontakt на елемента 4 е отворен, когато $p_d < p_{зд}$ и $p_{изх} = 1$. Щом p_d стане по-голямо от $p_{зд}$, се отваря долният пневмоkontakt и изходното налягане се изравнява с атмосферното, т.е. $p_{изх} = 0$.

На изобразената на **фиг.239** схема е показано свързване за работа на максимум, т.е. при $p_d < p_{зд}$; $p_{изх} = 0$ и при $p_d > p_{зд}$; $p_{изх} = 1$.

Разгледаният регулатор може да се използва като устройство за сигнализация.

✓ *Позиционен регулатор с регулируема хистерезисна зона ПР 1.6*

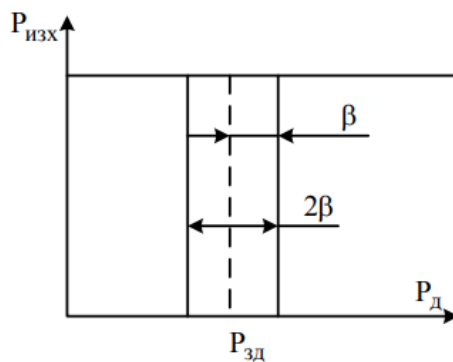
Твърде често при работа с позиционни регулатори се налага да се осигури възможност за изменение по наше желание на хистерезисната зона на регулатора, т.е. тя да бъде регулируема. Двупозиционният регулатор ПР 1.6 отговаря на тези изисквания. Принципната схема на регулатора (**фиг. 240**) е съставена чрез набор от един сравняващ петмембранен елемент 1, три тримембрания релета 2, 7 и 8, две превключващи релета 3 и 4, два задатчика 6 и 9 и един усилвател на мощност 5. Превключвателят 10 осигурява възможност за свързване и работа на максимум и на минимум.



фиг. 240. Принципна схема на регулатор ПР 1.6 [57]

Към суматора 1 се подават наляганията от датчика p_d , от задатчика $p_{зд}$ и едно налягане β , равно на половината от желаната хистерезисна зона. Знакът на β се променя в зависимост от това дали в камера Γ , или камера B на елемента 1 постъпва това налягане.

Изходният сигнал на регулатора се променя тогава, когато регулираната величина излиза от хистерезисната зона (фиг. 241), т.е. $p_d < \text{или} > (p_{зд} \pm \beta)$.



фиг. 241. Статична характеристика на регулатор ПР 1.6

Съобразявайки се с посоката на излизане, може да се конкретизира горното

неравенство при $\frac{dp_d}{dt} > 0, p_d > (p_{зд} + \beta)$.

$$\text{при } \frac{dp_d}{dt} < 0, p_d < (p_{зд} - \beta).$$

На *фиг. 240* схемата е свързана за работа на максимум. Нека да се проследи действието на регулатора, ако p_d започва да нараства от нула, т.е. $p_d < p_{зд}$ и е достатъчно малко, за да се намира извън хистерезисната зона. На изхода на елемента 1, в този случай, се формира налягането p_1 , съответстващо на логическа 0. Релето 2 работи като инвертор, следствие на което $p_2 = 1$. p_2 е управляващо налягане на релетата 7 и 8. Положението на мембранныя блок на тези релета ще се определя не от подпорното налягане в камери Б, а от управляващото налягане в камери В.

За реле 7 горната дюза е отворена и свързана с атмосферата, а долната е затворена. Вследствие на това камера В на сравняващия елемент 1 се оказва свързана с атмосферата. За реле 8 горната дюза е отворена, а долната - затворена. През отворената дюза към камера Г на елемента се предава налягането β , формирано от задатчика на хистерезисната зона 9. Налягането β се сумира със зададеното $p_{зд}$. Налягането p_1 ще се променя със скок, когато стане по-голямо от $(p_{зд} + \beta)$.

Нека да се вземе за изходно състоянието, при което $p_d > (p_{зд} + \beta)$ и да се разглежда случаят, когато намалява. На указаното състояние съответства $p_1 = 1$ и $p_2 = 0$. За реле 7 горната дюза е затворена, а долната отворена и свързана с атмосферата. По този начин и камера Г на елемента 1 се оказва също свързана с атмосферата. За реле 8 горната дюза е също затворена, а долната отворена. В този случай към изхода се предава налягане β , а оттам постъпва в камера В на елемента 1. Налягането β се изважда от зададеното $p_{зд}$. p_1 ще се промени със скок, едва когато p_d стане по-малко от $(p_{зд} - \beta)$.

За работа на регулатора на минимум p_d и $p_{зд}$ разменят местата си, като p_d постъпва в камера Б, а $p_{зд}$ - в камера Д. Вследствие на това се променя логиката на изхода на елемента 1. Високото и ниско ниво на p_1 разменят местата си по отношение на p_d .

Превключващото реле 3 изпълнява функциите и на втори инвертор. То предава или не към изхода формираното по стойност от задатчика 6 и усилено по мощност от усилвателя 5 изходно налягане $p_{изх}$. Релето 4 служи за дистанционно изключване на регулатора. При управляващо налягане $p_y = 1$, $p_{изх}$ се прекъсва (долната дюза се затваря).

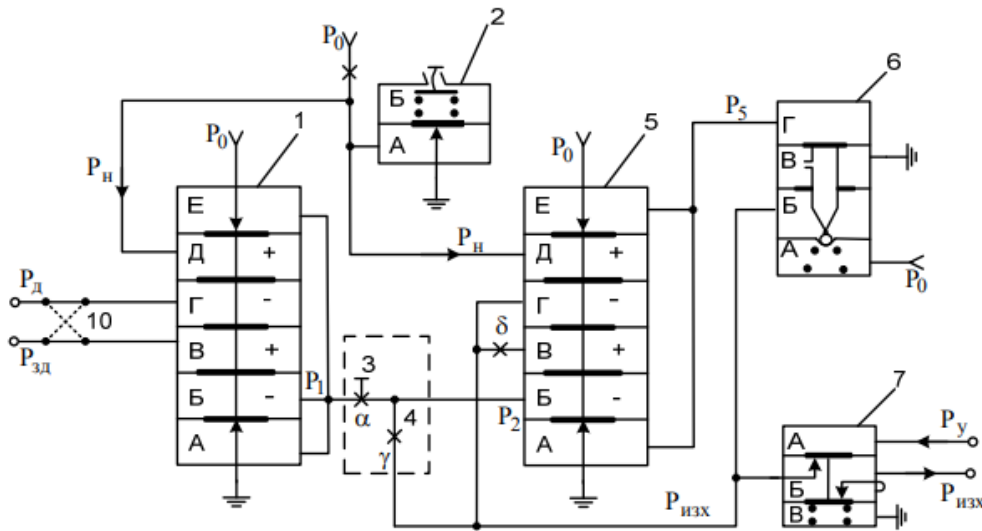
За регулатора ПР 1.6 хистерезисната зона 2β може да се задава в интервала от 0,01 до 0,08 МРа. За нормална работа е необходимо да са изпълнени неравенствата:

$$p_{зд} + \beta < 0,1 \text{ МРа,}$$

$$p_{зд} - \beta > 0,02 \text{ МРа.}$$

✓ *Пропорционален регулатор ПР 2.5*

Принципната схема на регулатора ПР 2.5 е показана на *фиг. 242*. Тя съдържа два петмембранни сравняващи елемента 1 и 5, задатчик 2 за настройка нивото на изходния сигнал при $p_d = p_{зд}$, регулируем дросел 3, постоянен дросел 4, превключващо реле 7 за дистанционно изключване на регулатора и усилвател на мощност 6.



фиг. 242. Принципна схема на регулатор ПР 2.5 [57]

Налягането p_1 след сумирация елемент 1 се определя по равенството;

$$p_1 = p_{зд} \cdot p_d + p_n.$$

Налягането p_2 (в камера Б на елемента 5) е резултат от сумирането на налягания p_1 и $p_{изх}$ от дроселния суматор, образуван от дросели 3 и 4.

$$p_2 = \frac{\alpha \cdot p_1 + \gamma \cdot p_{изх}}{\alpha + \gamma}.$$

Ако се запишат изразите за разхода на въздух G през съответните дросели

$$G_1 = \alpha (p_1 - p_2),$$

$$G_2 = \gamma (p_2 - p_{изх})$$

и се разглежда камера Б като проточна, то

$$G_1 = G_2$$

или

$$\alpha (p_1 - p_2) = \gamma (p_2 - p_{изх}).$$

Решава се относно $p_{изх}$

$$p_{\text{изх}} = \left(1 + \frac{\alpha}{\gamma}\right) \cdot p_2 - \frac{\alpha}{\gamma} \cdot p_1.$$

В установен режим $p_2 = p_n$. В такъв случай

$$p_{\text{изх}} = \left(1 + \frac{\alpha}{\gamma}\right) p_n - \frac{\alpha}{\gamma} \cdot p_1.$$

Замества се p_1 с неговото равно ($p_1 = p_{\text{зд}} - p_d + p_n$)

$$p_{\text{изх}} = \left(1 + \frac{\alpha}{\gamma}\right) p_n - \frac{\alpha}{\gamma} (p_{\text{зд}} - p_d + p_n),$$

$$p_{\text{изх}} = p_n + \frac{\alpha}{\gamma} p_n - \frac{\alpha}{\gamma} p_{\text{зд}} + \frac{\alpha}{\gamma} p_d - \frac{\alpha}{\gamma} p_n,$$

$$p_{\text{изх}} = \frac{\alpha}{\gamma} (p_d - p_{\text{зд}}) + p_n.$$

Коефициентът на регулатора $k_p = \frac{\alpha}{\gamma}$ може да се изменя в границите от 0,033 до 20.

Този диапазон съответства на зона на дроселиране от 5 до 3000%.

$$p_{\text{изх}} = k_p (p_d - p_{\text{зд}}) + p_n.$$

Пневматичният сигнал на разсъгласуването се усилва чрез обхващане на втория петмембранен суматор 5 с отрицателна обратна връзка. Предвидена е и демпфираща обратна връзка през постоянния дросел δ .

Изведеното по-горе уравнение описва работата на идеализиран П- регулатор. Вземайки предвид малките обеми на камерите и наличието на дросели, протичат преходни процеси, които могат да се опишат с уравненията:

$$p_1 = p_{\text{зд}} - p_d + p_n = p_n - \Delta p,$$

$$T_\gamma \frac{dp_2}{dt} + p_2 = k_1 \cdot p_{\text{изх}} + k_2 \cdot p_1,$$

$$T_\delta \frac{dp_\delta}{dt} + p_\delta = p_{\text{изх}},$$

$$p_\delta + p_n = p_2 + p_{\text{изх}},$$

където $k_1 = \frac{\gamma}{\alpha + \gamma}$, $k_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma}$, $T_\gamma = \frac{V_\gamma}{R_\theta(\alpha + \gamma)}$, $T_\delta = \frac{V_\delta}{SR_\theta}$.

Предавателната функция за разсъгласуването на реалния регулатор е:

$$W(p) = k_p \frac{T_6 \cdot p + 1}{T_\gamma T_6 \frac{1}{k_1} p^2 + T_6 (2 + k_p) \cdot p + 1} = W_{\text{и}}(p) W_6(p).$$

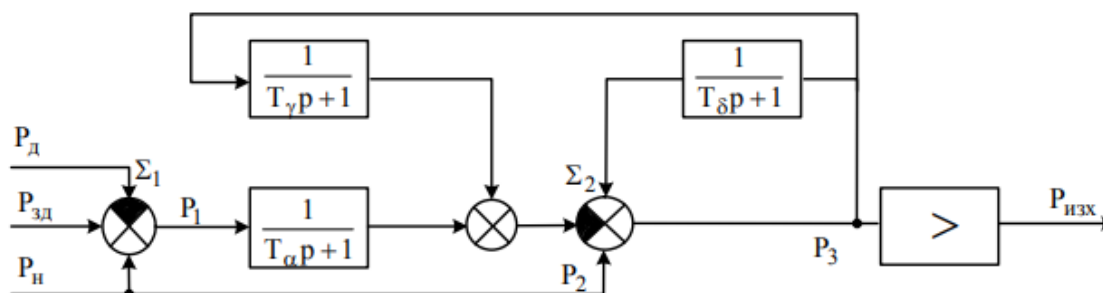
Тук $W_{\text{и}}(p)$ е предавателна функция на идеалния регулатор, а $W_6(p)$ - предавателна функция на баластното звено.

Относно входното налягане $p_{\text{н}}$, предавателната функция се получава от вида:

$$W_{\text{и}}(p) = \frac{(T_6 \cdot p + 1) \left(T_\gamma \frac{1}{k_1} \cdot p + 1 \right)}{T_\gamma T_6 \frac{1}{k_1} p^2 + T_6 (2 + k_p) p + 1}.$$

Колкото по-ограничен отгоре е честотният спектър на входните сигнали, толкова по-близка е реалната характеристика на регулатора до тази на идеалния регулатор.

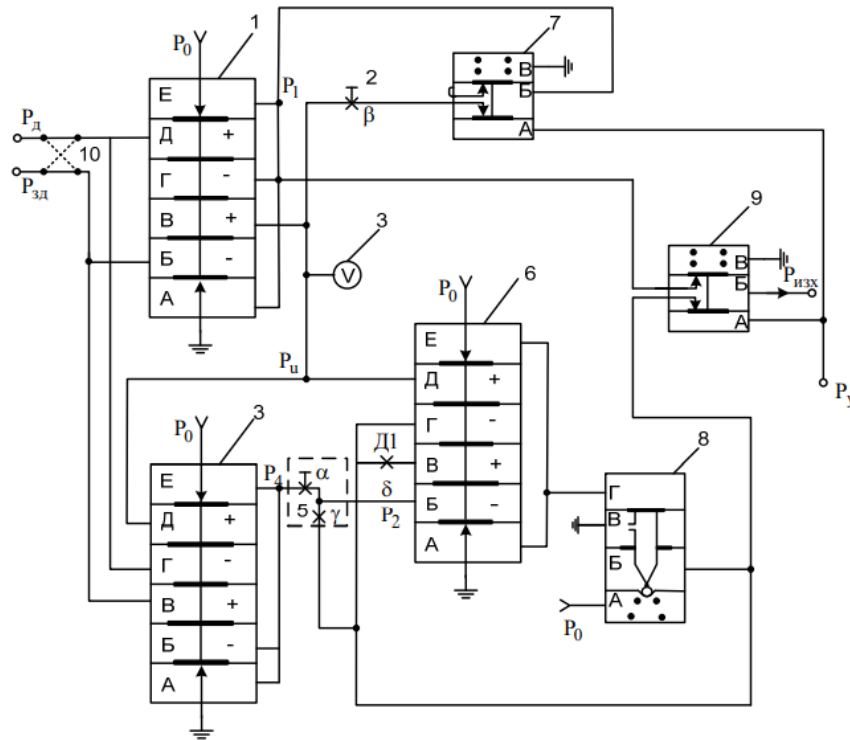
Пълната структурна схема на разглеждания пневматичен регулатор ПР 2.5 е изобразена на *фиг. 243*.



фиг. 243. Структурна схема на регулатор ПР 2.5 [57]

✓ Пропорционално-интегрален регулатор ПР 3.21

Регулаторът ПР 3.21 е един вариант на ПИ- регулатор. Състои се от две части (*фиг. 244*). Едната част формира П- компонентата и е аналогична на разглеждания П- регулатор ПР 2.5. Състои се от петмембранните суматори 4 и 6, дроселния суматор 5 и усилвателя на мощност 8. Интегралната част е изградена на петмембрания суматор 1, пневмокапацитета 3 и регулируемия дросел 2. Елементите 7 и 9 са превключващи релета.



фиг. 244. Принципна схема на регулатор ПР 3.21 [57]

Към суматора 1 се подават наляганията p_d и $p_{зд}$. Изходното налягане p_1 постъпва и в камера Г, при което се формира отрицателна обратна връзка.

На равновесно състояние на елемента 1 отговаря равенството:

$$p_1 = p_d \cdot p_{зд} + p_{и}$$

Налягането P_u се формира при запълването на обема 3 с въздух, преминаващ през регулируемия дросел 2. Съгласно уравнението на Клапейрон:

$$G = \frac{V}{R_\theta} \cdot \frac{dp_{и}}{dt},$$

където V е обемът на пневмокапацитета 3, а G - разходът на въздух през дросела 2.

От друга страна,

$$G = \beta(p_1 - p_{и}).$$

Решавайки съвместно двете уравнения, се получава:

$$\frac{V}{R_\theta\beta} \cdot \frac{d.p_{и}}{dt} + p_{и} = p_1.$$

Полага се $T_\beta = \frac{V}{R_\theta\beta}$ и се замества p_1 в уравнението за равновесното състояние на суматора 1.

$$T_{\beta} \frac{dp_{и}}{dt} = p_{д} - p_{зд}$$

След интегриране се получава:

$$p_{и} = \frac{1}{T_{\beta}} \int (p_{д} - p_{зд}) \cdot dt .$$

Изведеното уравнение на П- регулятора в предходния раздел имаше вида:

$$p_{изх} = k_p (p_{д} - p_{зд}) + p_{и}$$

В схемата на ПИ- регулятора, вместо налягането $p_{и}$ в камера Д на петмембранните суматори 4 и 6, се подвежда налягането $p_{и}$. В такъв случай

$$p_{изх} = k_p (p_{д} - p_{зд}) + \frac{1}{T_{\beta}} \int (p_{д} - p_{зд}) \cdot dt .$$

Предавателната функция на идеалния ПИ- регулятор е от вида:

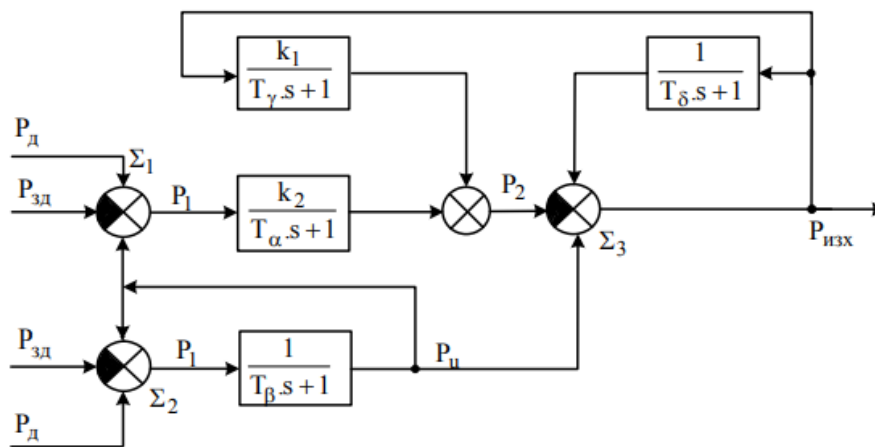
$$W_{и}(p) = k_p + \frac{1}{T_{\beta} \cdot p}$$

Реалната предавателна функция е с баластно звено

$$W(p) = W_{и}(p) \cdot W_{\beta}(p) ,$$

където
$$W_{\beta}(p) = \left(1 + \frac{1}{k_1} \cdot \frac{T_{\gamma} \cdot p}{k_2 T_{\gamma} p + 1} \right) \cdot \frac{T_{\beta} \cdot p + 1}{\frac{T_{\gamma} T_{\beta}}{k_1} \cdot p^2 + T_{\beta} (2 + k_p) \cdot p + 1}$$

Пълната структурна схема на реалния ПИ- регулятор ПР 3.21 е показана на *фиг. 245*.



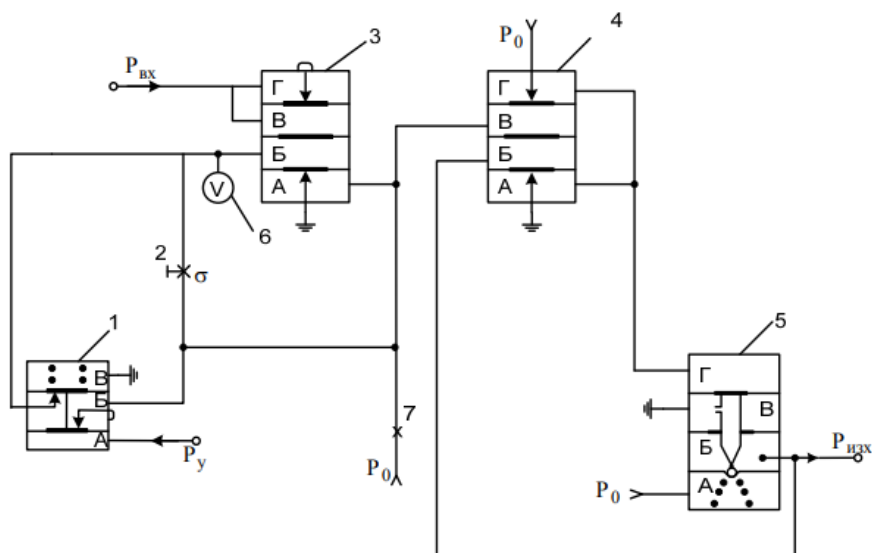
фиг. 245. Структурна схема на регулатор ПР 3.21 [57]

Коефициентът на регулатора K_p може да се задава в границите от 0,033 до 20, а времеконстантата на интегриране - от 0,05 до 100 min.

✓ *Пропорционално-интегрално-диференциален регулатор ПР 3.21*

ПИ- регулаторът ПР 3.21 е основна съставна част на регулатора ПР 3.25. За формиране на Д- компонента е въведено пневматично диференциращо звено, наречено устройство за изпреварване.

На *фиг. 246* е показана принципната схема на устройство за изпреварване тип ПФ 2.1. Изградено е от превключващо реле 1, регулируем дросел 2, тримембранните суматори 3 и 4, усилвател на мощност 5, пневмокапацитет 6 и постоянен дросел 7. В установен режим ПФ 2.1 работи като повторител.



фиг. 246. Принципна схема на устройство за изпреварване ПФ 2.1 [57]

При промяна на входния сигнал $p_{вх}$ (напр. нарастване), мембранныят блок на елемента 3 се спуска надолу и притваря долната дюза. Налягането на изхода на този елемент $p_{изх1}$ рязко нараства. Това налягане постъпва в камера В на суматора 4 и през инерционното звено, изградено от дросела 2 и пневмокамерата 6, към камера Б на суматора 3. От елемента 4 през усилвателя 5 $p_{изх}$ нараства със скок около 0,1 МРа. Спадането на това налягане става бавно, под действие на отрицателната обратна връзка, подведена към камера Б на елемента 3 през инерционното звено. Скоростта на спадане на $p_{изх}$ зависи от степента на отвореност на дросела 2. Посредством реле 1 се изключва изпреварващото действие на устройството.

За налягането в камера Б на суматора може да се запише:

$$\frac{V_6}{R_\theta} \cdot \frac{dp_6}{dt} = \gamma(p_{\text{изх1}} - p_6),$$

$$\frac{V_6}{\gamma R_\theta} \cdot \frac{dp_6}{dt} + p_6 = p_{\text{изх1}}.$$

В това уравнение V_6 е обемът на пневмокапацитета б и камера Б на суматора 3,

$$T_d = \frac{V_6}{\gamma R_\theta}. \text{ Тогава}$$

$$T_d \frac{dp_6}{dt} + p_6 = p_{\text{изх1}}.$$

В операторен вид

$$p_6(p) = \frac{1}{T_d \cdot p + 1} \cdot p_{\text{изх1}}(p).$$

В равновесно състояние за суматора 3 е в сила равенството:

$$p_{\text{вх}} \cdot F - p_6(F - f) = p_{\text{изх1}} f,$$

$$p_{\text{изх1}} = \frac{F}{f} \cdot p_{\text{вх}} - \frac{F - f}{f} \cdot p_6,$$

където F и f са активна площ на голямата и малката мембрани.

$$\text{Замества се } k = \frac{F}{f}$$

$$p_{\text{изх1}} = k p_{\text{вх}} - (k - 1) \cdot p_6.$$

В операторен вид

$$p_{\text{изх1}}(p) = k p_{\text{вх}} + (1 - k) \cdot p_6(p).$$

От уравнението за равновесното състояние се замества p_6 .

$$p_{\text{изх1}}(p) = k p_{\text{вх}}(p) + \frac{1 - k}{T_d p + 1} \cdot p_{\text{изх1}}(p),$$

$$\left(1 - \frac{1 - k}{T_d \cdot p + 1}\right) \cdot p_{\text{изх1}}(p) = k \cdot p_{\text{вх}}(p),$$

$$p_{\text{изх1}}(p) = \frac{k(T_d \cdot p + 1)}{T_d \cdot p + k} \cdot p_{\text{вх}}(p).$$

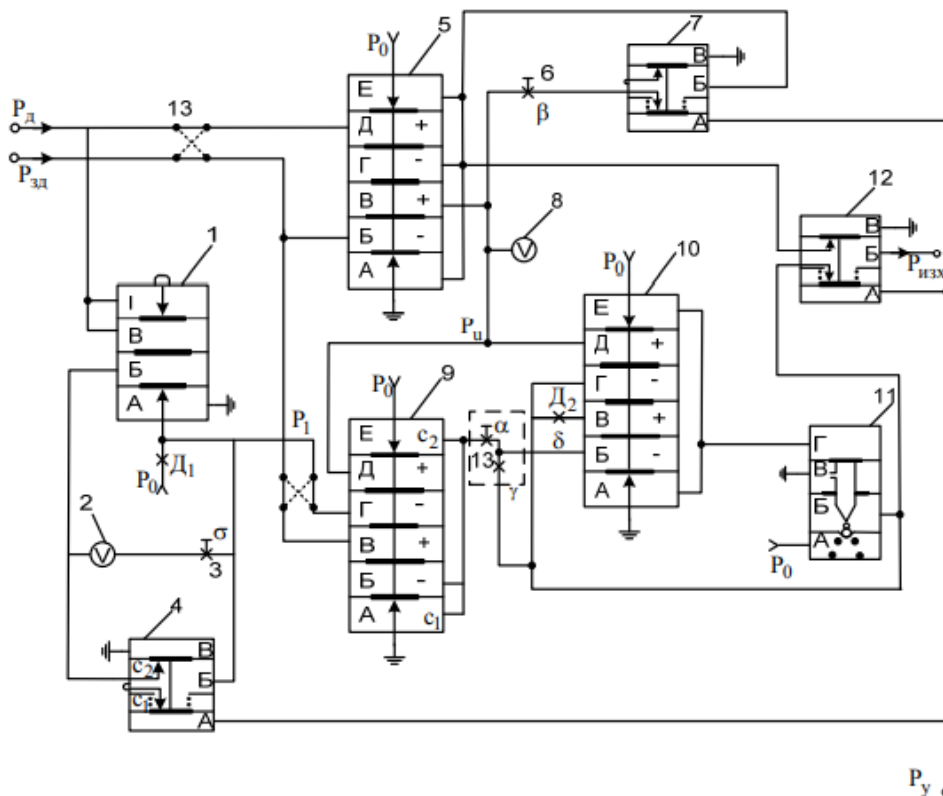
Получава се следната предавателна функция:

$$W(p) = \frac{k(T_d \cdot p + 1)}{T_d \cdot p + k} = \frac{k}{T_d \cdot p + k} + \frac{k \cdot T_d \cdot p}{T_d \cdot p + k}$$

Тук T_d е времеконстанта на диференциране или време на изпреварване. Чрез дросела 2 (γ) могат да се зададат стойности за T_d от 0,05 до 10 min.

