

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, Ю.А. Бабіченко, В.І. Вельма,  
О.І. Зайцев, М.О. Подустов

ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ І АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПРОЦЕСІВ

За заг. ред. А.К.Бабіченко

Допущено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів  
хіміко-фармацевтичних та хіміко-технологічних спеціальностей

Харків 2007

УДК 681.5(075.8)  
ББК 32.965 я 73  
П81

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
(лист № )*

**Автори:**

А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, Ю.А. Бабіченко, В.І. Вельма, О.І. Зайцев, М.О. Подустов.

**Рецензенти:**

*В.А. Реньов*, зав. каф. Автоматизації виробничих процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури, канд. техн. наук, проф.;

*В.С. Кисельов*, головний метролог Головної організації Метрологічної служби Мінпромполітики України, м. Харків.

П 81. А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, Ю.А. Бабіченко, В.І. Вельма, О.І. Зайцев, М.О. Подустов. Основи вимірювань та автоматизації технологічних процесів / За заг. ред. А.К.Бабіченко: Підручник – Х.: Вид-во НФаУ: Золоті сторінки, 2007 р. – 515 с.

**ISBN**

У підручнику викладені основні відомості про вимірювання, похибки вимірювань та їх визначення, методи автоматичного контролю технологічних параметрів. Описані характерні об'єкти хімічної і фармацевтичної технології та основні методи керування ними та наведена інформація щодо сучасних мікропроцесорних засобів регулювання і виконавчих пристроїв. Розглянуті елементи теорії, розрахунку і проектування систем автоматизації. Надані приклади автоматизації типових технологічних процесів.

Підручник призначено для студентів хіміко-фармацевтичних і хіміко-технологічних спеціальностей та може бути корисним для студентів і широкого кола інженерно-технічних працівників різних галузей промисловості, що спеціалізуються в області автоматизації.

**УДК 681.5(075.8)**  
**ББК 32.965 я 73**

© А.К. Бабіченко  
В.І. Тошинський  
Ю.А. Бабіченко  
В.І. Вельма  
О.І. Зайцев  
М.О. Подустов

© НФаУ, 2007 р.

**ISBN**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, Ю.А. Бабіченко, В.І. Вельма,  
О.І. Зайцев, М.О. Подустов

ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ І АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПРОЦЕСІВ

За заг. ред. А.К.Бабіченко

Допущено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів  
хіміко-фармацевтичних та хіміко-технологічних спеціальностей

Харків 2007

УДК 681.5(075.8)  
ББК 32.965 я 73  
П81

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
(лист № )*

**Автори:**

А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, Ю.А. Бабіченко, В.І. Вельма, О.І. Зайцев, М.О. Подустов.

**Рецензенти:**

*В.А. Реньов*, зав. каф. Автоматизації виробничих процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури, канд. техн. наук, проф.;

*В.С. Кисельов*, головний метролог Головної організації Метрологічної служби Мінпромполітики України, м. Харків.

П 81. А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, Ю.А. Бабіченко, В.І. Вельма, О.І. Зайцев, М.О. Подустов. Основи вимірювань та автоматизації технологічних процесів / За заг. ред. А.К.Бабіченко: Підручник – Х.: Вид-во НФаУ: Золоті сторінки, 2007 р. – 515 с.

**ISBN**

У підручнику викладені основні відомості про вимірювання, похибки вимірювань та їх визначення, методи автоматичного контролю технологічних параметрів. Описані характерні об'єкти хімічної і фармацевтичної технології та основні методи керування ними та наведена інформація щодо сучасних мікропроцесорних засобів регулювання і виконавчих пристроїв. Розглянуті елементи теорії, розрахунку і проектування систем автоматизації. Надані приклади автоматизації типових технологічних процесів.

Підручник призначено для студентів хіміко-фармацевтичних і хіміко-технологічних спеціальностей та може бути корисним для студентів і широкого кола інженерно-технічних працівників різних галузей промисловості, що спеціалізуються в області автоматизації.

**УДК 681.5(075.8)**  
**ББК 32.965 я 73**

© А.К. Бабіченко  
В.І. Тошинський  
Ю.А. Бабіченко  
В.І. Вельма  
О.І. Зайцев  
М.О. Подустов

© НФаУ, 2007 р.

**ISBN**



## ВСТУП

Виробничі процеси фармацевтичної і хімічної технології характеризуються різним ступенем складності і представляють собою деяку систему, до якої надходять потоки сировини, напівфабрикатів, реагентів, теплоносіїв, холодоагентів і т. ін. і рухаються від початку до кінця процесу. Ці потоки називаються матеріальними і енергетичними. У технологічному процесі вони зв'язані поміж собою через відповідне обладнання, агрегати установки, які здійснюють переробку, транспортування, нагрів, охолодження, випаровування, конденсацію, очищення і т. п. речовин, що рухаються у потоках, змінюючи їх показники, склад і стан. Серед такого типового обладнання фармацевтичних і хімічних виробництв можна виділити ректифікаційні колони, випарні апарати, теплообмінники, випарники, конденсатори, насоси, компресори, абсорбери та ін. Для ефективного протікання процесів як у вище переліченому обладнанні, так і технологічній системі з метою забезпечення продукції заданої якості та продуктивності необхідне дотримання норм технологічного регламенту, що визначаються сукупністю значень параметрів таких як температура, витрата, тиск, концентрація, рівень та ін. Однак з цілої низки зовнішніх причин ( зміна складу, витрати, параметрів теплоносіїв, холодоагентів та ін.) чи явищ, що відбуваються у самому апараті ( зміна активності каталізаторів, гідродинамічних умов в апараті, умов передачі теплоти, коливання напруги і т. п.), вказані параметри можуть значно відхилитися від норм технологічного регламенту (заданих значень). Це призводить до порушень технології процесів і як наслідок зниженню продуктивності та якості продукції, що отримується, зношенню обладнання, а при значних відхиленнях і до аварійних ситуацій. Тому для дотримання норм технологічного регламенту необхідна система керування, технічна і функціональна структура якої визначається складністю суто самого технологічного виробничого процесу.

Найвищий рівень керування забезпечується автоматизованою системою керування технологічним процесом (АСКТП), що має на меті досягнення максимальної економічної ефективності процесу при заданому плані вироблення продукції. АСКТП, найпростіша узагальнююча математична структура якої представлена на рис.В.1, характеризується окремими наступними функціями: інформаційні, керуючі і виконавчі.

До *інформаційних функцій* відносяться ті, на меті яких збір перетворювання і зберігання інформації про стан технологічного об'єкта, подання цієї інформації оперативному персоналу або передача її для подальшої обробки. Основним інформаційним функціям притаманні: первинна обробка інформації про поточний стан технологічного процесу і обладнання; виявлення відхилень технологічних параметрів і показників стану обладнання від заданих значень; розрахунок значень величин, що не вимірюються (непрямі вимірювання, розрахунок техніко – економічних показників, прогнозування); оперативне відображення і реєстрація інформації, обмін інформацією з оперативним персоналом та адміністративними підрозділами.

*Керуючі функції* забезпечують максимально ефективний режим проведення технологічного процесу. При цьому задача керування може вирішуватись на двох рівнях. На нижньому рівні (див. рис. В.1) використовується поточна вимірювальна інформація  $\{y\}$  про параметри стану технологічного об'єкта. На базі цієї інформації у рамках контуру зворотного зв'язку  $\{y\} - F_{СК} - \{\mu\}$  здійснюється визначення і установка таких значень  $\mu_i$ , за яких зміни параметрів  $y_i$  відповідають деяким апріорним програмам  $u_i$ , що задають бажаний режим роботи.

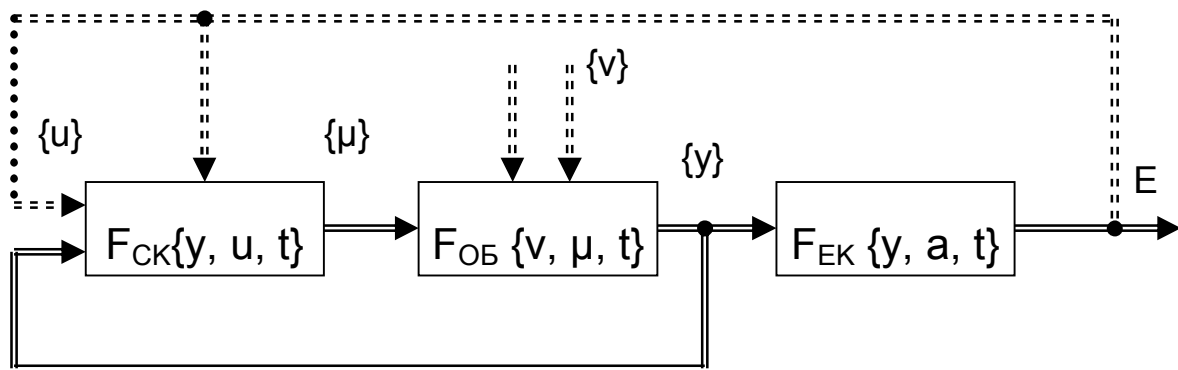


Рис. В.1. Узагальнююча математична структура АСКТП:  $\{y\}$  – вихідні параметри, що характеризують стан технологічного об'єкта і в процесі роботи повинні відповідати заданим значенням;  $\{\mu\}$  – керуючі впливи, що компенсують збурюючі чинники;  $\{v\}$  – збурюючі впливи, що діють довільно і викликають відхилення вихідних параметрів від заданих значень;  $\{a\}$  – параметри настройок і характеристики системи управління;  $F_{СК}$ ,  $F_{ОБ}$ ,  $F_{ЕК}$  – оператори алгоритму (математичне забезпечення) відповідно системи керування (регулювання), технологічного об'єкта і цільової функції (критерію економічної ефективності);  $t$  – час.

Алгоритм такого перетворення може бути представлений узагальнюючим оператором:

$$\{\mu\} = F_{СК}^{ОПТ} \{y, u, t\} \quad (B.1)$$

У найпростішому випадку програми оптимального функціонування технологічного процесу задаються наступними виразами:

$$u_i = y_i^{ОПТ} = const \quad (B.2)$$

$$u_i = y_i^{ОПТ}(t) \quad (B.3)$$

$$u_i > y_i(t) \quad (B.4)$$

$$u_{k1} > y_k(t) > u_{k2} \quad (B.5)$$

Виконання програм у вигляді констант (B.2) чи функцій (B.3) відповідає звичайному *локальному автоматичному регулюванню* застосовується на нижньому рівні АСКТП, а регулюючий вплив  $\mu_i$  повинен змінюватись так, щоб розузгодження  $\varepsilon_i$  поміж поточними значеннями  $y_i$  і  $u_i$  прагнуло до нуля, тобто:

$$\varepsilon_i = u_i - y_i \rightarrow 0 \quad (B.6)$$

При цьому задане значення  $u_i$  визначить деяке оптимальне значення  $y_i^{ОПТ}$  і процес з цим заданим значенням буде протікати найбільш ефективно.

Програми у вигляді нерівностей (B.4) і (B.5) передбачають незалежність показників ефективності процесу  $E$  від значень параметрів  $\{y\}$  у деякому діапазоні їх змін. Для реалізації таких програм на нижньому рівні АСКТП використовується *логічне управління*, що базується на комбінації найпростіших логічних функцій (“или”, “и”, “не” та ін) і застосовуються у системах позиційного регулювання, блокування, захисту і сигналізації.

На вищому рівні АСКТП вирішується задача визначення параметрів завдання  $u_i$  і алгоритму  $F_{CY}\{y, u, t\}$ , які забезпечують можливість оптимального проведення технологічного процесу. Для пошуку оптимальних алгоритмів (B.1) необхідно мати інформацію про алгоритми функціонування технологічного об'єкта, тобто знати його математичну модель

$$\{y\} = F_{ОБ}\{\mu, v, t\}, \quad (B.7)$$

а також алгоритм цільової функції (функціонал)

$$E = F_{EK}\{y, a, t\} \quad (B.8)$$

Ця цільова функція і повинна встановлювати зв'язок технологічних параметрів стану процесу  $\{y\}$ , а також характеристик системи керування (параметрів настроювання) з економічним ефектом чи системою окремих техніко – економічних показників. Для її реалізації необхідна наявність *математичного, програмного і інформаційного* (база даних) забезпечення. У відповідності з рис.В.1 цей вищий рівень керування здійснюється у рамках контуру зворотного зв'язку  $\{y\} - F_{EK}\{y, a, t\} - \{u\} - F_{CK}\{y, u, t\}$ .

Таким чином, у рамках АСКТП для нижнього характерні такі керуючі функції як автоматичне регулювання і логічне управління, а для вищого рівня – оптимізація керуючих програм і алгоритмів.

*Виконавча функція* АСКТП реалізує зв'язок між технологічним об'єктом та системою керування і необхідна для здійснення у відповідності з регулюючими впливами  $\{\mu\}$  безпосереднього впливу на хід технологічного процесу шляхом зміни значень параметрів енергетичних і матеріальних потоків.

У відповідності з вище переліченими функціями необхідне і *технічне забезпечення*, тобто технічні засоби автоматизації для реалізації інформаційних, керуючих і виконавчих функцій АСКТП.

В процесі створення АСКТП має бути виконаним цілий комплекс робіт по вивченню технологічного процесу як об'єкта керування. При цьому з'ясовують ціль і критерії якості функціонування технологічної системи та її структуру, тобто вхідні впливи (контрольовані і неконтрольовані збурювальні впливи, керуючі впливи), вихідні (що регулюються) параметри і зв'язки поміж ними, структуру математичних моделей статичної і динамічної, значення параметрів (норм технологічного режиму) та їх стабільність. Отримані результати дозволяють здійснити розробку АСКТП і вирішити такі задачі: вибір критерію і математична постановка задачі оптимального керування, вибір методів вирішення глобальної і локальних задач оптимального керування, на основі яких у подальшому будується алгоритм оптимального керування; розробка функціональної і алгоритмічної структури АСКТП; визначення об'єму інформації (переліку параметрів) про стан технологічної системи і ресурсів обчислювального комплексу (швидкодія, об'єм запам'ятовуваних пристроїв), необхідних для реалізації усіх функцій АСКТП; вибір комплексу технічних засобів автоматизації; розрахунок техніко-економічних пока-

зників і надійності системи в цілому. З ускладненням задач, що вирішує АСКТП у цілому, зростають вимоги до якості роботи локальних систем автоматичного регулювання. Тому при автоматизації хіміко-фармацевтичних і хіміко-технологічних процесів у першу чергу необхідно створювати надійні та якісно працюючі локальні автоматичні системи регулювання і логічного управління, на чому у даному виданні і зосереджена основна увага.

Підручник написаний на підставі досвіду викладання на кафедрі “Процеси й апарати хіміко-фармацевтичних виробництв” Національного фармацевтичного університету та кафедрі “Автоматизації хіміко-технологічних систем і екологічного моніторингу” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” таких дисциплін як “Контроль та керування хіміко-технологічних процесів”, “Автоматизація хіміко-технологічних процесів”, “Контрольно-вимірювальні прилади”, “Основи вимірювань” і “Технологічні вимірювання і прилади”.

Автори висловлюють вдячність рецензентам В.А.Реньову і В.С.Кисельову за цінні зауваження, що сприяли покращенню якості підручника.

# 1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ І ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ

## 1.1. ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

*Вимірювання* – це процес отримання значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

**Фізична величина** (температура, витрата, тиск та ін.) – це властивість, загальна у якісному відношенні для багатьох об'єктів, але у кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкту. Кількісний вміст цієї властивості в об'єкті є *розміром фізичної величини*, а числова оцінка її розміру – *значенням фізичної величини*. Фізичні величини, що мають ту саму у якісному відношенні властивість, називаються *однорідними*. Основна задача вимірювань полягає в отриманні інформації в ході вимірювань про значення фізичної величини у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць. *Одиниця фізичної величини* – це фізична величина, якій за визначенням надане числове значення, що дорівнює одиниці. Число  $q$  називається *числовим значенням вимірюваної величини*  $Q$  і характеризується відношенням вимірюваної величини  $Q$  до одиниці вимірювання  $[Q]$ .

$$Q = q[Q] \quad (1.1)$$

Рівняння (1.1) є основним рівнянням вимірювання і показує, що числове значення величини залежить від розміру прийнятої одиниці фізичної величини.

Значення фізичної величини, що ідеальним чином відбиває у якісному і кількісному відношенні властивості об'єкта, називається *істинним*. Істинне значення фізичної величини не може бути встановлене, а лише отримана оцінка цієї величини з визначеним ступенем наближення. Цю оцінку прийнято називати *дійсним значенням*, яка знаходиться експериментальним шляхом.

За умовною залежністю від інших величин фізичні величини діляться на *основні* (умовно незалежні) і *похідні* (умовно залежні). За способом перетворення в інформаційний сигнал відрізняють активні і пасивні. *Активними* називають величини, що можуть бути перетворені у сигнал вимірювальної інформації без використання

джерел допоміжної енергії (температура, електричні сили струму і напруги та ін.). *Пасивні* величини (електричний опір, індуктивність, маса та ін.) вимірюються із застосуванням допоміжного джерела енергії і, таким чином, перетворюються в активні. Можливість вимірювання величин по частинам передбачає розділення їх на адитивні (довжина, маса, сила струму, час та ін.) і неадитивні (густина, в'язкість, питома електрична провідність та ін.).

Вимірювання фізичних величин здійснюють за допомогою спеціальних технічних засобів, що називаються інструментальними. Класифікація вимірювань здійснюється за наступними ознаками: загальним прийомом отримання результатів (прямі, непрямі, сумісні і сукупні); числу вимірювань у серії (однократні і багатократні); метрологічному призначенню (технічні, метрологічні); характеристикам точності (рівноточні і нерівноточні); відношенню до зміни вимірюваної величини (статичні і динамічні); виразу результату (абсолютні і відносні).

*Прямим* називають вимірювання, за яким значення величини, що визначається, знаходять безпосередньо з дослідних даних (вимірювання маси на терезах, температури термометром, довжини за допомогою лінійних мір та ін.).

*Непрямим* називають вимірювання, результат якого визначають на підставі прямих вимірювань, зв'язаних з вимірюваною величиною відомою функціональною залежністю (визначення густини однорідного тіла по його масі і його геометричним розмірам; питомого електричного опору провідника по його опору, довжині і площині поперечного перерізу та ін.).

*Сукупними* називають вимірювання, що проводяться одночасно декількох однойменних величин, за яких значення величин, що визначаються, знаходять вирішенням системи рівнянь, отриманих при прямих вимірюваннях (вимірювання, за яких маса окремих гир набору знаходиться за відомою масою однієї з них і за результатами прямих порівнянь мас різних сполучень гир). Сукупні вимірювання знаходять застосування лише у лабораторній і дослідницькій практиці.

*Сумісними* називають вимірювання, що проводяться одночасно, двох чи декількох неоднойменних величин для знаходження функціональної залежності між ними (вимірювання коефіцієнту лінійного розширення зразка за даними прямих вимірювань, що прово-

дяться одночасно, прирощення довжини зразка у залежності від змін його температури).

*Абсолютні* вимірювання базуються на прямих вимірюваннях однієї чи декількох основних величин з використанням фізичних констант. *Відносні* вимірювання базуються на визначенні відношення величини до однойменної величини, що відіграє роль одиниці, чи зміни величини по відношенню до однойменної величини, що прийнята за початкову.

*Однократне* вимірювання – це вимірювання, що виконується один раз. *Багатократні* вимірювання – це вимірювання однієї і тієї ж фізичної величини, результат яких отримують з декількох (понад трьох), прямуючих одне за одним вимірювань.

*Технічні* вимірювання виконуються за допомогою робочих засобів вимірювань з метою контролю і керування науковими експериментами чи технологічними процесами. *Метрологічні* вимірювання здійснюються за допомогою еталонів і зразкових засобів вимірювань з метою нововведення одиниць фізичних величин або передачі розмірів робочим засобам вимірювань.

*Рівноточні* вимірювання – це ряд вимірювань якої-небудь величини, виконаних однаковими за точністю засобами вимірювань в одних і тих же умовах. *Нерівноточні* вимірювання – це ряд вимірювань будь якої фізичної величини, виконаних різними за точністю засобами вимірювань та у різних умовах.

*Статичні* вимірювання – це вимірювання фізичної величини, яка приймається у відповідності з конкретною вимірювальною задачею за незмінну протягом часу вимірювання. *Динамічні* вимірювання – це вимірювання фізичної величини, розмір якої змінюється у часі.

**Методи вимірювань** характеризуються сукупністю прийомів використання принципів і засобів вимірювань. У свою чергу *принцип вимірювання* становить собою сукупність фізичних явищ, на яких оснований вимірювання (принцип вимірювання температури термометром опору ґрунтується на залежності його електричного опору від температури, а термоелектричним термометром – на залежності його термоелектрорушійної сили від різниці температур та ін.). При вимірюваннях можна виділити декілька наступних основних методів: безпосередньої оцінки, порівнювання з мірою, нульовий, диференційний, співпаданя, заміщення, контактний і безконтактний.



*Метод безпосередньої оцінки* дозволяє визначити значення вимірюваної величини безпосередньо по відліковому пристрою вимірювального приладу прямої дії (вимірювання тиску пружинним манометром, маси на циферблатних терезах, температури термометром розширення та ін.)

*Метод порівнювання з мірою* застосовується для особливо точних вимірювань і передбачає порівнювання вимірюваної величини, що відтворюється мірою (вимірювання маси на важільних терезах з врівноважувачими гирями).

*Метод заміщення* є різновидом методу порівнювання і передбачає заміщення вимірюваної величини відомою величиною, що відтворюється мірою (зважування з почерговим поміщенням вимірюваної маси ваги і гир на ту саму чашу терезів).

*Нульовий (компенсаційний) метод* – це метод порівнювання з мірою, за якого підсумовуючий ефект впливу величин на прилад порівнювання доводять до нуля (вимірювання електричного опору мостом з повним його врівноваженням).

*Диференційний метод* має високу точність і характеризується вимірюванням різниці поміж значеннями вимірюваної і відомої (що відтворюється мірою) величинами, після чого вимірювана величина знаходиться шляхом алгебраїчного додавання. Цей метод може бути використаний тільки у тих випадках, коли просто і точно реалізується операція віднімання (компаратори порівнювання електричних напруг).

*Метод збігу* – це метод порівнювання з мірою, у якому різницю поміж значеннями величин, що шукається і відтворюється мірою, вимірюють, використовуючи збіг відміток шкал чи періодичних сигналів (при вимірюванні довжини штангенциркулем спостерігають збіг відміток на шкалах штангенциркуля і ноніуса).

*Контактний і безконтактний методи* – це методи, за яких чутливий елемент приладу має чи не має контакту з об'єктом вимірювань (вимірювання температури термометром опору виконується контактним методом, а пірометром – безконтактним).

Результати вимірювань в окремих випадках можуть мати невелике значення, а в інших ситуаціях значимість результатів вимірювань може бути дуже суттєвою. Наприклад, невірний результат вимірювання тиску у людини може вплинути на його здоров'я. Тому значимість цілі, для якої проведені вимірювання, визначає деякі вимоги до якості результатів вимірювань.

**Якість вимірювань** характеризується точністю, вірогідністю, правильністю, збіжністю, відтвореністю і розміром припустимих похибок.

*Точність вимірювання* відбиває наближення результатів вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Висока точність відповідає малим похибкам, а кількісно її оцінюють зворотною величиною відносною похибки.