Предавателната функция показва, че при скокообразно изменение на входа, изходният сигнал нараства и спада до новата установена стойност по експонента.

На *фиг. 247* е изобразена принципната схема на ПИД- регулатор ПР 3.25. Трите компоненти от закона на регулиране се формират, както следва: на елементи 5, 6, 7 - интегралната компонента, на елементи 1, 2, 3, 4 - диференциалната компонента и на елементи 9, 10 и 13 - пропорционалната компонента. 4, 7 и 12 са превключващи релета, а 11 - усилвател на мощност на регулатора.



фиг. 247. Принципна схема на регулатор ПР 3.25 [57]

Уравненията, с които се описва действието на идеализирания ПИД- регулатор, са съответно:

$$P_{изх} = k_p (P_1 - P_{зд}) + P_i,$$

$$p_u = \frac{1}{T_\beta \cdot p} (p_d - p_{зд}),$$

$$p_1 = (T_\delta \cdot p + 1) \cdot p_d.$$

Изключвайки междинните променливи, относно разсъгласуването $\Delta p = (p_d - p_{зд})$, се получава:

$$p_{изх} = k_p (p_d - p_{зд}) + \frac{1}{T_\beta} \int (p_d - p_{зд}) dt + k_p T_\delta' \frac{dp_1}{dt},$$

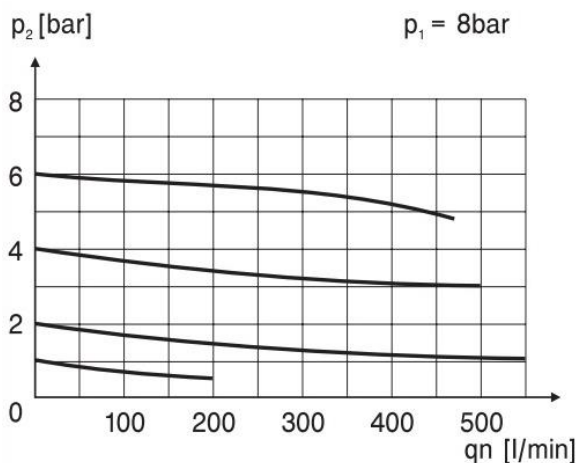
където k_p е коефициент на усилване; $T_\beta = \frac{V_\beta}{\beta R_\theta}$ - интегрираща времеконстанта; $T_\delta' = \frac{F}{f} T_\delta$

- диференцираща времеконстанта.

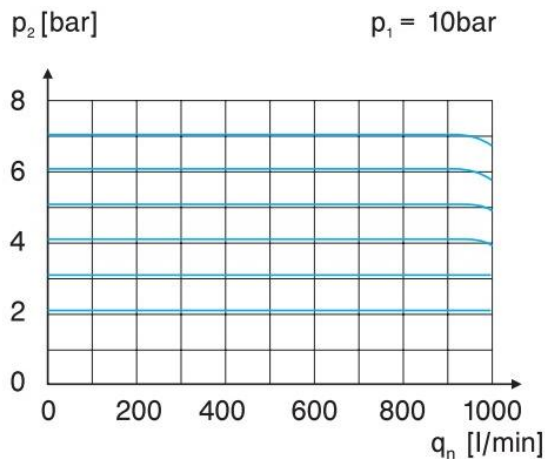
Параметрите на настройка на регулатора ПР 3.25 могат да се зададат в границите: за T_β от 3 s до 100 min (чрез дросела β), за T_δ от 3s до 10 min (чрез дросела δ) и за k_p от 0,03 до 20 (чрез дросела α).

3.3.5. ПНЕВМАТИЧНИ РЕГУЛАТОРИ НА НАЛЯГАНЕ И ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕТО ИМ В РАЗЛИЧНИ ПНЕВМАТИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

Пневматичните регулатори за обща употреба са с характеристики, които задоволяват изискванията на повечето индустриални приложения. На *фиг. 248* са показани статични дебитни характеристики на пневматичен регулатор на налягане, изобразяващи изходното налягане p_2 като функция на масовия дебит q , при постоянно входно налягане p_1 . По отношение на идеалния регулатор тези линии би следвало да бъдат прави, успоредни на хоризонталната ос, т. е. не би трябвало да има промяна в изходящото налягане.



фиг. 248. Статична дебитна характеристика на пневматичен регулатор на налягане



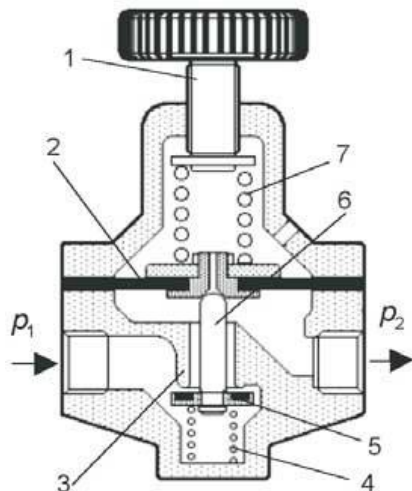
фиг. 249. Дебитната характеристика на прецизен регулатор - пневматичен регулатор на налягане

Прецизните регулатори се използват в приложения, в които е необходимо налягането да се контролира в тесен диапазон. Типични техни приложения са инструменталните системи, пневматичните спирачни системи и медицинските устройства. Логично, конструкцията е сложна, а цената им - по-висока. На *фиг. 249* е показана дебитната характеристика на прецизен регулатор. Видно е, че тя се доближава много до характерната за идеален регулатор.

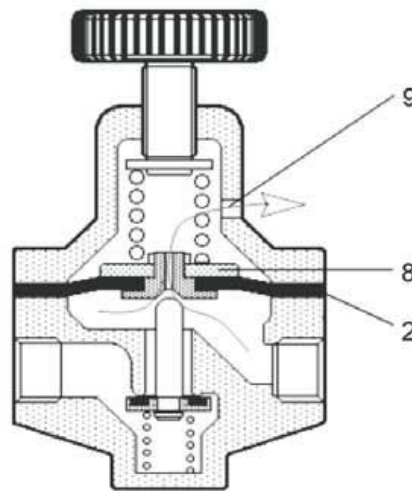
Регулаторите на налягане в пневматичните системи обикновено не показват проблеми със стабилността. Колебания могат да се наблюдават при регулатори с вътрешен предпазно-изпускателен клапан в моментите на отварянето му към атмосферата.

Регулаторите с пряко действие са най-широко разпространени. Принципно конструктивна схема на подобен регулатор е показана на *фиг. 250*. В изходна позиция - под действие на пружината 7, чрез мембраната 2 и стеблото 6, затворът с еластично уплътнение 5 е максимално отдалечен от седлото 3. Следователно, входният и изходният канал на регулатора са свързани помежду си. Пружината 4 придържа регулиращия елемент, притиснат към мембраната, от долната страна на която действа изходното налягане p_2 . При постъпване на сгъстен въздух, налягането p_2 се повишава до стойност, при която силата от налягането върху мембраната се изравни със силата на пружината 7. След тази стойност затворът 5 се повдига и притваря управляващия процеп, при което преминаващият поток се дроселира и въздухът напуска регулатора с налягане, което съответства на настройката на пружината, чрез винта 1. В регулаторите, както е видно и в разглежданата конструкция, често се вгражда втори клапан с предпазни функции. Ако по някаква външна причина, налягането във вторичната страна се увеличи до стойности, които са по-високи от настройката, например при промяна на

натоварването на захранвания пневматичен изпълнителен механизъм, мембраната се повдига - *фиг. 251*, през отвора в мембранната тарелка 8. Въздухът изтича в атмосферата през отвора за вентилиране 9.

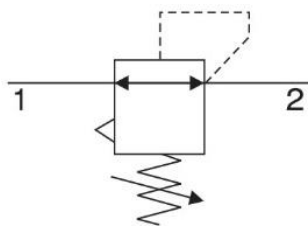


фиг. 250. Схема на пневматичен регулатор на налягане с пряко действие - изходна позиция [58]

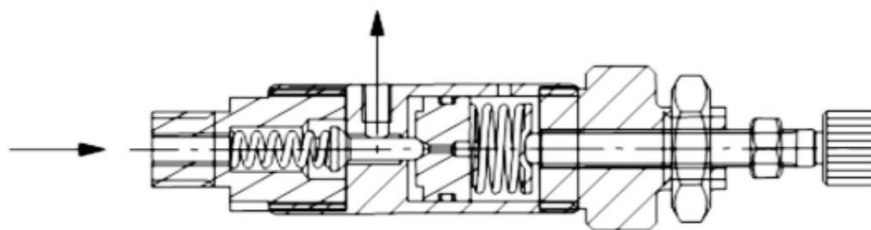


фиг. 251. Схема на пневматичен регулатор на налягане с пряко действие изтичане през отвора вентилиране [58]

На *фиг. 252* е показан стандартният символ за условно изобразяване на пневматичен регулатор с предпазен клапан.



фиг. 252. Символ на пневматичен регулатор с предпазен клапан



фиг. 253. Регулатор на налягане с бутало

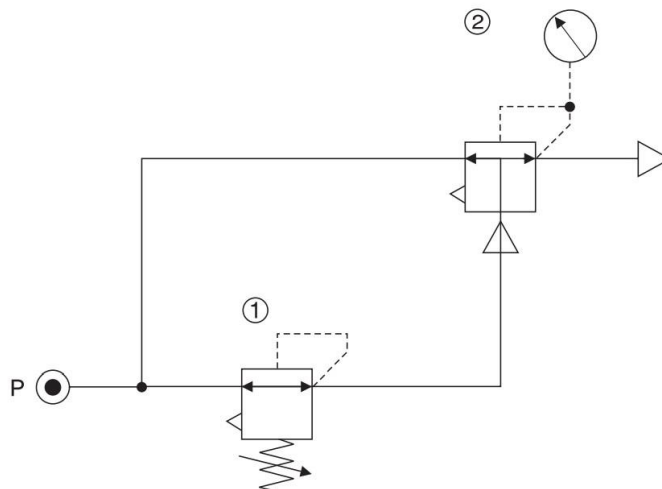
В някои конструкции за подобряване на функционалността се използва балансиран регулиращ елемент, от двете страни на който действа едно и също налягане. По този начин се елиминира влиянието на налягането върху позицията на затвора и размерът на дроселиращото сечение. Резултатът е значително повишаване на чувствителността и качеството на регулиране. Вместо плоски мембрани, в някои регулатори се използват силфони, за да се увеличи преместването на затвора.

Вместо мембрана, във функцията на чувствителен елемент е възможно да се използва бутало - *фиг. 253*. Решението е характерно за малките и миниатюрните регулатори. Типични техни приложения са отличаващите се с високи налягания. Буталото има по-голяма ефективна площ на чувствителния елемент при дадени габарити. Като цяло, обаче, малките и миниатюрните регулатори реагират по-бавно.

Най-типичната област, в която се използва този тип регулатори, е за повишаване икономичността на работа в системи с пневмоцилиндри. В много случаи цилиндрите развиват големи сили по време на работния си ход, докато при обратния ход се преодоляват много малки сили. Чрез подходящо включване във веригата за управление на пневмоцилиндъра, един регулатор може да се настрои на възможно най-ниското налягане, осигуряващо устойчиво движение на буталото. Регулаторът функционира само по време на неработния ход. Това води до значителни икономии на сгъстен въздух, т.е. до по-висока икономическа ефективност.

В приложения, характеризирани се с чести промени в изходното налягане по време на работа, се прилагат регулатори с пневматично управление. При тях, за генериране на определена сила, противостояща и определяща изходното налягане, се използва не пружина, а управляващо налягане, което въздейства върху чувствителния елемент - мембрана или бутало. Пример за начин на включване на подобен регулатор в пневматична система и условното му обозначение е показан на *фиг. 254*. С позиция 1 е означен прецизен пневматичен регулатор, а позиция 2 - регулатор с пневматично управление. Илюстрираното техническо решение се използва, когато регулаторът трябва да се инсталира на място, неудобно за настройка. По този начин се разделят задаващият и регулиращият механизъм. Типично, решението се използва в конвенционалните пневматични спирачни системи на превозни средства, където командата за спиране следва да бъде пренесена от педала през дълги линии до спирачните цилиндри. За да се избегнат значителните хидравлични загуби и големите обеми между педала и спирачните цилиндри, които иначе трябва да се допълват при всяко задействане на спирачката, се използва регулатор с пневматично управление. Той действа като усилвател, а именно, слаб сигнал от педала се усилва, управлявайки поток с определено

налягане и почти неограничен дебит. Подобни регулатори се използват и във взривоопасни производства, за да се избегнат електрически управляващи сигнали.



фиг. 254. Включване на регулатор на налягане в пневматична система

Регулаторите с непряко (пилотно) управление също функционират на основата на описания вече принцип на пневматично управление. При тях, управляващият (пилотен) клапан, задаващ налягането, и основният регулатор са обединени в общ корпус. Логично е, че при големи дебита и налягания, пружината на регулатор с пряко действие би трябвало да има много големи размери. Предназначението на пилотния клапан е да доставя управляващо налягане за позициониране на регулиращия елемент на регулатора, като поддържа постоянна разликата между изходното и управляващото налягане. Всяко изменение на изходното налягане въздейства върху пилотния клапан, който променя управляващото налягане към регулатора. Регулаторите от този тип се характеризират с много малка грешка при регулиране. Затова повечето прецизни регулатори са с непряко управление. Недостатък е, че са по-бавни като бързо действие. Друга тяхна специфика е, че за да функционира пилотният клапан, през него преминава непрекъснато определен управляващ дебит, дори и при дебит нула през регулатора. Това определя дадена постоянна загубена мощност. В съвременните конструкции управляващият дебит е много малък - около 2 l/min.

Чисто механичните пневматични регулатори се отличават с редица предимства, сред които: ниска цена, здрава конструкция, отсъствие на необходимост от допълнителен източник на енергия. Използването им в автоматизирани приложения, обаче, е силно затруднено. Особено, ако процесите изискват промяна в налягането, централизираното му управление или при монтаж на регулатора на труднодостъпно място.

Затова са разработени т.нар. пневматични регулатори с електрическо/електронно управление. В най-използваните електропневматични регулатори управляващата пружина е

заменена с пропорционален електромагнит, който генерира сила, строго пропорционална на електрически управляващ сигнал (типично 0- 5VDC, 0- 10VDC или 4- 20mA). Тъй като силата, създавана от електромагнит, е ограничена и много по-малка от постиганата с пружина, силите от триене трябва да са възможно най-малки. Един от начините да се постигне използва подходящо модулиран електрически сигнал, който поддържа механичните части постоянно в движение, за да се намали триенето. В други конструкции, за да не се използват уплътнения с триене, се използват силфонни уплътнения. Независимо от конструкцията, преобразувател следи изходното налягане и формира електрически сигнал, съответстващ на големината на налягането. Вграден в регулатора процесор сравнява текущата стойност с управляващия сигнал и подава въздействие, целящо увеличаване или намаляване на изходното налягане. Ако е необходимо, регулаторът би могъл да осигури изходящ електронен сигнал за централизирано управление на процесите, за събиране и обработка на данни и др. Произвеждат се и модели с цифрово управление.

✓ **Варианти на електропневматични регулатори на налягане**

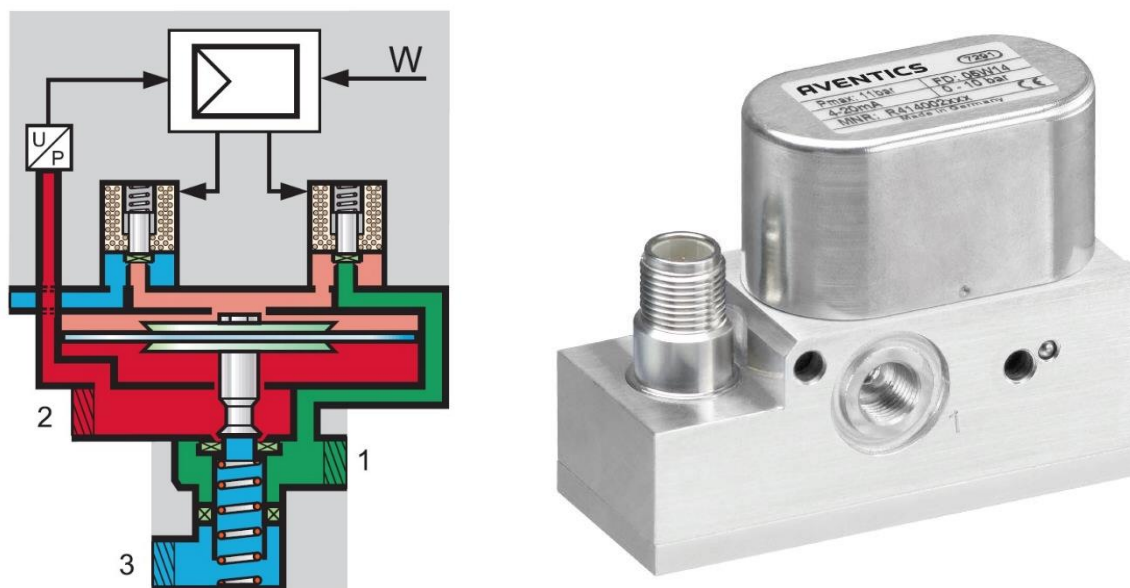
В електропневматичната технология за регулиране на налягането се използват три различни принципа.

- Пилотно управление
- Директно управление
- Високо динамично управление

При електропневматичните регулатори Е/Р на налягане се използва тарелков клапан, който е защитен от замърсяване, поради относително голямото напречно сечение и използване на меки уплътнения.

Регулаторите на налягане са подходящи за сух сгъстен въздух и инертни газове. Ако управляваните устройства работят с омаслен въздух, то омаслителят трябва да се постави след регулатора, за да не се измие оригиналната смазка на клапана.

Описаният вид регулатори имат няколко ограничения. Поради присъщите свойства на електромагнитите, те се използват в приложения с ниска честота. Малката сила, създавана от електромагнита, ограничава размерите на чувствителния елемент, а следователно намалява и максималния дебит (пропускателната способност). Често електропневматичните регулатори се използват като пилотни за управление на по-големи регулатори с пневматично управление.



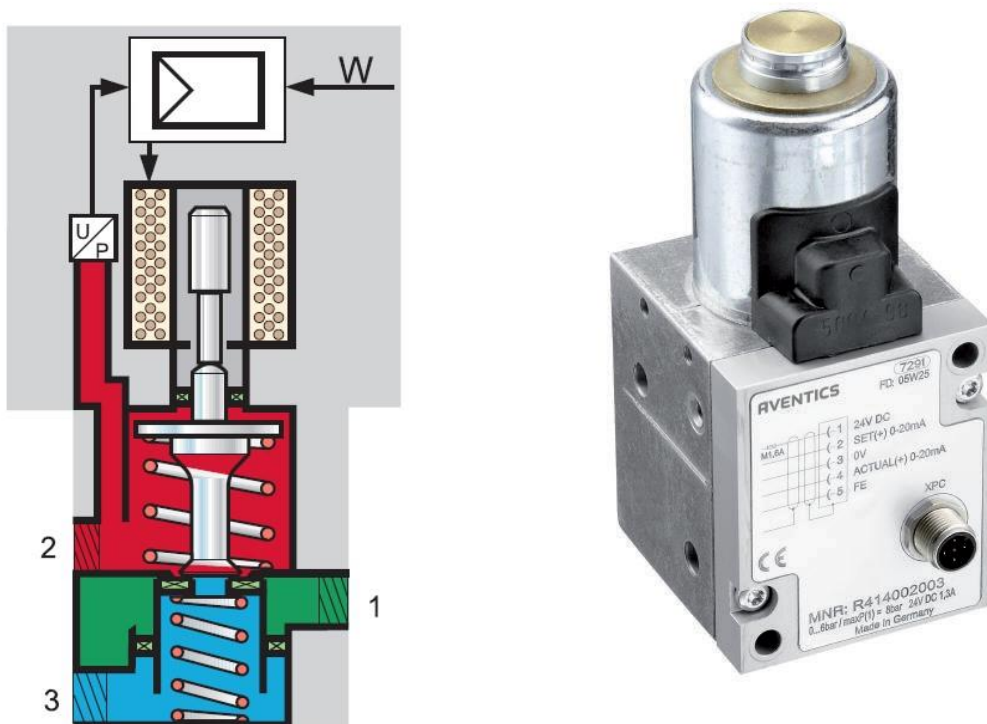
фиг. 255. Електропневматичен регулатор с пилотно управление [19]

W - задаващо електрическо напрежение, U/P - преобразувател налягане електрическо напрежение /обратна връзка/, 1 - входно налягане /захранващо/, 2 - изходно/работно налягане, 3 - атмосферно налягане

На *фиг. 255* е показан електропневматичен регулатор на налягане с два пилотни клапана с пропорционални магнити. Пропорционалните магнити се управляват от електрически суматор, който сравнява зададеното напрежение и напрежението на преобразователя на налягане.

✓ Електропневматичен регулатор на налягане с директно управление с пропорционален магнит

На *фиг. 256* и *фиг. 257* е показана схема на електропневматичен регулатор с директно управление, използващ 3/3 пневматичен клапан.

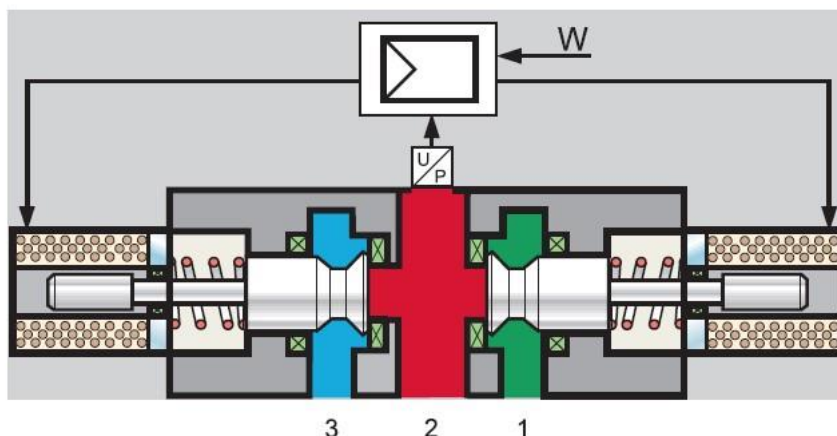


фиг. 256. Електронневматичен регулатор с директно управление, използващ 3/3 пневматичен клапан [19]

W - задаващо електрическо напрежение, U/P - преобразувател налягане електрическо напрежение /обратна връзка/, 1 - входно налягане /захранващо/, 2 - изходно/работно налягане, 3 - атмосферно налягане

Чрез принципа на директно управление, силата за регулиране на клапана, се осигурява директно от пропорционален магнит. Налягането се измерва на изхода и се изпраща сигнал до електронния суматор, който променя големината на електрическия ток и в резултат на това отварянето на клапана. Чрез директно задвижване се избягват инерцията и хистерезиса при механичните елементи. Регулирането на налягането зависи само от точността на използвания сензор за налягане.

По този начин може да се постигне много по-висока динамика с малки динамични грешки.



фиг. 257. Електропневматичен регулатор с директно управление, използващ 3/3 пневматичен клапан [19]

W - задаващо електрическо напрежение, U/P - преобразувател налягане електрическо напрежение /обратна връзка/, 1 - входно налягане /захранващо/, 2 - изходно/работно налягане, 3 - атмосферно налягане

✓ Високодинамично управление

В този случай се използват два 2/2- пътни клапана, вместо 3/2- пътен клапан вид контрол. Освен възможността за по-голям дебит на въздуха, друго предимство на този тип управление е неговите динамични характеристики. Двата управляващи клапана могат да се управляват независимо един от друг.

✓ Приложение на електропневматичен регулатор на налягането в индустрията

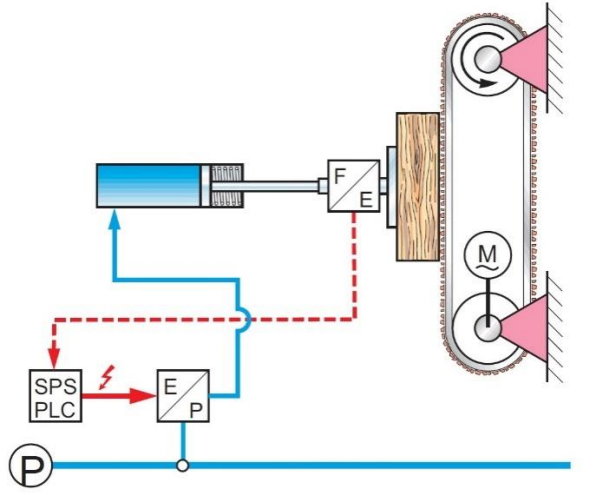
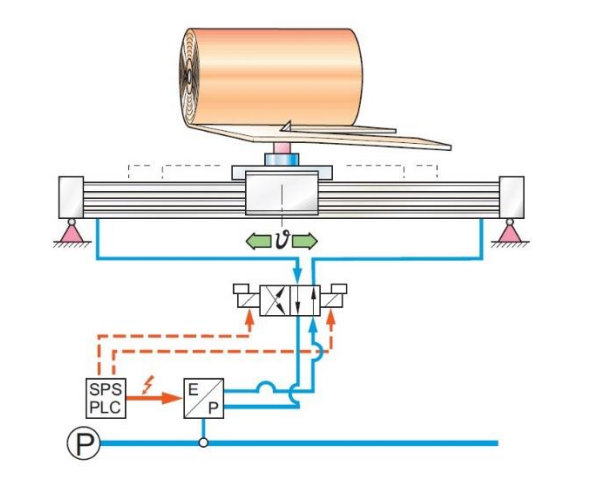
В съвременната индустрия електропневматичните регулатори на налягане намират широко приложение. По-важните приложения са:

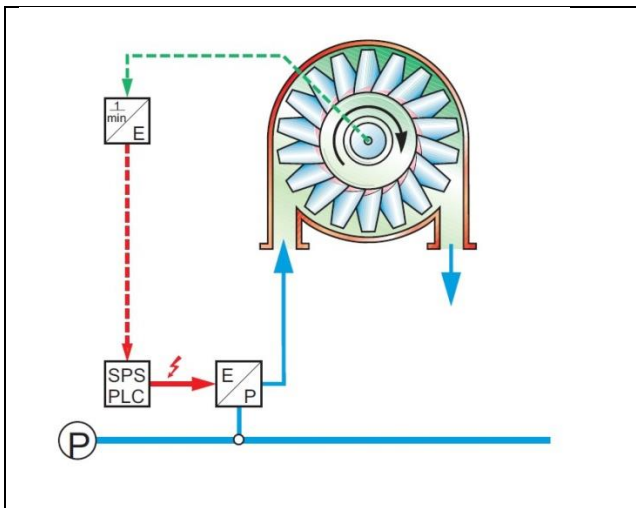
- Регулиране на контакт на налягане, скоростта или оборотите в минута
- Регулиране на компенсаторни ролки
- Регулиране на количеството боя при промишлено боядисване

- Управление на режимите на заваряване
- Управление на баланса
- Регулиране на дебита течности и газове
- Управление подавания въздух при производството на бутилки
- Дозиране на течности в системи за пълнене
- Регулиране на силата за изпитвания на материали в съоръжения за изпитване
- Регулиране на спирачната сила в машини и системи
- Регулиране на нивото на пълнене с дозиращи клапани

В таблица 3 са показани типични приложения на електропневматични регулатори в различни индустриални машини и процеси.

Приложение на електропневматични регулатори са показани на *фиг. 258.*

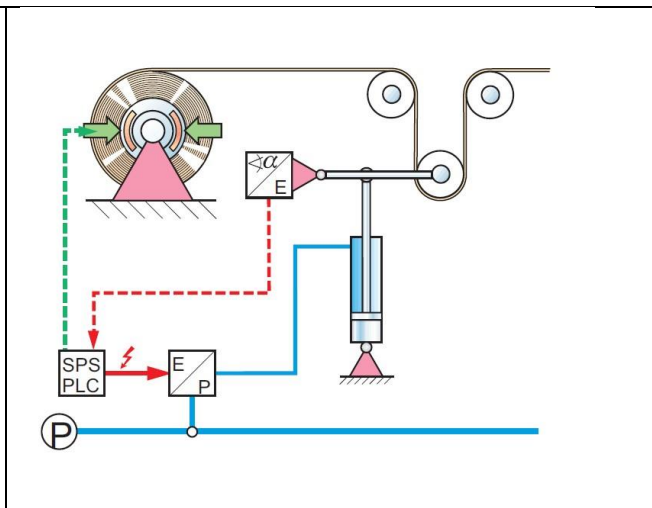
	
<p>Регулиране на контактно налягане [19] Поддържайки контактното налягане върху обработващия инструмент, осигурява качествата на повърхностната обработка на материалите</p>	<p>Регулиране на скоростта [19] Чрез регулиране на налягането в камерата на пневматичния цилиндър е възможно да се постигнат различни скорости на движение на изпълнителния механизъм.</p>



Регулиране на скоростта на вала [19]

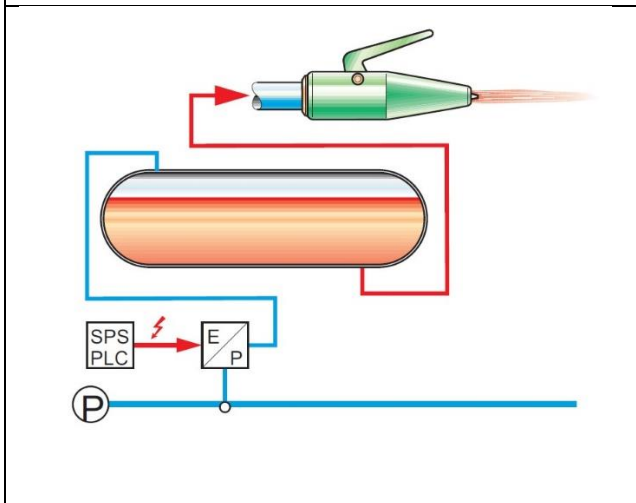
/обороты на въртене/

Чрез регулиране на налягането на въздушния поток може да се постигне регулиране на ъгловата скорост на вала на пневматични мотори и турбини. Обратната връзка в системата се осъществява с помощта на сензор на ъгловата скорост.



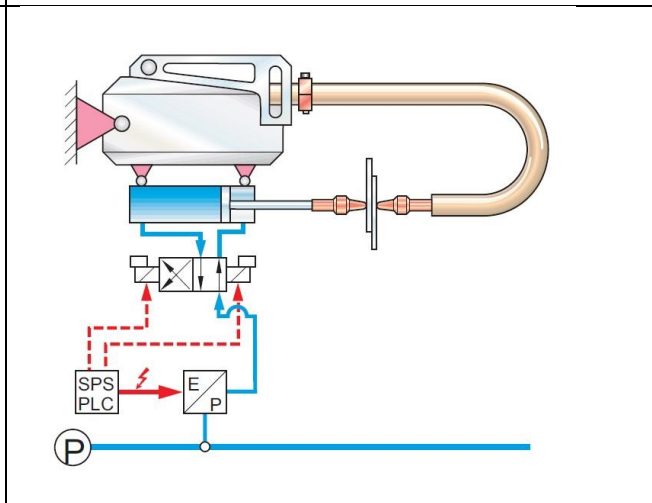
Регулиране на компенсативни ролки [19]

Чрез промяна на налягането в пневматичната система на компенсиращите ролки се регулира опъването на материала в рулонни системи. Предотвратява се разкъсване на тъканта и заплитането и осигурява оптимално подаване на материала.



Регулиране качеството при боядисване [19]

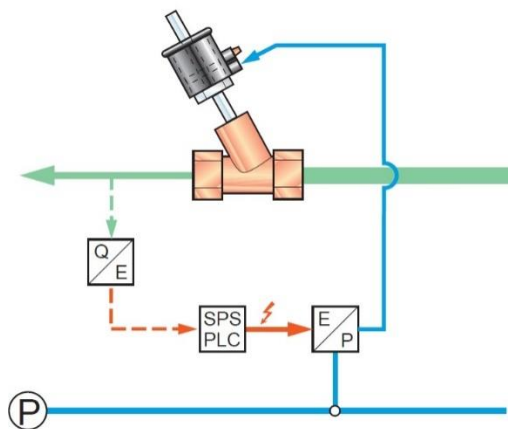
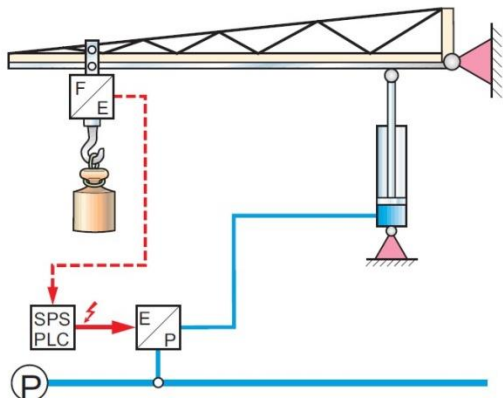
В системите за боядисване електропневматичните регулатори осигуряват качеството на боядисване на всеки слой боя. Имат и важна функция при смяната на цвета и почистването на дюзите.



Регулиране на заваръчен процес [19]

Електропневматичното регулиране на заваръчните електроди има приложение в автомобилната индустрия. Регулаторите осигуряват точно отваряне на заваръчните клещи и прецизно регулират силата в заваръчната глава.

Електропневматичния регулатор Е/Р поддържа постоянно налягането в контейнера за боядисване.

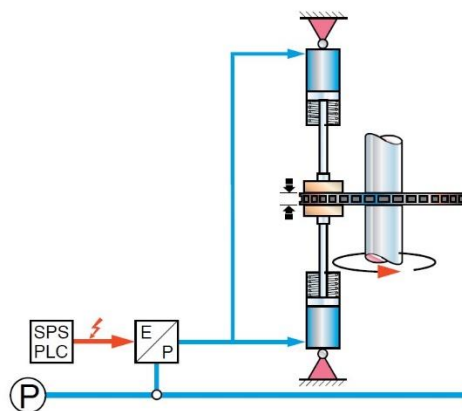
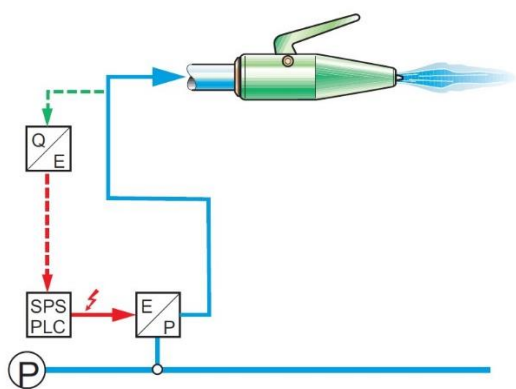


Регулиране на балансиращи тежести [19]

Електропневматичното регулиране на балансиращите тежести се прилага при големи товари и компоненти, за да се осъществи лесен процес на сглобяване. Регулира се налягането в пневматичен цилиндър при понасяне на тежки товари. Като се използва Е/Р регулатор, поддържащата сила винаги може да се адаптира оптимално към товара, който трябва да се премести.

Регулиране дебита на течности [19]

Регулаторът на налягане Е/Р променя отвора на напречното сечение на клапан за дебит, който променя дебита на течността през него. Непрекъснато измерване на дебита със сензор за дебит позволява безстепенно и постоянно регулиране на преминаващия през клапана дебит.

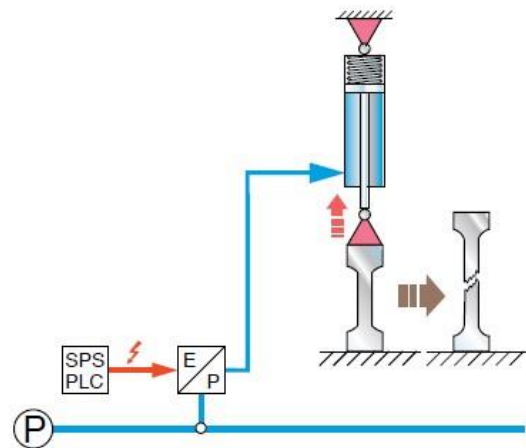
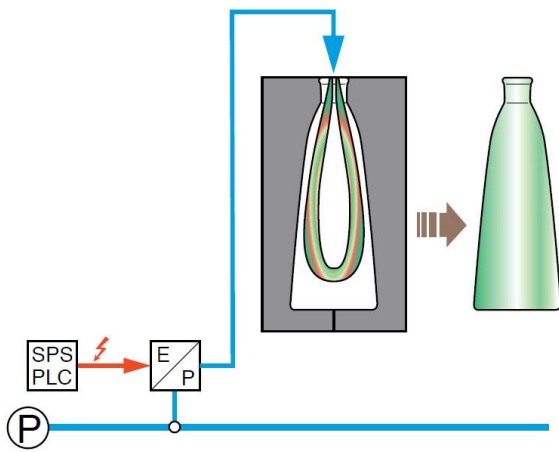


Регулиране на количество въздух [19]

Регулиране на спирачното усилие [19]

Дебитът на въздуха през дюза може се регулира точно с помощта на изменението на налягане на входа. Точността може да бъде оптимизирана чрез инсталиране на сензор за дебит Q/E и преобладаващ контрол на скоростта.

С регулатора на налягането E/P се прилагат различни спирачни сили към спирачен диск, в съответствие със съответния задаващ сигнал. Въртящата се маса може да се забави и спира в съответствие с предварително програмирано изменение на скоростта.

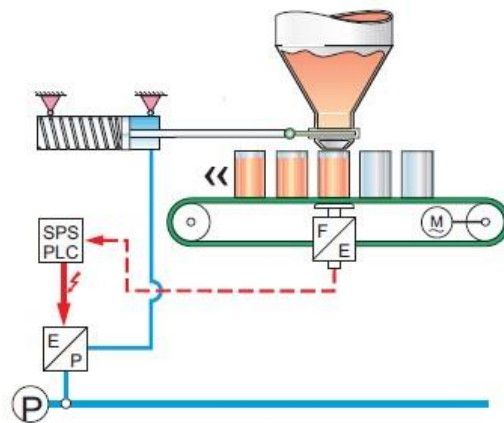
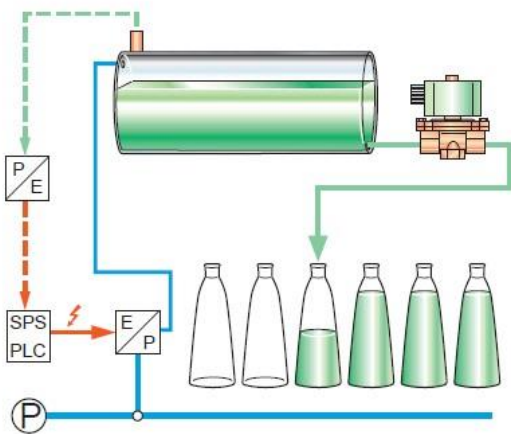


Производство на бутилки [19]

Чрез поддържане на правилния дебит на въздуха и въздушно налягане чрез електропневматичния E/P регулатор, бутилката се издува във матрицата и се оформя според зададената форма.

Изпитване на материали [19]

Чрез електропневматичния регулатор E/P се регулира силата върху изпитвания материал. Силата се увеличава постепенно, докато не се разруши изпитвания образец.



Дозиране на течности [19]

Регулиране на запълването на

<p>Електропневматичният Е/Р регулатор на налягането поддържа налягането в захранващия резервоар. Течността тече към клапана за пълнене с постоянно налягане, независимо от нивото на запълване в резервоара.</p>	<p>контейнери [19] Електропневматично управлявани дозиращи клапани се използват за регулиране на запълването на контейнери за насиптни материали. Използва се сензор за теглото F/E на контейнера, за да се осигури точност на запълването.</p>
--	---

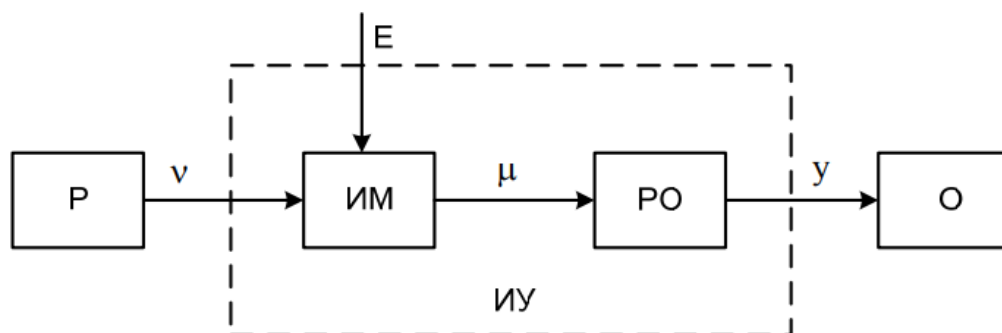
фиг. 258. Приложение на електропневматични регулатори

Електропневматичните регулатори осигуряват динамични движения, точен момент и винаги правилната сила са задължителни в технологиите за манипулиране и автоматизация. Управлението на технологичните процеси и машини е базиран обикновено на SPS/PLC системи със съответно машинно програмиране. Електропневматичните регулатори са важен съществен интерфейс между управляващия контролер и технологичния процес или машината. Те се използват за надеждно и прецизно регулиране на наляганя и сили за всяка стъпка от процеса.

3.4. ИЗПЪЛНИТЕЛНИ МЕХАНИЗМИ

3.4.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ. КЛАСИФИКАЦИЯ

Изпълнителните устройства (ИУ) са съставна част на всяка САР. Чрез изпълнителните устройства се въздейства върху количеството материал или енергия, които постъпват към технологичния обект. Степента на въздействие се определя от получаваната информация в режим на автоматично регулиране или при дистанционно или ръчно управление. Основните блокове, от които се състои изпълнителното устройство са два - изпълнителен механизъм (ИМ) и регулиращ орган (РО) (*фиг. 259*).



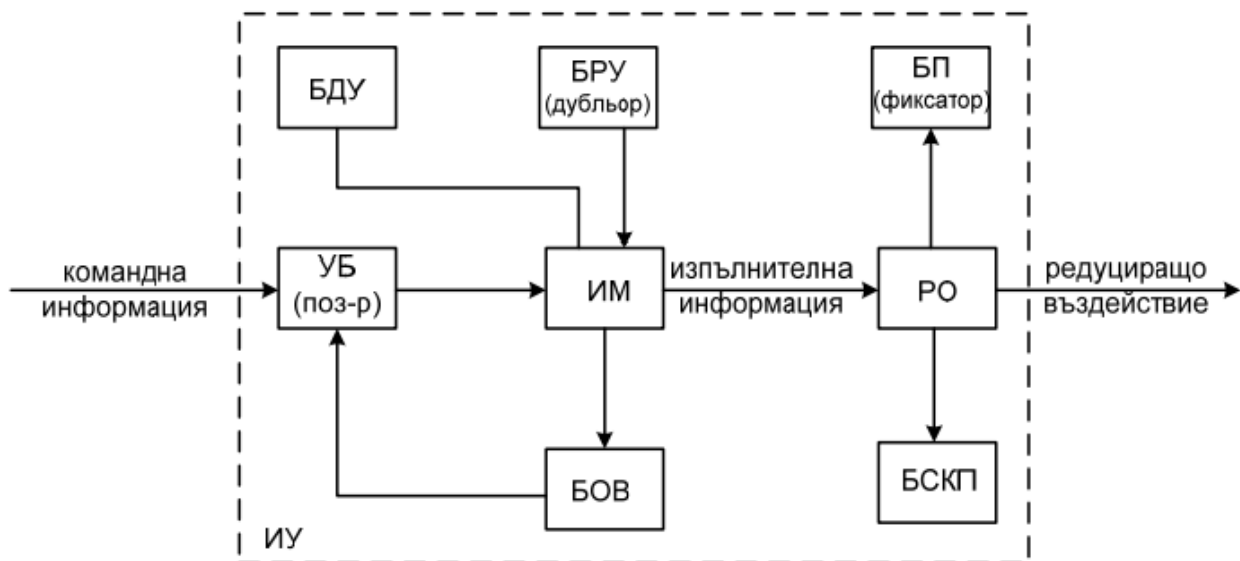
фиг. 259. Блокова схема на изпълнително устройство

P - регулаторът, *ИУ* - изпълнително устройство, *ИМ* - изпълнителен механизъм,
РО - регулиращ орган, *О* - обектът за регулиране, *Е* - външен източник,

Изпълнителния механизъм преобразува входния сигнал от регулатора v в сигнал, който чрез съответна връзка осъществява изпълнително въздействие μ върху регулиращия орган. Изпълнителния механизъм е задвижващата част на изпълнителните устройства. Регулиращия орган формира регулиращо въздействие U върху обекта за регулиране.

При регулаторите с пряко действие, изпълнителния механизъм и регулатора са единен конструктивен блок и сигналът μ се формира за сметка на енергията на въздействието v . При регулаторите с непряко действие, изпълнителния механизъм работи за сметка на енергията на външен източник.

В зависимост от конкретните условия, към изпълнителните устройства понякога се присъединяват допълнителни блокове с цел разширяване областта на използване на тези устройства. По такъв начин блоковата схема на изпълнителното устройство може да бъде усложнена. Получават се различни варианти в зависимост от комбинацията на включените допълнителни блокове (фиг. 260):



фиг. 260. Разширена блокова схема на изпълнително устройство

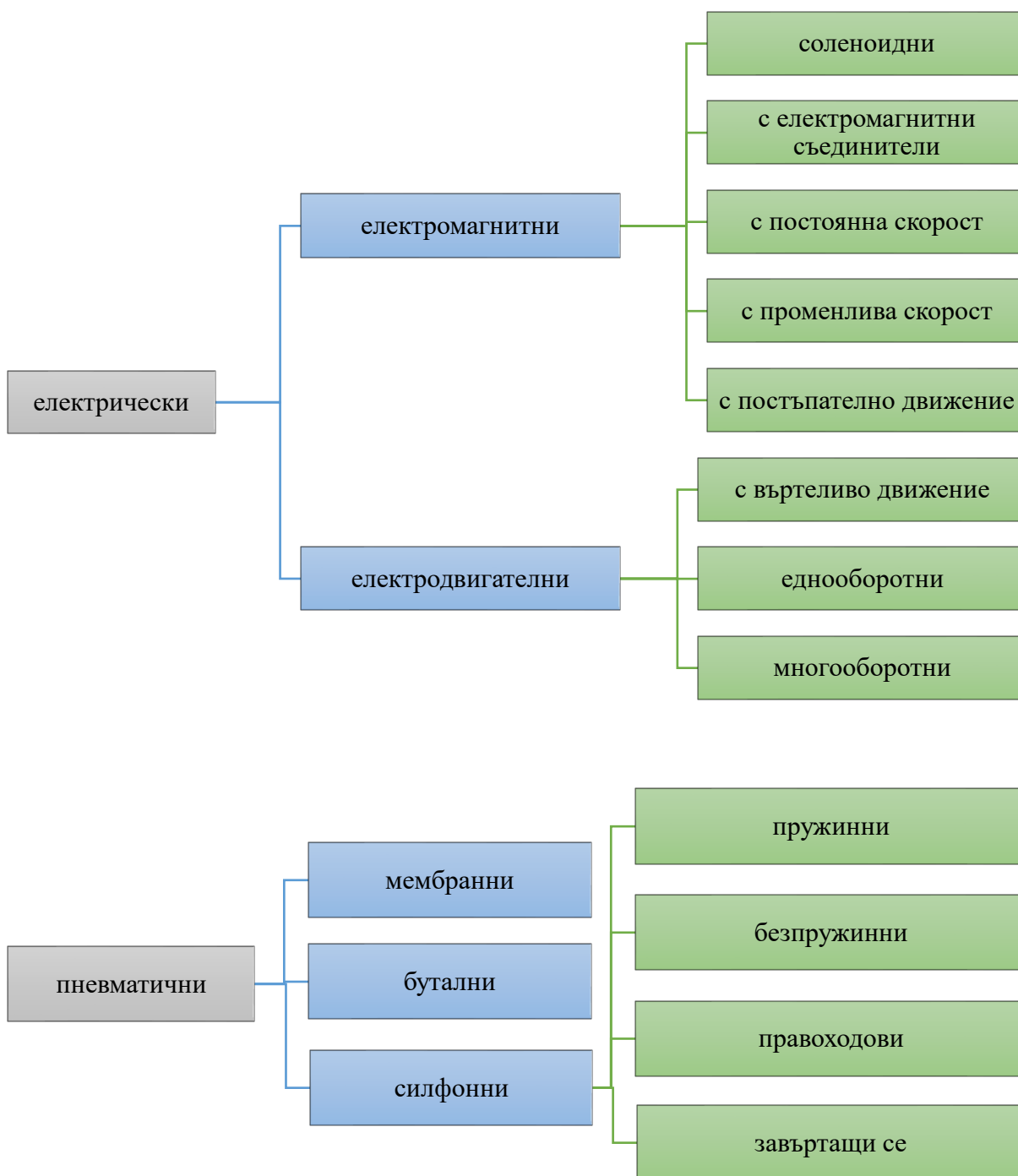
*БДУ - блок за дистанционно управление, БРУ - блок за ръчно управление (дубльор),
УБ - усилвателен блок (позиционер), БОВ - блок на обратна връзка,
БП - блок за положение (фиксатор), БСКП - блок за сигнализация на крайните
положения.*

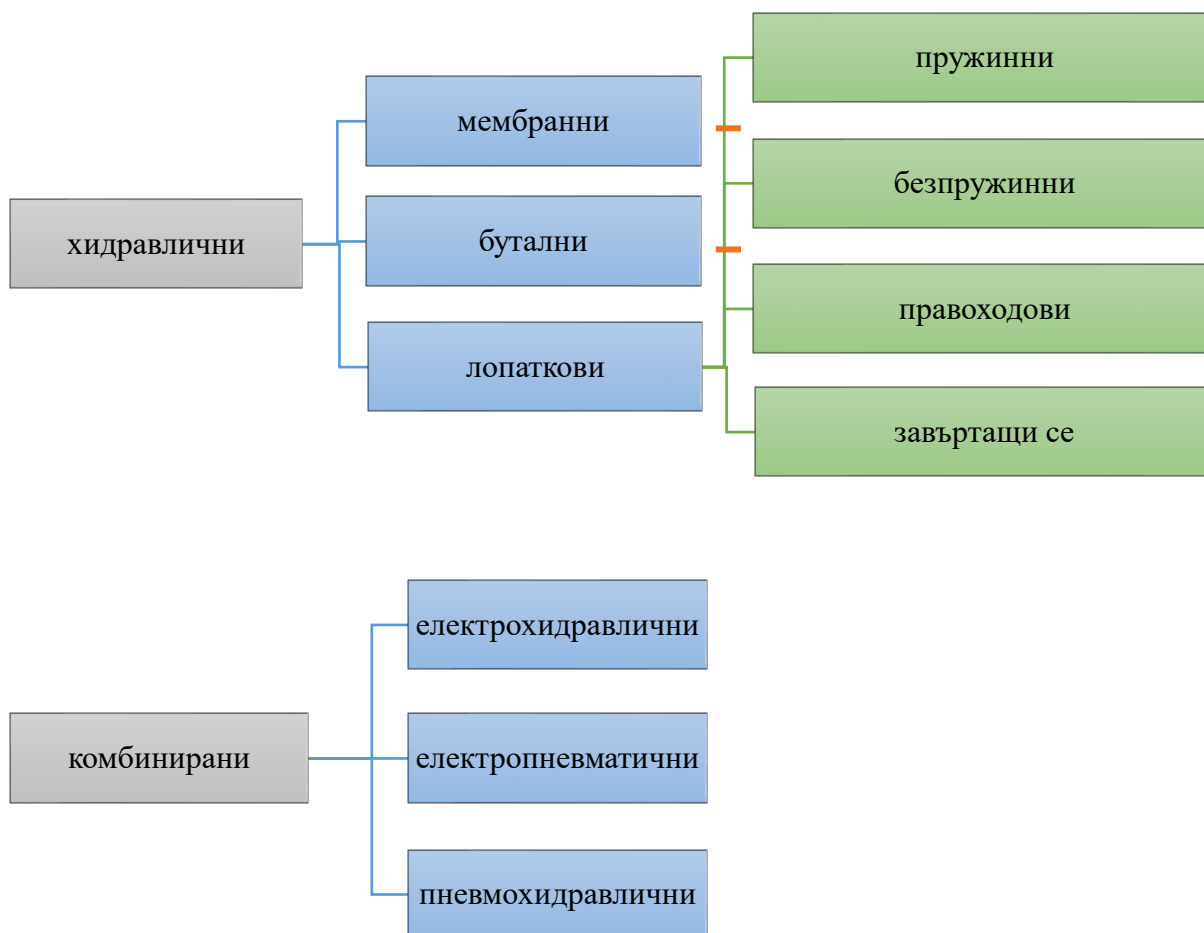
Видовете изпълнителни механизми могат да се различават по вида на използваната енергия, по принципа на действие, по своите конструктивни особености и по други признаци. Примерна класификация на ИМ е показана във **фиг. 261**.

От електрическите изпълнителни механизми най-голямо разпространение имат електродвигателните. Те дават възможност да се реализират линейни закони на регулиране.

Статичната характеристика на изпълнителни механизми представлява връзката между входната и изходната величини в установен режим. За изходна величина се приема преместването или скоростта на преместване. По статичната характеристика могат да бъдат определени редица параметри като зона на нечувствителност, номинална скорост на преместване, номинален управляващ сигнал.







фиг. 261. Класификация на ИМ.

Точността на ИМ се определя от максималната грешка при установяване в ново равновесно положение. При ИМ, обхванати с твърда обратна връзка (при позициониране), приведената грешка се определя по изрази:

$$E_{\text{пр}} = \frac{\Delta E}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \cdot 100\%$$

където $(E_{\text{max}} - E_{\text{min}})$ е диапазон на изменение на входния сигнал на ИМ; ΔE е разликата между най-голямата и най-малката стойности на входния сигнал, при които по датчика за обратна връзка изходният сигнал на ИМ все още не се е изменил.