*Вірогідність вимірювань* характеризує ступінь довіри до результатів вимірювань. Вірогідність оцінки похибок визначають із застосуванням законів теорії ймовірності і математичної статистики. Це дає можливість для окремого випадку обрати засоби і методи вимірювань, що забезпечують отримання результату, похибка якого не перевищить заданих границь.

*Правильність вимірювань* – це якість вимірювань, що відбиває наближення до нуля систематичних похибок у результаті вимірювань.

*Збіжність* характеризує близькість один до одного результатів вимірювань, виконаних в однакових умовах і відбиває вплив випадкових похибок.

*Відтвореність* – це якість вимірювань, що відбиває близькість один до одного результатів вимірювань, виконаних у різних умовах (різний час, різні методи чи засоби вимірювань).

*Похибка вимірювання* – це відхилення результату вимірювання від істинного (дійсного) значення вимірюваної величини. Похибка вимірювань становить собою суму цілої низки складових, кожна з яких має свою причину (кваліфікація оператора, зовнішній вплив на засоби чи об'єкт вимірювань і т.п.) та є одним з головних показників якості засобів вимірювань в процесі отримання результатів вимірювань.

**Умови вимірювання** фізичних величин суттєво впливають на якість результату вимірювання. Це, насамперед, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск і вологість повітря, напруга і частота у мережі змінного струму, магнітні і електричні поля. Вплив цих величин у ході вимірювань вкрай небажаний, бо як правило призводить до викривлення результатів вимірювань. У зв'язку з цим для кожного виду вимірювань нормують значення зовнішніх впливів, тобто визначають нормальні умови застосування засобів вимірювання.

*Нормальні умови застосування засобів вимірювання* – це умови, за яких величини, що впливають, мають нормальні значення чи знаходяться у межах нормальної області значень. За нормальних умов визначається основна похибка засобів вимірювань. Нормальні умови встановлюються нормативно – технічною документацією (НТД) на засоби вимірювань. Наприклад, нормальне значення температури для всіх видів вимірювань складає  $20^{\circ}\text{C}$  (293К), тиск повітря 100 кПа (750 мм.рт.ст.), відносна вологість повітря 58% та ін.

*Нормальне значення* величини, що впливає (нормальна область значень), встановлюється стандартом на засоби вимірювань окремого виду у якості нормального значення для цих засобів вимірювань. *Робоча область значень величини*, що впливає, встановлюється стандартом на засоби вимірювань окремого виду, у межах якої нормується додаткова похибка цих засобів вимірювань. Наприклад, для електронних автоматичних потенціометрів нормують додаткову похибку внаслідок відхилення температури навколишнього середовища від нормального значення.

Отримання результатів вимірювань фізичних величин здійснюється за допомогою вимірювальних засобів, що використовують той чи інший метод вимірювання.

## 1.2. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

*Засоби вимірювань* – це технічні засоби, що використовуються при вимірюваннях і мають нормовані метрологічні характеристики. Серед них можна виділити наступні: міри вимірювальні прилади, перетворювачі, установки і системи. Від засобів вимірювання залежить точність визначення вимірюваної величини в процесі вимірювання.

**Міра** – це засіб вимірювань, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру (гиря – міра маси, вимірювальний резистор – міра електричного опору і т. п., стандартні зразки і речовини). Міри розподіляються на однозначні і багатозначні, набори і магазини мір. *Однозначна міра* відтворює фізичну величину одного розміру (або одиницю вимірювання, або деяке визначене числове значення фізичної величини). Наприклад, вимірювальна котушка опору, нормальний елемент, конденсатор постійної ємності, вимірювальна колба. З однозначних мір збирають *набори мір* – спеціально підібраний комплект мір, що застосовуються не тільки поодин-

ці, але і у різних сполученнях з метою відтворювання низки однойменних величин різного розміру (набір гир, денсиметрів, вимірювальних конденсаторів та ін.). *Багатозначна міра* відтворює низку однойменних величин різного розміру (конденсатор змінної ємності, лінійка з міліметровими поділками, варіометр індуктивності та ін.). *Магазин мір* становить собою пристрій, що об'єднує набір мір з пристосуваннями для їх з'єднання у різному сполученні (магазин опірностей чи індуктивностей). *Калібр* – це міра для порівнювання розмірів, форми і розташування поверхонь деталей з метою визначення їх придатності, що застосовуються у відділах технічного контролю для прийому виробів. Найчастіше це геометричні калібри.

**Вимірювальний прилад** становить собою засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Результати вимірювань відбиваються відліковими пристроями приладів, які можуть бути шкальними, цифровими і реєструючи ми.

*Шкальні відлікові пристрої* складаються з шкали, що становить собою сукупність відміток і чисел, які відображають ряд послідовних значень вимірюваної величини, і покажчика (стрілка, електронний промінь та ін.), зв'язаного з рухливою системою приладу. Відмітки шкали, яким присвоєне числове значення називаються числовими відмітками шкали.

Основні характеристики шкали (див. рис.1.1) наступні: довжина поділки шкали (відстань поміж осями чи центрами двох сусідніх відміток шкали) і ціна поділки шкали (значення вимірюваної величини, що викликає переміщення відлікового пристрою на одну поділку). Найменше і найбільше значення вимірюваної величини, що показані на шкалі, називаються відповідно початковим і кінцевим значеннями шкали. Область значень шкали, яка обмежена початковим і кінцевим значеннями шкали, називається діапазоном показань. Частина діапазону показань, для якої нормовані межі припустимих похибок засобів вимірювань, називається діапазоном вимірювань. У технічних приладах ці діапазони як правило співпадають.

Значення величини, що визначається по відліковому пристрою засобу вимірювання та має вираження у деяких одиницях виміру цієї величини, називається показанням засобу вимірювання. Величина показання  $X_{\text{П}}$  може бути визначена чи шляхом множення кількості поділок шкали  $N_{\text{Под}}$  на ціну поділки шкали  $C_{\text{Под}}$  чи множенням чисельного значення  $N$ , що відлічене по шкалі, на постійну шкали  $C$  у

відповідності з рівняннями:

$$X_{II} = N_{\text{ПОД}} C_{\text{ПОД}} ; \quad (1.2)$$

$$X_{II} = N C \quad (1.3)$$

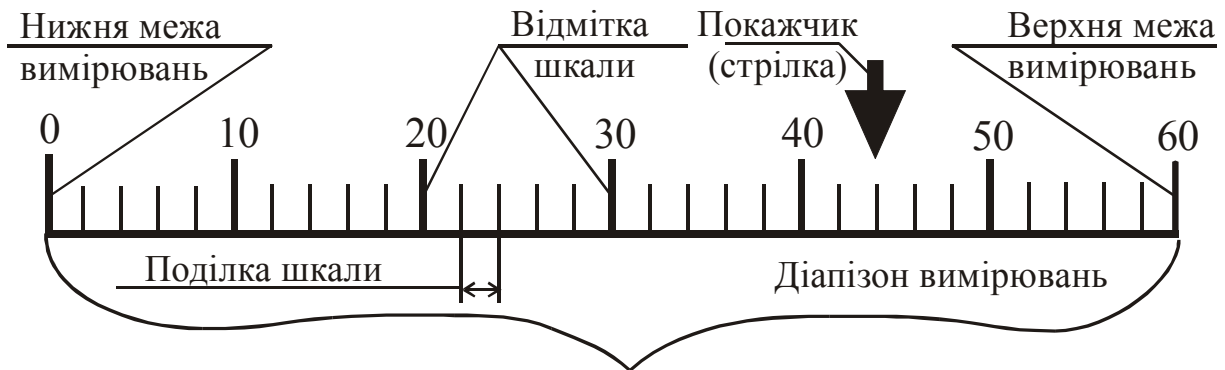


Рис.1.1. Шкала відлікового пристрою вимірювального приладу.

*Приклад.* У відповідності з рис. 1.1 максимальний відлік складає  $N_{\text{МАКС}} = 60$ , а показчик зупинився на відмітці  $N = 44$ . Якщо найбільше показання приладу  $X_{II}^{\text{МАКС}} = 60^{\circ}\text{C}$ , то постійна термометра складе

$$C = X_{II}^{\text{МАКС}} / N_{\text{МАКС}} = 60 / 60 = 1^{\circ}\text{C} ,$$

а показання приладу згідно (1.3) буде дорівнювати

$$X_{II} = 44 \cdot 1 = 44^{\circ}\text{C}$$

Крім того, ціна поділки шкали термометра визначається за рівнянням

$$C_{\text{ПОД}} = X_{II}^{\text{МАКС}} / N_{\text{ПОД-МАКС}} = 60 / 30 = 2^{\circ}\text{C}/\text{под} ,$$

а показання приладу за рівністю (1.2) складе

$$X_{II} = 22 \cdot 2 = 44^{\circ}\text{C}.$$

Шкали приладів можуть бути однобічними, двобічними і безнульовими. А однобічних шкалах одна межа вимірювань приладу дорівнює нулю, у двобічних – нульове значення розташоване посередині шкали, а безнульові – не мають на шкалі нульового значення.

*Цифрові відлікові пристрої* можуть бути чи механічними, чи світловими. Механічні використовують у тих цифрових приладах, де вимірювана величина перетворюється у відповідні кути поворотів валів. Світлові складаються, як правило, з систем газорозрядних ламп, світло діодів чи рідинно-кристалічного екрану, що висвітлюють ті чи інші цифри, і використовуються в електронних приладах,

де вимірювана величина перетворюється у визначену послідовність імпульсних сигналів.

*Реєструючи відлікові пристрої* складаються з пишучого чи друкарського механізму і стрічки. Найпростіший пишучий пристрій становить собою перо, заповнене чорнилом, що фіксує результат вимірювання на паперовій стрічці. У більш складних пристроях запис результатів вимірювань відбувається світловим чи електронним променем, переміщення якого залежить від значень вимірюваних величин.

За способом утворення показань прилади розподіляють на показуючі і реєструючі. *Показуючі прилади*, у свою чергу, розділяють на аналогові і цифрові. Аналогові прилади – це звичайні стрілкові прилади з відліковими пристроями, що складаються з двох елементів – шкали та покажчика, з'єднаного з рухливою частиною приладу. Показання таких приладів є неперервною функцією вимірювань вимірюваної величини. Цифрові прилади автоматично відпрацьовують дискретні сигнали вимірювальної інформації, що відбиваються у цифровій формі. Відлік у них відбувається за допомогою механічних чи електронних цифрових відлікових пристроїв. У порівнянні з стрілковими вони мають ряд переваг: процес вимірювань автоматизований, що виключає виникнення похибок операторів; час вимірювань дуже малий; результат вимірювань легко фіксується цифро друкарським пристроєм і зручний для уводу до обчислювальної машини. *Реєструючі прилади* розподіляються на самописні, що видають показання у формі діаграми, і друкарські, які відбивають результат вимірювань у цифровій формі на паперовій стрічці.

**Вимірювальний перетворювач** – це засіб вимірювань, необхідний для вироблення вимірювальної інформації у формі, придатній для передачі, подальшого перетворення, обробки і зберігання, але такої, що непіддатна безпосередньому сприйманню спостерігачем. Вимірювальні перетворювачі є складовою частиною вимірювальних приладів, різних систем автоматичного контролю і регулювання технологічних процесів. Перетворювач, до якого підведена вимірювана величина, є *первинним* (термопара, термоопір, діафрагма і т. п.), а той, що призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації є *передавальним* (реостатний, індуктивний, пневматичний і т. п.).

**Вимірювальна установка** – це сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювання (мір, вимірювальних приладів і пе-

ретворювачів) та допоміжних пристроїв, призначених для вироблення сигналів вимірювальної інформації у зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем формі і розташованих в одному місці. Установки, як правило, створюються для контролю роботоздатності тих чи інших технічних систем, для перевірки різних засобів вимірювань та ін.

**Вимірювальні системи** призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, що зручна для автоматичної обробки, передачі і використання в автоматичних системах керування. Головна їх ціль – це автоматизація процесу вимірювань і використання результатів вимірювання для автоматичного керування різними технологічними процесами. До складу таких систем можуть входити перетворювачі, схеми автоматичного регулювання, міри і вимірювальні прилади. Якщо різні елементи розташовані на значній відстані, то зв'язок поміж ними може здійснюватись як по провідним, так і по безпровідним каналам.

За метрологічним призначенням засоби вимірювання діляться на робочі, зразкові і еталони. *Робочі засоби* вимірювань застосовують для вимірювань, що не пов'язані з передачею розміру одиниць фізичної величини. Вони служать для технічних вимірювань в лабораторіях чи на виробництвах.

**Зразкові засоби вимірювань і еталони** забезпечують відтворення, зберігання і передачу розмірів одиниць. При цьому, вищою ланкою у метрологічному ланцюгу передачі розмірів одиниць вимірювань є еталони.

*Еталони* – це засоби вимірювань (або комплекс засобів вимірювань), що забезпечують відтворення і зберігання одиниці з метою передачі її розміру засобам вимірювань, знаходяться нижче за схемою перевірки, виконані за особливою специфікацією і офіційно затверджені у встановленому порядку.

Відтворення одиниць здійснюють одним з двох способів: централізований – за допомогою єдиного для всієї країни державного еталону; децентралізований, - коли необхідна точність відтворення може бути забезпечена шляхом непрямих вимірів, що виконуються в органах метрологічної служби за допомогою зразкових засобів вимірювань. За першим способом відтворюють всі основні одиниці Міжнародної системи одиниць (СІ) і більшу частину похідних. Другий спосіб застосовується до похідних одиниць, розмір яких не може бути переданий прямим порівнюванням з еталоном, або якщо повір-

ка мір шляхом непрямих вимірювань простіше, ніж їх порівнювання з еталоном. Серед еталонів слід виділити наступні: державний, робочий та вихідний. *Державний еталон* – офіційно затверджений еталон, що забезпечує відтворення одиниці вимірювань і передачу її розміру іншим еталонам з найвищою у країні точністю. *Робочий еталон* призначений для повірки чи калібровки засобів вимірювальної техніки. *Вихідний еталон* має найвищі метрологічні властивості серед еталонів, що знаходяться на підприємстві чи в організації.

*Зразкові засоби вимірювань* призначені для передачі розмірів одиниць від еталонів до робочих засобів вимірювання, тобто служать для їх повірки. Зразковими засобами можуть бути міри, вимірювальні прилади і пристрої, що пройшли метрологічну атестацію і затверджені органами державної чи відомчої метрологічних служб у якості зразкових. За призначенням розрізняють вихідні і підпорядковані зразкові засоби вимірювань. *Вихідними* називають зразкові засоби вимірювань, від яких розмір одиниці передається з найвищою точністю у деякому підрозділі метрологічної служби. Підпорядкованими називають зразкові засоби вимірювань, яким передається розмір одиниці від вхідного зразкового засобу вимірювань безпосередньо або через інші зразкові засоби вимірювань. У залежності від похибки атестації зразкові засоби вимірювань, крім того, діляться на розряди.

### **1.3. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ**

Результат вимірювань фізичної величини завжди відрізняється від істинного значення на деяку величину, яка називається похибкою. Оскільки неможливе встановлення істинного значення вимірюваної величини, а отже і похибки вимірювань, тому з метою отримання хоча б приблизних відомостей про них на практиці замість істинного використовують дійсне значення. Виникнення похибок може бути пов'язано з недосконалістю методів вимірювання, технічних засобів, що застосовуються при вимірюваннях, та органів почуття спостерігача. Проте, головним чином, вони визначаються похибками технічних засобів вимірювань. До окремої групи можна віднести причини, що пов'язані із впливом умов проведення вимірювання. Останні можуть впливати двояко. З одного боку, усі фізичні величини, що мають будь-яке значення при проведенні вимірювань, в тій



чи іншій мірі залежать одна від одної. Тому із зміною зовнішніх умов змінюються істинні значення вимірюваних величин. З іншого боку, умови проведення вимірювань впливають і на характеристики засобів вимірювань та фізіологічні властивості органів почуття спостерігача, через що також виникає джерело похибки вимірювання.

Загальна схема класифікації похибок у залежності від джерела виникнення, умов проведення вимірювань, характеру прояву вимірюваної величини за часом та способу її виразу наведена на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Узагальнююча схема класифікації похибок.

**Способи виразу похибок вимірювання** можуть бути у вигляді абсолютної, відносної і наведеної похибок.

*Абсолютна похибка вимірювання*  $\Delta$  - це різниця поміж результатом вимірювання  $X_B$  та дійсним значенням  $X_D$  вимірюваної величини:

$$\Delta = X_B - X_D \quad (1.4)$$

У якості дійсного значення  $X_D$  приймається значення, що отримане за допомогою зразкового приладу при проведенні повірки. Абсолютна похибка має розмірність одиниці вимірюваної величини.

*Абсолютна похибка перетворювання по входу* визначається як різниця між розрахунковим  $X_P$  (визначається за допомогою градуювальної характеристики перетворювача для кожного дійсного значення параметра на виході) і дійсним значенням  $X_D$  параметра на вході перетворювача:

$$\Delta = X_P - X_D \quad (1.5)$$

*Абсолютна похибка перетворювання по виходу* обчислюється як різниця між дійсним  $X_D$  і розрахунковим  $X_P$  значенням параметра на виході (визначається за допомогою градуювальних характеристик перетворювача для кожного дійсного значення параметра на вході):

$$\Delta = X_D - X_P \quad (1.6)$$

*Відносна похибка вимірювання (перетворювання)  $\delta$  (%)* визначається відношенням абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини (дійсного значення параметра на вході чи на виході):

$$\delta = (\Delta / X_D) \cdot 100 \quad (1.7)$$

*Наведена похибка  $\gamma$  (%) вимірювання* – це відношення абсолютної похибки до нормованого значення  $X_N$ :

$$\gamma = (\Delta / X_N) \cdot 100 \quad (1.8)$$

Нормоване значення  $X_N$  – це умовно прийнята величина, що визначається у залежності від характеру та виду шкали приладу (діапазону вимірювань). Нормоване значення дорівнює:  $X_N = X_{100\%}$  – кінцевому значенню діапазону вимірювань для приладів з однорічною шкалою;  $X_N = X_{100\%} + X_{0\%}$  – сумі кінцевих значень діапазону вимірювань для приладів з двобічною шкалою;  $X_N = X_{100\%} - X_{0\%}$  – різниці

кінцевого і початкового значень діапазону вимірювань для приладів з без нульовою шкалою.

Для логарифмічних, гіперболічних і ступеневих шкал приладів наведену похибку виражають у процентах від довжини шкали.

**Основна і додаткова похибки** обумовлені умовами проведення вимірювань. *Основна похибка* – це похибка засобу вимірювань, що визначається в нормальних умовах його застосування. *Додаткова похибка* – це складова похибки вимірювань, що виникає внаслідок відхилення однієї з величин від нормального значення чи виході її за межі нормальної області значень. Розподіл похибок на основну і додаткову є суто умовним і визначається конкретною домовленістю між розробником і замовником засобів вимірювання.

**Статична і динамічна похибки** вимірювання обумовлюються умовами і режимами вимірювання. *Статична похибка* не залежить від швидкості вимірювання вимірюваної величини за часом. Прикладом статичної похибки може бути похибка вимірювання постійної за часом вимірювання напруги постійного струму. *Динамічною* називають похибку, яка залежить від швидкості зміни вимірюваної величини за часом. Виникнення динамічної похибки обумовлено інерційністю елементів вимірювального ланцюга засобу вимірювань, тобто тим, що перетворення у вимірювальному ланцюгу не відбувається миттєво, а вимагає деякого часу. Динамічна похибка визначається різницею між похибкою засобу вимірювань у динамічних умовах і його статичною похибкою, яка відповідає значенню величини у даний момент часу.

Причини виникнення похибок визначаються сукупністю великої кількості чинників, під впливом яких утворюється сумарна похибка вимірювання. Їх можна взагалі об'єднати у дві основні групи: систематичні і випадкові. В процесі вимірювань обидві похибки проявляються одночасно і похибку вимірювання можна представити у вигляді суми:

$$\Delta = \Delta^o + \Delta_C, \quad (1.9)$$

де  $\Delta^o$  – випадкова, а  $\Delta_C$  – систематична похибки.

**Систематична похибка** – це складова похибки вимірювань, що залишається постійною чи закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. У залежності від джерела виникнення систематичні похибки розділяються на такі: похибки

методу (теоретичні похибки), інструментальні і суб'єктивні.

*Похибка методу* обумовлена недосконалістю прийнятого методу вимірювань в цілому чи від застосованих спрощень при проведенні вимірювань. Похибки методу виникають також при екстраполяції вимірюваної властивості на обмеженій частині деякого об'єкту на весь об'єкт, якщо останній не має однорідності цієї Властивості. Так при визначенні густини речовини за масою і об'ємом деякої проби виникає систематична похибка, якщо проба мала у собі деяку кількість домішок, а результат вимірювання приймався за характеристику цієї речовини в цілому.

*Інструментальні похибки* індивідуальні для кожного засобу і обумовлені насамперед особливостями принципів і методів вимірювань, що застосовуються у засобах вимірювань. Серед інструментальних похибок слід відзначити похибки схеми та технологічні похибки. Перші обумовлені неточністю виготовлення засобів вимірювання і зобов'язані своїм походженням самій структурній схемі засобів вимірювання (зокрема, його кінематичній схемі) та властивостям утворюючих його елементів. Другі виникають внаслідок недосконалості виготовлення елементів засобу вимірювання. До інструментальних похибок також відносяться похибки засобів вимірювання у робочих умовах, що вміщують у себе основну, додаткову і динамічну помилку.

*Суб'єктивні похибки* обумовлені індивідуальними особливостями спостерігача (оператора). Велике значення у виникненні цієї похибки відіграє швидкість реагування спостерігача на отриманий сигнал. Так, час реагування з моменту подачі світлового сигналу до моменту сприйняття сигналу у різних особистостей може складати від 0,15с до 0,25с.

За характером своєї поведінки в процесі вимірювання систематичні похибки діляться на постійні, прогресивні і періодичні.

*Постійні систематичні похибки* – це похибки, що тривалий час зберігають своє значення і викликані умовами невірною встановлення початку відліку чи градування шкал приладів.

*Прогресивні систематичні похибки* – це безперервно зростаючі або спадаючі похибки, що можуть бути викликані внаслідок зношення контактуючих деталей засобів вимірювань, постійного зменшення напруги джерела струму і т. п.

*Періодичні систематичні похибки* – це похибки, що періодично змінюють значення і знак. Найчастіше ці похибки притаманні

приладам з круговою шкалою.

Систематичні похибки становлять найбільшу небезпеку і можуть суттєво викривляти результат вимірювань, тому їх необхідно виключити з результатів вимірювань, для чого необхідно: усунути джерела похибок в ході вимірювань; внести відомі поправки до результату вимірювань; оцінити границі невиключених систематичних похибок.

*Усунення джерел похибок до початку вимірювань* є одним з головних етапів і здійснюється шляхом захисту вимірювальної апаратури від зовнішніх впливів (джерела теплоти, вібрацій, магнітних полів і т.п.). При цьому інструментальні похибки окремого засобу вимірювань можуть бути усунені в процесі ремонту і регулювання, за рахунок правильної його установки чи ліквідацією зміщення нуля перед початком вимірювання.

*Усунення похибок в процесі вимірювань* здійснюється найчастіше наступними методами: заміщення, інвертування (компенсації по знаку), протиставлення симетричних спостережень.

*Метод заміщення* є найбільш універсальним методом, що дає можливість усунути більшість систематичних похибок. Суть метода полягає у тому, що об'єкт вимірювання замінюють відомою мірою без зміни умов вимірювання. Наприклад, при вимірюванні електричних параметрів (опір, ємність, індуктивність) об'єкт підключається до вимірювального кола. У більшості випадків для цього застосовуються нульові методи вимірювання (мостовий, компенсаційний), за яких здійснюється електричне врівноваження кола. Після цього, не змінюючи схеми, замість вимірюваного об'єкта вмикають міру змінного значення (магазин опірностей, ємностей, індуктивностей) і, змінюючи їх значення, досягають встановлення рівноваги кола. Застосування методу заміщення забезпечує виключення залишкової нерівноваженості мостових кіл, впливу на коло магнітних і електричних полів.

*Метод інвертування* передбачає проведення повторних вимірювань таким чином, щоб похибка увійшла до результатів з протилежними знаками, виключення якої буде здійснено в процесі обчислення середнього значення. Наприклад, для виключення похибки через термоелектрорушійну силу (ТЕРС) у високоточних цифрових вольтметрах постійного струму виконується повторне вимірювання з одночасною зміною полярності вимірюваної напруги і робочого струму. Оскільки ТЕРС не залежить від полярності струму, то ре-

результати двох вимірювань будуть дорівнювати:  $U_{X1} = U_X + E_{TEPC}$  і  $U_{X2} = -U_X + E_{TEPC}$ . Середнє значення  $U_X$  складе  $U_X = 0,5(U_{X1} + U_{X2})$ , а отже результат не буде заложити від ТЕРС.

*Метод протиставлення* полягає у тому, що вимірювання виконуються два рази, таким чином, щоб причина виникнення похибки при першому вимірюванні учинила протилежну дію на результат другого. Наприклад, при зважуванні на рівноплечих терезах причина похибки може бути викликана через деяку їх невірноваженість. Рівняння зважування за цим методом будуть наступні.

Умова рівноваги при першому зважуванні складе:

$$m_1 l_1 = m_2 l_2, \quad (1.10)$$

де  $m_1, m_2$  – відповідно маса ваги, що зважується, і гир, що врівноважують;  $l_1, l_2$  – відповідно плечі коромисла.

Вплив нерівноплечисті буде мати вигляд множника  $l_2/l_1$ , тобто:

$$m_1 = (l_2/l_1) m_2 \quad (1.11)$$

При повторному зважуванні отримаємо наступну умову рівноваги:

$$m_2' l_1 = m_1 l_2 \quad (1.12)$$

Вирішуючи сумісно рівняння (1.10) і (1.12) отримаємо:

$$m_1 = \sqrt{m_1 m_2} \quad (1.13)$$

Якщо  $m_2$  і  $m_2'$  несуттєво відрізняються одна від однієї, то

$$m_1 = 0,5 (m_2 + m_2'), \quad (1.14)$$

а вплив на результат нерівноплечисті терезів буде виключеним.

*Метод симетричних спостережень* дозволяє виключити вплив будь-якого прогресуючого чинника і лінійного залежного у часі. Метод полягає у тому, що протягом деякого інтервалу часу виконуються декілька вимірювань однієї і тієї ж величини постійного розміру. За кінцевий результат приймається на півсума окремих результатів, симетричних за часом відносно середини інтервалу. Напри-

клад, при вимірюванні електричного опору резистора шляхом порівняння напруги на вимірюваному та зразковому резисторах, що включені послідовно і живляться від загального акумулятора, похибка може виникнути внаслідок поступового розряду джерела живлення. Для виключення цієї похибки проводять три вимірювання падіння напруги через рівні проміжки часу. Падіння напруги на зразковому резисторі  $R_0$  при першому вимірюванні складе:

$$U_{01} = I \cdot R_0 \quad (1.15)$$

Падіння напруги при другому вимірюванні на вимірюваному резисторі та на зразковому резисторі при третьому вимірюванні визначиться відповідно рівняннями:

$$U_X = (I - \Delta I_1) R_X, \quad (1.16)$$

$$U_{02} = (I - \Delta I_2) R_0 \quad (1.17)$$

У випадку зміни струму за лінійним законом у часі величина  $\Delta I_2$  буде дорівнювати:

$$\Delta I_2 = 2\Delta I_1 \quad (1.18)$$

У відповідності з рівняннями (1.17) і (1.18) величина  $\Delta I_1$  складе

$$\Delta I_1 = (U_{01} - U_{02}) / 2R_0, \quad (1.19)$$

а різниця  $(I - \Delta I_1)$  з урахуванням співвідношення (1.15) визначиться виразом:

$$I - \Delta I_1 = (U_{01} + U_{02}) / 2R_0 \quad (1.20)$$

Підставивши вираз для  $(I - \Delta I_1)$  у рівняння (1.16), отримаємо формулу для розрахунку  $R_X$ :

$$R_X = 2U_X R_0 / (U_{01} + U_{02}) \quad (1.21)$$

Якщо вимірювання неможливо провести таким чином, щоб виключити чи скомпенсувати який-небудь чинник, вплив якого на результат може бути суттєвим, то необхідно організувати уведення

поправки шляхом перевірки засобів вимірювання у робочих умовах. Це дасть змогу урахувати усі систематичні похибки без з'ясування причин їх виникнення. Поправка  $\nu$  за числовим значенням дорівнює систематичній похибці і протилежна їй за знаком.

*Приклад.* Встановлено шляхом порівнювання, що показання зразкового манометра 1 МПа, а того, що повіряється 0,95 МПа. Необхідно визначити абсолютну похибку і поправку для манометра, що повіряється.

Абсолютна похибка у відповідності з рівнянням (1.4) буде складати:  $\Delta = 0,95 - 1 = -0,05$  МПа. Поправка буде дорівнювати абсолютній похибці  $\Delta$  і протилежна їй за знаком, тобто  $\nu = 0,05$  МПа.

В окремих випадках виключення систематичних похибок виявляється практично неможливим, тобто після уведення поправок залишаються присутніми її окремі складові, що називаються *невиключеними залишками систематичних похибок*. До них в першу чергу можна віднести наступні: похибки визначення поправок; похибки, що залежать від точності вимірювання величин, які впливають на результат у зв'язку з їх входженням до рівнянь для визначення поправок; похибки, що пов'язані з коливанням величин, що впливають, у таких малих межах внаслідок чого неможливе введення поправок. У таких випадках обмежуються оцінкою границь можливих систематичних похибок.

**Випадкова похибка** – це складова похибки вимірювання, характер зміни якої при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини в однакових умовах випадковий. Ці похибки виникають внаслідок варіації показань вимірювального приладу, похибки округлення в процесі відліку показань приладу, зміни умов вимірювання випадкового характеру і т. п. Під впливом цих причин похибка (результат) вимірювання весь час змінюється (хоча можливо і не суттєво) і значення її можуть суцільно заповнювати деякий проміжок, тобто ці значення неможливо відокремити одне від одного інтервалами. Отже, похибка і результат вимірювань є *безперервними випадковими величинами*.

Випадкові похибки неможливо урахувати і виключити з результатів вимірювань, як систематичні похибки. Однак проведення повторних багатократних вимірювань дає можливість, використовуючи методи теорії ймовірності і математичної статистики уточнити результат, тобто наблизити значення вимірюваної величини до істинного значення.



Окрему групу випадкових похибок складають *грубі похибки і промахи*, що виникають внаслідок помилок чи неправильних дій оператора (його психофізіологічний стан, невірний відлік, помилки у записах чи обчисленнях, неправильне вмикання приладів і т. п.), а також при короткочасних різких змінах умов проведення вимірювань (вібрації, зміна температури, поштовх приладу оператором і т. п.). Грубі похибки піддаються виключенню з результатів експерименту і найчастіше виявляють тільки при остаточній обробці результатів вимірювань із застосуванням спеціальних математичних критеріїв оцінки.

#### 1.4. ОЦІНКА ВИПАДКОВИХ І СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ

**Основні положення теорії похибок вимірювань**, що дозволяють проводити оцінку величини похибок для серії вимірювань, базуються на двох передбаченнях, підтверджених експериментально: за великої кількості вимірювань випадкові похибки мають однакову величину, але різного знаку, тобто похибки як у бік зменшення, так і у бік збільшення зустрічаються однаково часто; великі (за абсолютною величиною) похибки зустрічаються значно рідше, ніж малі, тобто ймовірність появи похибки зменшується із зростанням величини похибки.

Припустимо, що проведено  $n$  прямих вимірювань, деякої фізичної величини, істинне (невідоме) значення якої позначимо через  $x_{icm}$ , через  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – результати окремих вимірювань, а через  $\Delta = (x_{icm} - x_i)$  – істинну абсолютну похибку  $i$ -го вимірювання. Тоді результати вимірювань можна представити у вигляді рівностей:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{icm} - \Delta^o_1, \\ x_2 &= x_{icm} - \Delta^o_2, \\ &\dots\dots\dots \\ x_n &= x_{icm} - \Delta^o_n. \end{aligned} \tag{1.22}$$

При цьому, абсолютні похибки  $\Delta^o_i$  можуть приймати як позитивні, так і негативні значення. Підсумовуючі ліву і праву частину рівностей (1.22), отримаємо:

$$\sum_{i=1}^n x_i = n x_{icm} - \sum_{i=1}^n \Delta_i^o. \quad (1.23)$$

Розділивши обидва боки рівності (1.23) на кількість вимірювань і виконавши перестановку членів будемо мати:

$$x_{icm} = \bar{x} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^o, \quad (1.24)$$

де  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  – середньоарифметичне значення результатів вимірювань.

Якщо число  $n$  достатньо велике ( $n \rightarrow \infty$ ), то згідно передбачення наведеного вище з рівності (1.24) виходить, що

$$x_{icm} = \bar{x} \text{ при } n \rightarrow \infty. \quad (1.25)$$

Тобто за безкінечно великого числа вимірювань істинне значення вимірюваної величини дорівнює середньоарифметичному значенню усіх результатів виконаних вимірювань. Однак за обмеженості вимірювань ( $n \neq \infty$ ) середньоарифметичне значення буде відрізнятися від істинного, тобто рівність (1.25) буде не точною, а наближеною ( $x_{icm} = \bar{x}$ ), а отже необхідно оцінювати величину цієї випадкової розбіжності (похибки вимірювання), тобто знати з якою ймовірністю вона приймає те чи інше значення. Іншими словами, потрібно знати розподіл цієї випадкової величини. Для опису результатів чи похибок вимірювань в теорії ймовірності використовують функції розподілу та числові характеристик.

**Функції розподілу**, що визначають ймовірність попадання випадкової величини у деяку намічену сукупність чисел, відрізняють інтегральні і диференціальні. Під *інтегральною функцією розподілу* результатів вимірювань (рис. 1.3) розуміють ймовірність того, що результат вимірювання  $X$  прийме значення менше деякого значення  $x$ , тобто

$$F(x) = P(X < x) \quad (1.26)$$

Для випадкової похибки вимірювання рівність (1.26) буде мати

ВИГЛЯД:

$$F(\Delta^o) = P(\Delta^o_i < \Delta) \quad (1.27)$$

Як усяка ймовірність інтегральна функція розподілу задовольняє нерівностям (не може бути негативною і більше одиниці):

$$0 \leq F(x) \leq 1 \quad (1.28)$$

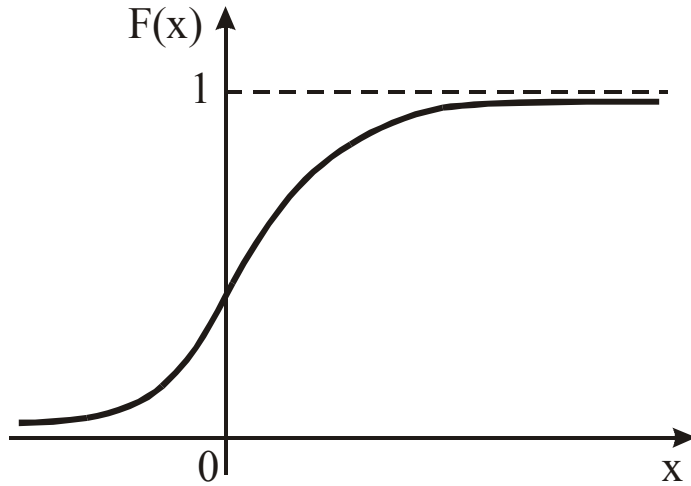


Рис. 1.3. Графік інтегральної функції розподілу.

не може бути негативною і більше одиниці):

Ймовірність попадання результату вимірювання  $X$  чи випадкової похибки  $\Delta^o$  в інтервал  $(x_1; x_2)$  чи  $(\Delta^o_1; \Delta^o_2)$  визначають за формулами:

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1), \quad (1.29)$$

$$P(\Delta^o_1 \leq \Delta^o \leq \Delta^o_2) = F(\Delta^o_2) - F(\Delta^o_1) \quad (1.30)$$

Функція розподілу  $F(x)$  випадкової величини не дозволяє отримати ймовірностей по окремим значенням цієї величини. Збільшуючись від значення до значення, вона є як би функцією “накопиченої ймовірності”. Тому для визначення наскільки часто випадкова величина приймає значення поблизу окремої точки застосовують диференціальну функцію розподілу  $f(x)$ , яка має більш прикладний характер.

Диференціальна функція розподілу або функція щільності розподілу є похідною від інтегральної за своїм аргументом:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}; \quad f(\Delta^o) = \frac{dF(\Delta^o)}{d\Delta^o}. \quad (1.31)$$

Графіки диференціальних функцій розподілу називають також кривими розподілу. У низці випадків вони мають дзвіноподібну форму з максимумом при  $x = x_{icm}$  чи  $\Delta^o = 0$  відповідно (рис. 1.4).

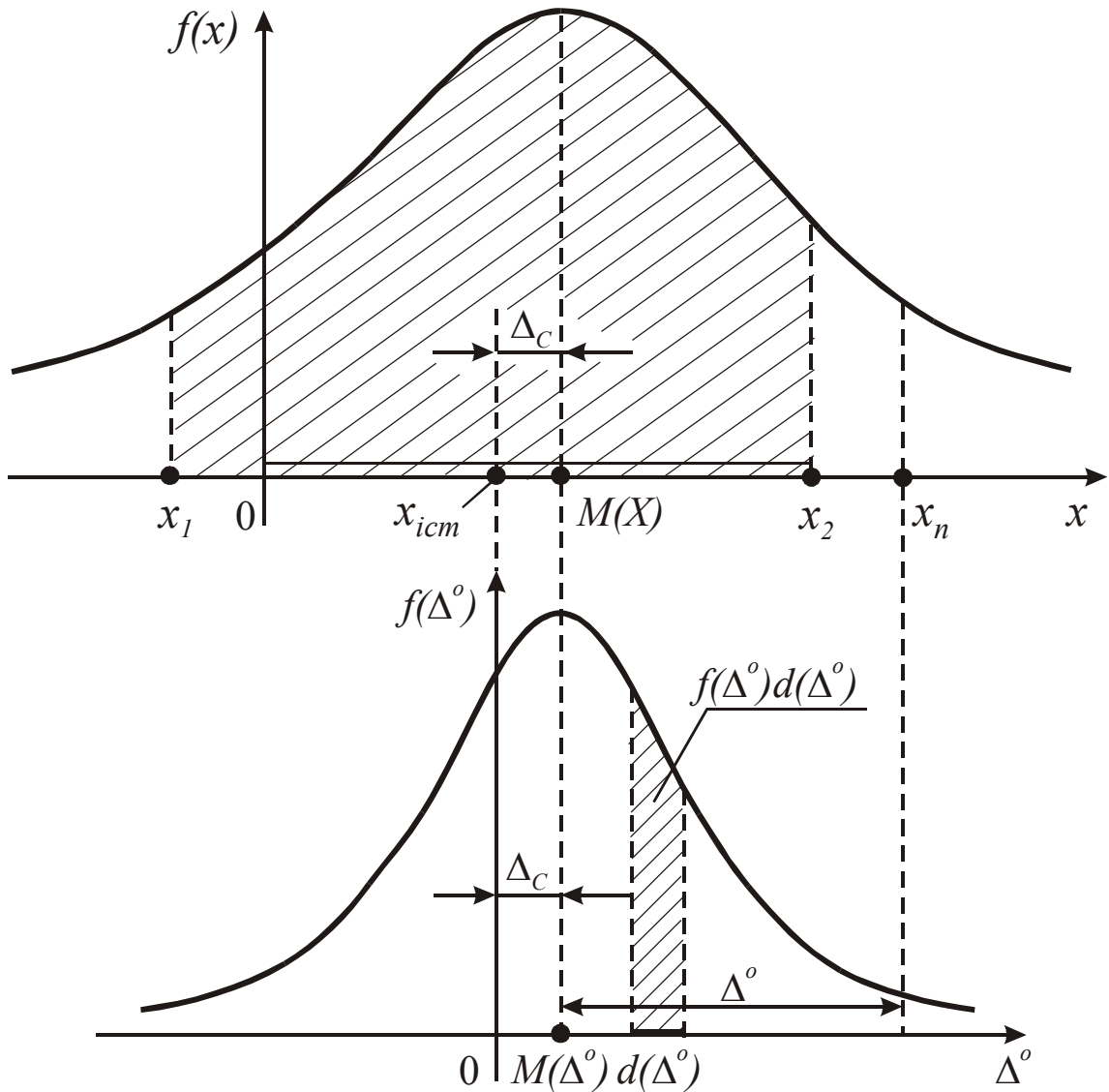


Рис. 1.4. Графік функції щільності розподілу.

Перехід від диференціальної функції розподілу до інтегральної здійснюється шляхом інтегрування.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx; \quad F(\Delta^0) = \int_{-\infty}^{\Delta^0} f(\Delta^0)d\Delta^0 \quad (1.32)$$

Враховуючі згідно з теорією ймовірності, що  $F(+\infty) = 1$ , отримаємо

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1, \quad (1.33)$$

тобто попадання випадкової величини в інтервал  $(-\infty < X < \infty)$  є ві-

рогідною подією, а площа, що заключена поміж кривою розподілу і віссю абсцис, дорівнює одиниці.

За допомогою функції щільності розподілу можна оцінювати ймовірність попадання результату вимірювання чи випадкової похибки у деякий інтервал за формулами:

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx; \quad (1.34)$$

$$P(\Delta_1^0 \leq \Delta^0 \leq \Delta_2^0) = \int_{\Delta_1^0}^{\Delta_2^0} f(\Delta^0) d\Delta^0; \quad (1.35)$$

Добутки  $f(x)dx$  і  $f(\Delta^0)d\Delta^0$  називаються елементами ймовірності і дорівнюють ймовірності того, що випадкові величини  $X$  і  $\Delta^0$  приймуть деякі значення в інтервалах  $dx$  і  $d\Delta^0$  відповідно. Форма кривої розподілу (див. рис. 1.4) дозволяє судити про те, які інтервали значень випадкових похибок більш, а які менш ймовірні. Функція розподілу значень  $X$  чи похибок  $\Delta^0$  дає вичерпну інформацію про випадкові величини. Проте в практичній діяльності іноді достатньо знати лише числові характеристики законів розподілу.

**Числові характеристики розподілу випадкових величин** дозволяють оцінити властивості законів розподілу і повністю охарактеризувати розподіл результату вимірювання чи похибки вимірювання. Ці числові характеристики називають *моментами* і на практиці визначаються по окремим вибіркам експериментальних даних, безумовно, приблизно, але потрібна точність досягається за набагато менших об'ємах вибірок. Розрізняють початкові моменти, що знайдені без виключення систематичної складової, і центральні моменти. Найбільше прикладне значення мають початкові моменти першого порядку (математичне очікування) і центральні моменти другого (дисперсія), третього (асиметрія) і четвертого (ексцес) порядку.

В процесі спостережень при встановленні значень числових характеристик (параметрів розподілу) керуються теоремою Глівенко: з ймовірністю одиниця при  $n \rightarrow \infty$  максимальна різниця між функціями розподілу величини  $X$ , що вивчається, і вибіркової величини  $x_n$  прямує до нуля. Практично це означає, що за достатньо великого об'єму вибірки функцію розподілу генеральної сукупності (області всіх припустимих значень деякої випадкової величини  $X$ ) можна

приблизно замінювати вибірковою функцією розподілу. У зв'язку з тим, що числові характеристики визначаються через свої функції розподілу, тому і параметри розподілу генеральної сукупності також можна замінювати вибірковими параметрами розподілу, які прийнято називати оцінками параметрів генеральної сукупності.

*Математичне очікування*  $M(X)$  безперервної випадкової величини  $X$  (результату вимірювань) характеризує центр групування випадкової величини і визначається за формулою:

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (1.36)$$

Для безмежної кількості вимірювань величина  $M(X)$  згідно теореми Глівенко дорівнює середньоарифметичному значенню  $\bar{x}$  результатів вимірювань. В умовах обмеження кількості вимірювань величину  $M(X)$  можна замінювати її оцінкою – середнім значенням вибірки спостережень і визначати  $\bar{x}$  за рівнянням:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.37)$$

Похибка такої заміни тим менше, чим більше об'єм вибірки.

За таких обставин систематична похибка визначиться (див. рис.1.4) як відхилення математичного очікування результатів вимірювання від істинного значення вимірюваної величини:

$$\Delta_c = M(X) - x_{icm} \quad (1.38)$$

Тоді випадкова похибка буде становити різницю поміж результатом одиночного вимірювання і математичним очікуванням результатів:

$$\Delta^o = X - M(X) \quad (1.39)$$

При цьому істинне значення вимірюваної величини складе:

$$x_{icm} = X - (\Delta_c + \Delta^o) \quad (1.40)$$

Математичне очікування похибки вимірювання  $M(\Delta) = \Delta_c$ . За умов усунення систематичних похибок величина  $M(\Delta) = M(\Delta^o) = 0$ .

*Дисперсія* характеризує міру розсіювання випадкової величини відносно її математичного очікування:

$$D(X) = M[X - M(X)]^2 \quad (1.41)$$

В практичних задачах розсіювання частіше характеризують *середнім квадратичним відхиленням (стандартом)*  $\sigma = \pm\sqrt{D(X)}$ , яке має ту саму розмірність, що і випадкова величина. Для вибірки об'єму  $n$  величина оцінки середньоквадратичного відхилення  $s$  (*вибірковий стандарт*) визначається за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.42)$$

Використовуючи властивість математичного очікування (математичне очікування суми випадкових величин дорівнює сумі математичних очікувань доданків) формулу (1.42) можна представити у вигляді:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n} \right]} \quad (1.43)$$

Значення  $\bar{x}$ , отримане в одній із серій вимірювань, є випадковим наближенням до  $x_{icm}$ . Щоб мати уяву про можливі відхилення  $\bar{x}$  від  $x_{icm}$ , необхідно визначити середньоквадратичне відхилення середньоарифметичного. Оцінка середнього квадратичного відхилення  $\bar{x}$ , тобто результату вимірювання обчислюється за формулою:

$$s_x = s/\sqrt{n}. \quad (1.44)$$

Для більш детального опису розподілу випадкових величин використовують моменти третього і четвертого порядків. Центральний момент третього порядку, віднесений до кубу середнього квадратичного відхилення, характеризує асиметричність розподілу і називається коефіцієнтом асиметрії (рис. 1.5):

$$\gamma_a = \mu_3(X)/\sigma^3(X), \quad (1.45)$$

де  $\mu_3(X) = [X - M(X)]^3$  – центральний момент третього порядку.