Когато ИМ се управлява чрез продължителността на входния сигнал

$$E_{\text{пр}} = \frac{\Delta t}{T} \cdot 100\%$$

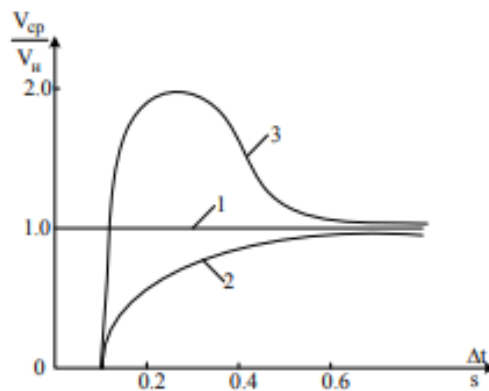
В този израз T е времето за преместване на изходното звено на ИМ от едното крайно положение до другото, а Δt - най-малката продължителност на входния импулс, предизвикващ преместване на изходното звено на ИМ.

Бързодействието на ИМ зависи от скоростта на двигателя V_{cp} . При работа на ИМ в импулсен режим, V_{cp} се определя по израза:

$$V_{cp} = \frac{\Delta\mu}{\Delta t}$$

където Δt е продължителност на входния импулс на ИМ, $\Delta\mu$ е преместване на изходното звено на ИМ за време Δt .

Зависимостта $V_{cp} = f(\Delta t)$ е показана на *фиг. 262*.

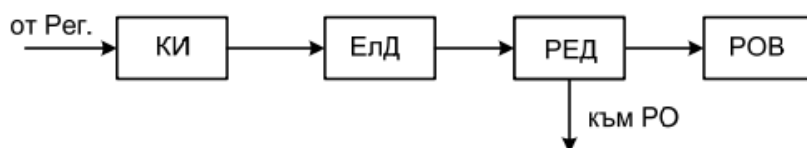


фиг. 262. Зависимост $V_{cp} = f(\Delta t)$ за различни ИМ

Характеристика 1 се отнася за идеалния случай, когато V_{cp} не зависи от продължителността на входния импулс Δt . На натоварен ИМ съответства характеристика 2. При $\Delta t < 0,1S$ ИМ изобщо не реагира. Номиналната скорост v_n е по-малка от средната $V_n < V_{cp}$. Времето за развъртане е значително, а времето за спиране - минимално. Когато двигателният момент е съпосочен със съпротивителния, процесът се развива по крива 3. Времето на развъртане е минимално, а спиращият път - максимален. В този случай $V_n > V_{cp}$.

3.4.2. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗПЪЛНИТЕЛНИ МЕХАНИЗМИ

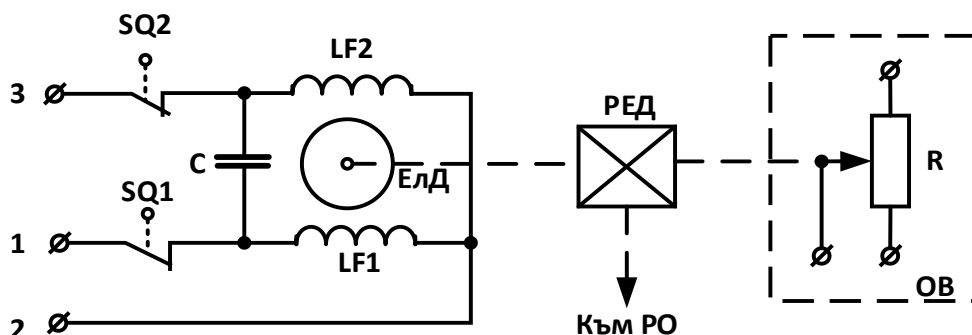
Основните елементи, от които се изгражда един електродвигателен ИМ, са показани на **фиг. 263**. Крайните изключватели КИ ограничават преместването на изходното звено на ИМ, като изключват захранването на електрическия двигател ЕлД. Посредством понижаващия редуктор РЕД, движението се предава, от една страна, към РО, а от друга страна - към реостата РОВ за обратна връзка по положението на РО.



фиг. 263. Блокова схема на изпълнителен механизъм

Изходното звено (ИЗ) на ИМ може да извършва постъпателно или въртеливо движение. В последния случай ИМ могат да бъдат еднооборотни и многооборотни.

На **фиг. 264** е показана схемата на изпълнителен механизъм тип ИМ- 2/120.



фиг. 264. Принципна схема на електродвигателен ИМ

Като задвижващ се използва еднофазен кондензаторен двигател. Управлява се от регулатор с релейно - контактен изход. ИМ е еднооборотен. Изходното му звено се завърта на ъгъл 120° за 120s. Съпротивлението на обратната връзка R е 120Ω . Номиналният въртящ момент е $19,62\text{Nm}$, а пусковият - $29,43\text{Nm}$.

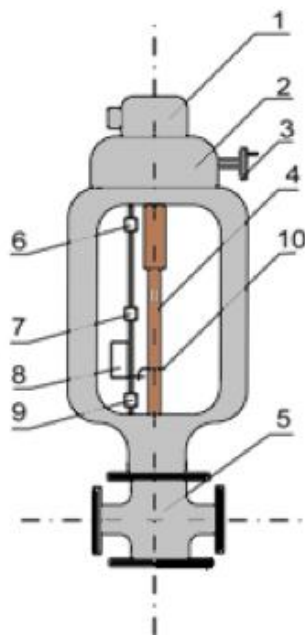
При подаване на захранване между клеми 1 и 2, кондензаторът C се оказва съединен последователно с намотката LF₂ и Ел Д се завърта в определена посока. За движение в обратна посока захранването се подава между клеми 2 и 3, вследствие на което кондензаторът C се свързва последователно с възбудителната намотка LF₁. По този начин

ЕлД се реверсира. Крайните изключватели SQ₁ и SQ₂ ограничават движението в едното и другото крайно положение на изходното звено на ИМ, като прекъсват захранването на двигателя.

Реостатът за обратна връзка R може да се използва за получаване на информация за положението на РО за визуално наблюдение или формиране, заедно с регулатора, на определен закон на регулиране.

Представител на многооборотните ИМ е българският електродвигателен ИМ тип ЕСПА.02.ПА. Той е правоходов и работи съвместно с вентилни РО, с условен диаметър от 15 mm до 150 mm.

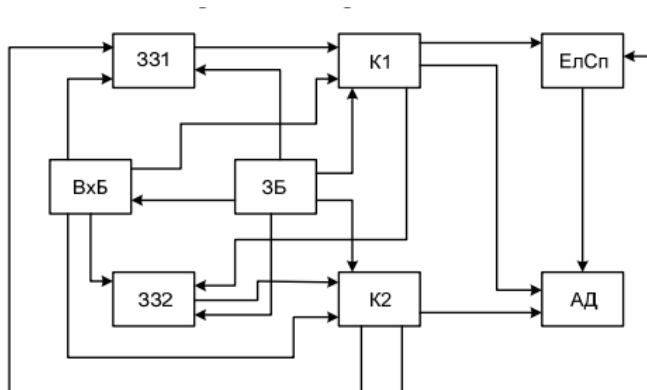
На *фиг. 265* са показани основните елементи на ИМ, заедно с РО.



фиг. 265. Електродвигателен ИМ [57]

Електродвигателят 1, посредством регулатора 2, привежда в движение гайка, която премества пръта 4 надолу или нагоре. Прътът 4 е свързан твърдо с вентилния регулиращ орган 5. Микропревключвателят 6 ограничава максималната сила на затваряне на РО (посредством специално пружиниращо устройство). Двата ограничителя на хода (микропревключватели 7 и 9) и реохордът 8 (за обратна връзка по положение на РО) се задействат от планката 10, съединена с пръта 4 и движеща се с него. Ръкохватката 3 е предназначена за ръчно задвижване на ИМ.

Блокова схема на управлението на ИМ, заедно с електродвигателя, е изобразена на **фиг. 266**. Тя се състои от захранващ блок ЗБ, входен блок ВхБ, закъснителни звена 331 и 332, контактори К₁ и К₂, блок за електродинамично спиране ЕлСп и задвижващ еднофазен асинхронен двигател АД.



фиг. 266. Блокова схема на системата за управление на ИМ [57]

Изходът на схемата за управление е релейно - контактен. Поради това блокът за управление се нарича още релеен блок.

Електродвигателните ИМ с малка мощност използват за задвижващ двигател асинхронни еднофазни двигатели или двигатели за постоянен ток, а при по-големи мощности - трифазни асинхронни двигатели с кафезен ротор.

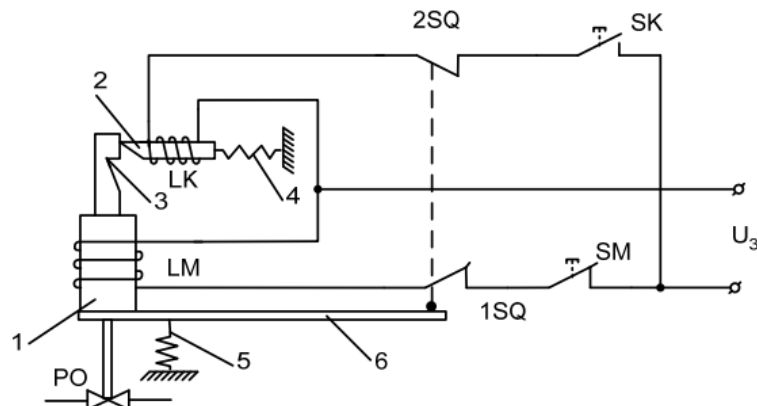
Електромагнитните ИМ са с по-малка мощност от електродвигателните. Отличават се с по-проста конструкция и не сложна схема за управление, по-малки размери, по-ниска цена и висока надеждност. Соленоидните електромагнитни ИМ се използват само в схемите с двупозиционно управление, т.е. РО може да се намира само в две крайни положения (отворено или затворено).

Захранването може да бъде както с постоянно, така и с променливо напрежение. Постояннотоковите електромагнити притежават по-добри характеристики. При променливо-токовите често се вграждат собствени изправители.

Различават се два вида соленоидни електромагнитни ИМ - с продължително захранване и с кратковременно захранване.

При ИМ от първата група котвата се премества след подаване на напрежение и се освобождава, когато се прекъсне захранването. Основен недостатък в този случай е непрекъснатата консумация на енергия. Освен това, при изчезване на захранването, РО сменя положението си.

ИМ с кратковременно импулсно захранване се състоят от два електромагнита - главен електромагнит и електромагнит за механизма на ключалката (*фиг. 267*).



фиг. 267. Принципна схема на импулсен електромагнитен ИМ [57]

При импулсно захранване, чрез бутона SM на главната бобина LM (при условие, че PO е нормално затворен), котвата 1 се изтегля нагоре. Лостът на ключалката 2 пропада в канала 3 под действието на пружина 4 и фиксира котвата. В същия момент, чрез контакта на крайния изключвател 1SQ, се прекъсва захранването на бобината LM. Контактът 2SQ се затваря. За връщане на PO в изходно (затворено) положение, е необходимо да се натисне бутонът SK. Бобината на ключалката LK получава захранване. Създадената електромагнитна сила изтегля котвата 2 на ключалката и освобождава котвата 1, която под действието на пружина 5 се връща в изходно положение. PO се затваря. Контактът 2SQ се отваря поради това, че плънката 6 освобождава крайния изключвател. Бобината LK губи захранване. ИМ е готов за повторно включване.

Предимството на ИМ с импулсно захранване е това, че консумира малко енергия и при изчезване на захранването PO не променя своето положение.

Електромагнитните съединители, използвани като ИМ, позволяват да се повиши бързодействието на системата за регулиране. Чрез тях може да се регулира скоростта на въртене на ИМ от електродвигателен тип, да се реверсира или разединява изходният вал, без да се спира двигателя.

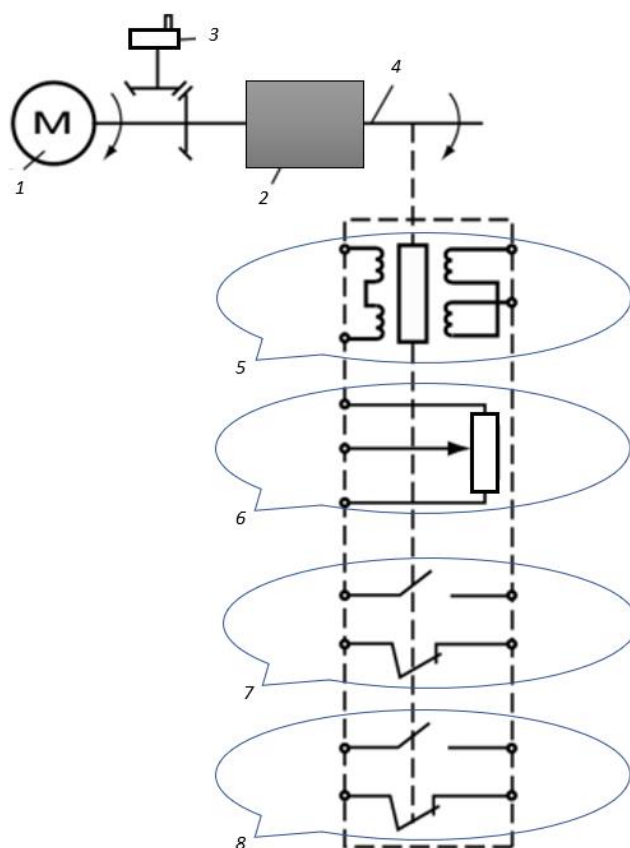
Съединителите се поставят между електрическия двигател и РО. С тях се регулира скоростта, промяна посоката на въртене и изключване на работната машина, без да се спира задвижващия електродвигател.

Принципна схема на изпълнителен механизъм с асинхронен двигател (*фиг. 268*).

Задвижващият механизъм съдържа спомагателни устройства, които преобразуват ъгъла на въртене на изходния вал в електрически сигнали за различни цели. Диференциално-

трансформаторният преобразувател служи за въвеждане в регулатора на сигнал за обратна връзка, пропорционален на ъгъла на въртене на изходния вал на задвижващия механизъм или, който е същият, степента на отваряне на регулиращото тяло.

Изходният сигнал на реостатния преобразувател се използва за управление на дистанционния индикатор за положение на задвижващия механизъм, инсталиран на панела на оператора до ръчните бутони за дистанционно управление.



фиг. 268. Електрически задвижващ механизъм [57]

1 - електрически мотор; 2 - редуктор; 3 - маховик; 4 - изходният вал на задвижващия механизъм; 5 - преобразувател на диференциален трансформатор; 6 - преобразувател на реостат; 7 - крайни превключватели; 8 - крайните превключватели превключвателите изпълняват защитни функции

Крайните превключватели изключват тиристорния стартер, когато регулаторът достигне крайните положения. Те се използват за ограничаване на обхвата на движение на регулиращото тяло. В автоматичния режим на работа те изключват стартера, когато той излезе извън зададения обхват.

Спирачното устройство в такива механизми е необходимо за намаляване на изтичането на изходящия вал, след прекратяване на управляващите импулси. Обикновено спирачното

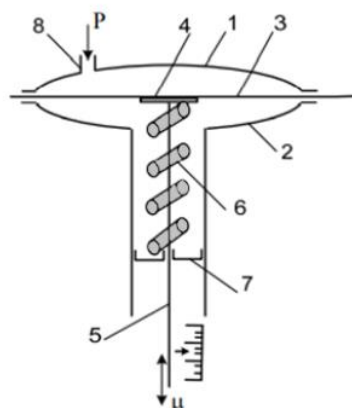
устройство е оборудвано с електромагнитно задвижване, което работи по следния начин: когато на електрическият двигател се появи напрежение, в намотката на електромагнита се появява ток. Котвата се прибира и премества спирачната накладка от вала на двигателя. Когато захранващото напрежение изчезне, електромагнитът е обезсилен и валът на двигателя се спира от обувка, която е притисната към него от пружина.

3.4.3. ПНЕВМАТИЧНИ ИЗПЪЛНИТЕЛНИ МЕХАНИЗМИ

Пневматичните ИМ са предназначени за работа със сигнал от пневматични регулиращи устройства. Те преобразуват налягането на въздух в преместване на изходното звено на ИМ, което се предава на РО.

Най-голямо разпространение са намерили мембранно-пружинните ИМ. Преместването на изходното звено е в интервала от 6 до 100 mm.

На *фиг. 269* е показана опростена конструкция на такъв ИМ.



фиг. 269. Мембранно-пружинен ИМ [57]

Състои се от горен 1 и долен 2 капаци, между които плътно е захваната с болтове еластична (от гумирана тъкан) мембрана 3. Под мембраната е разположен металният диск 4, съединен с изходното подвижно звено 5 на ИМ. Пружината 6 огъва мембраната нагоре и изтегля в същата посока изходния прът 5. Първоначалното натягане на пружината може да се регулира чрез преместване на опората 7. През щуцера 8 в пространството над мембраната се подава въздух под налягане (P). Това налягане се преобразува в сила, която свива пружината 6, премествайки лоста 5 надолу. По такъв начин входна величина за ИМ е налягането на въздух, а изходна - преместването на лоста 5.

Уравнението на движение на ИМ има вида:

$$m \frac{d^2\mu}{dt^2} + r \frac{d\mu}{dt} + c\mu = k_1 p$$

където: m е маса на подвижната част,

μ - преместване на изходното звено,

r - съпротивление при преместването,

c - коефициент на твърдост на пружината,

k_1 - коефициент.

Пренебрегвайки членовете при втората и първата производни, тъй като са много по-малки в сравнение с коефициента на твърдост на пружината c , уравнението на ИМ се преобразува в уравнение на усилвателно звено:

$$\mu = k \cdot p$$

Където $k = \frac{k_1}{c}$

ИМ от мембранно-пружинен вид могат да задвижват както РО от клапанен тип, така и РО със завъртаща се клапа.

Зависимостта между налягането на въздуха p върху мембраната и преместването μ на изходното звено представлява статичната характеристика на ИМ.

За получаване на линейна характеристика е необходимо да се запазва съотношението:

$$G = p \cdot F_{e\phi}$$

където G - сила на пружината,

$F_{e\phi}$ - ефективна площ на мембраната.

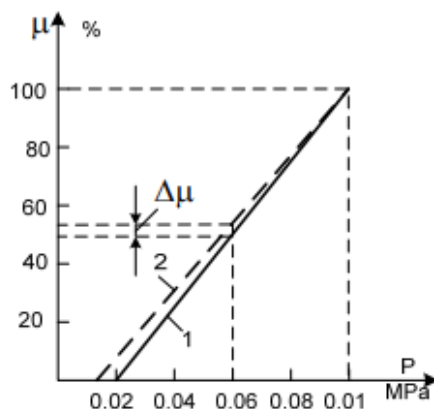
Тъй като

$$G = p \cdot \mu$$

то $\mu = \frac{F_{e\phi}}{c} \cdot p$

От последното равенство следва, че $F_{e\phi}$ трябва да остава постоянна при всяко положение на мембраната. На практика обаче $F_{e\phi}$ е променлива величина и зависи от μ . За намаляване на промяната на $F_{e\phi}$ до незначителна се прибегва до мембрани, специално изпълнение.

Конструкцията на съвременните пневматични ИМ осигурява добра линейност между μ и p . ИМ трябва да работи с малък хистерезис. При едно и също достигнато налягане в посока на нарастване или намаляване (при прав и обратен ход), изходното звено трябва да заема почти еднакво положение. Допустимата разлика $\Delta\mu$ не трябва да превишава 2 % от пълния ход μ_{max} .



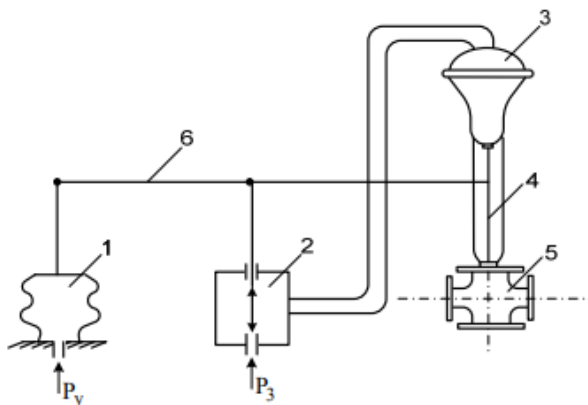
фиг. 270. Статична характеристика на мембранен ИМ

На *фиг. 270* е изобразена статична характеристика на мембранен ИМ. Участък 1 съответства на посока на нарастване на p , а участък 2 - на посока намаляване на p .

Мембранни ИМ се произвеждат с диаметър на мембраната от 125 до 500 mm. Те могат да бъдат комплектовани с позиционери и ръчни дубльори.

Чрез позиционерите се постига подобряване на бързодействието и повишаване точността на установяване в дадено междинно положение на изходното звено. Те са предназначени за създаване на допълнителна сила върху изходното звено на ИМ за противодействие на неуравновесените сили, възникващи в РО. Тези схеми работят като пропорционално звено.

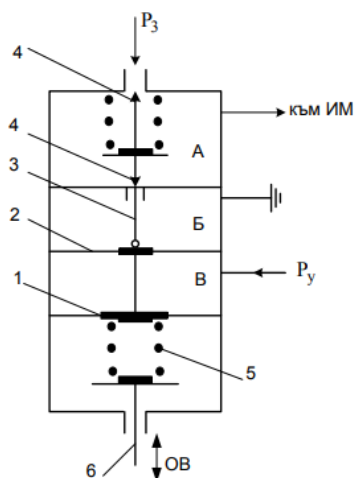
Принципната схема на позиционера и неговото свързване с ИМ се вижда на *фиг. 271*.



фиг. 271. Схема на ИМ с позиционер [57]

Управляващото налягане P_y постъпва в силфона 1, а хранващото налягане P_3 се предава към ИМ през плунжерния усилвател 2. Изходното звено 4 на ИМ е свързано пряко с РО 5. Посредством лоста 6 се осъществява обратна връзка по положение.

На *фиг. 272* е показана принципна схема на позиционера ПР-10 с мембранен чувствителен елемент. Сигналят от регулатора P_y постъпва в глухата камера В, образувана от мембраните 1 и 2, свързани в блок.



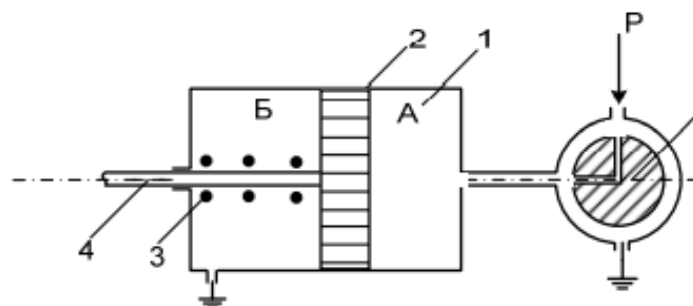
фиг. 272. Принципна схема на позиционер тип ПР-10 [57]

Мембрана 1 е с по-голяма ефективна площ. Опашката 3 на двойния клапан 4 се опира в твърдия център на мембрана 2. Клапанът 4 създава два променливи дросела. Единият, е на пътя на захранващото налягане P_3 към камера А и оттам към ИМ, а другият, е на изхода от камера А към камера Б и оттам към атмосферата. Пружината 5 и лостът 6 са за създаване на отрицателна обратна връзка.

За позиционера ПР-10 пълният ход на лоста 6 е 10 mm, а налягането в захранващата линия $P_3 = 0,25$ МРа.

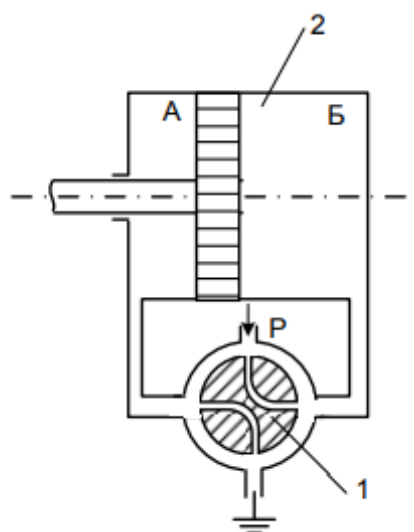
Дубльорите са предназначени за ръчно преместване на изходното звено на ИМ в случай на аварийно прекратяване на въздуха от регулатора и при необходимост от ограничаване преместването на изходното звено.

За развиване на по-големи сили намират приложение буталните ИМ. При буталните ИМ с еднократно действие, наляво буталото 2 се премества в цилиндъра 1 под действието на въздух с налягане P , постъпващ през разпределителния кран 5 (*фиг. 273*). В обратна посока буталото се връща под действие на пружина 3. Кранът 5 свързва камера А с атмосферата. Камера Б има постоянна връзка с атмосферата. Изходно звено на ИМ е лостът 4.



фиг. 273. Пневматичен бутален ИМ с едностранно действие [57] [59]

Буталните ИМ с двустранно действие се преместват и в двете посоки под действие на налягането на въздух (**фиг. 274**). Когато камера А е свързана с атмосферата, налягане Р се подава към камера Б и буталото 2 се премества наляво. Завъртайки разпределителния кран 1 на 90° надясно, буталото започва да се премества надясно. В междинно положение на крана 1, буталото се установява в определено положение.



фиг. 274. Пневматичен бутален ИМ с двустранно действие [57] [59]

3.5. РЕГУЛИРАЩИ ОРГАНИ

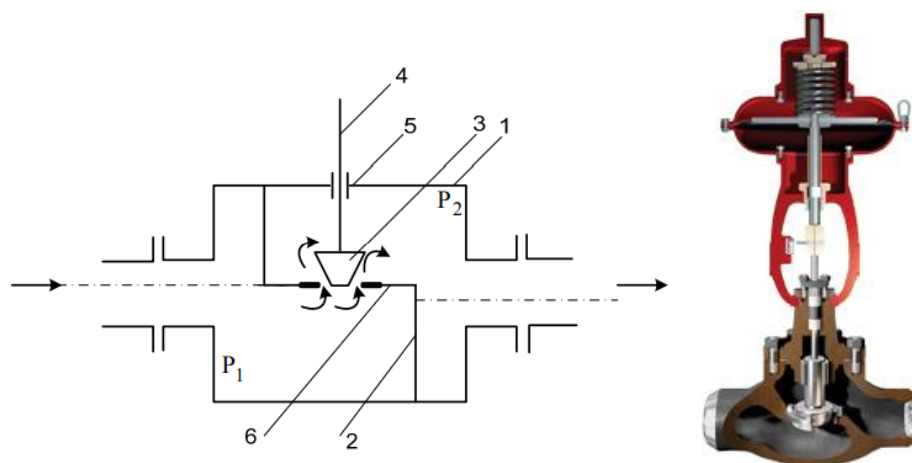
3.5.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ. ВИДОВЕ

Регулиращите органи РО са съставна част на изпълнителните устройства. РО, като елемент на системите за автоматизация, непосредствено въздействат върху количеството енергия или материал, подавани към обекта.