Вибірковий коефіцієнт асиметрії  $\bar{\gamma}_a$  визначається за рівнянням:

$$\bar{\gamma}_a = \frac{1}{s^3} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n n_i x_i^3}{n} - \frac{3 \sum_{i=1}^n n_i x_i^2 \sum_{i=1}^n n_i x_i}{n^2} - \frac{2 \left( \sum_{i=1}^n n_i x_i \right)^3}{n^3} \right] \quad (1.46)$$

Гостроверхів'я розподілу і крутизну кривої характеризує центральний момент четвертого порядку який називається коефіцієнт ексцесу  $\gamma_e$  (рис. 1.6) і визначається за рівнянням:

$$\gamma_e = [\mu_4(X)/\sigma^4(X)] - 3, \quad (1.47)$$

де  $\mu_4(X) = [X - M(X)]^4$  – центральний момент четвертого порядку.

Вибірковий коефіцієнт ексцесу обчислюється за формулою:

$$\bar{\gamma}_e = \frac{1}{s^4} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n n_i x_i^4}{n} - \frac{4 \sum_{i=1}^n n_i x_i^3 \sum_{i=1}^n n_i x_i}{n^2} + \frac{6 \sum_{i=1}^n n_i x_i^2 \left( \sum_{i=1}^n n_i x_i \right)^2}{n^3} - \frac{3 \left( \sum_{i=1}^n n_i x_i^4 \right)}{n^4} \right] - 3. \quad (1.48)$$

Центральні і початкові моменти випадкових похибок збігаються поміж собою і з центральними моментами результатів вимірювань у зв'язку з тим, що математичне очікування випадкових похибок (за відсутності систематичних і грубих похибок) дорівнює нулю.

Кількість всіляких типів розподілу, звичайно, необмежена. Проте на практиці далеко не всі розподіли зустрічаються однаково часто. Аналіз різних випадкових величин, вивчених як теоретично,



так і обчислених за результатами експериментів, показує, що найчастіше зустрічається нормальний (чи близький до нього) розподіл.

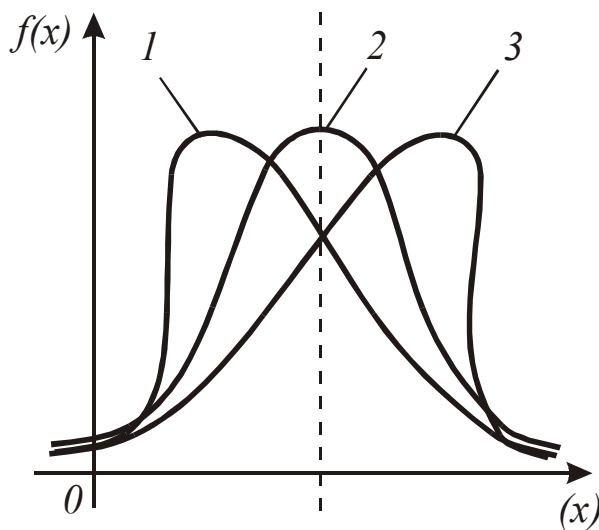


Рис. 1.5. Графік функцій розподілу: 1 -  $\gamma_a > 0$ ; 2 -  $\gamma_a = 0$ ; 3 -  $\gamma_a < 0$ .

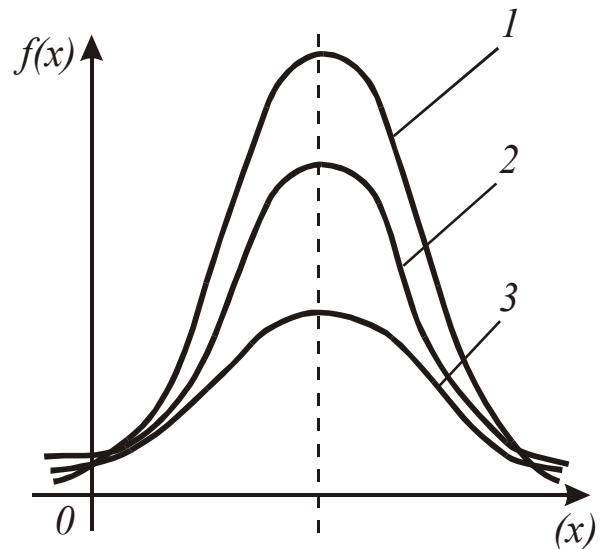


Рис. 1.6. Графік функцій розподілу: 1 -  $\gamma_e > 0$ ; 2 -  $\gamma_e = 0$ ; 3 -  $\gamma_e < 0$ .

**Нормальний закон розподілу** завдяки своїй детальній вивченості найбільш зручний для практичної роботи. Тому при обробці спостережень перша ж гіпотеза, що перевіряється – це нормальність відповідного розподілу (основна гіпотеза). Приналежність розподілу випадкової величини, що вивчається, до нормального визначається сукупністю її властивостей. Властивості перевіряються значно легше, ніж безпосередньо сам розподіл. У зв'язку з цим необхідно з'ясувати основні властивості нормального розподілу.

Випадкова величина  $X$  (результат вимірювання) є розподіленою за нормальним законом, якщо її функція розподілу і функція щільності розподілу відповідають наступним залежностям:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{[x-M(x)]^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (1.49)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[x-M(x)]^2}{2\sigma^2}}. \quad (1.50)$$

Аналогічним чином можна записати вирази цих функцій для

випадкової похибки  $\Delta^0$ :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\Delta^0} e^{-\frac{(\Delta^0)^2}{2\sigma^2}} d\Delta^0, \quad (1.51)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta^0)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1.52)$$

Графік щільності нормального розподілу називається *нормальною кривою чи кривою Гауса*. Він визначається значеннями параметрів розподілу  $M(X)$  і  $\sigma$ . На рис. 1.7 представлена нормальна крива при  $M(X)=2$  і  $\sigma = 0,5$ . Нормальна крива симетрична відносно прямої  $x = M(X)$  і при  $x \rightarrow \pm\infty$  необмежено наближується до осі абсцис (ця вісь є асимптотою кривої). При  $x = M(X)$  крива має максимум, що дорівнює  $1/\sigma\sqrt{2\pi}$ . Якщо навколо кожної точки осі абсцис взяти невелике оточення заданого радіусу  $\varepsilon$  (тобто інтервал довжиною  $2\varepsilon$  з центром у цій точці), то ймовірність попадання у такий інтервал пропорційна значенню щільності у точці, що розглядається. Без посередньо з графіку видно, що для нормального розподілу найбільш ймовірне попадання в оточення математичного очікування, а по обидва боки від нього ця ймовірність монотонно спадає. Швидкість спадання при цьому залежить від крутизни нормальної кривої, яка у свою чергу залежить від  $\sigma$ . На рис. 1.8 наведені для порівняння три нормальні криві  $f(\Delta^0)$  при  $M(\Delta^0) = 0$  і різних  $\sigma$ . Як виходить з рис. 1.8, чим менше  $\sigma$  тим сильніше спадає ймовірність, тобто тим щільніше навколо математичного очікування розташовані значення випадкової похибки, маючи при цьому достатньо суттєву ймовірність.

Для нормального розподілу ймовірність попадання випадкової величини  $X$  у будь-який заданий інтервал  $(x_1; x_2)$  визначається за формулою:

$$P\{x_1 \leq X \leq x_2\} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{[x-M(x)]^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (1.53)$$

Обчислення цього складного інтегралу здійснюється достатньо складними методами, тому щоб не проводити кожного разу громізд-

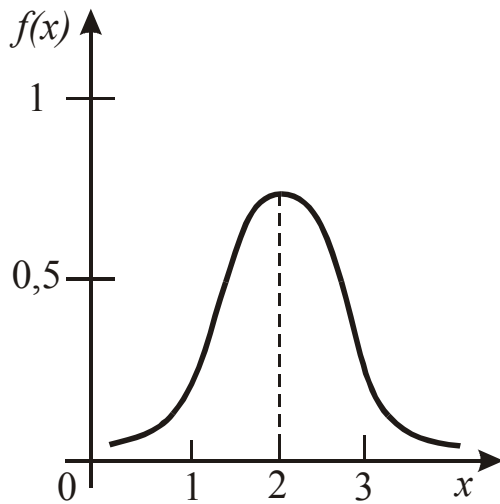


Рис. 1.7. Графік щільності розподілу вимірюваної величини.

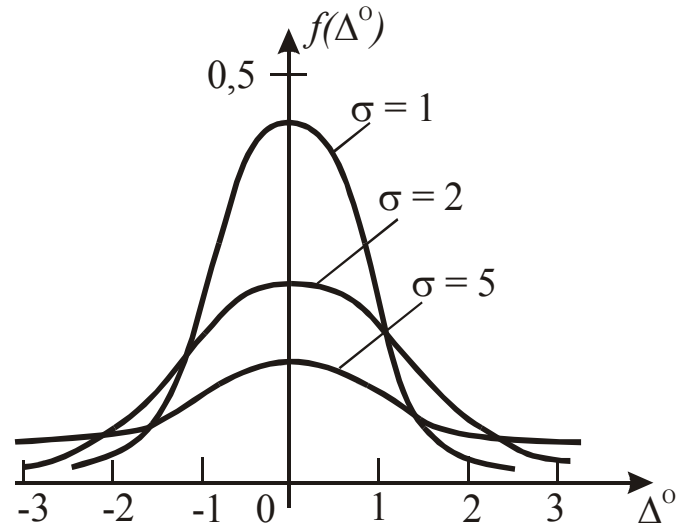


Рис. 1.8. Порівнювальний графік нормальних кривих розподілу випадкової похибки.

кі розрахунки складені спеціальні таблиці. В таблицях наведені значення функції розподілу  $F(x)$ , по яких і обчислюють ймовірність попадання у деякий інтервал за формулою (1.29) чи (1.30). Табулювання функції  $F(x)$  наштовхується на одну трудність – для кожних конкретних значень  $M(X)$  і  $\sigma$  необхідно скласти окрему таблицю. Запобігання цього недоліку здійснено за рахунок приведення нормального розподілу до такого, у якого  $M(X)=0$  і  $\sigma=1$ . Нормальний розподіл з нульовим математичним очікуванням і одиничним стандартом називається *стандартним*, а його функція розподілу для результату вимірювання і випадкової похибки визначається відповідно за рівняннями:

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (1.54)$$

$$F_0(\Delta^0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\Delta^0} e^{-\frac{(\Delta^0)^2}{2}} d\Delta^0. \quad (1.55)$$

Графік цієї функції представлено на рис 1.9. Для скорочення таблиць визначення  $F_0(x)$  Лапласом була запропонована функція  $\Phi(x) = [F_0(x) - 0,5]$ , яка є непарною, тобто  $\Phi(-x) = -\Phi(x)$ . Завдяки цьому було складено таблицю значень функції  $\Phi(x)$  лише для  $x \geq 0$ .

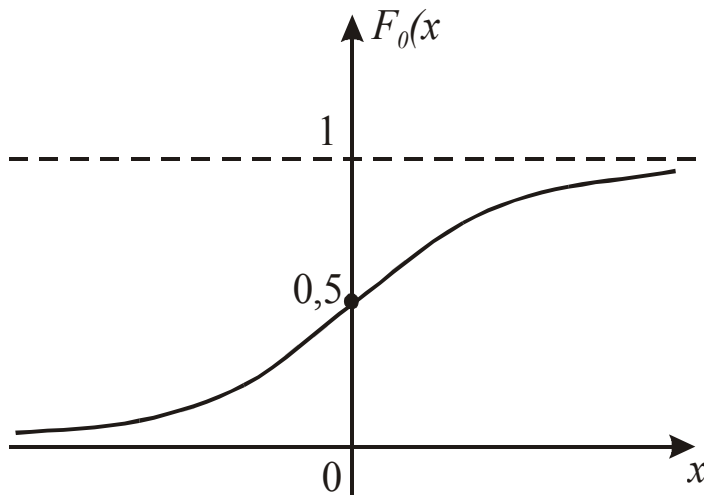


Рис. 1.9. Графік стандартної функції розподілу результату вимірювання.

такої величини справедлива рівність:

$$P\{x_1 \leq X_0 \leq x_2\} = \Phi(x_2) - \Phi(x_1) \quad (1.57)$$

Функція  $\Phi(x)$  називається функцією Лапласа, яку можна записати у вигляді:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (1.56)$$

Таблиця значень для цієї функції представлена у табл.1.1. Випадкова величина  $X_0$ , що має стандартний розподіл, називається нормованою. Для

Таблиця 1.1.

Значення функції розподілу Лапласа  $\Phi(x)$

$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	1,20	0,3849	2,40	0,4918
0,10	0,0398	1,30	0,4032	2,50	0,4938
0,20	0,0793	1,40	0,4192	2,60	0,4953
0,30	0,1179	1,50	0,4332	2,70	0,4965
0,40	0,1554	1,60	0,4452	2,80	0,4974
0,50	0,1915	1,70	0,4554	2,90	0,4981
0,60	0,2257	1,80	0,4641	3,00	0,49865
0,70	0,2580	1,90	0,4713	3,50	0,49977
0,80	0,2881	2,00	0,4772	3,80	0,499928
0,90	0,3159	2,10	0,4821	4,00	0,499968
1,00	0,3413	2,20	0,4861	4,50	0,499998
1,10	0,3643	2,30	0,4893	5,00	0,499999

Якщо будь-яке із значень  $x_1$  чи  $x_2$  негативне, то для нього функцію Лапласа обчислюють з урахуванням властивості її непарності.

*Приклад.* Знайти ймовірність того, що нормована величина прийме значення поміж  $x_1 = -1$  і  $x_2 = 0,5$ .

Згідно формули (1.57)  $P\{-1 \leq X_0 \leq 0,5\} = \Phi(0,5) - \Phi(-1)$ . По

табл. 1.1 знаходимо, що  $\Phi(0,5) = 0,1915$ , а  $\Phi(-1) = -\Phi(1) = -0,3413$ . Отже, остаточно отримаємо:  $P\{-1 \leq X_0 \leq 0,5\} = 0,1915 + 0,3413 = 0,5328$ .

Операція нормування випадкової величини (результату чи похибки вимірювання) виконується рівняннями:

$$X_0 = [X - M(X)] / \sigma \quad (1.58)$$

$$\Delta^0 = \Delta / \sigma \quad (1.59)$$

Для отриманої, таким чином, після нормування випадкової величини будуть справедливі усі знайдені вище формули, тобто ймовірність попадання результату вимірювання в інтервал  $(x_1; x_2)$  у відповідності з (1.57) буде мати вигляд:

$$P\{x_1 \leq X \leq x_2\} = \Phi\left[\frac{x_2 - M(X)}{\sigma}\right] - \Phi\left[\frac{x_1 - M(X)}{\sigma}\right]. \quad (1.60)$$

У разі симетричних відхилень  $x_1$  і  $x_2$  відносно математичного очікування буде справедливою рівність:  $\Delta^0 = |X - M(X)|$ . При цьому ймовірність того, що результати вимірювання не вийдуть за межі якого-небудь інтервалу похибки  $\varepsilon$  буде визначатись рівнянням:

$$P\{\Delta^0 \leq \varepsilon\} = P\left\{\Delta_0^0 \leq \frac{\varepsilon}{\sigma}\right\} = 2\Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right). \quad (1.61)$$

Такий інтервал  $\varepsilon$  прийнято називати *довірчим*, а відповідну йому ймовірність появи випадкової похибки – *довірчою ймовірністю*. Довірчий інтервал, що характеризує ступінь відтвореності результатів вимірювання, може мати різні значення і більшому довірчому інтервалу відповідає більша довірна ймовірність. Довірчий інтервал  $\varepsilon$  (гранична випадкова похибка, що характеризує довірчий інтервал) як правило виражають відносною величиною  $t = \varepsilon/\sigma$ . Виходячи з цього рівняння (1.61) для довірчої ймовірності прийме наступний вигляд:

$$P\{\Delta^0 \leq t\sigma\} = 2\Phi(t). \quad (1.62)$$

Аналіз виразу (1.62) свідчить, що ймовірність  $P\{\Delta^0 \leq t\sigma\}$  не змінюється у разі постійності  $t$ , яку б випадкову величину з нормальним

розподілом ми не розглядали. Це дозволяє зробити такий висновок: ймовірність, що випадкова похибка з нормальним розподілом не перевищить деякої межі, залежить тільки від того, у скільки разів ця межа більше стандарту випадкової похибки. Від цього до речі і стає зрозумілим назва “стандарт” – величина, з якою порівнюються усі відхилення.

Задаючись різними значеннями  $t$  можна визначити ймовірність появи випадкових похибок для конкретного довірчого інтервалу. Для деяких значень  $t$  корисно пам’ятати наступні значення  $\Phi(t)$ , тобто

$$P\{\Delta^0 \leq \sigma\} = 2\Phi(1) = 0,6826;$$

$$P\{\Delta^0 \leq 2\sigma\} = 2\Phi(2) = 0,9544;$$

$$P\{\Delta^0 \leq 3\sigma\} = 2\Phi(3) = 0,9973.$$

Отримані значення дозволяють зробити наступні для запам’ятовування висновки: ймовірність стандартного відхилення дорівнює 68% (правило сигми); ймовірність подвоєного стандарту дорівнює 95% (правило двох сигм); ймовірність потроєного стандарту складає 100% (правило трьох сигм). Останнє положення свідчить, що похибки більш ніж потроєний стандарт, практично неможливі. По довірчій ймовірності  $\Phi(t)$  можна визначати і значення граничної похибки вимірювання. Досвід засвідчив, що для практичних цілей цілком достатня величина  $\Phi(t) = 0,9 \div 0,95$ .

*Приклад.* За результатами відомого числа вимірювань концентрації метану  $x_i$  у танкових газах виробництва аміаку отримані відповідно значення  $\bar{x} = 1,27\%об.$  і  $s = 0,025 \%об.$  Визначити ймовірність того, що випадкова похибка  $\Delta^0$  окремого вимірювання  $X$  не вийде за межі обраного довірчого інтервалу  $\varepsilon = \pm 0,01\% об.$ , тобто має місце нерівність  $1,26 < X < 1,28$ .

Знаходимо відносну величину  $t = 0,01/0,025 = 0,4$ . За формулою (1.62) довірча ймовірність  $P\{\Delta^0 \leq 0,01\} = 2\Phi(0,4) = 0,3108$ . Отже, біля 30% загального числа вимірювань будуть мати випадкову похибку  $\Delta^0$ , що не перевищить  $\pm 0,01\% об.$

*Приклад.* Визначити границі довірчого інтервалу похибки вимірювання температури  $T$ , розподіленою за нормальним законом. З ймовірністю 0,95 за великої кількості вимірювань було встановлені наступні оцінки:  $\bar{x} = 145,6^0C$ , а  $s = 0,9^0C$ .

Для ймовірності  $(0,95/2)$  згідно рівняння (1.62) величина  $t = 1,96$ . Тоді ширина довірчого інтервалу  $\varepsilon = 1,96 \cdot 0,9 = 1,764^0\text{C}$ , а загальна границя довірчого інтервалу буде мати вигляд:  $T_{0,95} = [(\bar{x} - \varepsilon); (\bar{x} + \varepsilon)] = (143,836; 147,364)^0\text{C}$ .

Розглянутий вище закон нормального розподілу справедливий за достатньо великої (понад 20) кількості спостережень однієї і тієї ж фізичної величини. Проте на практиці найчастіше доводиться мати справу з обробкою обмеженої кількості (менше 20) спостережень. За таких умов закон розподілу випадкових похибок відрізняється від нормального і суттєво залежить від числа спостережень. Дослідження питання про реальні закони розподілу випадкових похибок показали, що за малої кількості вимірювань поведінка випадкових похибок більш точно виражається законом розподілу Стюдента.

**Закон розподілу Стюдента** ( $t_s$  – розподіл) встановлює, що розподіл щільності ймовірності за малого числа вимірювань залежить не тільки від значення випадкової похибки  $\Delta^0$ , але і від числа  $n$  спостережень та визначається формулою:

$$f(\Delta^0, n) = \frac{\Gamma(n/2)}{\sqrt{\pi} \sqrt{n-1} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \left(1 + \frac{t_s^2}{n-1}\right)^{n/2}}, \quad (1.63)$$

де  $f(\Delta^0, n)$  – щільність ймовірності випадкової похибки при заданій кількості вимірювань  $n$ ;  $\Gamma(n)$  – гама-функція, значення якої залежить від числа вимірювань  $n$  та така, що володіє рекурентною властивістю  $\Gamma(n+1) = n\Gamma(n)$ ;  $t_s = \Delta^0/s_x$  – значення випадкової похибки, що виражена у долях середньоквадратичного відхилення  $s_x$  (коєфіцієнт Стюдента).

Графічне зображення кривих розподілу випадкових похибок  $t_s$  за законом Стюдента для різної кількості вимірювань наведено на рис. 1.10.

Крива розподілу Стюдента нагадує за формою щільність нормального розподілу, але при  $t \rightarrow \pm\infty$  значно повільніше наближується до осі абсцис. При  $n \rightarrow \infty$  (практично при  $n \geq 20$ ) дисперсія  $s^2 \rightarrow \sigma^2$ , тому розподіл Стюдента переходить у нормальний розподіл, тобто випадкова величина  $t_s$  становить собою величину  $t$ . За малої ж кільк-

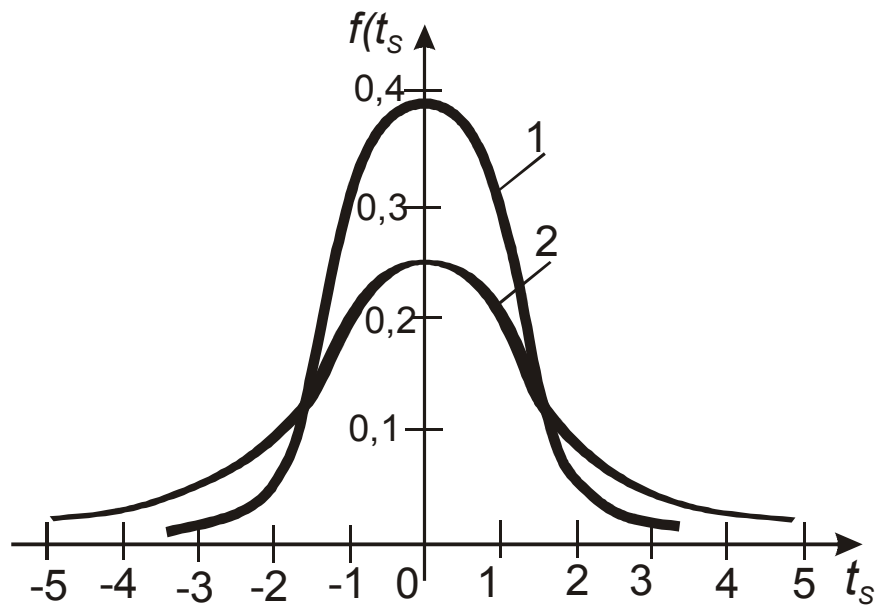


Рис. 1.10. Криві розподілу Стюдента для різних значень  $n$ : 1 -  $n=\infty$ ; 2 -  $n=2$ .

кості  $n$  розподіл Стюдента суттєво відрізняється від нормального, внаслідок чого його  $t_s$  – розподіл відіграє особливу роль у статистиці малих вибірок. У табл. 1.2 наведені значення коефіцієнтів розподілу Стюдента за різних кількостей спостережень  $n$  і значень довірчих ймовірностей  $P$ .