РО се различават по своята конструкция, габарити и материал, от който са изработени. Условието за работа на РО, при непрекъснато и двупозиционно регулиране, са различни. При непрекъснато регулиране големината на проходното сечение се променя плавно, в зависимост от положението на изходното звено на ИМ. Когато регулирането е двупозиционно, количеството преминал през РО флуид се определя от съотношението на времената на отворено и затворено състояние.

✓ Едноседловите клапанни РО

Едноседловите клапанни РО са прости по конструкция. Принципната схема на такъв РО е показана на **фиг. 275**. Корпусът 1 се монтира върху тръбопровода, по който тече течност, газ или пара. Той е разделен от преградата 2 на две части. Над откритието е разположен клапанът 3, който е съединен с лоста 4 и чрез него е захванат към изходното звено на ИМ. Лостът 4 излиза от корпуса на РО през салниково уплътнение 5.



фиг. 275. Едноседлов клапанен РО [57] [60]

Проходното сечение f_k на клапана зависи от разстоянието между седлото 6 и клапана 3:

$$f_k = \pi \cdot d_c \cdot \mu$$

където d_c - вътрешен диаметър на седлото, μ - преместване на клапата нагоре.

Счита се, че клапанът е напълно отворен, когато проходното сечение f_k стане равно на площта на отвора в седлото б. Условието за равенството е:

$$\pi \cdot d_c \cdot \mu_{max} = \frac{\pi d_c^2}{4}$$

$$\text{или } \mu_{max} = \frac{d_c}{4}$$

От последното равенство следва, че протичащото количество вещество може да се регулира при изменение на μ от 0 до $\frac{d_c}{4}$.

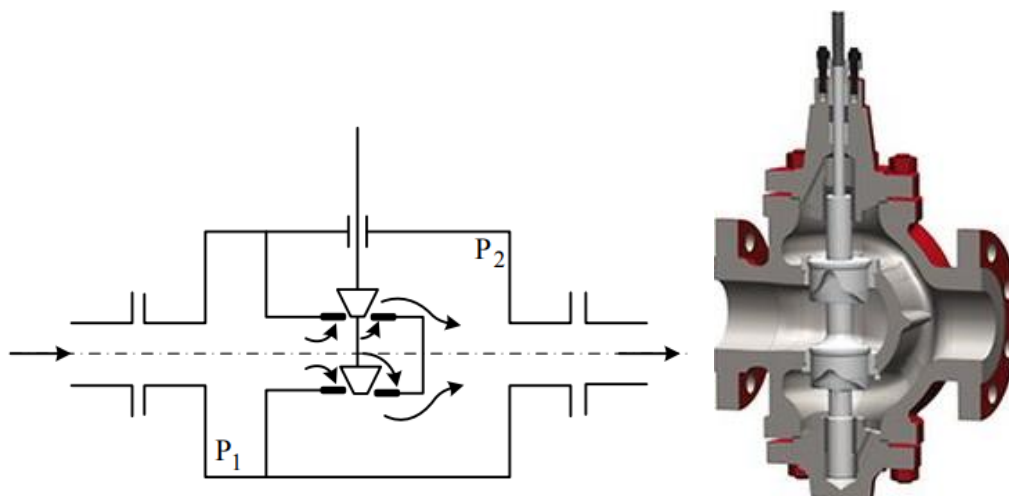
При преминаване на течността (газа) през пролуката между седлото и клапана, тя губи част от своето налягане. Това създава сила, която се стреми да изтласка клапана 3 и лоста 4 нагоре. Ако клапанът е с голямо сечение, то и силата става голяма. Затова, при едноседловите клапанни РО диаметърът на клапана не надвишава $12 \div 15$ mm. При по-големи диаметри е необходимо ИМ да развива голяма сила, за да може да задържа РО в определено положение. Ако налягането спада от P_1 до P_2 при преминаване на течността (газа) през проходното сечение, силата N на изтласкване на клапана се определя от уравнението:

$$N = f_{кл} (p_1 + p_2)$$

където $f_{кл}$ е площ на клапана.

✓ Двуседловите клапанни РО

За уравнивяване на силата N , стандартните РО се изпълняват двуседлови (фиг. 276). Те имат два отвора: 1 на преградата 3 и два клапана 2. Пълно уравнивяване не може да се постигне. Това обаче не се отразява значимо на работата на клапана. Управлението му се осъществява от ИМ с малка мощност.



фиг. 276. Двуседлов клапанен РО [57]

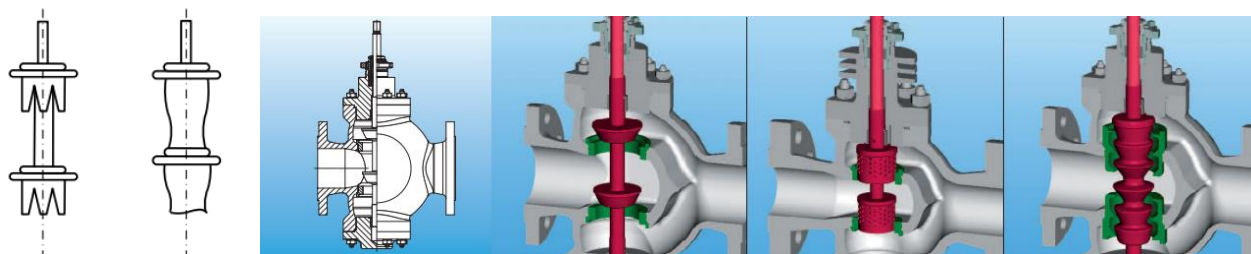
Присъединяването може да стане с резбова връзка. Размерите на клапана се определят от диаметъра на присъединителните фланци на корпуса. Този диаметър се нарича номинален (условен). Той съответства на диаметъра на стандартните тръби.

Най-голямо разпространение имат клапанните РО с условен диаметър (D_y) от 25 до 350 mm. В корпус с един диаметър на фланците могат да бъдат монтирани клапани и с други по-малки размери. Например при номинален диаметър на фланците 25 mm, могат да бъдат монтирани клапани с диаметър 15, 20 или 25 mm. За лабораторни условия клапаните могат да бъдат с диаметър 6 и 9 mm.

Корпусите на РО се изработват в няколко варианта-прави, ъглови и триходови. Правите са с два фланеца, разположени по права линия-входен и изходен. При ъгловите, щуцерите са под ъгъл 90^0 , а триходовите имат два изходни щуцера-прав и ъглов.

Корпусите се изработват от чугун, въглеродна и легирана стомана, а седлата и затворите-най-често от неръждаема стомана.

Затворите на клапаните имат обикновено цилиндрична форма с триъгълни изрези (фиг. 3). За гъсти и замърсени течности и големи разлики в наляганията се предпочитат клапани с прътови затвори (фиг. 277). При клапаните с цилиндрични затвори и изрези могат да възникнат вибрации.

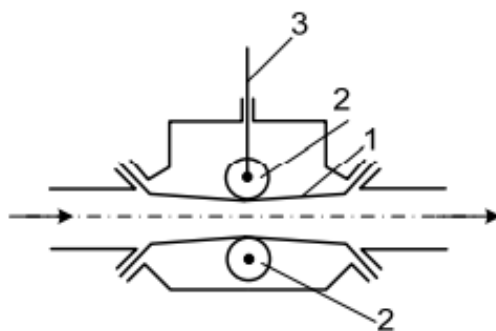


фиг. 277. Клапани за двуседлови РО [57] [61]

РО са с право и обратно действие. При РО с право действие проходното сечение е максимално (клапанът е отворен), а при тези с обратно действие-клапанът е затворен. РО с право действие се наричат още нормално отворени (НО) или “въздухът затваря” (ВЗ) (когато ИМ е пневматичен). РО с обратно действие са нормално затворени (НЗ) или “въздухът отваря” (ВО). Същите разсъждения могат да бъдат отнесени и към ИУ като цяло, РО може да става от НО на НЗ, чрез завъртане на клапанныя блок на 180^0 . Обръщането на логиката на РО може да става и чрез подходящо управление на ИМ.

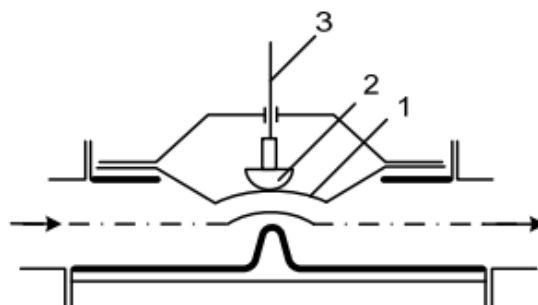
По тръбопровода може да протича течност, съдържаща твърди частици (суспензия или пулп) или пък течност, която кристализира. В този случай РО от клапанен тип (двуседлови или едноседлови) не се използват. За такива условия са подходящи шланговите РО. Те

представяват парче от гумен шланг 1 (*фиг. 278*), който се притиска (премазва) от два валека 2, свързани един с друг чрез верига. Те се приближават или отдалечават при преместване на лоста 3.



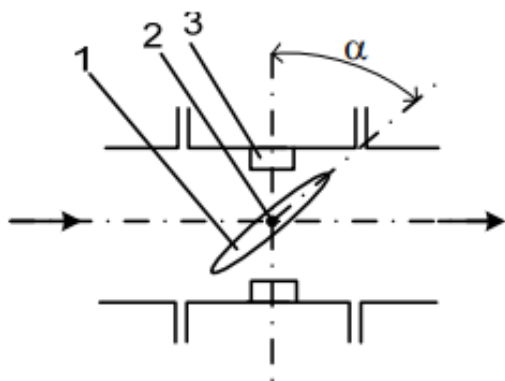
фиг. 278. Шлангов РО [57]

Диафрагмените РО намират приложение за измерване поток на агресивни среди-киселини и основи. Между корпуса на РО и ИМ е захваната киселинно-устойчива мембрана 1 (*фиг. 279*). Посредством гъбовидния си накрайник 2 лостът 3 притиска надолу или освобождава мембраната 1. По този начин се променя проходното сечение на РО. Вътрешната повърхност на РО се покрива с киселинноустойчив материал (емайл, ебонит, ортопласт и др.).



фиг. 279. Диафрагмен РО [57]

За дроселиране на потоци от газ или пара в тръбопроводи с голям диаметър, приложение намира РО със завъртаща се клапа, показан на *фиг. 280*.



фиг. 280. РО със завъртаща се клапа [57] [62]

Клапата 1 представлява кръгъл диск, който може да се завърта около оста 2 и да заема различни положения спрямо вертикалната ос в интервала от 0 до 90^0 . При $\alpha = 0^0$, клапата е затворила тръбопровода (допряла е до опорите 3). Когато $\alpha = 90^0$, тръбопроводът е напълно отворен. През салниково уплътнение оста 2 се извежда извън тръбопровода за връзка с ИМ. Дори при затворено положение ($\alpha = 0^0$), РО със завъртаща се клапа не осигурява пълно прекъсване на газовия поток, поради наличието на кръгов луфт. Този вид РО са от неуравновесен тип. Разделеният от клапата поток на две части, създава въртящ момент, който трябва да се преодолява от ИМ с достатъчно голяма мощност. РО със завъртащи се клапи се характеризира с проста конструкция, с малки габарити и тегло.

За визуализация принципа на действие на РО следвайте линка:

<https://www.tlv.com/global/RU/steam-theory/types-of-valves.html>

3.5.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РУГУЛИРАЩИТЕ ОРГАНИ

Най-важните показатели за оценка на РО са:

- условен диаметър
- пропускателна способност
- конструктивна характеристика
- разходна характеристика.

Условният диаметър D_y (mm), това е вътрешният диаметър на сечението в мястото на присъединяване на РО към тръбопровода.

Условната пропускателна способност K_y се определя чрез условния диаметър D_y и коефициента α , зависещ от вида на РО:

$$K_y = \alpha D_y^2$$

За различните видове РО коэффициентът α приема различни стойности:

- за едноседлови и диафрагмени РО $\alpha = 0,012$;
- за двуседлови клапанни РО $\alpha = 0,016$;
- за РО със завъртащи се клапи $\alpha = 0,02$;
- за шлангови РО $\alpha = 0,05$.

Условната пропускателна способност K_y представлява номиналния разход (m^3/h) на течност с плътност 1000 kg/m^3 през РО при нормални условия. Течността протича при отворен РО и пад на налягане върху него $0,1 \text{ MPa}$.

Конструктивната характеристика на РО представлява зависимостта между площта на проходното сечение f и положението на затвора μ или φ (μ е линейно преместване на затвора, а φ - ъгъл на завъртане).

$$f = \Psi(\mu)$$

или

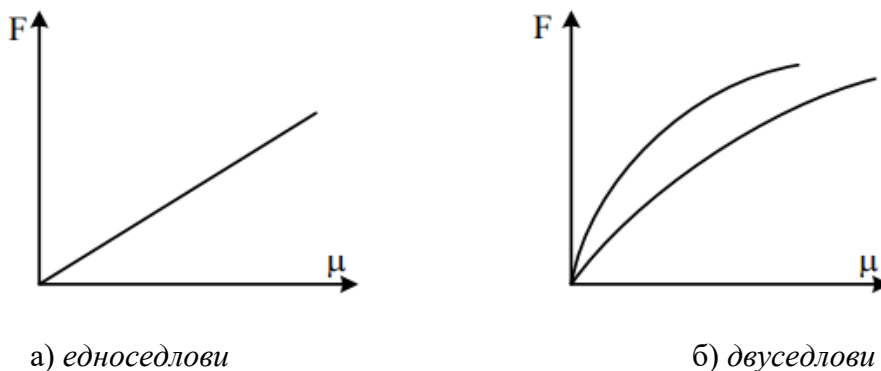
$$f = \Psi(\varphi)$$

За РО със завъртащи се клапи, втората зависимост има следния конкретен вид:

$$f = 0,5\pi D_y^2(1 - \cos \varphi)$$

Вижда се, че характеристиката е нелинейна.

За едноседлови РО характеристиката е линейна (*фиг. 281, а*), а за двуседлови РО- тя е нелинейна (*фиг. 281, б*).



фиг. 281. Конструктивни характеристики на РО

Разходната характеристика на РО представлява зависимостта между разхода на вещество Q и положението на затвора на РО (респективно на изходното звено на ИМ).

Теоретичната разходна характеристика се получава при постоянен пад на налягане върху РО, а работната - при променлив пад на налягането, такъв, какъвто се получава при работни условия.

РО представлява дроселиращо устройство с променливо проходно сечение. За обемния разход на течност Q през РО може да се запише:

$$Q = \alpha f \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

където α е коефициент на разхода; f - площ на проходното сечение; ρ - плътност на течността и Δp - пад на налягането върху РО.

При постоянен пад $\Delta p = const$ и линейна конструктивна характеристика $f = k \cdot \mu$, разходната характеристика е нелинейна поради това, че коефициентът α е променлива величина и зависи от μ .

4.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ И ИСТОРИЧЕСКО РАЗВИТИЕ НА МИКРОПРОЦЕСОРИТЕ

През последните години микропроцесорните системи навлизат все по-широко в бита и производството. Бързото развитие на електрониката доведе до създаването на различни видове микропроцесори и микроелектронни схеми с широка гама от характеристики и функционални възможности.

За решаването на многократно повтарящи се специализирани изчислителни и логически задачи или реализирането на комплекс от повтарящи се неизменни функции се разработиха т. нар. големи (хибридни) интегрални схеми (ГИС). В структурата им има най-често логически и изчислителни схеми, които в съвкупност реализират конкретни функции, като изпълнението им се определя от неизменен алгоритъм и програма, записана в постоянна памет на системата. Подобни ГИС има в съвременните електродомакински уреди, които работят в съответствие с предварително зададена програма (автоматични програмни перални машини, нагревателни уреди и др.), детски механизирани играчки и т. н. В промишлеността ГИС се използват често като управляващи устройства за машини и механизми с програмно управление (стругове, фрези и др.), в схеми за управление и диагностика на двигатели с вътрешно горене. ГИС се използват и като решаващи устройства с различни функции при преобразуването на сигналите (унифициране на сигналите, линеаризиране на характеристиките, филтриране на смущенията, усилване и запомняне на сигналите) в ролята на елементи от сложната измервателна верига.

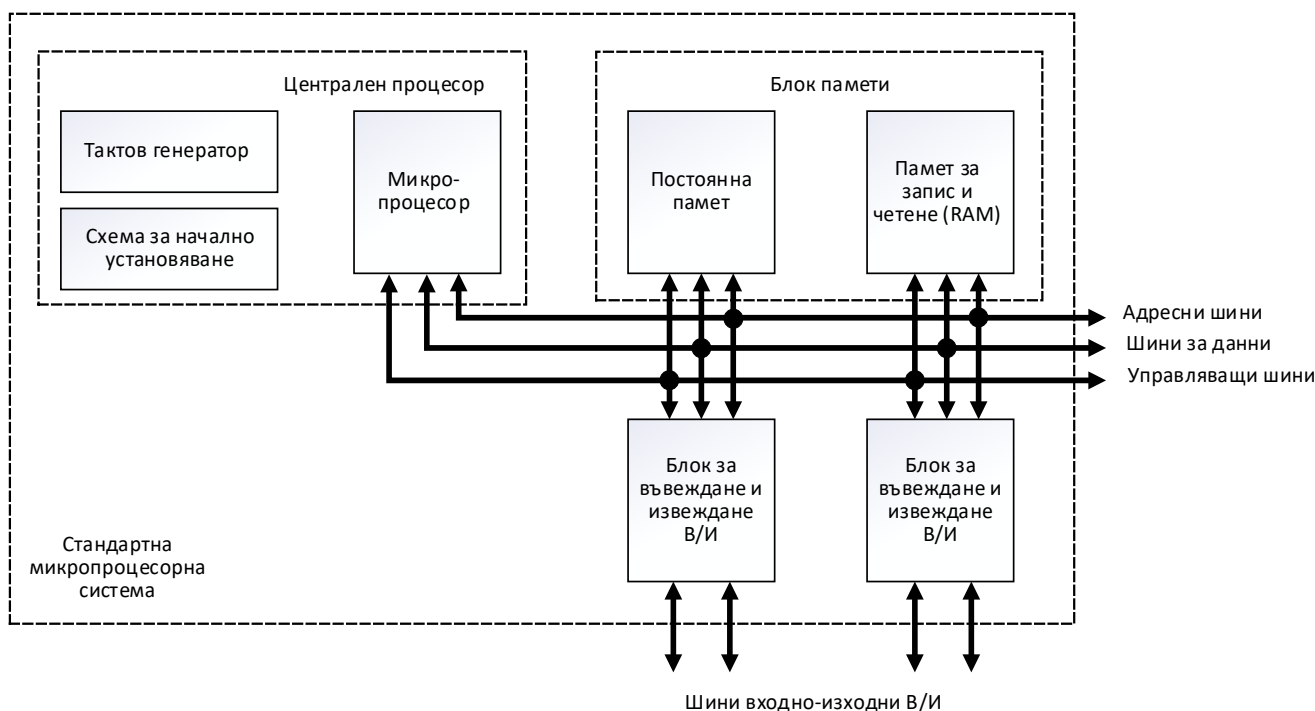
Често към първичния преобразувател, разположен на мястото на измерването, се вгражда сложен междинен преобразувател, реализиран с ГИС, който извършва всички необходими преобразувания на сигнала (линеаризиране на характеристиката на първичния преобразувател, нормализиране, унифициране на сигнала, аналогово-цифрово преобразуване, кодиране и т. н), за да може да бъде пренесен на големи разстояния или защитен от производствени шумове.

Производителите на микропроцесорни системи разработват отделни блокове (микропроцесор, памет и т. н.), чрез свързването им по подходящ начин могат да се изградят разнообразни микропроцесорни системи с различни функционални възможности и характеристики. Например, чрез свързването на няколко схеми (модули) памет, може да се разшири обемът на паметта на микропроцесорната система. Архитектурата на подобни системи е опростена и е подчинена на модулния принцип на изграждане. Системата от модули е отворена. Може да се разработват и включват в структурата и нови функционални модули, които да разширяват функциите на компютърната система. Всички сигнали от отделните

модули са унифицирани и отделени в отделни групи: управляващи (синхронизиращи) сигнали, адресни сигнали и сигнали, носители на обработваната информация – данните.

4.2. АРХИТЕКТУРА НА МИКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА

Една стандартна микропроцесорна система съдържа определен брой блокове и магистрали. На *фиг. 282* е показана тримагистрална микропроцесорна системна архитектура.



фиг. 282. Тримагистрална микропроцесорна системна архитектура

В системата са включени следните основни функционални блокове и магистрали:

- Микропроцесор (или централен процесор)
- Памет
- Входно-изходни устройства
- Адресна магистрала
- Информационна магистрала
- Управляваща магистрала

Микропроцесорът обменя данни във форма на електрически сигнали с паметта, входните и изходните устройства на системата по трите системни магистрали: адресна, информационна-

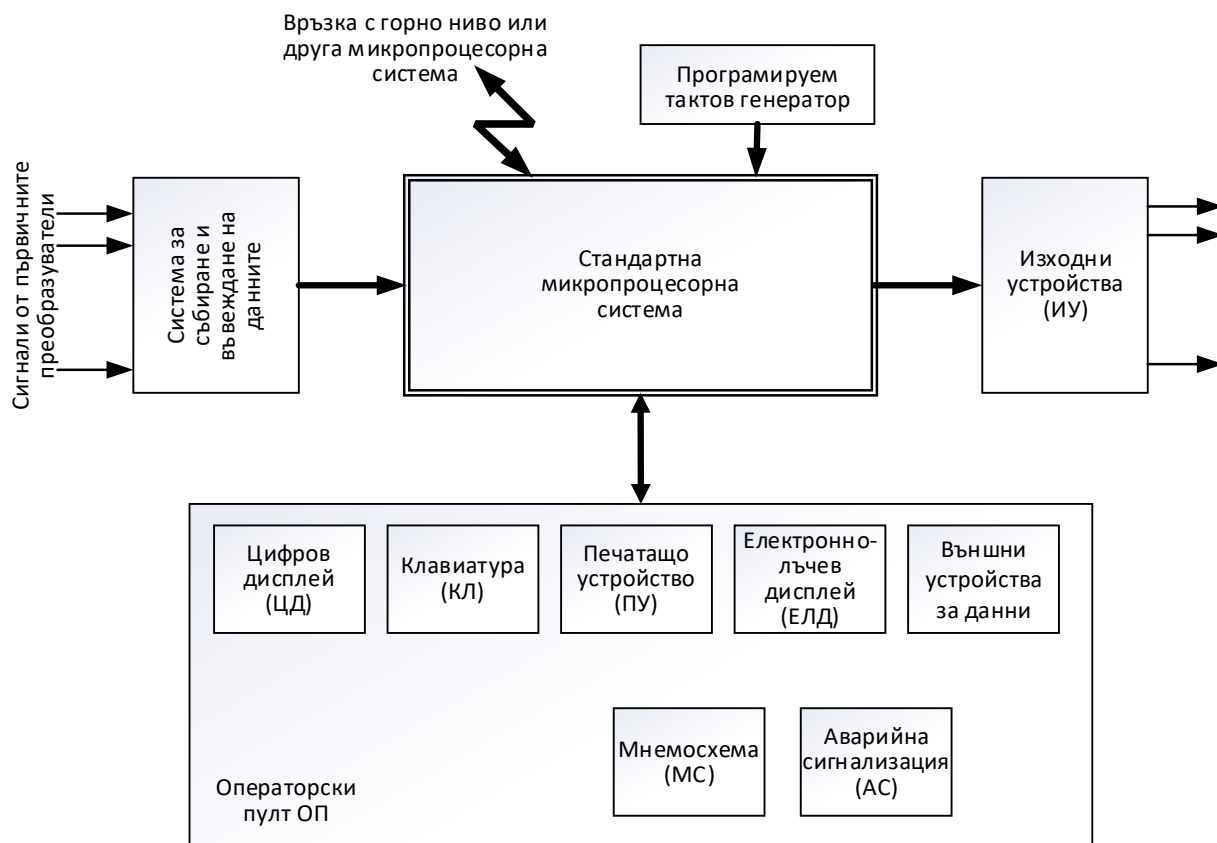
двупосочни информационни шини, и управляваща. Всички стандартни елементи на системата се свързват с тези шини.

Централният процесор включва микропроцесори с необходимия за неговата работа тактов генератор и схема за начално установяване (RESET), която при включване на схемата поставя всички устройства в начално положение.

Блокът на паметта се изгражда от стандартни елементи и по функционалното предназначение се разделя на постоянна (ROM, EEPROM, Flash) памет и памет за четене и запис (RAM). Цялата входна информация от първичните преобразуватели и устройствата за връзка с оператора, която трябва да се съхрани за определено време в микропроцесорната система, може да се запише и запомни само в RAM паметта. В RAM паметта могат да бъдат съхранявани временно и междинни резултати от обработването на информацията, периодично изменящи се константи и др. В постоянната памет се записват при изграждането на системата програми, които определят последователността на обработване на данните и тяхното използване за целите на измерването и управлението. Когато се променят режимите на работа на микропроцесорната система или редът на обработване на информацията, в RAM паметта може да се записват и стартират впоследствие различни свързващи програми, които определят реда на изпълнението на програмите, записани в постоянната памет. Във всички случаи началната програма, която управлява информационната връзка между отделните блокове на стандартната микропроцесорна система, при пускането ѝ се записва в постоянната памет. Тази начална програма в общия случай носи наименованието монитор или супервайзер.

4.3. МИКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕН ПРОЦЕС

Микропроцесорната система се свързва с външни периферни устройства чрез входно-изходни блокове В/И. Такава система е показана на *фиг. 283*.



фиг. 283. Микропроцесорна система с външни периферни устройства

Входно-изходните блокове В/И биват два вида:

- за паралелно-последователно преобразуване
- паралелни интерфейсни схеми

Сигналите от първичните преобразуватели (от обекта за измерване или управление) постъпват на входа на системата за събиране и въвеждане на данни. След преобразуване в нея информацията за състоянието на технологичния обект постъпва през устройство за въвеждане в микропроцесорната система. По заложения в нея алгоритъм, информацията се оценява и се формират управляващите въздействия, които в определени моменти от време, чрез устройства за извеждане, въздействат директно върху състоянието на технологичния обект.

За правилното функциониране на цялата микропроцесорна система в реално време, информацията от първичните преобразуватели трябва да се въвежда в точно определени моменти. Сигналите към изходното устройство ИУ трябва да се подават синхронизирано със състоянието на технологичния процес. За генериране на тактови синхронизиращи поредици от импулси с различна честота се използват програмируеми тактови генератори (таймери), включени към магистралите.

Човекът-оператор се свързва с микропроцесорната система чрез устройства за въвеждане, извеждане и визуализиране на информацията, обединени в операторски пулт ОП и по този начин управлява и настройва режимите на работа на системата.