Таблиця 1.2.  
Значення коефіцієнту розподілу Стюдента  $t_s$

n	Довірча ймовірність $P$				
	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,88	636,62
3	2,92	4,30	6,97	9,93	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,03	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32



Продовження таблиці 1.2.

n	Довірча ймовірність P				
	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
$\infty$	1,65	1,98	2,33	2,58	3,29

*Приклад.* Для  $n = 6$  зважувань злитку з дорогоцінного металу були отримані такі результати ( $z$ ): 72,361; 72,357; 72,352; 72,346; 72,344; 72,340. визначити довірчий інтервал  $\Delta^0$  для середнього значення при довірчій ймовірності  $P = 0,99$ .

Середньоарифметичне значення  $\bar{x}$  за формулою (1.37) дорівнює 72,35  $z$ . По табл. 1.2 для  $n = 6$  і  $P = 0,99$  значення коефіцієнту  $t_s = 4,03$ . По відхиленням від середньоарифметичного значення результатів зважування знаходимо середньоквадратичне відхилення за формулою (1.42):

$$s = \sqrt{326/5} \approx 8,06 \text{ мг.}$$

Середньоквадратичне відхилення середнього значення за формулою (1.44) складе:

$$s_x = 8,06 / \sqrt{6} = 3,29 \text{ мг.}$$

Довірчий інтервал  $\Delta^0$  для середнього  $\bar{x}$  буде дорівнювати:

$$\Delta^0 = t_s s_x = \pm(4,03 \cdot 3,29) \approx \pm 13 \text{ мг.}$$

Отже, маса злитку складе  $(72,35 \pm 0,013) z$ .

Однією з найважливіших умов правильного застосування статистичних оцінок є відсутність грубих помилок при спостереженнях. Тому всі грубі помилки (похибки) повинні бути виявлені і виключені з розгляду на самому початку обробки результатів спостережень (вимірювань). Єдиним достатньо надійним способом виявлення грубих помилок є ретельний аналіз умов самих вимірювань. Проте, на практиці не завжди вдається провести такий аналіз, внаслідок чого дослідник має справу з остаточним цифровим матеріалом, у якому

окремі значення фізичних величин викликають сумнів лише своїм суттєвим відхиленням від інших. Науково-обґрунтований аналіз вибірки спостережень може бути проведений тільки статистичними методами, за умови, якщо результати спостережень можна віднести до нормального розподілу.

**Виключення грубих похибок** (помилки) здійснюється найчастіше в практичних умовах за допомогою  $\tau$  - критерію. Це викликано тим, що в процесі обробки результатів вибірки невідомі як правило обидва генеральних параметра розподілу  $M(X)$  і  $\sigma$ . Одночасна заміна цих параметрів вибірковими  $\bar{x}$  і  $s$  змушує відмовитись від використання довірчих границь (квантилів) нормального розподілу. За таких обставин виключення грубих помилок виконується із застосуванням  $\tau$  - розподілу.

Якщо  $x$  – крайній елемент вибірки, по якій обчислюють  $\bar{x}$  і  $s$ , то випадкова величина  $\tau$  (максимальне відносне відхилення) визначиться наступним відношенням:

$$\tau = |x - \bar{x}| / s. \quad (1.64)$$

Максимальне відносне відхилення  $\tau$  має спеціальний розподіл, що залежить тільки від об'єму вибірки  $n$  рівня значимості  $\alpha = 1 - P$  ( $P$  – довірна ймовірність). В табл. 1.3 наведені квантилі цього розподілу при різних  $n$ .

Таблиця 1.3.

Квантилі розподілу максимального відносного відхилення  $\tau_\alpha$ .

Число спостережень	Рівень значимості $\alpha$				
	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1
3	1,414	1,414	1,414	1,414	1,412
4	1,732	1,730	1,728	1,710	1,689
5	1,994	1,982	1,972	1,917	1,869
6	2,212	2,183	2,161	2,067	1,996
7	2,395	2,344	2,310	2,182	2,093
8	2,547	2,476	2,431	2,273	2,172
9	2,677	2,586	2,532	2,349	2,238
10	2,788	2,680	2,616	2,414	2,294

Продовження таблиці 1.3.

Число спостережень	Рівень значимості $\alpha$				
	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1
11	2,884	2,760	2,689	2,470	2,343
12	2,969	2,830	2,753	2,519	2,387
13	3,044	2,892	2,809	2,563	2,426
14	3,111	2,947	2,859	2,602	2,461
15	3,171	2,997	2,905	2,638	2,494
16	3,225	3,042	2,946	2,670	2,523
17	3,274	3,083	2,983	2,701	2,551
18	3,320	3,120	3,017	2,728	2,577
19	3,361	3,155	3,049	2,754	2,601
20	3,400	3,187	3,079	2,779	2,623
21	3,436	3,217	3,106	2,801	2,644
22	3,469	3,245	3,132	2,823	2,664
23	3,500	3,271	3,158	2,843	2,683
24	3,529	3,295	3,179	2,862	2,701
25	3,556	3,318	3,200	2,880	2,718
26	3,582	3,340	3,220	2,897	2,734
27	3,606	3,360	3,239	2,913	2,749
28	3,629	3,380	3,258	2,929	2,764
29	3,651	3,399	3,275	2,944	2,778
30	3,672	3,416	3,291	2,958	2,792

Згідно  $\tau$  - критерію крайнє значення  $x$  відкидається як грубо помилкове (на рівні значущості  $\alpha$ ), якщо має місце нерівність:

$$\tau = |x - \bar{x}| / s > \tau_{\alpha}. \quad (1.65)$$

*Приклад.* Десятикратне вимірювання сили струму дало наступні значення ( $A$ ): 10,07; 10,08; 10,10; 10,12; 10,13; 10,13; 10,16; 10,17; 10,20; 10,40. Результат 10,40А суттєво відрізняється від інших. Необхідно перевірити чи є цей результат грубою помилкою.

Обчисленнями за формулою (1.37) і (1.42) встановлюються параметри  $\bar{x} = 10,16A$  і  $s = 0,094A$ , значення яких визначають  $\tau = (10,40 - 10,16)/s = 2,55$ . Приймається  $\alpha = 0,01$  і по табл. 1.3 знаходимо  $\tau_{\alpha} = 2,62$ . Перевірка нерівності (1.65) свідчить, що  $\tau = 2,55 < 2,62 = \tau_{\alpha}$ , тобто результат вимірювання з обраним рівнем значущості не є грубою помилкою.

*Приклад.* При восьми вимірюваннях концентрації водню у циркуляційному газі відділення синтезу аміаку за короткий термін отримані наступні оцінки:  $\bar{x} = 62\%$ об., а  $s = 1,3\%$ об. Мінімальне значення з отриманих результатів, що викликало сумнів, склало  $58,6\%$ об.

Для перевірки цього результату розраховується відносне відхилення  $\tau = (62 - 58,6) / 1,3 = 2,62$ . По табл. 1.3 для обраного рівня  $\alpha = 0,05$  і  $n = 8$  величина  $\tau_\alpha = 2,27$ . Отже, на рівні значущості  $0,05$  значення  $58,6\%$ об. слід вважати грубим, виключивши його з подальших розрахунків та знову винайшовши  $\bar{x}$  і  $s$ .

Всі попередні оцінки суттєво спираються на нормальність експериментального розподілу. Тому застосування багатьох оцінок припустимо лише у разі впевненості, що експериментальний розподіл близький до нормального. Гіпотеза нормальності перевіряється безпосередньо по спостереженням (по виборці) з використанням так званих критеріїв узгодження.

**Критерії узгодження** передбачають порівняння окремих параметрів теоретичного розподілу та їх оцінок, отриманих з вибірки результатів спостережень. Існують декілька критеріїв узгодження, застосування яких в основному обумовлюється об'ємом вибірки.

*Критерій узгодження за асиметрією і ексцесом розподілу* є велими наближеними. Застосовується лише за невеликого об'єму вибірки ( $n \leq 20$ ). Згідно цього критерію розподіл, що спостерігається, можна вважати нормальним, якщо вибіркові асиметрія і ексцес задовольняють нерівностям:

$$|\bar{\gamma}_a| \leq 3\sqrt{D(\bar{\gamma}_a)}, \quad |\bar{\gamma}_e| \leq 5\sqrt{D(\bar{\gamma}_e)}, \quad (1.66)$$

При цьому  $\bar{\gamma}_a$  і  $\bar{\gamma}_e$  визначаються за рівняннями (1.45; 1.47) чи (1.46; 1.48), а формули для розрахунку дисперсій цих величин мають вигляд:

$$D(\bar{\gamma}_a) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}, \quad D(\bar{\gamma}_e) = \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \quad (1.67)$$

Дисперсії  $D(\bar{\gamma}_a)$  і  $D(\bar{\gamma}_e)$  дозволяють оцінювати, значимо чи ні вибіркові асиметрія і ексцес відхиляються від своїх математичних очікувань, тобто від нуля.

*Приклад.* За результатами спостережень в процесі вимірювання тиску отримана вибірка об'єму  $n = 15$ , значення для якої зведені до перших двох стовпчиків табл. 1.4.

Таблиця 1.4.

Результати спостережень і розрахунків.

Номер спостереження, $i$	Значення тиску, кПа	Розрахункові показники			
		$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(x_i - \bar{x})^3$	$(x_i - \bar{x})^4$
1	15,61	-9,798	96,00	-940,61	9216,15
2	20,71	-4,698	22,07	-103,69	487,14
3	21,68	-3,728	13,89	-51,81	193,15
4	22,28	-3,128	9,78	-30,60	95,73
5	23,22	-2,188	4,78	-10,47	22,92
6	24,14	-1,268	1,61	-2,04	2,58
7	24,59	-0,818	0,67	-0,55	0,45
8	26,18	0,772	0,59	0,46	0,35
9	26,23	0,822	0,67	0,55	0,45
10	27,59	2,182	4,76	10,38	22,66
11	27,88	2,472	6,11	15,10	37,34
12	28,74	3,332	11,10	36,99	123,25
13	29,34	3,932	15,46	60,79	239,03
14	30,86	5,452	29,72	162,05	883,53
15	32,08	6,672	44,52	297,00	1981,63
Сума	381,13	-	261,73	-556,45	13306,36

Використовуючи формули (1.37) і (1.42) та підсумкові значення другого і четвертого стовпчиків табл. 1.4 обчислюються параметри  $\bar{x}$  і  $s$ :

$$\bar{x} = 381,13/15 = 25,408 \text{ кПа}, \quad s = \sqrt{261,73/14} = 4,324 \text{ кПа}.$$

Підсумкові значення п'ятого і шостого стовпчиків табл. 1.4 дозволяють виконати розрахунки оцінок  $\bar{\gamma}_a$  і  $\bar{\gamma}_e$ :

$$\bar{\gamma}_a = \frac{1}{ns^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 = \frac{1}{15 \cdot 4,324^3} (-556,45) = -0,458,$$

$$\bar{\gamma}_e = \frac{1}{ns^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 - 3 = \frac{1}{15 \cdot 4,324^4} \cdot 13306,36 - 3 = -0,462.$$

За формулами (1.67) визначаються дисперсії  $D(\bar{y}_a)$  і  $D(\bar{y}_e)$ :

$$D(\bar{y}_a) = \frac{6 \cdot 14}{16 \cdot 18} = 0,292, \quad D(\bar{y}_e) = \frac{24 \cdot 15 \cdot 13 \cdot 12}{16^2 \cdot 18 \cdot 20} = 0,355.$$

Перевірка умов нерівностей (1.66) свідчить, що  $|\bar{y}_a| = 0,458 \leq 3\sqrt{0,292} = 1,62$  і  $|\bar{y}_e| = 0,462 \leq 5\sqrt{0,355} = 2,98$ , тобто результати спостережень відповідають нормальному закону розподілу.

*Критерій узгодження графічний* зручний своєю наочністю, проте не може бути достатньо точним за відсутності надійної кількісної оцінки. Він передбачає побудову вибіркової (емпіричної) і теоретичної (нормальної) функцій щільності розподілу. Розбіжність між цими функціями щільності оцінюється спостерігачем по графіку і якщо вона невелика, то гіпотеза про нормальність емпіричного розподілу приймається. Проте, якщо кількість спостережень  $n < 20$ , то розрахунки параметрів і значень функцій щільності розподілу достатньо громіздкі. Тому при побудові графіків щільності застосовується метод групування результатів спостережень, що передбачає розділення низки експериментальних значень від  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$  на інтервали. Кількість інтервалів  $K$  найчастіше визначається за формулою Старджеса:

$$K = 1 + 3,3 \cdot \lg n. \quad (1.68)$$

Визначення ширини інтервалу  $h$  здійснюється за рівнянням:

$$h = (x_{\max} - x_{\min})/K. \quad (1.69)$$

Значення  $h$ , що розраховане за рівнянням (1.69), округляється до величини кратної ціні поділки вимірювального приладу, після чого встановлюється середина інтервалу. Результати групування зводять до таблиці. До кожного, отриманого таким чином інтервалу  $K$ , потрапляє якась кількість елементів вибірки, число яких позначають через  $n_i$  (абсолютна частота). Отже, замість попередньої вибірки буде розглядатись сукупність інтервалів. Обираючи у якості представника інтервалу його середину, згрупована вибірка  $(x_1, x_2, \dots, x_K)$  має об'єм значно менший ніж первісний, тобто у новій вибірці стають непомітними елементи попередньої вибірки, що відрізняються мен-

ше ніж на  $h$ . При цьому всі вони замінюються серединою відповідного інтервалу  $x_k$ . Розрахунки  $\bar{x}$  і  $s$  за такого розділення виконуються за рівняннями:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i x_i; \quad (1.70)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2 - h^2 / 12}, \quad (1.71)$$

де  $h^2/12$  – поправка Шепарда викликана зміщенням дисперсії при групуванні, причиною якої є перевищення довжини інтервалу над точністю отриманих даних.

Для зручності розрахунків параметру  $s$  формула (1.71), враховуючі властивості математичного очікування, може бути перетвореною до вигляду:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^k n_i x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^k n_i x_i \right)^2}{n} \right] - \frac{h^2}{12}}. \quad (1.72)$$

Нижче розглянуто застосування методу групування для попереднього прикладу в процесі перевірки гіпотези про нормальність розподілу за допомогою графічного критерію узгодження.

*Приклад.* Вихідні дані наведені у табл. 1.4.

За формулою (1.68) і (1.69) кількість і ширина інтервалів будуть становити:

$$K = 1 + 3,3 \lg 15 = 4,88 \approx 5 ;$$

$$h = (32,08 - 15,61) / 5 = 3,29 \text{ кПа} .$$

З урахуванням встановлених границь інтервалів попередня табл. 1.4 вихідних даних прийме вигляд у відповідності з табл. 1.5.

Для визначення значень теоретичної функції щільності розподілу будується табл. 1.6. Використовуючи рівняння (1.70) і (1.72) та підсумкові значення третього і четвертого стовпчиків табл. 1.6 обчислюються  $\bar{x}$  і  $s$ :

$$\bar{x} = 380,56/15 = 25,37 \text{ кПа};$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{14} \left( 9869,12 - \frac{380,56^2}{15} \right) - 3,29^2 / 12} = 3,79 \text{ кПа}.$$

Таблиця 1.5.

Результати застосування методу групування  
для експериментальних даних табл. 1.4.

Номер інтервалу $K$	Границя інтервалу ( $x_K^H - x_K^B$ )*, кПа	Абсолютна частота $n_i$	Відносна частота $f^*(x_K) = n_i/n$	Середина інтервалу $x_K$ , кПа
1	15,61 ÷ 18,9	1	0,066	17,25
2	18,9 ÷ 22,19	2	0,134	20,54
3	22,19 ÷ 25,48	4	0,266	28,83
4	25,48 ÷ 28,77	5	0,334	27,13
5	28,77 ÷ 32,06	3	0,2	30,42
Сума	$x_K^H, x_K^B$ – відповідно нижня і верхня границі	15	1,00	-

Визначаються значення теоретичної функції щільності розподілу з встановленими оцінками  $\bar{x}$  і  $s$  за формулою (1.60), значення якої для всіх інтервалів зведені до табл. 1.6. Для першого інтервалу значення  $f(x_1)$  буде становити:

$$\begin{aligned} f(x_1) &= P\{15,61 \leq x_1 \leq 18,9\} = \Phi\left(\frac{18,9 - 25,37}{3,79}\right) - \Phi\left(\frac{15,61 - 25,37}{3,79}\right) = \\ &= \Phi(-1,707) - \Phi(-2,575) = -0,4561 + 0,495 = 0,0389. \end{aligned}$$

За результатами, що наведені у табл. 1.5 і 1.6, будується графік для теоретичної  $f(x_K)$  і емпіричної  $f(x_K)$  функцій щільності (рис. 1.11). Отриманий ступінчастий графік у вигляді прямокутників називають *гістограмою розподілу* результатів вимірювань, а крива, проведена через середини відрізків прямокутників – *полігоном розподілу*. Сукупність точок середини відрізків прямокутників називається *огівною випадкової величини*.



Таблиця 1.6.

Результати розрахунків значень функції щільності розподілу.

Номер інтервалу $K$	Середина інтервалу $x_K, кПа$	Добутки		Функція щільності теоретична $f(x_K)$
		$n_i x_K$	$n_i x_K^2$	
1	17,25	17,25	297,56	0,0389
2	20,54	41,08	843,78	0,1566
3	23,83	95,32	2271,47	0,3115
4	27,13	135,65	3680,18	0,3040
5	30,42	91,26	2776,13	0,1582
Сума	-	380,56	9869,12	—

Порівняння кривих розподілу у відповідності з рис. 1.11 свідчить, що експериментальний розподіл достатньо близько збігається з нормальним (теоретичним), тобто основна гіпотеза виконується.

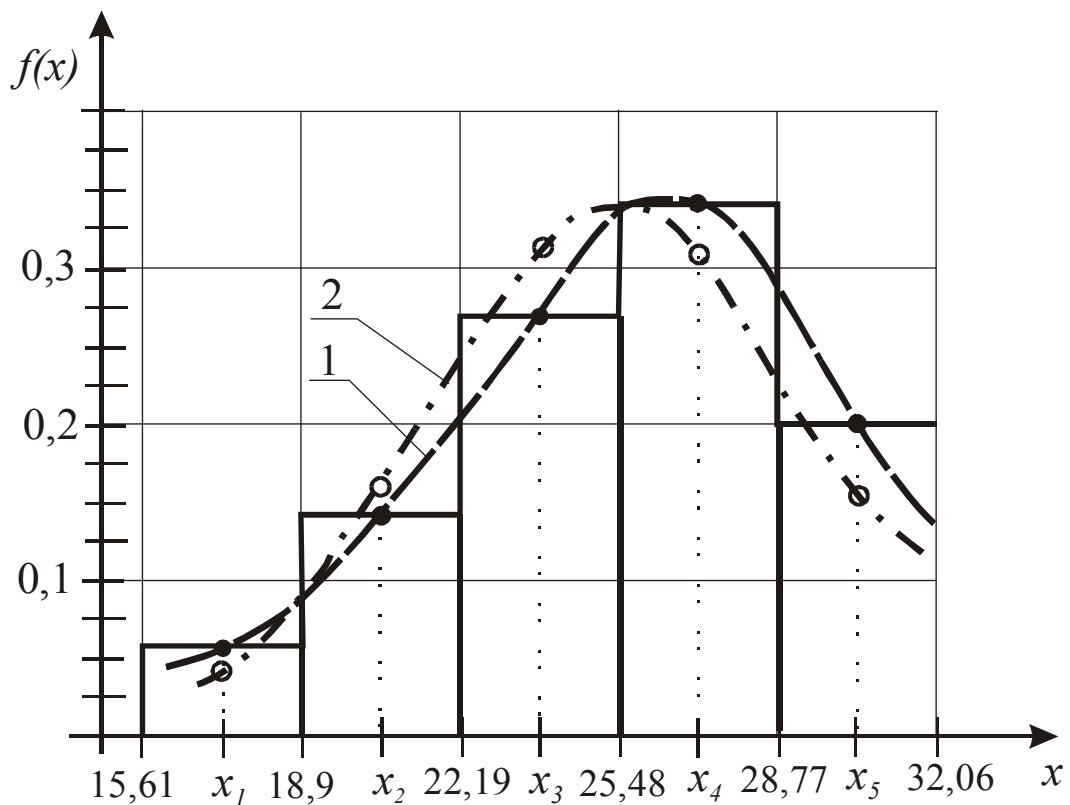


Рис. 1.11. Криві щільності розподілу результатів вимірювання: 1 - теоретична; 2 - емпірична.

Критерій узгодження Пірсона ( $\chi^2$  – критерій) зв'язаний з методом групування результатів спостережень та є найбільш розповсю-

дженням і надійним критерієм узгодження. Застосовується за великого числа спостережень ( $n > 50$ ). В процесі перевірки гіпотези про нормальність характеру розподілу обчислюються теоретичні значення для ймовірностей  $f(x_k)$  попадання спостереження в  $i$ -й інтервал, для чого використовується формула (1.60). Після того як знайдене  $f(x_k)$  підраховується найімовірніше число попадання результатів вимірювань в  $i$ -й інтервал –  $nf(x_k)$ . Далі, якщо  $nf(x_k) \leq 5$  для деяких інтервалів, то слід об'єднати інтервал, у якому спостерігається ця нерівність, з одним чи декількома сусідніми інтервалами таким чином, щоб у новому інтервалі (сумарному) виконувалась нерівність  $nf(x_k) \geq 5$ . В процесі порівняння емпіричного розподілу з нормальним (теоретичним) обчислюється величина  $\chi^2$  за формулою:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{[n_i - nf(x_k)]^2}{nf(x_k)}. \quad (1.72)$$

Обравши рівень значимості  $\alpha$  і знайшовши по табл. 1.7 розподілу Пірсона для числа ступенів вільності  $f = k - 3$  значення  $\chi^2_{1-\alpha}$ , необхідно гіпотезу нормальності для емпіричного розподілу відхилити за умови  $\chi^2 \geq \chi^2_{1-\alpha}$  і вважати правильною при  $\chi^2 \leq \chi^2_{1-\alpha}$ .

Таблиця 1.7.

Квантилі розподілу Пірсона  $\chi^2_{1-\alpha}$ .

Число ступенів вільності $f$	Рівень значимості $\alpha$							
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30
1	0,00016	0,0006	0,0039	0,016	0,064	0,148	0,455	1,07
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,66
4	0,30	0,43	0,71	1,06	1,65	2,19	3,36	4,9
5	0,55	0,75	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,1
6	0,87	1,13	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35	7,2
7	1,24	1,56	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,4
8	1,65	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,5
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8
11	3,1	3,6	4,6	5,6	7,0	8,1	10,3	12,9
12	3,6	4,2	5,2	6,3	7,8	9,0	11,3	14,0

## Продовження таблиці 1.7.

Число ступенів вільності $f$	Рівень значимості $\alpha$							
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30
13	4,1	4,8	5,9	7,0	8,6	9,9	12,3	15,1
14	4,7	5,4	6,6	7,8	9,5	10,8	13,3	16,2
15	5,2	6,0	7,3	8,5	10,3	11,7	14,3	17,3
16	5,8	6,6	8,0	9,3	11,2	12,6	15,3	18,4
17	6,4	7,3	8,7	10,1	12,0	13,5	16,3	19,5
18	7,0	7,9	9,4	10,9	12,9	14,4	17,3	20,6
19	7,6	8,6	10,1	11,7	13,7	15,4	18,3	21,7
20	8,3	9,2	10,9	12,4	14,6	16,3	19,3	22,8
21	8,9	9,9	11,6	13,2	15,4	17,2	20,3	23,9
22	9,5	10,6	12,3	14,0	16,3	18,1	21,3	24,9
23	10,2	11,3	13,1	14,8	17,2	19,0	22,3	26,0
24	10,9	12,0	13,8	15,7	18,1	19,9	23,3	27,1
25	11,5	12,7	14,8	16,5	18,9	20,9	24,3	28,2
26	12,2	13,4	15,4	17,3	19,8	21,8	25,3	29,3
27	12,9	14,1	16,2	18,1	20,7	22,7	26,3	30,3
28	13,6	14,8	16,9	18,9	21,6	23,6	27,3	31,4
29	14,3	15,6	17,7	19,8	22,4	24,6	28,3	32,5
30	15,0	16,3	18,5	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5
Число ступенів вільності $f$	Рівень значимості $\alpha$							
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
1	1,64	2,7	3,8	5,4	6,6	7,9	9,5	10,8
2	3,22	4,6	6,0	7,8	9,2	10,6	12,4	13,8
3	4,64	6,3	7,8	9,8	11,3	12,8	14,8	16,3
4	6,0	7,8	9,5	11,7	13,3	14,9	16,9	18,5
5	7,3	9,2	11,1	13,4	15,1	16,3	18,9	20,5
6	8,6	10,6	12,6	15,0	16,8	18,6	20,7	22,5
7	9,8	12,0	14,1	16,6	18,5	20,3	22,6	24,3
8	11,0	13,4	15,5	18,2	20,1	21,9	24,3	26,1
9	12,2	14,7	16,9	19,7	21,7	23,6	26,1	27,9
10	13,4	16,0	18,3	21,2	23,2	25,2	27,7	29,6
11	14,6	17,3	19,7	22,6	24,7	26,8	29,4	31,3
12	15,8	18,5	21,0	24,1	26,2	28,3	31,0	32,9
13	17,0	19,8	22,4	25,5	27,7	29,8	32,5	34,5
14	18,2	21,1	23,7	26,9	29,1	31,3	34,0	36,1
15	19,3	22,3	25,0	28,3	30,6	32,8	35,5	37,7
16	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	34,3	37,0	39,2

Продовження таблиці 1.7.

Число ступенів вільності $f$	Рівень значимості $\alpha$							
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
17	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	35,7	38,5	40,8
18	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	37,2	40,0	42,3
19	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	38,6	41,5	43,8
20	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	40,0	43,0	45,3
21	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	41,4	44,5	46,8
22	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	42,8	46,0	48,3
23	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6	44,2	47,5	49,7
24	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	45,6	48,5	51,2
25	30,7	34,4	37,7	41,6	44,3	46,9	50,0	52,6
26	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	48,3	51,5	54,1
27	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	49,6	53,0	55,5
28	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	51,0	54,5	56,9
29	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6	52,3	56,0	58,3
30	36,3	40,3	43,8	48,0	50,9	53,7	57,5	59,7

*Приклад.* За результатами вимірювань концентрації аміаку у циркуляційному газі на дільниці вторинної конденсації агрегатів синтезу отримана вибірка з 200 значень, які були згруповані у 10 інтервалів. Середини інтервалів, число спостережень, потрапивши у кожний інтервал, і допоміжні розрахункові показники за розглянутою вище схемою, наведені у табл. 1.8.

За формулами (1.70) і (1.71) обчислюються параметри  $\bar{x}$  і  $s$ :

$$\bar{x} = 816/200 = 4,08 \text{ \%об};$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{199} \left[ 3341,6 - \frac{816^2}{200} \right] - \frac{0,2^2}{12}} = 0,25 \text{ \%об}.$$

Визначаються ймовірності  $f(x_k)$  і  $nf(x_k)$ . Для першого інтервалу  $f(x_1)$  і  $nf(x_1)$ , будуть становити:

$$\begin{aligned} f(x_1) &= P\{3,1 \leq x_1 \leq 3,3\} = \Phi\left(\frac{3,3 - 4,08}{0,25}\right) - \Phi\left(\frac{3,1 - 4,08}{0,25}\right) = \\ &= \Phi(-3,13) - \Phi(-3,92) = -0,4989 + 0,4999 = 0,001; \\ nf(x_1) &= 200 \cdot 0,001 = 0,2. \end{aligned}$$

Таблиця 1.8.

Результати спостережень і розрахунків при застосування критерію узгодження Пірсона.

Номер інтервалу $K$	Середина інтервалу $x_K$ , % об.	Абсолютна частота $n_i$	Добутки			Величина $[n_i - n f(x_K)] / n f(x_K)$
			$n_i x_K$	$n_i x_K^2$	$n f(x_K)$	
1	3,2	1	3,2	10,24	0,2	} 0,65
2	3,4	5	17,0	57,80	1,9	
3	3,6	4	14,4	51,84	10,8	
4	3,8	18	68,4	259,92	34,3	7,75
5	4,0	86	344,0	1376,0	59,2	12,13
6	4,2	62	260,4	1093,6	55,7	0,71
7	4,4	14	61,6	271,04	28,6	7,45
8	4,6	6	27,6	126,96	8,0	} 0,05
9	4,8	3	14,4	69,12	1,2	
10	5,0	1	5,0	25,0	0,1	
Сума	—	200	816	3341,6	—	$\chi^2 = 28,74$

Аналогічно визначаються ці ймовірності для інших інтервалів, результати розрахунків яких занесені до табл. 1.8. У зв'язку з тим, що для перших і для останніх двох інтервалів добуток  $n f(x_K) \leq 5$ , то перші і останні три інтервали відповідно об'єднуються. Знаходиться значення величини  $[n_i - n f(x_K)]^2 / n f(x_K)$  для кожного з інтервалів, яке для перших трьох інтервалів складе:  $(10 - 12,9)^2 / 12,9 = 0,65$ . Обчисленні значення для кожного з інтервалів, а також величина  $\chi^2$  представлені в останньому стовпчику табл. 1.8.

Приймається рівень значимості  $\alpha = 0,05$  і по табл. 1.7 за числа ступенів вільності  $f = 6 - 3 = 3$  визначається  $\chi^2_{0,95} = 7,8$ . Отже,  $\chi^2 = 28,74 > 7,8 = \chi^2_{0,95}$ , тобто гіпотезу про нормальність експериментального розподілу слід відхилити.

*Складовий критерій* застосовується, якщо необхідно виконати перевірку гіпотези про нормальність розподілу за невеликої кількості результатів спостережень ( $50 > n > 15$ ). Перевірка здійснюється у два етапи. На першому етапі (*критерій 1*) перевіряється гіпотеза нормальності для середини результатів розподілу, а на другому – для “кінців” розподілу (*критерій 2*).

За *критерієм 1* визначається відношення  $\bar{d}$  у відповідності з

рівнянням:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot s^*}, \quad (1.73)$$

де  $s^*$  - зміщена оцінка середнього квадратичного відхилення, яка обчислюється за формулою

$$s^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (1.74)$$

За обраним рівнем значимості  $\alpha'$  по табл. 1.9 знаходяться квантилі розподілу  $d_{(1 - \alpha'/2)}$  і  $d_{\alpha'/2}$ . Розподіл результатів спостережень вважають нормальним, якщо виконується умова:

$$d_{(1 - \alpha'/2)} \leq \bar{d} \leq d_{\alpha'/2} \quad (1.75)$$

Таблиця 1.9.

Значення квантилів розподілу  $d_{(1 - \alpha'/2)}$  і  $d_{\alpha'/2}$ .

Кількість спостережень	При $\alpha'/2$ , %			При $(1 - \alpha'/2)$ , %		
	1	5	10	90	95	99
11	0,9359	0,9073	0,8899	0,7409	0,7153	0,6675
16	0,9137	0,8884	0,8733	0,7452	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,8631	0,7495	0,7304	0,6950
26	0,8901	0,8686	0,8570	0,7530	0,7360	0,7040
31	0,8827	0,8625	0,8511	0,7559	0,7404	0,7110
36	0,8769	0,8578	0,8468	0,7583	0,7440	0,7167
41	0,8722	0,8540	0,8436	0,7604	0,7470	0,7216
46	0,8682	0,8508	0,8409	0,7621	0,7496	0,7256
51	0,8648	0,8481	0,8385	0,7636	0,7518	0,7291

За критерієм 2 вважається, що результати спостережень мають приналежність до нормального розподілу, якщо не більше  $m$ -різниць  $|x_i - \bar{x}|$  перевищило значення  $Z_{P/2} \cdot s$ , де  $s$  – оцінка середньоквадратичного відхилення визначається за формулою (1.42), а  $Z_{P/2}$  – верхня квантиль розподілу нормованої функції Лапласа, що відповідає ймовірності  $P/2$  і встановлюється по табл. 1.1.

Значення  $P$  і  $m$  визначаються числом вимірювань  $n$  і рівнем значимості  $\alpha''$  у відповідності з табл. 1.10.

Таблиця 1.10.

Значення довірчої ймовірності  $P$  і кількості різниць  $m$ .

Кількість спостережень	Кількість різниць $m$	Рівень значимості $\alpha''$ , %		
		1	2	3
10	1	0,98	0,98	0,96
11 - 14	1	0,99	0,98	0,97
15 - 20	1	0,99	0,99	0,98
21 - 22	2	0,98	0,97	0,96
23	2	0,98	0,98	0,96
24 - 27	2	0,98	0,98	0,97
28 - 32	2	0,99	0,98	0,97
33 - 35	2	0,99	0,98	0,98
36 - 49	2	0,99	0,99	0,98

Для рівня значимості відмінного від передбаченого табл. 1.10 значення  $P$  визначається шляхом інтерполяції. До того ж, якщо для “критерію 1” обрано рівень значимості  $\alpha'$ , а для “критерію 2” – рівень значимості  $\alpha''$ , то сумарний рівень значення складового критерію повинен відповідати нерівності  $\alpha \leq \alpha' + \alpha''$ . Гіпотеза про нормальність розподілу приймається тільки за умови виконання обох критеріїв. При цьому, перевірку проводять як правило з рівнем значимості  $\alpha$  від 10 до 2%.

У випадку  $n \leq 15$  приналежність до нормального розподілу не перевіряється.

*Приклад.* Для результатів спостережень в процесі вимірювання тиску, представлених у табл. 1.4, необхідно перевірити гіпотезу про нормальність розподілу за складовим критерієм.

Раніше встановлені  $\bar{x} = 25,408$  кПа і  $s = 4,324$  кПа.

Обчислюється зміщена оцінка  $s^*$  за рівнянням (1.74):

$$s^* = \sqrt{261,73/15} = 4,177 \text{ кПа.}$$

Відношення  $\bar{d}$  за формулою (1.73) складе:

$$\bar{d} = 51,265/(15 \cdot 4,177) = 0,8182.$$

Приймається рівень значимості  $\alpha' = \alpha'' = 2\%$  і за табл. 1.9 для  $n = 15$  і  $\alpha' = 2\%$  встановлюється шляхом інтерполяції параметри  $d_{(1-\alpha'/2)} = 0,67982$  і  $d_{\alpha'/2} = 0,91814$ . Перевірка умови (1.75) свідчить, що для  $\bar{d} = 0,8182$  вона виконується.

За табл. 1.10 для  $\alpha'' = 2\%$ ,  $n = 15$  і  $m = 1$  встановлюється значення ймовірності  $P = 0,99$ . При цьому за табл. 1.1 для  $P/2 = 0,495$  верхня квантиль  $Z_{P/2} = 2,6$ , а добуток  $Z_{P/2} \cdot s = 2,6 \cdot 4,324 = 11,242$  кПа. Аналіз різниць  $|x_i - \bar{x}|$  табл. 1.4 свідчить, що жодне з цих значень не перевищує величини  $11,242$  кПа. Отже, за обома критеріями гіпотеза про нормальність емпіричного розподілу підтверджується на загальному рівні значимості  $\alpha = 4\%$ .

**Обчислення довірчих границь похибки результатів вимірювань** передбачає оцінку як невиключених систематичних складових так і випадкових похибок. Оцінка довірчих границь невиключеної систематичної похибки здійснюється за припущення, що розподіл її як випадкової величини, відповідає рівномірному. Невиключеними систематичними похибками можуть бути похибки методу, засобів вимірювання та інші, що обумовлені зовнішніми джерелами впливу. У якості границь складових невиключеної систематичної похибки приймаються межі припустимих основних і додаткових похибок засобів вимірювання, якщо випадкові складові похибки зневажливо малі. У випадку рівномірного розподілу невиключених систематичних складових ці границі без урахування знаку обчислюють за формулою:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (1.76)$$

де  $\Theta_i$  – границя  $i$ -ої невиключеної систематичної складової похибки;  $k$  – коефіцієнт, що визначається довірчою ймовірністю ( $k = 1,1$  за довірчої ймовірності  $P = 0,95$ ;  $k = 1,4$  для  $P = 0,99$ ).

У залежності від граничного відношення невиключених систематичних складових похибок до середнього квадратичного відхилення результату вимірювання нехтують чи невиключеними систематичними похибками. При цьому, якщо  $\Theta/s_x(\bar{x}) < 0,8$ , то нехтують невиключеними систематичними похибками і приймають, що границя похибки результату  $\Delta = \varepsilon$ . Проте, якщо  $\Theta/s_x(\bar{x}) > 8$ , то нехтують



ють випадковою похибкою і приймають, що границя похибки результату  $\Delta = \Theta$ . У випадку невиконання цих нерівностей границя похибки результату вимірювання визначається сумою випадкової і невиключених систематичних і похибок, що розглядаються як випадкові величини. Обчислення границі похибки результату вимірювання  $\Delta$  без урахування знаку здійснюється за формулою:

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma}, \quad (1.77)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що залежить від співвідношення випадкової і невиключеної систематичної похибок;  $S_{\Sigma}$  – оцінка підсумкового середнього квадратичного відхилення результату вимірювання.

Коефіцієнт  $K$  розраховується за формулою:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta}{s_x(\bar{x}) + \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Theta_i^3 / 3)}}. \quad (1.78)$$

Оцінка  $S_{\Sigma}$  обчислюється у відповідності з рівнянням:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Theta_i^3 / 3) + s_x^2(\bar{x})}. \quad (1.79)$$

*Приклад.* Виконані чотири вимірювання маси деякого зразку на терезах з межею припустимої похибки за паспортними даними  $\Delta_0 = \pm 0,002$  кг, результати яких наведені у табл. 1.11.

Таблиця 1.11.

Результати вимірювання маси зразку і розрахунків допоміжних величин.

Номер вимірювання	Значення маси $x_i, \text{кг}$	Різниці	
		$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	7,97	- 0,001	$1 \cdot 10^{-6}$
2	7,975	0,004	$16 \cdot 10^{-6}$
3	7,965	0,006	$36 \cdot 10^{-6}$
4	7,974	0,003	$9 \cdot 10^{-6}$
Сума	31,884	—	$62 \cdot 10^{-6}$

Визначається середнє значення і середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання за формулами (1.37) і (1.44):

$$\bar{x} = 31,884 / 4 = 7,971 \text{ кг};$$

$$s_x = \sqrt{62 \cdot 10^{-6} / (4 \cdot 3)} = \pm 0,0023 \text{ кг}.$$

Для довірчої ймовірності  $P = 0,95$  і  $n = 4$  по табл. 1.2 визначається  $t_S = 3,18$ . При цьому довірчі границі випадкової похибки результатів вимірювання будуть становити:

$$\varepsilon = t_S s_x(\bar{x}) = 3,18 \cdot 0,0023 = \pm 0,0073 \text{ кг}.$$

З урахуванням межі припустимої основної похибки  $\Delta_D$  загальна похибка результату вимірювання маси зразку складе:

$$\Delta = \sqrt{0,0073^2 + 0,002^2} = \pm 0,0076 \text{ кг}.$$

Отже, вимірювана маса зразку за довірчої ймовірності  $0,95$  буде дорівнювати:  $M = (7,971 \pm 0,0076) \text{ кг}$ .

Розглянуті вище розрахунки свідчать, що визначення похибки, тобто оцінки точності результату в процесі вимірювання тими чи іншими засобами вимірювання, вимагає знання межі їх припустимої основної похибки. Встановлення меж припустимих похибок показань засобів вимірювань регламентується стандартами по класам точності, які забезпечують в умовах виробництва досить швидко оцінку точності результатів вимірювання технологічних параметрів.

**Клас точності засобів вимірювань** – це узагальнююча метрологічна характеристика, що визначається межами припустимих основної і додаткової похибок, а також іншими властивостями засобів вимірювань, значення яких впливають на точність і встановлюються стандартами на окремі види засобів вимірювань. Клас точності хоча і характеризує сукупність метрологічних властивостей окремого засобу вимірювання, проте не визначає однозначно точність вимірювань, бо остання залежить також від методу вимірювань і умов їх виконання. З метою обмеження номенклатури засобів вимірювань по точності встановлюється для засобів вимірювання окремого виду обмежена кількість класів точності, яка визначається техніко-економічними обґрунтуваннями. Якщо у стандарті чи технічних

умовах, що регламентують технічні вимоги до засобів вимірювань окремого типу, встановлено декілька класів точності, то припускається присвоювати клас точності при випуску з виробництва, а також знижувати клас точності за результатами повірки у порядку передбаченому нормативною документацією.

Межі припустимих основної і додаткової похибок засобів вимірювань підлягають нормуванню і можуть бути виражені у формі абсолютної, відносної і наведеної похибки. Форма вираження межі припустимих похибок залежить від характеру зміни границь абсолютної похибки по діапазону вимірювання, а також від умов застосування і призначення засобів вимірювання окремого виду. При цьому, якщо границі абсолютної похибки у межах діапазону вимірювань можна вважати практично незмінними, то межі припустимих похибок виражають у формі наведеної похибки, а у протилежному випадку – у формі відносної похибки. У формі абсолютних похибок характеризують ці межі, якщо похибку результатів вимірювань прийнято виражати в одиницях вимірюваної величини. Основні формули та відомості по вище переліченим похибкам наведені у розд. 1.3. Слід відзначити, що форма виразу меж припустимої похибки у вигляді відносних і наведених похибок є більш переважною, бо вони дозволяють визначати межі припустимої похибки числом, яке залишається тим самим для засобів вимірювань одного рівня точності, але з різними межами вимірювань.

Межі припустимої додаткової похибки можливо представляти у формі, відмінної від форми вираження меж припустимої основної похибки, серед яких розповсюджені наступні: у вигляді постійного значення для всієї робочої області величини, що впливає на результат вимірювання; шляхом зазначення відношення межі припустимої додаткової похибки, що відповідає регламентованому інтервалу величини, яка впливає на результат вимірювання, до цього інтервалу; шляхом зазначення залежності межі припустимої додаткової похибки від величини, що впливає на результат вимірювання; шляхом зазначення функціональної залежності меж припустимих відхилень від номінальної функції впливу. При цьому, межі припустимої додаткової похибки найчастіше встановлюють у вигляді частки від значення межі припустимої основної похибки. Межі припустимих похибок повинні бути виражені не більш ніж двома значущими цифрами, при цьому похибка округлення при обчисленні меж не має перевищувати 5%.

Позначення класів точності залежить від способу нормування похибки засобу вимірювання і наносяться на циферблати, щитки і корпуси засобів вимірювань, а також надаються у нормативно-технічній документації (НТД). Приклади позначення класів точності наведені у табл. 1.12.

Таблиця 1.12.

Приклади позначення класів точності у НТД та на засобах вимірювання.

Формула для визначення меж припустимих похибок вимірювання	Приклади меж припустимої основної похибки	Позначення класів точності		Спосіб вираження нормованого значення $X_N$
		у НТД	на засобах вимірювання	
$\Delta_D = \pm a$	—	Клас точності М	М	—
$\Delta_D = \pm(a + bX_{II})$	—	Клас точності С		—
$\gamma = \pm \left( \frac{\Delta_D}{X_N} \right) 100$	$\gamma = \pm 1,5$	Клас точності 1,5	1,5	Якщо $X_N$ виражено у одиницях величини
	$\gamma = \pm 0,25$	Клас точності 0,25	$0,25\sqrt{\quad}$	Якщо $X_N$ визначається довжиною шкали (її частини)
$\delta = \pm \left( \frac{\Delta_D}{X_{II}} \right) 100$	$\delta = \pm 0,5$	Клас точності 0,5	0,5	—
$\delta = \pm \left[ c + d \left( \left  \frac{X_K}{X_{II}} \right  - 1 \right) \right]$	$\delta = \pm \left[ 0,02 + 0,01 \left( \left  \frac{X_K}{X_{II}} \right  - 1 \right) \right]$	Клас точності 0,02/0,01	0,02/0,01 1	—

Примітка:  $\Delta_D$  – межі припустимої абсолютної основної похибки, що виражена в одиницях вимірюваної величини на вході (виході) чи умовно у поділках шкали;  $X_{II}$  – значення вимірюваної величини на вході (виході) засобів вимірювань чи число поділок, відрахованих по шкалі;  $a$  і  $b$  – позитивні числа, що незалежні від  $X_{II}$ ;  $c = b + d$  і  $d = a/X_K$  – позитивні числа, що обираються з ряду класів точності;  $X_K$  – більша (за модулем) з меж вимірювань.

Згідно стандарту класи точності засобів вимірювання обираються з ряду:  $1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $1,6 \cdot 10^n$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $3 \cdot 10^n$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$  ( $n = 1; 0; -1; -2$ ; і т. ін.). У залежності від точності всі засоби вимірювань розподіляють таким чином на еталони, зразкові і робочі засоби вимірювань.

При виборі приладу для вимірювань слід враховувати, що клас точності приладу визначається основною межевою абсолютною похибкою, якій на різних позначках шкали будуть відповідати різні значення відносної похибки. Наприклад, для електронного автоматичного моста зі шкалою  $0 \div 150$  °C класу точності 1,0 ( $\gamma = 1,0$ ) основна межева абсолютна похибка дорівнює згідно формули (див. табл. 1.12) дорівнює:  $\Delta_d = 150 \cdot 1/100 = 1,5$  °C. При цьому відносна похибка  $\delta$  на позначках шкали 15 і 100 °C будуть відповідно складати:  $\delta_{15} = 1,5 \cdot 100/15 = \pm 10\%$ ;  $\delta_{100} = 1,5 \cdot 100/100 = \pm 1,5\%$ . Отже, з метою зменшення відносної похибки необхідно обирати верхню межу вимірювань шкали вимірювального приладу таку, щоб очікуване значення вимірюваної величини (показання) знаходилось в останній її третині.

Клас точності відіграє важливу роль при вимірюванні технологічних параметрів. У залежності від вимог до точності вимірювань визначають необхідний для цього клас точності.

*Приклад.* Необхідно визначити клас точності манометра для вимірювання тиску у діапазоні  $0,1 \div 0,4$  МПа з кінцевою межею вимірювання 0,4 МПа за умови, щоб відносна похибка  $\delta$  вимірювання не перевищувала 1% у всьому діапазоні.

Визначається абсолютна похибка  $\Delta_d$  на позначці 0,1 МПа:  $\Delta_d = 1 \cdot 0,1/100 = \pm 1 \cdot 10^{-3}$  МПа. Тоді клас точності манометра за величиною наведеної похибки складе:  $\gamma = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 100/0,4 = \pm 0,25\%$ . Таким чином, клас точності манометра слід обрати із значенням 0,25.

## 1.5. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ.

Обробка результатів вимірювань регламентована стандартами. Вибір і складність методики обробки залежить від кількості експериментальних значень (однократні, багатократні вимірювання), виду вимірювань (прямі, непрямі, сукупні, сумісні), виду розподілу похибок вимірювань і т. ін. Нижче розглянуті деякі найпростіші методики обробки результатів вимірювань.