Операторският пулт се състои от следните устройства:

- Клавиатура - чрез нея операторът въвежда информация.
- Печатащо устройство - чрез него се извеждат и отпечатват съобщения за оператора.
- Дисплей - на екрана му се извежда буквено-цифрова и графична информация, необходима на оператора за следене и управление на процесите в микропроцесорните системи и на технологичния процес.
- Цифров дисплей - има спомагателни функции, като най-често се използва при първоначално пускане на системата.
- Външна памет - използва се външна памет, когато самата памет на микропроцесорната система не е достатъчна за записване на по-сложни програми или повече данни. Обединява се с останалите устройства от операторския пулт. Записаните във външната памет програми могат да бъдат пренасяни през съответния блок за въвеждане и извеждане на RAM паметта, където се стартират и изпълняват.

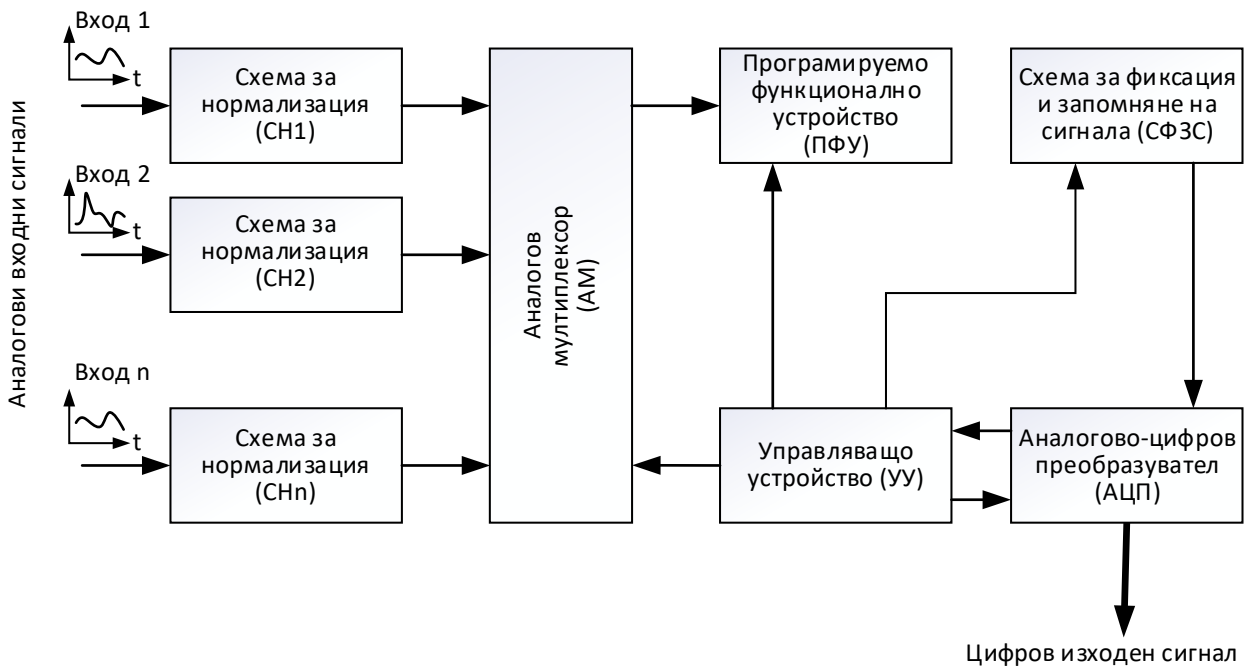
Устройствата от операторския пулт се свързват със микропроцесорната система чрез няколко входно-изходни блока, включени в структурата ѝ. Някои от тези блокове могат да бъдат специализирани за работа с точно определено външно устройство. В този случай В/И блокът влиза в състава на контролера - управляващото устройство.

Повечето интерфейсни схеми, необходими за свързване на стандартни външни устройства към системата, се съединяват с трите магистрали на микропроцесорната система.

В зависимост от целите и задачите на микропроцесорна система, някои от разгледаните блокове могат да липсват или да се добавят нови, със специално предназначение.

4.4. СИСТЕМИ ЗА СЪБИРАНЕ И ВЪВЕЖДАНЕ НА ДАННИ

Системата за събиране и извеждане на данни е предназначена за преобразуване на измерваните сигнали във вид, удобен за въвеждане в микропроцесорната система. Тя представлява сложна измервателна верига и нейните елементи имат специфично предназначение (*фиг. 284*).



фиг. 284. Система за събиране и извеждане на данни

Особености на системата за събиране и въвеждане на данни:

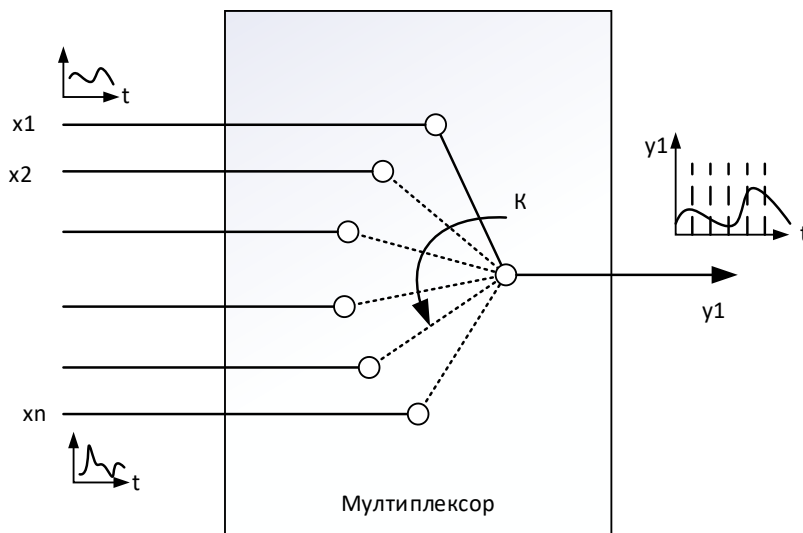
- Входните измервани сигнали са повече от един и са непрекъснати функции на времето t .
- Изходният сигнал z е един, в цифров вид, и съответства на фиксирана стойност на един от входните сигнали.

За целта, през определен интервал от време, чрез превключващо устройство (аналогов мултиплексор) един от входните сигнали (x_1, x_2, \dots, x_n), се подава към измервателната верига за преобразуване. Изходният сигнал за цялата верига z , в цифров вид, съответства на стойността на изходния сигнал u на мултиплексора в началото на интервала Δt .

В производствени условия върху измервания сигнал влияят различни шумове, които водят до грешки и влошават характеристиките на измервателната верига. Качеството на сигнали може да се изрази като отношение между измервания сигнал и нивото на шум. Това отношение е универсален показател, който позволява да се оценят характеристиките на измервателната верига. Тъй като амплитудата на изходния сигнал от първичния преобразувател обикновено съответства на някаква физическа величина- температура, налягане, ниво и други, то трябва да се измери истинската, без грешка, стойност на амплитудата. За постигане на желана стойност на отношението измерван сигнал/шум (чрез подходящо усилване на полезния сигнал и филтриране на шума) се използват схемите за нормализация. Обикновено това са висококачествени измервателни усилватели и подходящи

честотни филтри. Под нормализиране на сигнала се разбират операциите по повишаване на качеството на измервания сигнал.

Аналоговият мултиплексор в разглежданата схема може да се представи като многопозиционен превключвател, чийто изходен сигнал y_1 съвпада със съответния входен x_1, x_2, \dots, x_n , в зависимост от положението на ключа (фиг. 285).



фиг. 285. Многопозиционен превключвател

При системите за измерване и събиране на аналогови данни има необходимост от допълнителна обработка на сигнала:

- линеаризация
- логаритмични операции - свиване или компресия и разширение или експандиране на обхвата на измерване
- изчислителни операции (умножение, деление, степенуване...) над сигналите и реализирането на различни програмируеми функции.

Тези функции се реализират в програмируемото функционално устройство.

4.5. МИКРОПРОЦЕСОРНИ СИСТЕМИ ЗА ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНО УПРАВЛЕНИЕ

Функциите по управление на дадена технологична линия или цяло производство трябва да бъдат разпределени между няколко микропроцесорни системи, всяка от които стабилизира или оптимизира технологичния процес в един или няколко агрегата. Така се стига до идеята за изграждане на децентрализирано управление, при което се намаляват разходите по изграждане на линии за връзка, намалява се обемът на дистанционно пренасяната

информация, увеличава се надеждността на работа и шумозащитеността на цялата микропроцесорна система.

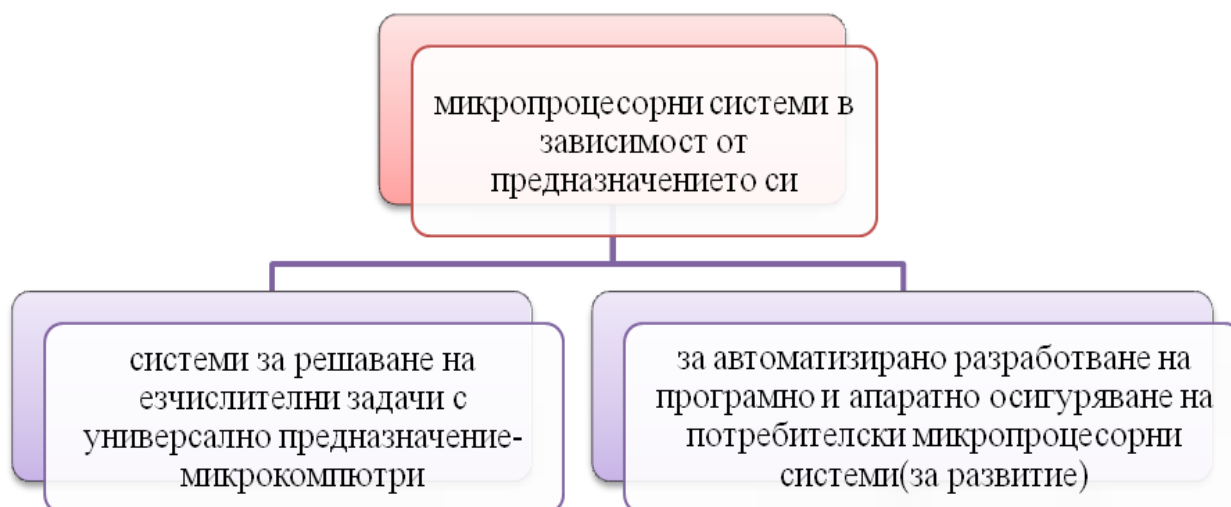
Съвместната работа на агрегатите в рамките на дадено производство трябва да бъде технологично обвързана. Трябва да се съгласува и работата на микропроцесорните системи, които управляват отделните агрегати, чрез изграждане на стандартни линии за връзка, по които да се пренася оперативна информация за режимите на работа, взаимосвързаните технологични величини и операции, стойностите на показателите за качество, задания за изпълнение и т.н.

Функционалната подсистема за входно-изходни преобразувания изпълнява следните функции:

- периодически сканира входните точки (аналогови, цифрови и броячи);
- актуализира стойностите им в базата от данни на БМС;
- прехвърля стойностите на изходите (аналогови и цифрови) към физически изходи;
- диагностицира състоянието на входно-изходните връзки.

Операторската мониторна станция (ОМС) реализира връзката на системата с персонала. Чрез ОМС се осигурява централизирано наблюдение и намеса в технологичния процес, конфигуриране и настройка на параметрите на системата. ОМС представлява микро-ЕИМ с цветен монитор, специализирана клавиатура, запомнящо устройство с гъвкави дискове и печатащо устройство.

4.6. ВИДОВЕ МИКРОПРОЦЕСОРНИ СИСТЕМИ



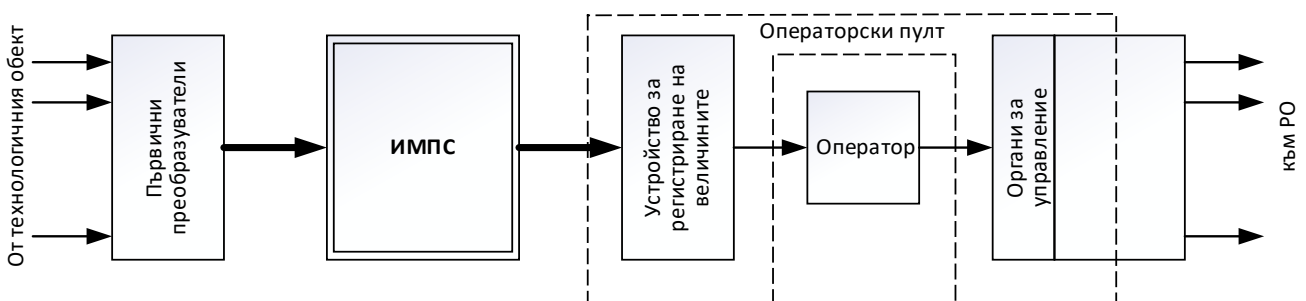


фиг. 286. Видове микропроцесорни системи

Голяма част от проблемите, които възникват при управлението на сложни технологични агрегати, могат да се решат чрез използването на технически средства с качествено нови свойства и характеристики, каквито са микропроцесорните системи за управление. С включването на микропроцесорната система в управляващата част на системата става възможно да се автоматизират функциите на управление и задачите, отнасящи се към сферата на дейността на човека.

4.6.1. ИНФОРМАЦИОННИ МИКРОПРОЦЕСОРНИ СИСТЕМИ (ИМПС)

Функционална схема за управление на технологичен процес с информационна микропроцесорна система е показана на **фиг. 287**.



фиг. 287. Функционална схема за управление на технологичен процес

Основната задача на ИМПС е да събира, обработва и регистрира информация за управлявания технологичен процес. Обработената информация се предоставя на оператора. Въз основа на нея той взема решение как трябва да управлява технологичния процес в конкретните условия. Решението се реализира без участието на ИМПС- тя решава само първата част, за състоянието на технологичния обект.

Състоянието на всеки технологичен процес се характеризира с определен брой променливи във времето величини. Чрез първични преобразуватели измерваните величини (температура, ниво, разход, налягане и т.н.) се преобразуват в сигнали, които постъпват на входа на ИМПС. Тя изпълнява следните функции:

- непрекъснато следи дали стойностите на измерваните величини са в допустимите граници и ако не са, веднага информира оператора.
- отбелязва момента, в който контролираната величина напуска обхвата на допустимите стойности, и момента на връщане в него.
- периодически регистрира всички измервани величини.
- при поискване регистрира параметри, които интересуват оператора във хода на технологичния процес.
- сигнализира за настъпила авария.
- изчислява някои комплексни показатели, които характеризират протичането на процеса, като например количество произведен продукт, сумарен разход и др.

Като използва създадените инструкции и личен опит, операторът взема решение да въздейства върху органите за управление на изпълнителните устройства. В някои случаи операторът променя заданията на регулаторите. Той може да пренастройва цялостно процеса в друг режим, да включва допълнителни машини и съоръжения и т.н.

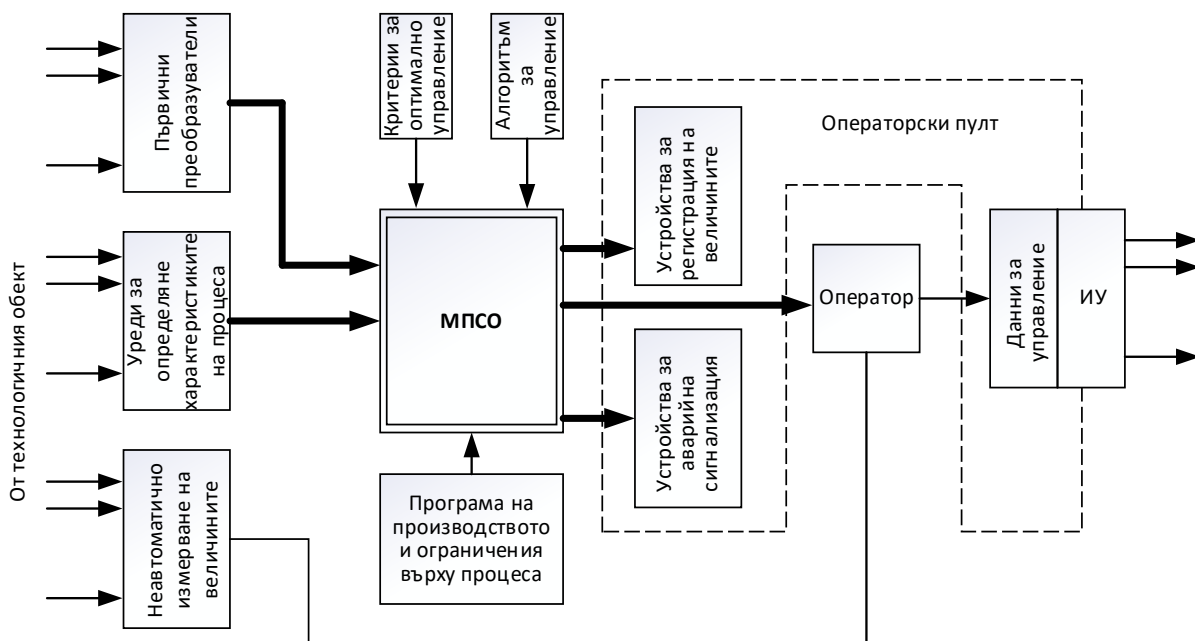
ИМПС автоматизира събирането на информацията, печата показанията на уредите и обработва събраната информация. Тя концентрира вниманието на оператора само върху тези величини, които са преминали допустимите граници. Изчислява в хода на процеса някои обобщени показатели, с което се облекчава труда на оператора и намалява вероятността от грешки, вследствие на умора.

Тъй като основната функция на ИМПС се заключава в централизирането на контрола на много параметри, в някои случаи те се наричат микропроцесорни системи за централизиран контрол.

4.6.2. МИКРОПРОЦЕСОРНИ СИСТЕМИ КАТО СЪВЕТНИК НА ОПЕРАТОРА

Следващ етап при разширяване функциите на микропроцесорната система е системата, която работи в режим „съветник на оператора”. Системата съветник изяснява всички основни функции на информационната, но освен това дава препоръки на оператора как да управлява технологичния процес.

Функционалната схема за управление на технологичен процес с микропроцесорна система, която работи в режим „съветник на оператора” е показана на *фиг. 288*.



фиг. 288. Функционална схема за управление на технологичен процес с микропроцесорна система, която работи в режим “съветник на оператора”

Величините, които характеризират състоянието на технологичния процес, се преобразуват от първичните преобразуватели или от уреди за определяне на характеристиките на процеса и постъпват на входа на микропроцесорната система. Тя обработва и регистрира информацията за състоянието на процеса, като я съобщава на оператора в удобна за възприемане форма. След оценяването на състоянието на технологичния процес, микропроцесорната система формира и издава към оператора „съвет” по какъв начин да въздейства върху изпълнителните устройства, за да се управляват оптимално режимите на работа на технологичните машини и съоръжения.

За формирането на „съвет” към оператора в МПССО трябва да се въведе допълнителна информация за:

➤ Програмата на производството за определено време и ограниченията върху технологичния процес. Имат се предвид указания за предстоящи изменения на вида и качеството на произвежданата продукция, ограничения по мощност и пропускателна способност на отделните агрегати, указания за предстоящ ремонт и др.

➤ Целта на управлението. Форма за определяне на целта е критерият за оптимално управление. В практиката се използват различни видове критерии - често технически или икономически. При вземането на решение за управление на технологичен процес може да се използва повече от един критерий.

➤ В паметта на МПССО трябва да се въведе и инструкция по какъв начин, като се разполага с получената от измерванията информация за състоянието на процеса и се знае критерият за управление, да се формират съвети и препоръки към оператора, които да осигуряват оптимално водене на процеса. Тази инструкция или програма съответства на разсъжденията, които прави самият оператор при отсъствие на системата съветник. Такава инструкция се нарича алгоритъм за управление.

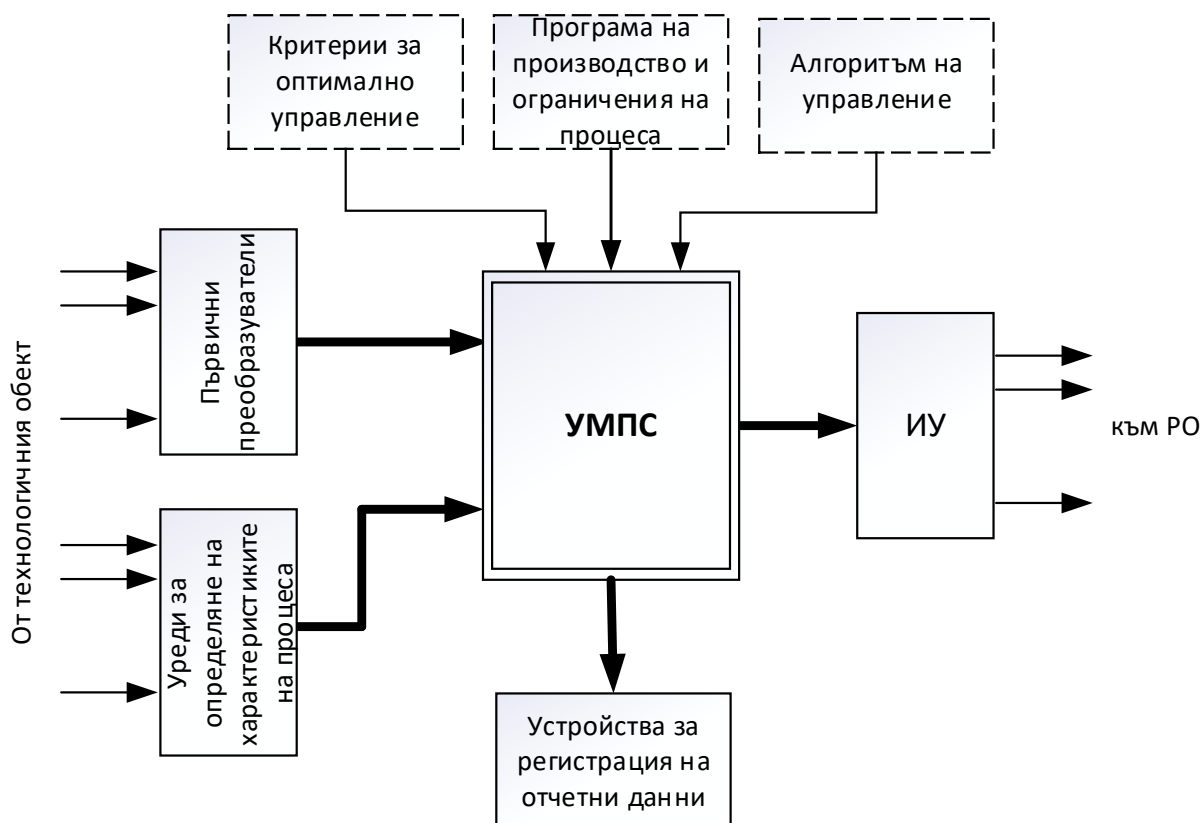
На *фиг. 289* условно е означено с прекъснатата линия въвеждането на допълнителна информация във вид на програми в паметта на МПССО.

Човекът-оператор оценява дали „съвета” на изхода на МПССО е правилен и взема окончателно решение за въздействие върху органите за управление на изпълнителните устройства.

4.6.3. УПРАВЛЯВАЩИ МИКРОПРОЦЕСОРНИ СИСТЕМИ (УМПС)

При използването на управляваща микропроцесорна система УМПС контурът за управление на технологичен процес се затваря без участието на оператор. Процесът на управление напълно се автоматизира, а обслужващият персонал само наблюдава правилното функциониране на системата за управление и контролира изправността за грешки, внасяни от оператора.

Работата на УМПС е показана на *фиг. 289*.



фиг. 289. Работа на управляваща микропроцесорна система

Работата на УМПС се различава от МПССО по това, че управляващите въздействия, изработвани от УМПС, се подават директно към изпълнителните устройства без оператор.

УМПС изпълнява всички функции на информационна микропроцесорна система ИМПС и микропроцесорна система „съветник-оператор” МПССО, но освен това решава и допълнителни задачи:

- изработва сигнал за непосредствено управление;
- контролира дали са правилни взетите решения, изправността на всички системи за събиране на информация и на цялостната управляваща система.

При затварянето на контура за управление без участието на човека, са възможни два варианта:

- в системата за управление има регулатори, които стабилизират една или друга величина. Управляващите въздействия на УМПС в този случай представляват задание на тези регулатори.
- в системата за управление липсват регулатори. Управляващите въздействия, изработени от УМПС, постъпват непосредствено към изпълнителните механизми.

4.7. ПРЕДИМСТВА НА МИКРОПРОЦЕСОРНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

В сравнение с аналоговите системи, микропроцесорните системи имат редица предимства:

➤ Гъвкавост - възможност чрез препрограмиране да се променят не само параметрите на системата за управление, но и алгоритмите, и дори структурата. В същото време хардуерната част на системата остава непроменена. В аналоговите системи би било необходимо да пренаредите връзките, да включите нови и т.н., тоест да промените хардуера.

➤ Премахване на всички ограничения върху структурата на устройството за управление и законите за контрол. Една цифрова система за управление може да осигури, в най-простия случай, резултати не по-лоши от аналогова (непрекъсната), когато традиционните алгоритми за управление, получени за непрекъснати системи, се апроксимират с дискретни такива (старт-стоп, адаптивни алгоритми) с възможност за изграждане на взаимосвързани мултиструктурни системи за управление. Предвид тези възможности, показателите за качество на цифровите системи могат значително да надхвърлят показателите за качество на непрекъснатите системи. Например, реалистично е да се създадат ограничаващи скоростта системи за управление.

➤ Самодиагностика на контролните устройства. Възможност за проверка на изправността на механични задвижващи блокове, преобразуватели на енергия, сензори и друго оборудване по време на технологични паузи, т.е. автоматична диагностика на състоянието на оборудването и ранно предупреждение за инцидент.

➤ По-висока точност поради липсата на нулев дрейф, характерна за всички аналогови устройства (нулеви дрейф не позволява точно измерване на малки несъответствия в аналоговите системи). По този начин цифровите системи за контрол на скоростта осигуряват увеличаване на точността с два порядъка, в сравнение с техните непрекъснати аналози.

➤ Простота на визуализация на параметрите на процеса на управление чрез използване на цифрови индикатори, индикаторни панели и дисплеи, организиране на интерактивен режим на обмен на информация с оператора за целите на контрола.

➤ Висока надеждност, по-малко тегло, размери и цена.

4.8. ОПАСНОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРАНИ ПРОЦЕСИ

Автоматизирането на процесите е един от най-ефективните начини за увеличаване на производителността на труда, както и за подобряване на условията на труд на работниците.

Индустриалните роботи (PR) са универсален инструмент, който осигурява цялостна автоматизация на производствените процеси и позволява бързо да променят последователността, скоростта и вида на манипулационните действия.

Механизацията и автоматизацията на процесите, извършена с помощта на PR, позволява да се освободи значителен човешки ресурс, като се насочи към основното производство. С помощта на PR успешно се автоматизират монотонно повтарящи се операции и преходи на производствения цикъл, които се случват в производствена среда с вредни условия на труд: високи температури, неприятни миризми, прах, газове и изпарения. Важен параметър, който гарантира безопасността на персонала, обслужващ PR, и удобството на оператора, е скоростта на движение на задвижванията.

За да се подобри безопасността на оператора, PR дизайнът предвижда устройства, с помощта на които се получава информация: за режима на работа, изпълнението на програмата, работата по програмни кодове, за задействане на блокировки на PR и обслужването от него технологично оборудване, за наличието на неизправност в PR, за началото на движението на изпълнителните органи на PR и тяхната готовност за движение при изпълнение на програмата за контрол. Роботите трябва да бъдат осигурени със защитно оборудване (защитно, безопасно, блокиращо, сигнално и т.н.), изключващо възможността за излагане на експлоатационния персонал на опасни и вредни производствени фактори. Тези средства за защита не трябва да ограничават технологичните възможности на PR и да влошават условията за тяхната поддръжка и ремонт.

За да се предотвратят повреди на елементи на оборудването, инструменти и друго оборудване, неизправности в системата за управление на PR, са предвидени различни заключващи устройства. Дизайнът на PR трябва да включва средства за гарантиране, че изпълнителните органи спират, когато човек влезе в частта от работното пространство, където PR работи съгласно програмата, така че манипулаторите да не излизат извън програмираното работно пространство. Те осигуряват твърди ограничители, предназначени за товара, като се вземат предвид динамичните и статичните сили, както и крайните превключватели. Блокиращите устройства PR при работа в един от режимите трябва да изключват възможността за работа в друг режим и спонтанно преминаване от един режим в друг. За да се гарантира безопасността на оператора, системата за управление на PR трябва да има

устройство за аварийно спиране, което се задейства в случай на прекъсване на PR, независимо от начина му на работа, включително когато се използва някакъв вид захранване - обслужваното оборудване е изключено.

При задействане на устройството за аварийно спиране, всяко движение на PR трябва да спре, независимо от режима на работа, с изключение на случаите, когато неговото спиране и фиксиране в определено положение водят до появата на опасни и вредни производствени фактори. Възобновяването на PR работата се извършва от оператора с помощта на специална команда. Роботите, предназначени за транспортиране на продукти на височина, са оборудвани с устройства, които предотвратяват падането на движещите се товари поради разхлабване на скобата за захващане, внезапно прекъсване на захранването и други причини.

PR контролите и средствата за показване на информация се намират на контролния панел, като местоположението им трябва да бъде удобно за използване от работниците. При избора на средство за показване на информация, което изисква бърза реакция на работника, трябва да се даде предимство на звукови и светлинни сигнали с достатъчна мощност. Превключвателите за режим PR и регулаторите на скоростта трябва да имат ключалки, които не позволяват спонтанното им движение. За да се възпрепятства свободният достъп до органите за управление на контролния панел, се използват специални капаци, бутони, копчета и др. Основните контроли на PR трябва да имат ясни надписи и символи, указващи тяхното предназначение. Контролите за аварийно спиране трябва да бъдат разположени на лесно достъпно място и трябва да се различават по размер и цвят от другите контроли и бутони.

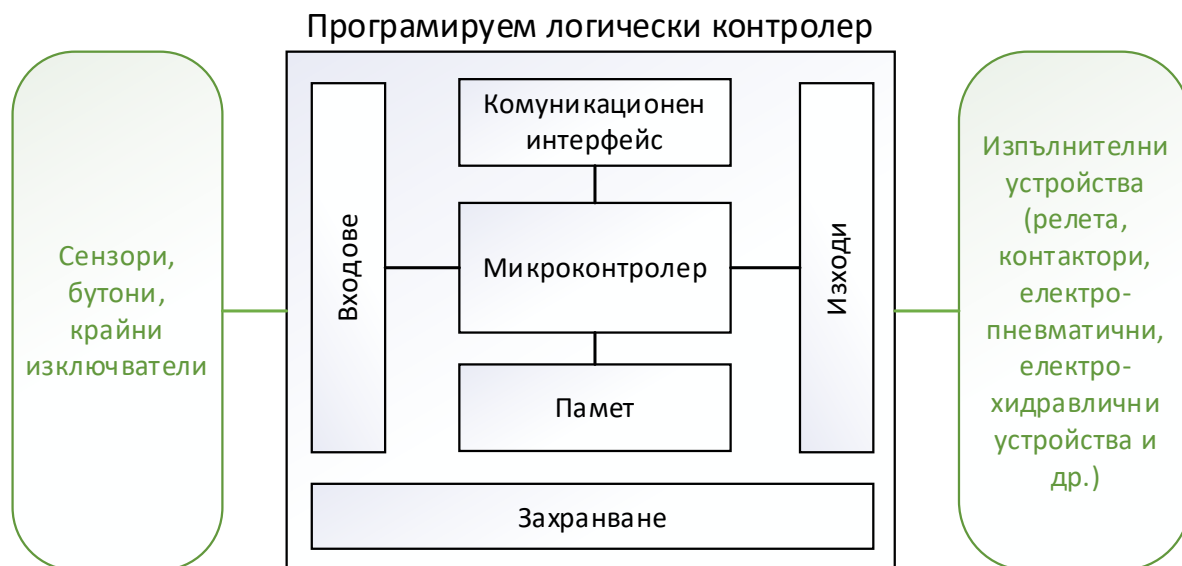
Неизправностите и аварийните ситуации, възникнали по време на експлоатацията на PR и използваното заедно с него технологично оборудване, трябва да се записват ежедневно от оператора, регулатора и други работници в специален дневник, за да се отстранят незабавно.

4.9. ПРОГРАМИРУЕМИ ЛОГИЧЕСКИ КОНТРОЛЕРИ

Програмируемите логически контролери (PLC) са широко използвани инструменти за автоматизация, като част от локални и разпределени системи за мониторинг и управление.

Терминът PLC означава устройства, които преобразуват, обработват, съхраняват информация и генерират управляващи команди или управляващи регулаторни действия, реализирани на базата на микропроцесорна технология, и всъщност са специализирани компютърни системи за управление за работа в локални и разпределени системи за управление в реално време.

Програмируемите логически контролери са предназначени за създаване на автоматизирани системи за управление на технологично оборудване в електроенергията, транспорта, включително железопътния, в различни области на промишлеността, жилищно-комуналните услуги и селското стопанство (*фиг. 290*).



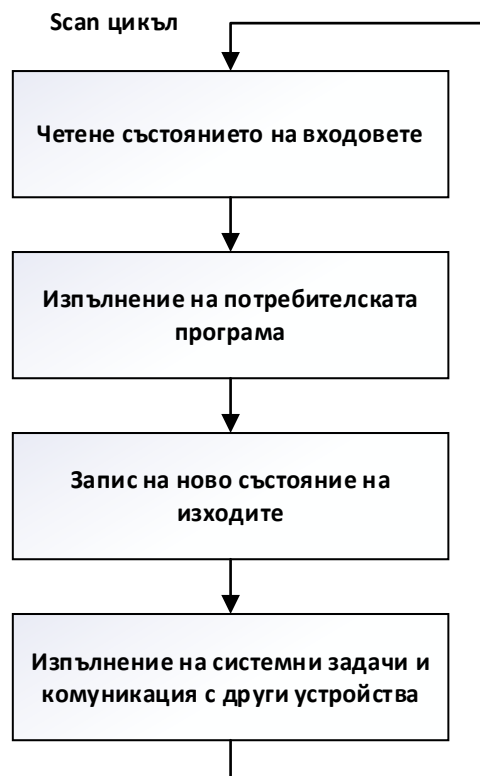
фиг. 290. Блокова схема на програмируем логически контролер

Операционната система, както и потребителската програма, се записват в паметта на контролера. Паметта включва както енергонезависима Flash памет, така и RAM памет за запис на променливите на потребителската програма. Част от RAM паметта може да бъде поддържана от батерия или супер кондензатор след спиране на захранването, като по този начин записаните там променливи се съхраняват.

Входовете и изходите на PLC контролера могат да бъдат цифрови или аналогови. Към входовете се свързват сигнали от различни сензори, бутони, крайни изключватели и други устройства за въвеждане на информация. Изходите се използват за управление на изпълнителни устройства като контактори, електропневматични устройства и др.

Повечето PLC позволяват избор между различни режими на работа като RUN, който се използва за изпълнение на потребителска програма, и STOP, който спира изпълнението на програмата. Когато PLC контролера е в режим RUN, се изпълнява потребителската програма, като последователност от т.нар. „Scan” цикли (или цикли на сканиране). Един „Scan” цикъл представлява следното – първоначално PLC контролера прочита състоянието на входовете, след което изпълнява потребителската програма и резултатите от изпълнението и ги извежда

на изходите. Накрая на „Scan” цикъла се изпълняват системни задачи и комуникация с други устройства (фиг. 291).



фиг. 291. „Scan” цикъл

Програмируемите логически контролери (PLC) са фокусирани главно върху изпълнението на логически функции, а не върху аритметични операции в реално време, и се използват вместо релейни управляващи вериги, т.е. за управление на полупроводникови вериги на електроавтоматични устройства на технологични обекти.

PLC изпълняват всякакви функции на командни устройства и микроконтролери и са създадени на базата на микрокомпютри. Данните от микрокомпютъра могат да се разглеждат като универсален програмируем модел на цифрова машина за управление. Възможността за използване на PLC като универсално локално устройство за управление за всички видове технологични процеси се постига чрез въвеждане на програма в PLC, която определя алгоритъма на работа на конкретен обект на управление, без да се променя неговата електрическа структура. По този начин ориентацията на PLC като устройство с общо предназначение в конкретно приложение се постига чрез подходящо програмиране.

PLC може да бъде или цялостен, неделим продукт, доставен от един производител, или няколко продукта - компоненти, доставени от един и същ или различни производители.

Според функционалното предназначение на PLC, могат да се разграничат следните основни части:

- процесор, който получава, обработва и издава информация;
- интерфейсно устройство процесор - обект (USO);
- устройство за свързване на процесора с човешки оператор;
- софтуер (софтуер).

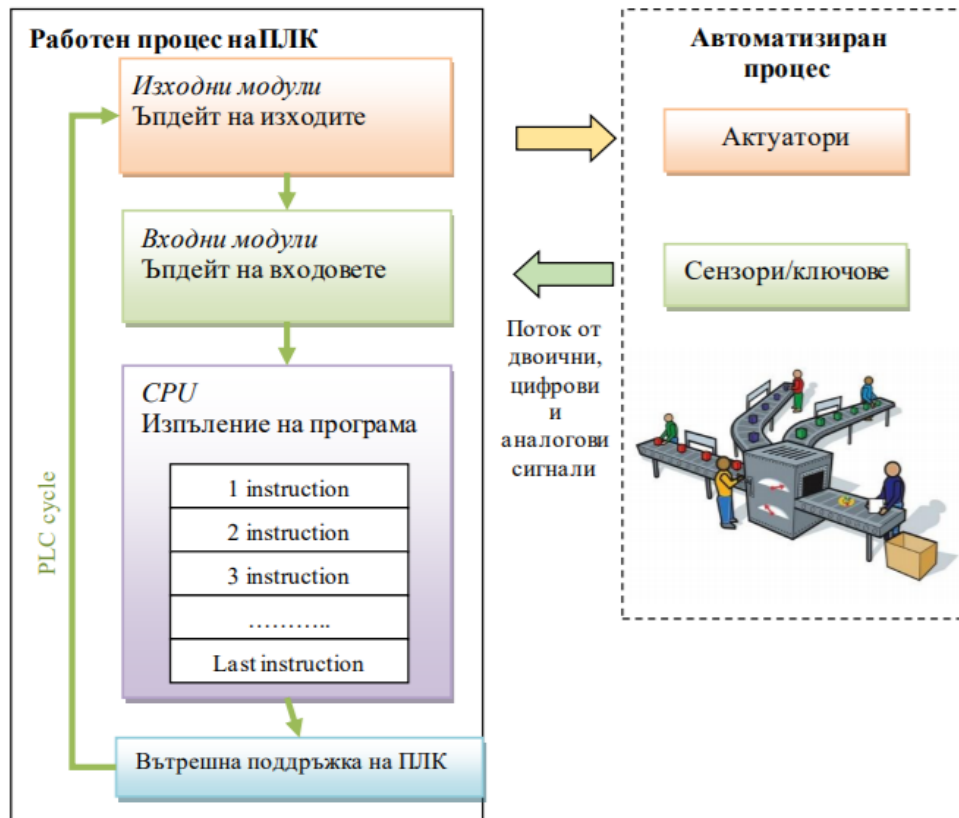
Изискванията за PLC са различни, тъй като PLC се използват за всички видове дейности в едно производство.

Първото и основно предимство на PLC, което доведе до широкото им използване, е, че едно компактно електронно устройство може да замени десетки и стотици електромеханични релета.

Второто предимство е, че функциите на логическите контролери се реализират не чрез хардуер, а чрез софтуер, което им позволява постоянно да се адаптират към работа в нови условия с минимални усилия и разходи.

Използването на PLC осигурява висока надеждност, проста репликация и поддръжка на системите за управление, ускорява инсталирането и въвеждането в експлоатация на оборудването, предоставя възможност за бързо актуализиране на алгоритмите за управление (включително на работещо оборудване).

На *фиг. 292* е показано как работи PLC.



фиг. 292. Работа на PLC

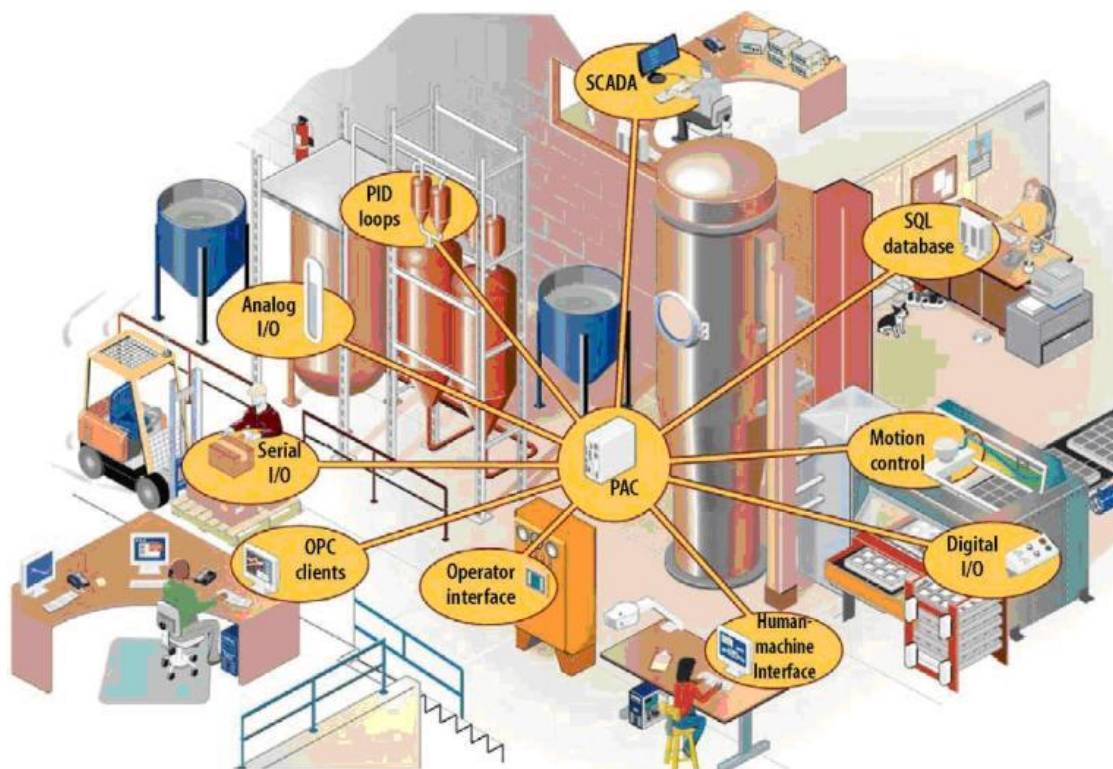
Всеки цикъл започва с вътрешна работа за поддръжка на PLC като управление на паметта, диагностика и т.н. Тази част се изпълнява много бързо, така че потребителят не я забелязва. След това се подновяват (инициализират) изходните стойности на СМ. Изходните стойности, намиращи се в паметта на процесора (в областта за изходни данни, изходно изображение), се изпращат към изходните сигнални модули. Сигналните модули ще конвертират стойностите на данните в цифрови или аналогови сигнали. Изпълнителните механизми „разбират“ тези сигнали. Следващата стъпка е актуализиране на входовете. Прочитат се входните състояния на СМ и се конвертират в двоични или цифрови сигнали. Тези сигнали се изпращат към CPU и се съхраняват в паметта за данни. След това CPU изпълнява потребителската програма, която е заредена в паметта, последователно (всяка инструкция индивидуално). Програмните инструкции на PLC се обработват в машинен код MC7 (наподобява програмния език на Siemens, наречен „списък с правила” - statementlist). Това означава, че всички програми, написани на други програмни езици, се конвертират в MC7 инструкции. При изпълнението на програмата се генерират нови изходни сигнали. Последната стъпка е актуализиране на изходите. След изпълнението на последния програмен ред, изходните сигнали (двоични, цифрови или аналогови) от паметта за данни се изпращат към

СМ. Тези сигнали след това се конвертират в подходящи сигнали за изпълнителните механизми (актуаторите). След това се изпълняват други дейности като комуникация на данни с програмно устройство, управление на паметта и диагностични функции. Ако един цикъл на потребителската програма приключи, PLC стартира нов цикъл. След командата за стартиране на PLC се изпълнява специална програмна част „Startup“. Първо се изчиства областта от паметта за записване на данните от входовете и след това се инициализират изходите на PLC. По време на тази част от програмата на ПЛК (блок OB100) стойностите на изходните данни и сигналите в сигналните модули не се актуализират. След това се актуализират изходните стойности в SM и входните данни в процесора. След първия цикъл PLC изпълнява главната потребителска програма. Понякога изпълнението на главната програма е прекъсвано от програми за прекъсвания при възникване на събитие (натиснат е аварийен бутон), хардуерно (при проблем с входен модул) или в даден момент от деня (при необходимост от изпълнение на по-малка програма). PLC продължава изпълнението на главната програма след края на работата на програмите за обработка на прекъсването.

4.10. ПРИЛОЖЕНИЕ

➤ *PLC приложение в специфични за компютър задачи (фиг. 293).*

Съвременните задачи за автоматизация представляват редица изисквания, като мрежова комуникация, взаимодействие между различни устройства, интеграция с общи корпоративни мрежи за данни, които затрудняват използването на традиционните PLC. Решаването на такива задачи е по-характерно за персоналния компютър (PC). За да ги разрешите, на традиционния PLC е инсталиран допълнителен (и) процесор (и), системата съдържа също мрежови шлюзове или конвертори (между мрежи с различни мрежови протоколи), „свързващият“ (специализиран) софтуер работи на отделен допълнителен компютър и „специализиран“ софтуер за интеграция в обща корпоративна мрежа за предоставяне на всички необходими данни. Такава конструкция система за управление е тромава, отнема време и има висока цена.



Фиг. 293. PLC приложение в специфични за компютър задачи

➤ *Прилагане на компютър като PLC*

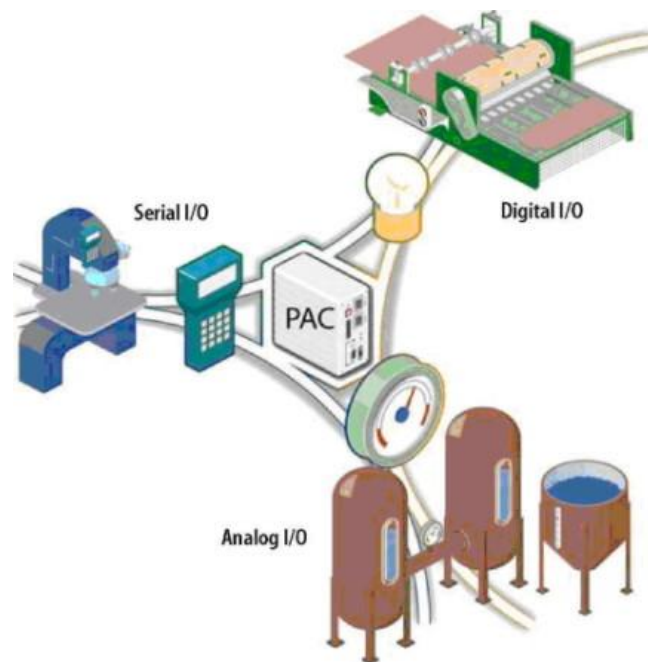
При многобройни задачи, при които се изисква активен обмен на мрежови данни, използване на модемна комуникация и т.н., компютрите в „индустриалния дизайн“ се използват доста успешно. За такива задачи, специфични за компютър, традиционен PLC може да бъде оборудван с допълнителни модули, но използването на „индустриален компютър“ в специфични за PLC задачи за управление на механизми или технологични процеси и т.н., „промишлен компютър“ също изисква допълнения и промени. Например, компютър може да използва операционна система, която не е оптимизирана за „бързи“ технологични процеси и не е детерминирана (с „твърдо“ и недвусмислено определено време за реакция на събитие).

➤ *Въведение в системата PAC (фиг. 294)*

Производителите на индустриална автоматизация, в отговор на днешните разширяващи се индустриални изисквания, съчетават детерминирания специфичен за PLC стил на управление на процеса с гъвкавостта на конфигурацията и мощността на компютъра. Такива устройства се наричат програмируем контролер за автоматизация (софтуер за програмируема автоматизация PAC).

РАС са изработени в модулен дизайн, имат „отворена архитектура“, възможност за разширяване с допълнителни I/O модули и комуникации с различни устройства и бизнес системи. РАС разполагат с отлична производителност и ефективна обработка на входно-изходните сигнали. Те са многофункционални и могат ефективно да обработват едновременно цифрови и аналогови сигнали, както и да осъществяват високоскоростен обмен на данни с други устройства, чрез различни комуникационни интерфейси.

Освен това РАС имат гъвкави възможности за интеграция в различни бизнес системи.



фиг. 294. Система РАС

➤ *Ползи при внедряването на системата и нейното по-нататъшно използване (фиг. 295).*

Използването на РАС контролери при индустриалните приложения, в сравнение с използването на PLC, предоставя множество предимства, свързани с подобрените възможности за програмиране и работа, в сравнение с традиционните PLC контролери.

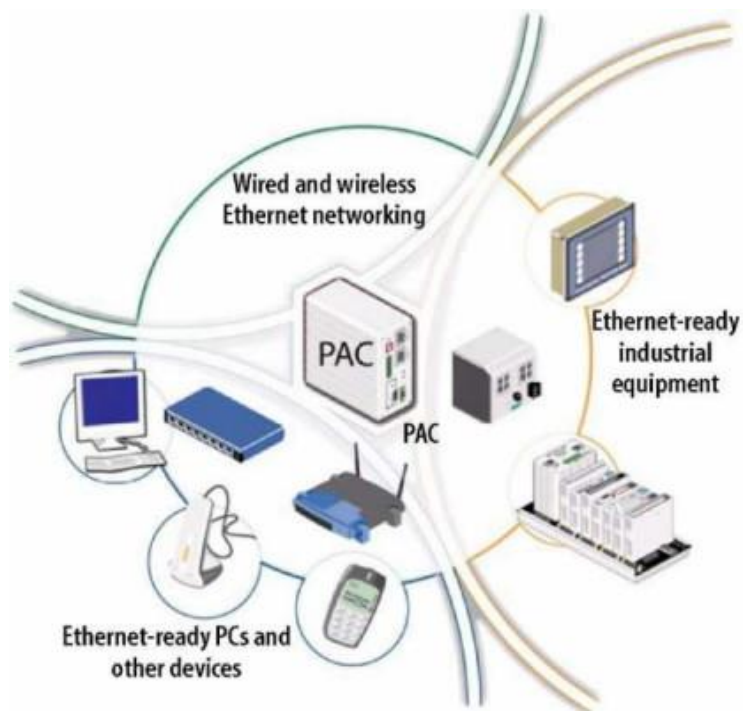
Интегрирането на хардуер и софтуер осигурява следните предимства при създаването на една система: интегрираната среда за разработка (IDE) за РАС системи има единна база данни от тагове (променливи на процеса), използвани от всички софтуерни инструменти.

РАС системите се разгръщат на място, с помощта на един софтуерен пакет, и при необходимост се надграждат в бъдеще, вместо няколко софтуерни пакета от различни доставчици, както в случая с традиционните системи за автоматизация.

Следващото предимство е възможността за надграждане (актуализиране) както на системния хардуер, така и на софтуера. Модулният дизайн на процесорите дава възможност

за тяхната подмяна без окабеляване, компактният размер на модулните PAC значително спестява пространство.

PAC е снабден със съвременни мрежови интерфейси, което позволява обмен на данни в „реално време“ (обработката и предаването на данни не е по-ниска от скоростта на възникване на събития в процеса). Това дава възможност да се получат всички необходими данни с най-високо качество, пълно и точно и да се използват в бизнес приложения.



фиг. 295. PAC.

➤ *PAC приложение за решаване на съвременни задачи за индустриална автоматизация. Една работна платформа на различни нива и зони*

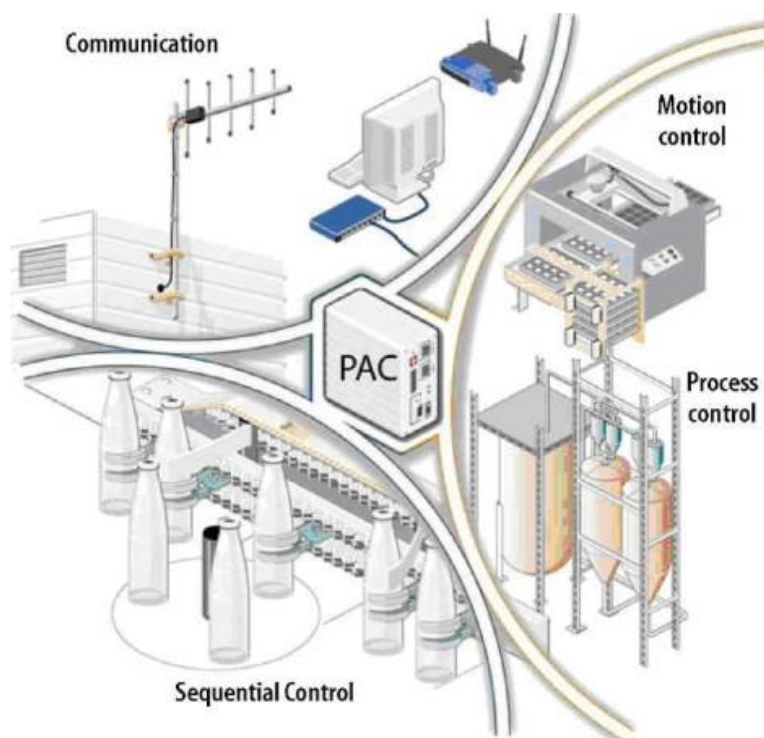
Една система работи в различни области: за наблюдение и контрол на производствената линия; за контрол на химически процеси; за задаване и тестване на „рецепти“; за опаковане и изпращане на готови продукти и др. На всички нива и зони PAC трябва едновременно да обработва стойности на аналогов сигнал, като температура, налягане, ниво и т.н., дискретни състояния на клапани, крайни превключватели, индикатори за състоянието и т.н., да следи състоянието и да извършва тестове за състоянието на оборудването. В определени моменти от време, PAC обменя получените данни чрез сървъра OPC (OLE за управление на процеси) с операторския панел (и) в работната зона, със SQL (структуриран език на заявките) сървър на база данни. В същото време PAC обработва задачата за управление на процеса, без използването на допълнителни процесори, мрежови шлюзове или специализиран приложен софтуер.