**Визначення показників точності прямих однократних вимірювань** здійснюється у передбаченні, що найбільш ймовірним значенням параметру є лише один результат вимірювань, а складовими похибки результату вимірювання є абсолютні основна і додаткові похибки (невиключені систематичні) засобу вимірювання, які обчислюються за даними наведеними у НТД.

Грубі, випадкові і систематичні складові похибки за такого вимірювання виявити неможливо. Тому підвищення точності результату можливе лише за умови ретельного проведення спроби: усунення зовнішніх впливів і застосування більш точного засобу вимірювання.

*Приклад.* Вимірювання надмірного тиску газу у реакторі здійснюється за допомогою показуючого манометра МП2-У, встановленого за місцем, класу точності 1,5 з діапазоном шкали  $0 \div 1,6$  МПа і ціною поділки 0,02 МПа. В процесі експлуатації відлік показань склав 1,2 МПа при навколишній температурі  $35^{\circ}\text{C}$  (нормативна  $20^{\circ}\text{C}$ ). Необхідно оцінити точність вимірювання тиску, використавши показники НТД на прилад.

Розглянемо можливі складові загальної похибки  $\Delta$ , серед яких слід виділити наступні:  $\Delta_D$  – основна;  $\Theta_1$  – додаткова температурна, що обумовлена відхиленням навколишньої температури від нормативної;  $\Theta_2$  – додаткова, що може бути викликана підвищеним нахилом манометра;  $\Theta_3$  – додаткова, обумовлена наявністю підвищеної вібрації;  $\Theta_{зч}$  – зчитування результату;  $\Theta_M$  – методична.

Границі основної похибки обчислюються за формулою (табл. 1.12):

$$\Delta_D = \pm(1,5 \cdot 1,6) / 100 = \pm 0,024 \text{ МПа.}$$

Границі температурної похибки в умовах зміни температури ( $\Delta t$ ) повітря від  $20$  до  $35^{\circ}\text{C}$  визначаються за рівнянням:

$$\Theta_1 = \pm(X_N \cdot k_t \cdot \Delta t) / 100 ;$$

$$\Theta_1 = \pm[1,6 \cdot 0,06(35 - 20)] / 100 = \pm 0,014 \text{ МПа,}$$

де  $k_t = 0,06\% / ^{\circ}\text{C}$  – температурний коефіцієнт згідно НТД на прилад.

Границі похибки від нахилу і вібрації не враховуються у зв'язку з тим, що манометр встановлено у відповідності з вимогами монтажу на прилад і забезпечення умов, за яких вібрація не призводить до коливань стрілки більш 0,1 довжини найбільшої поділки

шкали. Похибка зчитування визначається половиною ціни поділки і складатиме:  $\Theta_{зч} = \pm 0,02/2 = \pm 0,01$  МПа. Методична похибка може бути обумовлена різницею рівнів розташування манометра і точкою виміру тиску, гідравлічними втратами у трубопроводі поміж місцем відбору тиску і місцем установки манометра, а також відхиленням тиску навколишнього повітря від нормального (101,3 кПа). За невеликої довжини трубопроводної з'єднувальної лінії і відхиленнях тиску навколишнього повітря від барометричного, а також у разі незначної густини (газів) середовища, що вимірюється, методичну похибку можна не враховувати. Отже, підсумкова оцінка похибки вимірювання тиску за формулою (1.76) буде становити:

$$\Delta = \pm 1,1 \sqrt{0,024^2 + 0,014^2 + 0,01^2} = \pm 0,032 \text{ МПа.}$$

Результат вимірювання буде мати наступний вигляд:  $\bar{x} = (1,2 \pm 0,032)$  МПа;  $P = 0,95$ .

У разі відсутності даних НТД по додаткових похибках, оцінка загальної похибки може бути виконана за наближеною формулою:

$$\Delta = \pm 1,3 \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{Дi}^2}, \quad (1.80)$$

де  $\Delta_{Дi}$  – складові основної похибки вимірювального комплекту.

Для вищенаведеного прикладу за відсутності відомостей по додаткових похибках загальна похибка за рівнянням (1.80) складе:

$$\Delta = \pm 1,3 \sqrt{0,024^2} = \pm 0,031 \text{ МПа}$$

і результат вимірювання буде майже дорівнювати попередньому, що розрахований за формулою (1.76), тобто  $\bar{x} = (1,2 \pm 0,031)$  МПа;  $P = 0,95$ .

**Визначення показників точності прямих багатократних вимірювань** здійснюється із використанням статистичних методів оцінки похибок вимірювання. Взагалі, алгоритм обробки результатів вимірювань має наступну послідовність.

1). Виключають шляхом уводу поправок відомі систематичні похибки з результатів спостережень.

2). За наявності підозри про можливість присутності у вибірці грубих помилок виконується перевірка гіпотези за  $\tau$  - критерієм (1.65). При цьому знаходять попередні значення середнього арифметичного, виключивши з нього систематичну похибку шляхом внесення поправки, і середнє квадратичне відхилення за формулами (1.37) і (1.42).

3). Обчислюється середнє значення і середньоквадратичне відхилення з урахуванням вилучення грубих помилок.

4). Визначається оцінка середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного значення  $s_X$  за рівнянням (1.44).

5). Перевіряється гіпотеза про нормальність розподілу результатів спостережень. За кількості результатів вимірювань  $n > 50$  використовують критерій Пірсона, а за  $15 < n < 50$  – складовий критерій. Рівень значимості обирається з інтервалу  $0,02 \div 0,1$ . За  $n < 15$  нормальність розподілу не перевіряється і застосовується для оцінки довірчих границь похибки критерій Стюдента.

6). Визначаються довірчі границі  $\varepsilon$  випадкової похибки результату вимірювання за формулою  $\varepsilon = t_S \cdot s_X$  у відповідності з довірчою ймовірністю  $P$  (чи  $\alpha$ ) та числа  $n$ .

7). Встановлюються границі  $\Theta$  невиключеної систематичної похибки за рівнянням (1.76).

8). Обчислюється співвідношення  $\Theta / s_X$  та перевіряються його граничні умови для визначення можливості урахування чи невиключених систематичних складових ( $\Theta$ ) чи випадкових ( $\varepsilon$ ) похибок або усіх разом ( $\Theta + \varepsilon$ ) у загальній довірчій границі похибки ( $\Delta$ ) результату вимірювання. В останньому випадку довірча границя похибки результату вимірювання визначається за формулами (1.77 – 1.79).

9). Представляється результат вимірювання і похибки у разі симетричних довірчих границь у формі:  $(\bar{x} \pm \Delta)_P$ .

*Приклад.* В ході атестації платиногового термоопору типу ТСП з НСХ 50П проведено 20 вимірювань його опору при температурі насичених парів киплячої води за нормальних умов, що встановлені НТД на вимірювальний комплект. У якості зразкових засобів вимірювання використовувався подвійний врівноважений міст класу точності 0,02 з діапазоном вимірювання 1000 Ом і зразковий термоопір типу ТСП з НСХ 50П класу допуску А ( $\Delta_D^m = 0,067$  Ом), номінальне значення опору якого при  $100^0\text{C}$  складає 69,55 Ом. Необхідно визначити номінальне значення атестуємого термометра опору і по-



хибку атестації з довірчою ймовірністю 0,95 за нормальних умов. Результати вимірювань наведені у табл. 1.13.

Таблиця 1.13.

Результати вимірювання термоопору і допоміжних обчислень.

Номер вимірювання	Результат вимірювання $x_i$ , Ом	Допоміжні розрахункові величини			
		$x_i - \bar{x}'$	$(x_i - \bar{x}')^2$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	70,85	0,73	0,5329	0,45	0,2025
2	69,26	-0,86	0,7396	-0,78	0,6084
3	70,25	0,13	0,0169	0,21	0,0441
4	70,04	-0,08	0,0064	0,00	0,0000
5	70,04	-0,08	0,0064	0,00	0,0000
6	70,55	0,43	0,1849	0,51	0,2601
7	69,82	-0,30	0,09	-0,22	0,0484
8	69,43	-0,69	0,4761	-0,61	0,3721
9	70,04	-0,08	0,0064	0,00	0,0000
10	69,93	-0,19	0,0361	-0,11	0,0121
11	69,82	-0,30	0,09	-0,22	0,0484
12	69,61	-0,51	0,2601	-0,43	0,1849
13	70,04	-0,08	0,0064	0,00	0,0000
14	69,93	-0,19	0,0361	-0,11	0,0121
15	70,32	0,20	0,04	0,28	0,0784
16	70,41	0,29	0,0841	0,37	0,1369
17	69,43	-0,69	0,4761	-0,61	0,3721
18	70,25	0,13	0,0169	0,21	0,0441
19	69,82	-0,30	0,09	-0,22	0,0484
20	71,61	1,49	2,2201	—	—
Сума	1402,45	—	5,4155	5,34	2,473

Аналіз отриманих результатів вимірювань свідчить, що найбільшу підозру про наявність грубої помилки в процесі вимірювань викликає результат під номером 20. Для перевірки за  $\tau$ -критерієм необхідно провести обчислення середнього арифметичного  $\bar{x}'$  і середньоквадратичного відхилення  $s'$ , які для 20-ти спостережень у відповідності з формулами (1.37) і (1.42) будуть дорівнювати:

$$\bar{x}' = 1402,45 / 20 = 70,12 \text{ Ом};$$

$$s' = \sqrt{5,4155 / 19} = 0,5338 \text{ Ом}.$$

Обчислюється величина  $\tau$  за рівнянням (1.64).

$$\tau = \frac{|71,61 - 70,12|}{0,5338} = 2,79.$$

Визначається по табл. 1.3 для  $n = 20$  і  $\alpha = 0,05$  значення  $\tau_\alpha = 2,779$ . Перевірка умови нерівності (1.65) свідчить, що  $\tau = 2,79 > 2,779 = \tau_\alpha$ , тобто 20-те спостереження слід вилучити з подальшого розгляду. Далі розраховується середнє  $\bar{x}$  і середньоквадратичне  $s$  для 19-ти спостережень.

$$\bar{x} = 1330,84/19 = 70,04 \text{ Ом};$$

$$s = \sqrt{2,473/18} = 0,37 \text{ Ом}.$$

Обчислюється середнє квадратичне відхилення результату вимірювання за формулою (1.44):

$$s_x = 0,37/\sqrt{19} = 0,08 \text{ Ом}.$$

Приналежність результатів спостережень до нормального розподілу перевіряється за складовим критерієм ( $15 < n < 50$ ). Перевірка за критерієм 1 передбачає визначення параметра  $\bar{d}$ , для чого спочатку обчислюється зміщена оцінка  $s^*$  за формулою (1.74):

$$s^* = \sqrt{2,473/19} = 0,36 \text{ Ом}.$$

При цьому параметр  $\bar{d}$  за рівнянням буде становити:

$$\bar{d} = 5,34/(19 \cdot 0,36) = 0,78.$$

Для заданого рівня значимості  $\alpha' = \alpha'' = 2\%$  і  $n = 19$  по табл. 1.9 шляхом інтерполяції визначаємо  $d_{\alpha'/2} = 0,9055$  і  $d_{(1-\alpha'/2)} = 0,6901$ . Умова (1.75) за критерієм 1 про нормальність розподілу виконується. Для перевірки за критерієм 2 в табл. 1.10 при  $n = 19$  і  $\alpha'' = 2\%$  знаходимо  $P = 0,99$  і  $m = 1$ . По табл. 1.1 для  $P/2 = 0,495$  верхня квантиль складе  $Z_{P/2} = 2,6$ . Обчислюється добуток  $Z_{P/2} \cdot s = 2,6 \cdot 0,37 = 0,962$ . Аналіз різниць  $|x_i - \bar{x}|$ , наведених у табл. 1.13, показує, що жодна з них не перевищує величини  $0,962$ . Отже, умови обох критеріїв виконуються, що дозволяє вважати результати спостережень нормально розподіленими.

Обчислюються границі  $\varepsilon$  випадкової похибки вимірювань. Для

цього за  $P = 0,95$  і  $n = 19$  по табл. 1.2 визначається параметр  $t_S = 2,1$ . Тоді значення  $\varepsilon$  буде складати:  $\varepsilon = t_S \cdot s_X = 2,1 \cdot 0,08 = 0,168 \text{ Ом}$ .

Встановлюються довірчі границі невиключеної систематичної складової похибки вимірювань. При цьому, невиключена систематична похибка вимірювань буде обумовленою двома складовими: похибки атестації зразкового моста і термоопору. Розглядаємо їх як випадкові похибки з рівномірним законом розподілу, а довірчі границі приймаємо такими, що чисельно дорівнюють межах припустимих похибок атестації термоопору  $\Delta_D^m = \Theta_T = \pm 0,067 \text{ Ом}$  і моста  $\Theta_M = \gamma_M \cdot X_N = 0,02 \cdot 1000/100 = \pm 0,2 \text{ Ом}$ . Довірча границя сумарної невиключеної систематичної похибки визначиться за рівнянням:

$$\Theta = 1,1 \sqrt{0,067^2 + 0,2^2} = 0,211 \text{ Ом}.$$

Розраховується величина відношення  $\Theta/s_X = 0,211/0,08 = 2,637$ . У зв'язку з тим, що ця величина лежить у межах  $0,8 \div 8$ , то жодною з складових похибки вимірювання нехтувати неможливо, тобто загальна похибка буде визначатися обома складовими. За формулою (1.79) обчислюється підсумкове значення  $S_\Sigma$ :

$$S_\Sigma = \sqrt{\frac{1}{3}(0,067^2 + 0,2^2) + 0,08^2} = 0,145 \text{ Ом}.$$

За формулою (1.78) визначається коефіцієнт  $K$ :

$$K = \frac{0,168 + 0,211}{0,08 + \sqrt{\frac{1}{3}(0,067^2 + 0,2^2)}} = 1,876.$$

Довірчі границі похибки результату вимірювання при атестації за рівнянням (1.77) складуть:  $\Delta = 1,876 \cdot 0,145 = \pm 0,272 \text{ Ом}$ . Отже, результат вимірювання слід представити у вигляді:  $(70,04 \pm 0,272) \text{ Ом}$ ;  $P = 0,95$ .

**Визначення показників точності нерівноточних вимірювань** пов'язано із статистичною обробкою декількох рядів результатів спостережень, отриманих різними експериментаторами із застосуванням вимірювальних засобів різної точності чи однакової точності, але з різним числом спостережень або однакової точності за однакового числа спостережень, але проведених у різних умовах. Загальна послідовність обробки результатів нерівноточних вимірювань

може бути наступною.

1). Визначаються вагові коефіцієнти  $g_i$  як величини, зворотно пропорційні квадратам середніх квадратичних похибок результатів для декількох рядів вимірювань тієї самої величини у відповідності з рівністю:

$$g_1 s_1^2 = g_2 s_2^2 = \dots = g_i s_i^2 = \mu^2 \quad (1.81)$$

Величини  $g_i$  становлять собою позитивні числа, а значення  $\mu^2$  обирають таким, щоб відношення  $\mu^2/s_i^2$ , було якомога ближче до одиниці.

2). Обчислюється загальне середнє зважене для рядів вимірювань за формулою:

$$\bar{x}_g = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{x}_i g_i}{\sum_{i=1}^N g_i}, \quad (1.82)$$

де  $\bar{x}_i$  – результати окремих рядів вимірювань;  $g_i$  вагові коефіцієнти, що відповідають цим результатам;  $N$  – загальна кількість окремих рядів вимірювань.

3). Визначається середня квадратична похибка загального середнього зваженого значення за рівнянням:

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i^2 g_i}{(N-1) \sum_{i=1}^N g_i}}, \quad (1.83)$$

де  $\lambda_i = (\bar{x}_i - \bar{x}_g)$  – залишкове випадкове відхилення окремого ряду вимірювань по відношенню до середнього зваженого;  $\sum_{i=1}^N g_i \lambda_i = 0$  – контрольне значення для формули (1.83).

*Приклад.* В процесі вимірювання опору трьома способами були отримані наступні результати з оцінками середніх квадратичних відхилень результатів вимірювань за довірчої ймовірності  $P = 0,95$ :

$\bar{x}_1 = (12,045 \pm 0,003)$ ;  $\bar{x}_2 = (12,048 \pm 0,002)$ ;  $\bar{x}_3 = (12,047 \pm 0,001)$  Ом.

Визначаються вагові коефіцієнти окремих результатів вимірювань згідно рівності (1.81):

$$0,003^2 g_1 = 0,002^2 g_2 = 0,001^2 g_3 = \mu^2.$$

Приймаючи  $\mu^2 = 0,001^2$ , знаходимо значення вагових коефіцієнтів, щоб були якомога ближче до одиниці:  $g_1 = 0,112$ ;  $g_2 = 0,25$ ;  $g_3 = 1$ . За рівнянням (1.82) обчислюється середнє зважене значення опору:

$$\bar{x}_g = \frac{12,045 \cdot 0,112 + 12,048 \cdot 0,25 + 12,047 \cdot 1}{0,112 + 0,25 + 1} = 12,04702 \text{ Ом.}$$

За формулою (1.83) визначається величина середньої квадратичної похибки середнього зваженого:

$$s_g = \sqrt{\frac{0,00202^2 \cdot 0,112 + 0,00098^2 \cdot 0,25 + 0,00002^2 \cdot 1}{(3-1) \cdot (0,112 + 0,25 + 1)}} = 0,00051 \text{ Ом.}$$

Контрольна перевірка формули (1.83) свідчить, що

$$\sum \lambda_i g_i = -0,00202 \cdot 0,112 + 0,00098 \cdot 0,25 - 0,00002 \cdot 1 = 0.$$

Отже, результат вимірювання опору буде становити:  $(12,04702 \pm 0,00051)$  Ом;  $P = 0,95$ .

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

### 2.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Розробка сучасних вимірювальних пристроїв, регуляторів та інших засобів автоматизації здійснюється із застосуванням принципів стандартизації: агрегування, блоково-модульний і уніфікація.

*Агрегування* – це принцип формування засобів автоматизації, що серійно виготовляються, і направлений на максимальне задоволення попиту підприємств споживачів в умовах обмеження номенклатури виготовленої продукції. Агрегування базується на тому, що складні функції керування можна розкласти на більш простіші складові. Таким чином формуються засоби автоматизації, що вміщують такі конструктивно завершені і функціонально самостійні одиниці, як блоки, модулі, мікромодулі і механізми. Однак виготовлення блоків, приладів і модулів здійснюється у заводських умовах, а монтаж і комутація системи керування повністю завершується на місці експлуатації. Такий підхід отримав назву *блоково-модульного принципу*, тобто цей принцип є супутнім агрегуванню.

*Уніфікація* також базується на принципі агрегування, але направлена на впорядкування і скорочення складу серійних пристроїв автоматизації за принципом дії, схемним рішенням та інтерфейсом, тобто за параметрами і характеристиками сигналів-носіїв інформації, конструктивними параметрами і характеристиками пристроїв комутації. Сигнали-носії інформації, що встановлені стандартом, відрізняються як за фізичною природою і параметрами, так і за формою представлення інформації.

Межеві зміни аналогових пневматичних вхідних сигналів у робочому діапазоні складають 20 – 100 кПа. Рівень дискретних пневматичних вхідних і вихідних сигналів залежить від значень умовних сигналів і складає: для “0” не менше 0 і не більше 10 кПа, а для “1” не менше 110 і не більше 154 кПа. Номінальне значення тиску повітря живлення функціональних пристроїв і приладів складає 0,14 МПа, а пристроїв вводу, виводу і допоміжних може бути на рівні – 0,14; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0 МПа. Для аналогових токових вхідних і вихідних сигналів постійного струму (мА) межеві значення складають:  $0 \div 5$ ;  $(-5) \div 0 \div 5$ ;  $0 \div 20$ ;  $(-20) \div 0 \div 20$ ;  $4 \div 20$ . Межеві значення сиг-

налів напруги постійного струму (В) складають:  $0 \div 1$ ;  $(-1) \div 0 \div 1$ ;  $0 \div 5$ ;  $(-5) \div 0 \div 5$ ;  $1 \div 5$ ;  $0 \div 10$ ;  $(-10) \div 0 \div 10$ . Вхідні опірності приладу або пристрою з вхідним сигналом постійного струму повинні бути не більше 200 Ом. Номінальні межеві зміни сигналів напруги змінного струму з частотою 50 і 400 Гц складають (В):  $0 \div 5$ ;  $(-1) \div 0 \div 1$ ;  $0 \div 2$ . Для приладів і пристроїв з сигналами напруги змінного струму з частотою 50 Гц, що засновані на зміні взаємної індуктивності, межеві зміни взаємної індуктивності складають (мГн):  $0 \div 10$ ;  $(-10) \div 0 \div 10$ ;  $0 \div 20$ . У загальнопромислових системах також найчастіше застосовуються частотні сигнали 2-4 чи 4-8 кГц. Номінальні значення напруги живлення постійного чи змінного струму приладів і пристроїв встановлюються такі. Для змінної однофазної напруги частотою 50 Гц: 12; 24; 36; 40; 220; 380; 660 В. Для змінної напруги трифазної з частотою 50 Гц: 40; 220; 380; 660 В. Для постійної напруги: 12; 24; 36; 48; 60; 110; 220; 440 В. Таке обмеження сигналів дозволяє уніфікувати систему зовнішніх зв'язків чи інтерфейс засобів автоматизації, тобто виконувати пристрої сумісними поміж собою.

До пристроїв отримання інформації про стан технологічного процесу відносять первинні і вторинні вимірювальні перетворювачі, нормуючі перетворювачі і контрольно-вимірювальні прилади.

Первинний вимірювальний перетворювач (датчик) перетворює параметр, що контролюється, у вихідну фізичну величину (електричний чи пневматичний сигнал, пересування, зусилля і т. ін.). Нормуючий перетворювач перетворює сигнал з виходу первинного перетворювача в уніфікований. Найчастіше датчик і нормуючий перетворювач об'єднують конструктивно в один прилад.

Контрольно-вимірювальні прилади використовуються для вимірювання і запису різних технологічних параметрів (тиску, температури, рівня, витрати, складу та ін.). В них можуть бути вмонтовані додаткові пристрої для здійснення сигналізації граничних значень параметра, перетворення і передачі сигналу до інших вимірювальних і регулювальних систем. У залежності від виду енергії носія сигналу у каналі зв'язку, що застосовується для прийому, видачі та обміну інформацією, промислові засоби автоматизації розподіляються: на електричні, пневматичні, гідравлічні, комбіновані та ті, що не використовують допоміжну енергію. Пристрої, що використовують для своєї роботи енергію одного роду, умовно утворюють промислові гілки – електричну, пневматичну, гідравлічну. Гілка приладів, що не використовує допоміжної енергії, містить сукупність різного

роду регуляторів прямої дії. Зв'язок поміж приладами різних гілок здійснюється за допомогою перетворювачів (пневмоелектричних, електропневматичних, та ін.). Найбільш розповсюдженими при автоматизації технологічних процесів є прилади електричної та пневматичної гілок.

## 2.2. ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

У більшості виробничих процесів різних галузей промисловості тиск є одним із основних параметрів, що значно впливає на якість технологічного процесу. До того ж обладнання, що діє у тій чи іншій технологічній системі, проектується на певну припустиму величину тиску, перевищення якого може привести до аварійних ситуацій. Тому для якісного і безпечного управління технологічними процесами необхідно здійснювати безперервний автоматичний контроль тиску. Тиск  $P$  визначається відношенням нормальної складової сили  $F$  до площини  $S$ , на яку ця сила діє.

$$P=F/S \quad (2.1)$$

Розмірність величини тиску залежить від обраної системи одиниць. У табл. 2.1. наведені основні співвідношення одиниць тиску, що найчастіше використовуються.