➤ *Поддръжка на стандартни мрежови протоколи (фиг. 296)*

Оператор и работна станция, изпитвателно оборудване, сензори и изпълнителни механизми на технологията на процеса, четци на баркод и др., свързан към стандартна 10 / 100MB Ethernet мрежа за данни се използва, когато е възможно. В някои случаи устройствата нямат Ethernet интерфейс, например температурните сензори са свързани директно към модулите на I/O PAC или към модулите, монтирани в междинните възли (стелажи - стелажи), които I/O имат интерфейс Ethernet и извадена PAC мрежа.

Използвайки Ethernet мрежа, PAC комуникира с отдалечени стелажи за четене (запис на аналогови) цифрови, серийни сигнали. В същата мрежа PAC чрез OPC сървър се свързва с операторския панел (и) и сървър на SQL база данни. PAC може да комуникира с различни мобилни устройства или временни операторски станции.

PAC може да контролира, наблюдава, комуникира с много устройства и системи, понеже използва същите стандартни мрежови технологии и протоколи като тях. Други примери за системи за управление могат да бъдат протоколи - Modbus ®, SNMP (Simple Network Management Protocol), чрез модемна връзка и др.



фиг. 296. Стандартни мрежови протоколи.

PAC едновременно наблюдават съоръжението, събират данни, комуникират с други системи в мрежата и наблюдават други задачи.

➤ *Обмен на данни с други корпоративни системи*

Като пример за възможности за обмен на данни с други приложения, може да се разгледа случаят, когато PAC комуникира и с устройства свързани непосредствено с производството и със счетоводната система и със SQL базата данни на предприятието. Тази база данни предоставя необходимите данни за други ключови бизнес системи, като например планиране на ресурси на предприятието (Планиране на ресурси на предприятието - ERP), счетоводна система за цялостната ефективност на използването на оборудване (Ефективност на оперативното оборудване - ОЕЕ), управление на веригата за доставки и обществени поръчки (предоставят на веригата за управление - SCM). Поради факта, че PAC постоянно и автоматично актуализира цялата производствена информация в базата данни, тя се изисква своевременно за всички други бизнес системи на предприятието.

➤ *RTU, събиране на данни и PAC*

Един отдалечен терминал (RTU) е отдалечено разположено устройство, подобно на контролер (PLC), предназначено за събиране на данни от сензори и контролиране на изпълнителни устройства и т.н. Най-типичното използване на RTU е за събиране на информация от локални устройства и предаването ѝ по мрежата, както и за локално управление на устройства, използващи информация.

➤ *Сравнение на RTU и PLC*

RTU първоначално е бил предназначен за географски отдалечени обекти, за наблюдение на тяхното състояние, събиране на данни и контрол в такива зони като: тръбопроводи, кладенци, повдигащи (асансьорни) механизми, телекомуникационни съоръжения и др.

Традиционните PLC, като правило, нямат тази функционалност за този тип задачи. Също така, традиционните PLC нямат дизайн за „тежки“ условия на работа (температура, влажност, прах, вибрации). RTU, от друга страна, са фокусирани върху усъвършенствани мрежови възможности, предназначени са за „сурови“ условия на работа и имат разширени, „гъвкави“, опции за конфигуриране на I / O канали.

Въпреки това, RTUs се характеризира с мрежови възможности, фокусирани върху съществуващата мрежа окабеляване, което е остаряло техническо решение днес. Съвременните решения са „отворени“ и се основават на кабелни и безжични IP мрежи, които могат да покриват както местните индустриални зони, така и да предоставят достъп до информация от всяка точка на света. Този подход е по-гъвкав и по-евтин по отношение на

разходите, които освен това непрекъснато намаляват, а обхватът на предлагания хардуер също бързо се разширява.

Следователно използването на остарели технологии RTU в момента не е много добро решение, от гледна точка на бизнеса и бъдещата техническа употреба.

РАС, за разлика от горното, имат отлична комуникационна оперативна съвместимост, разнообразие от I / O опции, „суров“ дизайн на околната среда и използват най-модерните комуникационни стандарти, налични днес.

По отношение на привлекателността на използването на РАС системи в бъдеще, те са отлични и могат да заменят RTU решенията с техните собствени мрежови технологии и сравнително високи разходи за собственост.

➤ *Събиране на данни с помощта на РАС*

Система за събиране на данни, базирани на РС (РС базиран контролер) предоставя следните предимства: скорост на получаване на стойности на сигнала (придобиване); бърза обработка и тяхното нормализиране (кондициониране), запазване на получените стойности, което от своя страна намалява натоварването на мрежовия трафик.

Повечето базирани на компютър DAQ системи имат някои ограничения в местоположението си в промишлени среди или на отдалечени места. Най-често такива системи се използват в лабораторни условия (лаборатория, щандове за изпитване), в „комфортни“ условия и т.н.

За разлика от това, РАС системите предоставят възможности за разнообразно и гъвкаво приемане на сигнали от обект, тяхната бърза обработка, нормализиране и мултиплексиране. Наличието в РАС на мощен процесор и споделена (глобална) памет (RAM и ROM) ви позволява „бързо“ да събирате данни, да ги групирате, да ги манипулирате (да сравнявате, да проверявате праговите стойности и т.н.), да трансформирате (например водят до инженерни единици), преди да ги изпратят по комуникационни канали към база данни или други приложения.

Също така РАС може да извършва частично (в някои ограничени обеми) архивиране на данни, освен това, това се случва в защитен (частен) режим, за разлика от решенията на компютър, което като цяло значително повишава сигурността на цялата система и намалява нейните разходи (тъй като не се изискват специални мерки за защита).

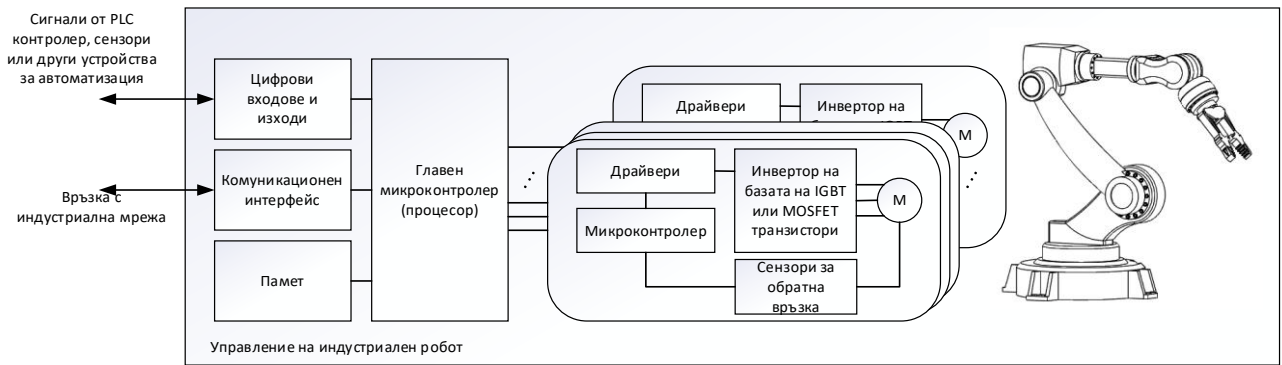
4.11. ИНДУСТРИАЛНИ РОБОТИ

Индустриалните роботи представляват едни от най-важните устройства в автоматизацията, що се отнася до реализиране на високопроизводителни поточни линии за нуждите на масовото производство. Индустриалните роботи могат да имат различно устройство и кинематика, но най-често първата представа, която изниква за индустриален робот, е робот с антропоморфна кинематика (*фиг. 297*). Обикновено тези типове роботи разполагат с шест оси на движение и позволяват да бъдат използвани в различни области като: заваряване, боядисване, преместване на детайли и други.



фиг. 297. Индустриален робот на фирмата АВВ.

Управлението на такъв индустриален робот (*фиг. 298*) се осъществява с помощта на специализиран контролер, в който се съдържат множество процесори и микроконтролери. Всяка една ос на свобода на движение се управлява от отделен серводвигател, докато главен процесор синхронизира работата на отделните серводвигатели. Към роботите има включени множество входове и изходи, посредством които те могат да обменят данни с други роботи, с PLC контролери, специализирани контролери на хващачите, както и с други устройства за автоматизация.



фиг. 298. Блокова схема на контролер на индустриален робот

ПРОВЕРОВЪЧНИ ВЪПРОСИ

Част 1. Измерване на технологични величини

1.1. Измервателни вериги

Какво се разбира под измервателни вериги?

Кои са основните елементи на измервателните вериги?

Каква е разликата между т.нар. проста и сложна измервателни вериги?

Каква е ролята на първичния преобразовател?

Дайте примери за междинни, унифицирани и изходни сигнали.

Какво се разбира под термина статични характеристики на измервателните преобразуватели?

1. 2. Дистанционни системи

Кои са основните части на една измервателна система?

Кои са основните характеристики на токовите средства за дистанционно предаване на данни?

Кои са основните характеристики на напрежителните средства за дистанционно предаване на данни?

Кои са основните характеристики на честотни средства за дистанционно предаване на данни?

Част 2. Технически средства за контрол на технологични величини

2. 1. Методи и средства за контрол на технологични величини

Какво представлява т.нар. контрол чрез измерване?

Какво представлява т.нар. контрол без измерване?

Според какви критерии се класифицират измервателните методи?

2. 2. Сензори

Дайте определение за сензор.

Какви са основните характеристики на т.нар. активни сензори?

Какви са основните характеристики на т.нар. пасивни сензори?

2. 3. Технически средства за измерване и контрол на температура

Какво се разбира под термина „опорни точки на температурните скали“?

Избройте какви температурни скали познавате.

Коя е най-широко използваната температурна скала в Европа?

Абсолютната нула по скалата на Келвин на каква температура съответства по скалата на Целзий?

Какви принципи за измерване на температура познавате?

Какъв е принципа на работа на биметалните термометри?

На какъв принцип работят сензорите за температура от тип термодвойка?

Какви видове термодвойки познавате?

Какво представляват термисторите и какви са основните им характеристики?

2. 4. Технически средства за измерване и контрол на налягане

По какъв начин (с каква формула) се дефинира величината налягане?

Какви са основните единици, които се използват за измерване на налягане?

Какво се разбира под термина „атмосферно налягане“?

Какви основни методи и средства се използват за измерване на налягане?

На какъв принцип работят деформационните манометри?

Каква е разликата между абсолютните и диференциалните манометри?

Какви типове сензори за измерване на налягане познавате?

2. 5. Технически средства за измерване на разход и количество

Какви принципи на работа използват уредите за измерване на разход и количество?

Какъв е принципа на работа на сензора за поток с турбина?

Каква е разликата при измерването на поток със сензор с калибриран отвор и сензор с тръба на Вентури?

На какъв принцип работят ултразвуковите сензори за поток?

На какъв принцип работят калориметричните сензори за поток?

На какъв принцип работят вихровите сензори за поток?

2. 6. Технически средства за измерване на ниво

Какви типове сензори за ниво се използват в практиката?

Какви са основните предимства на микровълновия радарен нивомер?

За измерване на нивото на какъв тип материали се използват поплавковите сензори за ниво?

На какъв принцип работи капацитивния нивомер?

2. 7. Технически средства за контрол на качеството и състава на материалите

Какви методи за измерване на качеството и състава на материалите познавате?

Какъв параметър може да се следи с помощта на кондуктометричните измервания при разтвори?

Избройте типовете сензори за измерване на концентрацията на газове?

Какви методи за измерване на влажност познавате?

Какви типове сензори се използват за измерване на влажност на насипни товари?

Какви методи се използват за определяне на плътността на течности и газове?

Как се определя дали един разтвор е кисел или алкален?

Опишете най-общо конструкцията на един рН-метър.

Част 3. Технически средства за регулиране на технологични величини

3. 1. Регулатори

Дайте определение за регулатор.

Какви могат да бъдат регулаторите според вида на източника на спомагателна енергия?

Как се класифицират регулаторите според вида на задаващата величина?

Как се класифицират регулаторите според алгоритъма им на функциониране?

Как се класифицират регулаторите според вида на управляващите сигнали?

Опишете основните характеристики на позиционните регулатори?

Какви са основните характеристики на пропорционалния (П) регулатор?

Какви са основните характеристики на интегралния(И) регулатор?

Какви са основните характеристики на пропорционално-интегралния (ПИ) регулатор?

Какви са основните характеристики на пропорционално-интегрално-диференциалния (ПИД) регулатор?

3. 2. Електронни регулатори

Какво представлява операционния усилвател?

Какъв е принципа на работа на аналоговия компаратор?

Какво е основното приложение на операционните усилватели в електронните регулатори?

Каква схема се използва за свързване на сензор от Pt100?

Какво е приложението на аналоговия суматор?

3. 3. Пневматични регулатори

Какво е основното приложение на редуциционния клапан?

Какви са предимствата на пневматичните регулатори?

В какви граници е прието да работят системите за високо налягане?

Какво е основното предназначение на пневматичните дросели?

Какви логически функции могат да се реализират с мембранните пневматични елементи?

Опишете принципа на работа на пневматичните позиционни регулатори.

Какви принципи за управление се използват в електропневматичните устройства за регулиране на налягането?

Дайте примери за използване на електропневматични устройства в практиката?

3. 4. Изпълнителни механизми

По какви критерии могат да бъдат класифицирани изпълнителните механизми?

Опишете основните типове електрически изпълнителни механизми.

Опишете основните типове пневматични изпълнителни механизми.

Какви видове електрически двигатели познавате?

Опишете основните типове електрически изпълнителни механизми.

3. 5. Регулиращи органи

Какъв е принципа на работа на едноседловите клапани?

Какъв е принципа на работа на двуседловите клапани?

Кои са основните показатели за оценка на регулиращите органи?

Част 4. Технически средства за автоматизация

4.1. Общи сведения и историческо развитие на микропроцесорите

Самостоятелно потърсете в интернет описание на историческото развитие при компютърните системи и микропроцесорните архитектури.

4. 2. Архитектура на микропроцесорна система

Кои са основните части в архитектурата на една микропроцесорна система?

Кои типове памети се използват за постоянно (енергонезависимо) съхраняване на данни?

Какво е основното приложение на RAM паметта?

4. 3. Микропроцесорна система за управление на технологичен процес

Каква е ролята на външните периферни устройства при микропроцесорните системи?

Какви части се включват в операторския пулт?

4. 4. Системи за събиране и въвеждане на данни

Опишете начина на въвеждане на данни?

Какво е основното приложение на аналоговия мултиплексор?

Какви допълнителни допълнителна обработки на сигналите се използват при системите за измерване и събиране на аналогови данни?

4. 5. Микропроцесорни системи за децентрализирано управление

Какво се разбира под термина децентрализирано управление?

4. 6. Видове микропроцесорни системи

Дайте класификация на микропроцесорните системи.

Опишете какво включва една функционална схема за управление на технологичен процес.

Опишете как работи една управляваща микропроцесорна система.

4. 7. Предимства на микропроцесорни системи за управление

Какви са предимствата на микропроцесорните системи за управление?

Какво се разбира под термина „самодиагностика“?

Сравнете възможностите на микропроцесорните управляващи системи с аналоговите управляващи системи.

4. 8. Опасности при автоматизирани процеси

Опишете основни опасности, които могат да възникнат за операторите при автоматизираните производствени процеси.

Как може да се предотврати възникването на опасни ситуации при работа с автоматизирано оборудване?

4. 9. Програмируеми логически контролери

Какво представляват програмируемите логически контролери?

Какви са основните части включени в един програмируем логически контролер?

Какво представлява т.нар. “scan” цикъл?

Опишете последователността при работа на един програмируем логически контролер.

4. 10. Приложение

Опишете основните приложения на програмируемите логически контролери.

Какви са основните характеристики на т.нар. PAC (Programmable Automation Controller) контролер?

Какви мрежови протоколи се поддържат от PAC контролерите?

Какви са сходствата и разликите между програмируемите логически контролери и PAC контролерите?

4. 11. Индустриални работи

Дайте определение за индустриален робот.

Какви части се включват в структурата на един индустриален робот?

При какви производства намират приложение индустриалните работи и къде е икономически оправдано тяхното използване?

1. Костов К., А. Тодоров, В. Стефанова. Технически средства за автоматизация. С., Техника, 1989.
2. Янко Л. Михайлов. Елементи на хидропневмоавтоматиката. С., Техника, 1975.
3. Колектив, Основи на хидравликата и пневматиката. С., Техника, 1966.
4. В. Гановски, Д. Дамянов, Д. Чакърски. Основи на автоматизацията, роботизацията и ГАПС. С., Техника, 1994.
5. В. Геров, Б. Спасов. Основи на хидравликата и пневматиката. С., Техника, 1981.
6. Р. Иванов, И. Баяслиева. Основи на автоматизацията. С., Техника, 1989.
7. Каров, Р., Преобразувателна Техника, С, Техника, 1994
8. Захаров, В. Електронни устройства на автоматиката, С, Техника, 1980
9. Калоянов, Г. Автоматизация на производството и управлението С, Техника, 1992.
10. Томов, И., Марков С. и др. Микропроцесорни управляващи системи, С, Техника, 1986.
11. Електрически измервания. Под ред. на проф. А. Н. Балтаджиев. С., Техника, 1977.
12. Brauer, J. R. Magnetic Actuators and Sensors. A John Wiley&Sons, Inc., Publ. New Jersey, 2006.
13. Измерение электрических и неэлектрических величин. Под. ред. Евтихеева Н. Н. , М. Энергоатомиздат, 1990.
14. Левщина, Е. С., П. В. Новицкий. Электрические измерения неэлектрических величин. Л. Энергоатомиздат, 1983.
15. Трендафилов, Г. Я. Измерване на неелектрически величини. Ръководство за лабораторни упражнения. Габрово, Университетско издателство „ Васил Априлов“, 2005.
16. David, S. Nyce. Linear Position Sensors. Theory and Applications. A John Wiley&Sons, Inc., Publ. New Jersey, 2004.
17. Fraden, J. Handbook of modern sensors: Physics, designs and application. Spriner- Verlag New York, Inc., New York, 2004.
18. Beater, Peter. Pneumatic Drives System Design, Modelling and Control Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
19. Каталог Aventics: dynamic pneumatics regulating with E/P pressure control valves, R499051108/2016-04/EN.
20. Каталог Rexroth. Пневматические компоненты и системы, 2013.
21. Списание Инженеринг ревю, бр. 6. 2010 г.
22. Coggan D. Fundamentals of Industrial Control, 2nd Edition, ISA, 2005
23. Levine, W. Control System Fundamentals, CRC Press, 1999

24. Jacobs, J. Industrial control Electronics, Prentice Hall, New Jery, 1988
25. Modern Sensors Handbook. Edited by P. Ripka and A. Tipeg. ISTE Ltd, London, 2007.
26. Nawrocki, W. Measurement Systems and Sensors. Artech House, Inc., Boston- London, 2005.
27. Nenov, T.,S. Yordanov. CERAMIC SENSORS: Technology and Applications. TECHNOMICPubl. Co., Inc.,Lancaster- Basel, 1996.
28. Sensor Technology Handbook. Ed. J. S. Wilson. Newnes, Amsterdam, 2005.
29. Solomon, S. Sensor and Control Systems in Manufacturing, McGraw- Hill Inc., New York, 2010.
30. Solomon, S. Sensor Handbook. McGraw- Hill Inc., New York, 2010.

Използвани сайтове:

31. <https://bg.besthomemaster.com/3046849->
32. <https://infopedia.su/22xf50e.html?fbclid=IwAR3mD0IuzIAhgJXBIHccUvu62Uc4bW9qhBI5KpbvTMZyVbuMvL1fjhB59HE>
33. <https://scsys.files.wordpress.com/2019/07/1.5.pdf?fbclid=IwAR3nbKbBeTrXMLBSrpKBZo7mxJ76dS-zfU99Q-EWbXnW3S-ZkliXG9IgnPQ>
34. <https://nakra.eu/>
35. <https://scsys.files.wordpress.com/2019/07/1.5.pdf?fbclid=IwAR3nbKbBeTrXMLBSrpKBZo7mxJ76dS-zfU99Q-EWbXnW3S-ZkliXG9IgnPQ>
36. <https://deatrade.eu/%D0%9C%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8-%D1%82%D0%B8%D0%BF-%D0%91%D1%83%D1%80%D0%B4%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D1%82%D1%80%D1%8A%D0%B1%D0%B0>
37. <http://www.fittings.kz/produkcija/sredstva-izmereniya-davleniya/manometry/>
38. <https://qubiqo.com/produkti/product/odobren-ultrazvukov-razhodommer-nivus-nf600/>
39. https://rusautomation.ru/articles/rekomendatsii_po_vyboru_datchikov_urovnya_12068/?fbclid=IwAR1F9nKMDTnv4285qPTZp7hRfIrh98nFZ-WfR8ZrpGmzuU_-04p1qO-Bus
40. http://www.energyed.ru/Auto/LengthCh03?fbclid=IwAR3e7kYpjoNXt0NrI_HNIgtc84ccgTDXY3S_y_gsH-VRjqwg6pAYyzx8f8cY
41. <https://www.rospribor.com/questions/kontrol-i-izmerenie-urovnya-hlorbenzola-fenilhlorid/?fbclid=IwAR2WBCxaFFphUR0-kbSVp5nUmgqt8JSyauqoJCcqYRBF6jvmxGJCrBT7Y4A>
42. https://sensoren.ru/product/opticheskiy_datchik_urovnya_zhidkosti_autonics_bl13_tdt/
43. http://knowkip.ucoz.ru/publ/teplotekhnicheskie_izmereniya/drugie_izmereniya/gazoanalizatory/5-1-0-14
44. https://studref.com/698150/tehnika/izmerenie_vlazhnosti
45. <https://www.roskip.ru/datchiki/owen-pdu-i-poplavykovye-datchiki-urovnya?fbclid=IwAR0->

- [rH2FT6t51HXCNi9dJ8omn1q_zsao4MIL8LklwUOdm3d1-ZET1QnZFRI](#)
46. https://trizur.ru/catalog/datchiki-urovnya/psu-1-signalizatory-urovnya-dlya-kns-i-stochnykh-vod/?fbclid=IwAR0-rH2FT6t51HXCNi9dJ8omn1q_zsao4MIL8LklwUOdm3d1-ZET1QnZFRI
 47. https://www.facebook.com/flx/warn/?u=https%3A%2F%2Fdoluongtudong.com%2Fcach-chon-cambien-do-muc-nuoc%2F%3Ffbclid%3DIwAR0-rH2FT6t51HXCNi9dJ8omn1q_zsao4MIL8LklwUOdm3d1-ZET1QnZFRI&h=AT2Ja509kPOOVk1rXyLhP0ntyAfkwiretp0Vcn7W53OjTTiwTA2KIw52GyCQhA4OEF1m8rrIkTbHN8u2fkKeBavUywwMNWY6LeSWv_SjlcMQjrNazop4VcFk7EKFngLkPqcYCg
 48. <https://www.rtautomacao.com.br/sensor-vazao?fbclid=IwAR1rFjRdzFjh1ISyj2brZO-CXj6DoCtTwyQNrfu3LZD24SWyExPyujglBmY>
 49. https://rusautomation.ru/catalog/s/mikrovolnovye_refleksnye_urovnamery_dlya_zhidkosti_microtrek/?fbclid=IwAR0XTC6HIXe69x6o7jaXDy-qvbJ71-WgWvLs0fuIl675DzGYpUv58GbWIFU
 50. https://www.lansnivootherm.nl/niveausensoren/niveaumeting-vaste-stoffen/nivobob-peillood?fbclid=IwAR2WounIpIik2XA6RI9KXeD0_iknhHK6c3N38W1TSgjbPkJO7RSECGsyYk
 51. https://studref.com/389986/tehnika/opredelenie_svoystv_veschestv?fbclid=IwAR25CiBzpk0xgOe8BzmvOAKoCD6NpMCCd-nke7xBML5zgywF43PAcMzlhbk
 52. https://en.ppt-online.org/81428?fbclid=IwAR3o4CQHyx9ri2INM7NJCHxIjHPpvi7CTelH0NQIF6_KpqYnGUeDMda48dI
 53. http://www.fenix-trade.kiev.ua/elec_opis6.shtml?fbclid=IwAR14rCziQP8iIN_hBmtkXtJf5EplG01iSUSRfasn043ZZa8kdKXFZWUYC54
 54. <https://www.zavodromax.com/products/storage-silos/silos-for-feed-storage/?fbclid=IwAR1YnxKFzIWflfldQy11uw5PXSndmw2LvgezWOF7ITec9nsNtOCbc6SHd6pE>
 55. <https://jeraff.ru/bg/regulating-devices-and-automatic-regulators-the-main-types-of-regulators-are-electric-drive-systems-for-the-executive-mechanisms-of-drilling-rigs/>
 56. <https://www.shutterstock.com/image-vector/electromechanical-relay-225959497?fbclid=IwAR3iQuz8vdD47V5SdU3G9dahXQ9bGIFnDKaErfW56Qh28S177dkngmwX6kY>
 57. file:///C:/Users/ANELIQ/Desktop/%D0%9F%D0%9E%D0%9C%D0%90%D0%93%D0%90%D0%9B%D0%9E/Vapros_14_15.pdf
 58. <https://www.engineering-review.bg/bg/pnevmatichni-regulatori-na-nalyagane/2/1457/>
 59. <https://www.smc.eu/bg-bg>
 60. https://pako.co.th/blog/2020/3-02-03_02_actuator-pneumatic/
 61. <https://arcacontrolvalvethailand.com/wp-content/uploads/2018/06/Untitled12.png>
 62. http://www.vertzandcompany.com/case-studies/hvac/?fbclid=IwAR1BEkAFqjI9Xbqzdk-N3ynkXa0aai3na80PxxgzgF18eKEzcr_y8s930e0
 63. https://www.youtube.com/watch?v=uBdTXTp_qLI&feature=share&fbclid=IwAR2QQJQzTgcSAaOPj1csk8hhzWkTU_kAqSGU1q7Xhx0x0q_ibLBRhHmjcbM&ab_channel=%D0%93%D0%B8%D0

[%B4%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D0%B8%D0%BF%D0%BD%D0%B5%D0%B2%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0](#)

64. https://steklopribor.com/catalog/measuring-instruments/pressure/5ff55ef8a50345425e7fd074?fbclid=IwAR1YluOSIs09Av51mzb9HFCbb8Jz2nUXASUesCq_RRo5YloNZIN6dJMOgU4
65. https://bgkids.hallowedgaming.com/user-44/techni-manometri-i-diferencialni-manometri.html?fbclid=IwAR2tYrxJgk8r1Rsc54nr7bhE9vAJlwDEwFIOp_i7AYprmzcYdVvvJA7LsRg