Таблиця 2.1

Співвідношення поміж одиницями вимірювання тиску різних систем і системою одиниць СІ

Системи одиниць СІ	Інші системи одиниць
0,1 МПа=10 <sup>5</sup> Па	1 бар або 1 атм.(фізична)
9,81·10 <sup>4</sup> Па	1 кгс/см <sup>2</sup> або 1 атм.(технічна)
9,81 Па	1 кгс/м <sup>2</sup> або 1 мм вод. ст.
133,3 Па	1 мм рт. ст.

Промислові прилади тиску, як правило, мають шкалу, що проградуєвана у одиницях технічної системи (атм., кгс/см<sup>2</sup>), системи СІ (Па, кПа, МПа). Межеві номінальні значення тиску, що вимірюється, згідно стандарту наступні (МПа): 0.1; 0.16; 0.25; 0.4; 0.6; 1.0; 1.6; 2.5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160.

При вимірюванні тиску необхідно відрізнити абсолютний  $P_a$ ,



надмірний  $P_H$  і атмосферний (барометричний)  $P_B$  тиск, а також вакуум  $P_V$ . Співвідношення поміж вище згаданими величинами можна представити наступними рівняннями:

$$P_a = P_H + P_B; \quad P_a = P_B - P_V \quad (2.2)$$

Прилади для вимірювання тиску носять загальну назву манометрів. Їх класифікують за принципом дії та видом тиску, що вимірюється.

За видом тиску, що вимірюється, прилади розподіляють на такі: манометри (для вимірювання абсолютного і надмірного); вакуумметри (для вимірювання розріджування); напороміри (для вимірювання невеликого надмірного тиску); тягоміри (для вимірювання невеликого розріджування); диференційні манометри (для вимірювання різниці двох тисків); барометри (для вимірювання атмосферного тиску).

За принципом дії найбільш розповсюджені наступні прилади для вимірювання тиску: рідинні, у яких тиск, що вимірюється, врівноважується гідростатичним тиском стовпа рідини; деформаційні, у яких величина тиску визначається за величиною деформації пружинного елемента; електричні, у яких використовується зміна електричних властивостей деяких матеріалів під впливом тиску.

Рідинні манометри в основному застосовуються для вимірювання тиску у лабораторних умовах при градуюванні та повірці приладів, тому вони далі не розглядаються. У відповідності з функціональним призначенням пристрої для вимірювання тиску, та і будь-які прилади, розподіляються на показуючі, самопишучі, регульовальні, сигналізуючі (реле) та вимірювальні перетворювачі. При побудові функціональних схем вибір засобів автоматизації значно зручніше проводити за їх функціональними можливостями. Тому далі розглядаються прилади тиску з урахуванням цієї класифікації.

**Деформаційні прилади тиску** складають найбільшу групу пристроїв автоматичного контролю. У цих приладах переміщення під впливом тиску, що вимірюється, пружистого чутливого елемента (мембрана, сильфон, одно- або багатовиткова пружина) перетворюється за допомогою передаточного механізму (секторний чи важільний) у переміщення покажчика або механізму, пов'язаного із системою передачі показань тиску на відстань. Деякі схеми пружистих елементів наведені на рис. 2.1.

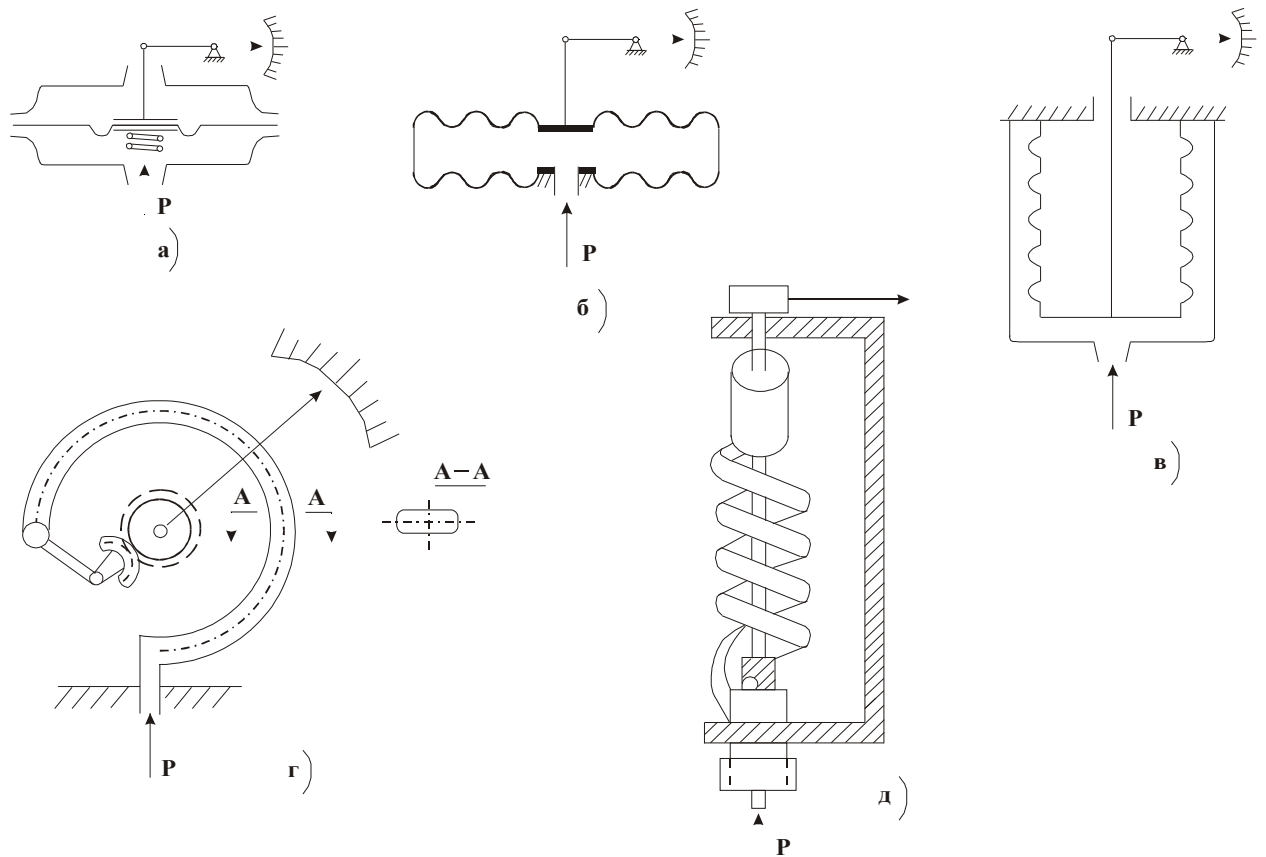


Рис. 2.1. Схеми пружистих елементів деформаційних приладів тиску: а – плоска мембрана; б – мембранна коробка; в – сильфон; г – одновиткова трубчаста пружина; д – багатовиткова трубчаста пружина; Р – тиск, що вимірюється.

Трубчасті металеві пружини застосовуються у приладах для вимірювання тиску від кількох Па до 1000 МПа. Мембранні чутливі елементи використовують у приладах для вимірювання невеликого надмірного тиску, розрідження і перепаду тиску. Мембрани виготовляють з гнучкого матеріалу: гуми із тканинною основою, тканини з газонепроникаючою пропиткою, особливих пластмас і металу. З метою підвищення ходи рухливого центру мембрани, стабілізації жорсткості і можливості її регулювання прилади будують найчастіше за схемою силової електричної чи пневматичної компенсації. Сильфони виготовляють з латуні, берилієвої бронзи і корозійно стійкої сталі. Для підвищення жорсткості, зменшення впливу гістерезису і нелінійності характеристики часто у середину сильфона ставлять гвинтову циліндричну пружину. У дифманометрах для вимірювання перепаду при великому статичному тиску середину сильфонів заповнюють рідиною. Вимірювальні пристрої тиску виготовляють показуючими, сигналізуючими, самописними, а також з електричними чи

пневматичними системами дистанційної передачі показань на відстані.

*Показуючі прилади* для вимірювання тиску як правило застосовують у схемах автоматизації для контролю параметра за місцем, тобто безпосередньо на об'єкті керування. Це пов'язано з тим, що за умов віддалення цих приладів на відстань від об'єкта керування виникають великі затримки показань. Чутливим елементом, що сприймає тиск, у цих приладах є трубчаста (манометрична) металева пружина з овальним перерізом.

Показуючі прилади типу МП-У, ВП-У, МВП-У призначені для вимірювання тиску і розрідження рідини, що неагресивна і не кристалізується, газу та пари, а також застосовують для вимірювання тиску хладонів. В останньому випадку вони мають додаткову шкалу, а у штуцер ввернуто демпфер для гасіння пульсуючого тиску. При вимірюванні тиску агресивного середовища слід використовувати розподільні пристрої. Прилади, що мають фланець, служать для щитового монтажу. Виконання приладів за стійкістю до механічних впливів та впливу навколишнього середовища – вібростійке, удароміцне і бризкозахищене.

*Сигналізуючі показуючі прилади тиску* призначені для вимірювання надмірного і вакуумметричного тиску різних середовищ та керування зовнішніми електричними колами від сигналізуючого пристрою прямої дії шляхом вмикання і вимикання контактів у схемах сигналізації, регулювання та блокування технологічних процесів. На відміну від звичних технічних манометрів сигналізуючі прилади тиску мають додатково дві стрілки до яких пружними проводами піджаті контакти. При виході тиску за робочий діапазон, тобто будь-якої з контактних стрілок, електричне зовнішнє коло замикається і буде у такому стані доки параметр тиску не повернеться до робочого діапазону. Деякі основні типи цих приладів: ДМ2005Сг, ДВ2005Сг, ДА2005Сг. Прилади з позначенням ІЕх мають вибухозахищене виконання.

*Самописні прилади вимірювання тиску* типу МТС-711, ВТС-711, МВТС-711 з довготривалим записом на дисковій діаграмі застосовуються при вимірюванні надмірного і вакуумметричного тиску неагресивної рідини, пари, газу у стаціонарних промислових умовах. Час одного оберту діаграми у приладів з годинниковим приводом 12 чи 24 год., а для приладів з електричним приводом – 8 чи 24 год.

Манометри, що мають годинниковий привід можуть бути ви-

користані для експлуатації у вибухонебезпечних умовах.

Вимірювальні пневматичні перетворювачі (датчики) тиску призначені для безперервного перетворення тиску (різниці тиску) у пропорційний стандартний пневматичний сигнал дистанційної передачі (0.02÷0.1 МПа) і використовуються у комплекті із вторинними приладами, регуляторами та іншими пристроями автоматизації.

Конструктивно вони вміщують два блоки: вимірювальний і пневмосиловий. Принцип дії вимірювальних перетворювачів побудовано на пневматичній силовій компенсації. На рис. 2.2 наведена



Рис. 2.2. Принципова пневматична схема пневмосилового блоку: P1 – тиск живлення; P2 – вихідний сигнал.

Зусилля, з яким вимірювальний блок (сильфон, мембрана, трубчаста пружина) впливає на пневмосиловий перетворювач, утворює момент  $M$ , що викликає незначне переміщення T-образного важеля 1 та пов'язаної з ним заслінки 8 відносно нерухомого сопла 5. Зміна тиску у лінії сопла викликає зміну тиску на вході підсилювача потужності 7, виході перетворювача та сильфоні зворотного зв'язку 6. Зусилля, що утворюється вихідним тиском у сильфоні через передаточний механізм (Г-образний важіль 2, T-образний важіль 1, рухлива опора 4), врівноважує зусилля, яке утворюється параметром тиску на чутливому елементі. У пневмосиловому перетворювачі є коректор нуля з пружиною 3, призначений для встановлення потрібного значення вихідного сигналу  $P_2$ . Корегування діапазону вимірювання здійснюється переміщенням рухливої опори 4. У демпфері 9 використовується кремнійорганічна рідина марки ПМС або демпферне мастило марки ДС-1. Вимірювальні блоки перетворювачів уніфіковані і відрізняються між собою тільки розмірами чи розміщенням чутливого деформаційного елемента.

Пневматичні перетворювачі тиску вимірювальні використовуються для вимірювання абсолютного (тип МАС, 13ДА), надмірного

(тип НС, МП, 13ДИ) і вакуумметричного (тип ВС, ТС, 13ДВ) тиску.

Перетворювачі з верхньою межею вимірювань до 25 кПа призначені для вимірювання тиску тільки газоподібних середовищ. Усі інші пристрої можуть бути застосовані при вимірюванні тиску газу і рідини. Перетворювачі забезпечують передачу вхідного сигналу по пневмотрасі з внутрішнім діаметром трубопроводу 6 мм на відстань до 300 метрів, а при внутрішньому діаметрі трубопроводу 4 мм на відстань до 150 м. Чутливі елементи, що контактують з вимірювальним середовищем, для манометрів надвисокого тиску (тип МСв) виготовлені із сталі 50ХФА і 18Х2Н4ВА, а інших перетворювачів – із сталі 12Х18Н10Т, 15Х18Н12С4ТЮ і 06ХН28МДТ, танталу ТВ4 і титану ВТ1-00. Таке застосування матеріалів у чутливому елементі дозволяє в більшості випадків використовувати перетворювачі при вимірюванні параметрів агресивного середовища без встановлення розподільчих пристроїв. Прилади випускаються у пило- і бризкозахисному виконанні. Підвід тиску живлення необхідно здійснювати через фільтр повітря і редуктор тиску.

Перетворювачі перепаду тиску (дифманометри типу 13ДД, ДМ, ДС) застосовуються для перетворення інформаційних сигналів тиску, витрати рідини або газу, а також рівня рідини в уніфікований пневматичний вихідний сигнал. При використанні дифманометрів для вимірювання витрати вони повинні застосовуватися у комплекті із звужувальними пристроями, а при вимірюванні рівня рідини – з вирівнювальними посудинами.

Тиск живлення перетворювачів 140 кПа, а витрати повітря не більш 3 л/хвил. Перетворювачі можуть робити у запилених, вибухонебезпечних приміщеннях і в умовах дощу. Вони забезпечують передачу вихідного сигналу по пневматичній лінії зв'язку з внутрішнім діаметром 6 мм довжиною до 300 м, а при внутрішньому діаметрі 4 мм до 150 м. Пневмосиловий блок у всіх перетворювачів майже однаковий, а вимірювальний відрізняється лише типом чутливого елемента. На рис.2.3 наведена схема перетворювача 13ДД11, яка в достатній мірі демонструє принцип дії перетворювача. Налагодження перетворювачів на необхідну межу вимірювання здійснюють переміщенням сильфону зворотного зв'язку. Мембранний блок дифманометру заповнюється поліетілоксеновою рідиною або водогліцериновим розчином. Відносна вологість повітря не повинна перевищувати 95%.

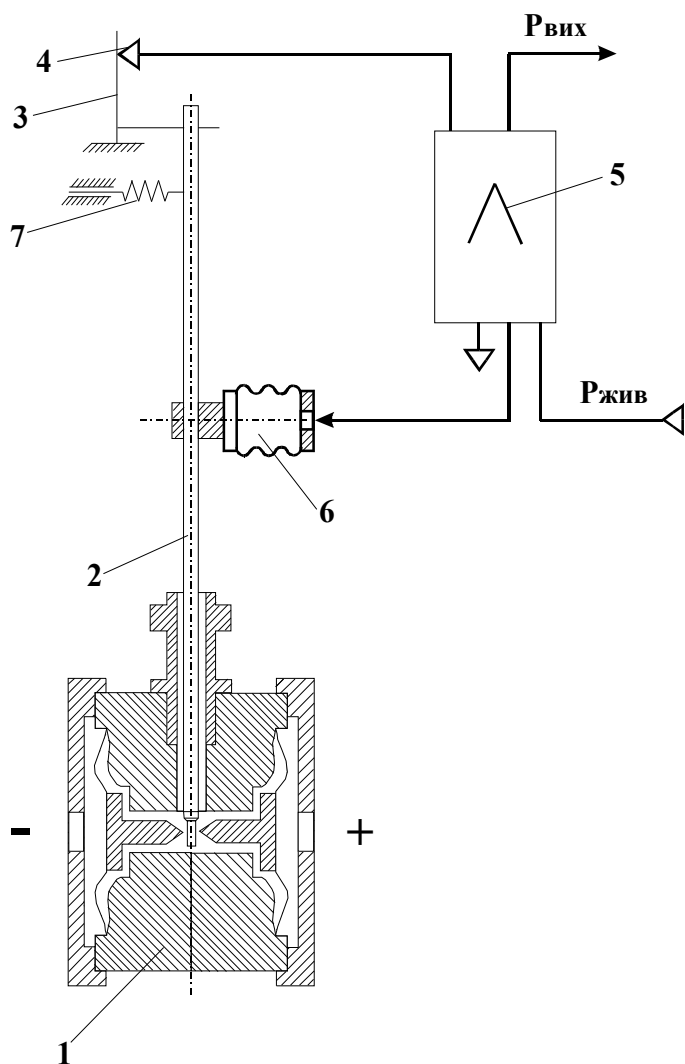


Рис. 2.3 Принципова схема перетворювача різниці тисків 13ДД11: 1—двомембранний чутливий елемент; 2—важіль; 3—заслінка; 4—сопло; 5—пневмореле; 6—сильфон зворотного зв'язку; 7—пружина коректора нуля.

Для перетворення тиску агресивної рідини та такої, що кристалізується, і газів у рівний тиск стислого повітря застосовуються перетворювачі (повторювачі) тиску ПД-4М. Знайшов широке застосування при вимірюванні тиску пароповітряних сумішей і плаву у виробництві аміачної селітри, а також для контролю кількості рідкої сировини в ємностях у лакофарбній промисловості. Повторювач безпосередньо контактує з вимірюваним середовищем. Виготовляється для зануреного та винесеного монтажу. Принцип дії повторювача побудовано на пневмосилової компенсації. На рис. 2.4 представлена пневматична схема повторювача.

Живлення на повторювач надходить до камери В під клапан 5 з великим прохідним перерізом, що забезпечує потужність вихідного сигналу, і крізь дросель 4 у камери Б, А та на вхід сопла 3. У сталому режимі тиск у камері 2 дорівнює тиску у камерах Г і Д та тиску робочого середовища. Тиск у камерах Б і А однаковий. При зміні тиску робочого середовища змінюється положення чутливої мембрани 1, що призводить до зміни провідності змінного дроселя, утвореного соплом 3 і мембраною 1. При цьому змінюється тиск у камерах А і Б. Тиск, що формується у камерах А і Б, керує роботою живлячого клапану 5 і атмосферного клапану, утвореного соплом 6 і мембраною 7, які формують у камерах А і Г вихідний сигнал пропорційний тиску робочого середовища.

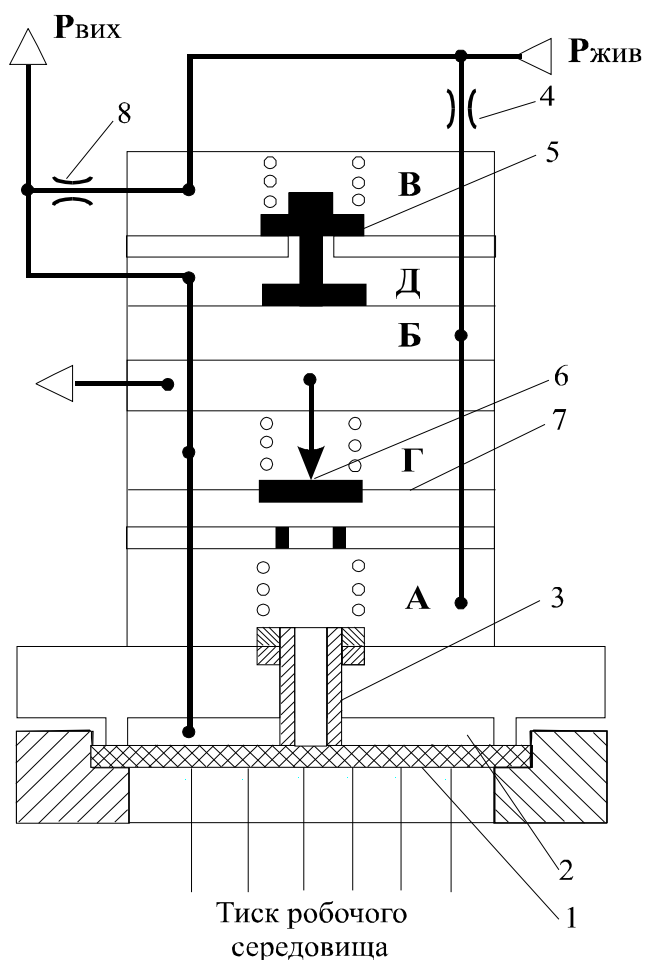


Рис. 2.4. Схема пневматична принципова повторювача тиску ПД-4М.

Дросель 8 забезпечує опрацювання вихідного сигналу у сталому режимі при закритому клапані 5. Надлишок повітря, яке пройшло крізь дросель 8, викидається крізь сопло 6 атмосферного клапану. Завдяки тому, що у сталому режимі живлення проходить крізь дросель 8 і сопло 6 при закритому клапані 5, стає можливим підтримування рівного тиску у камерах Б і А, бо у сталому режимі відсутнє позмінне включення живлячого клапану 5 і атмосферного клапану. Це сприяє усуненню автоколивань і підвищенню точностних характеристик повторювача. Для підвищення стабільності цього приладу його включають у схему роботи разом із стабілізатором тиску, що входить у комплект поставки.

На рис. 2.5 наведена пневматична схема з'єднання повторювача і стабілізатора тиску, а на рис. 2.6 загальний вигляд конструкції повторювача ПД-4М зануреного монтажу.

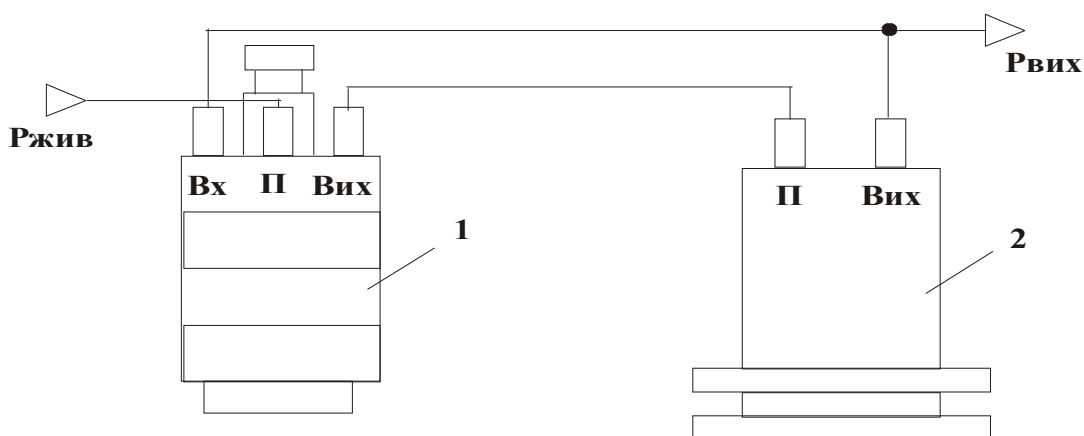


Рис. 2.5. Схема з'єднання повторювача ПД-4М(2) і стабілізатора тиску(1).

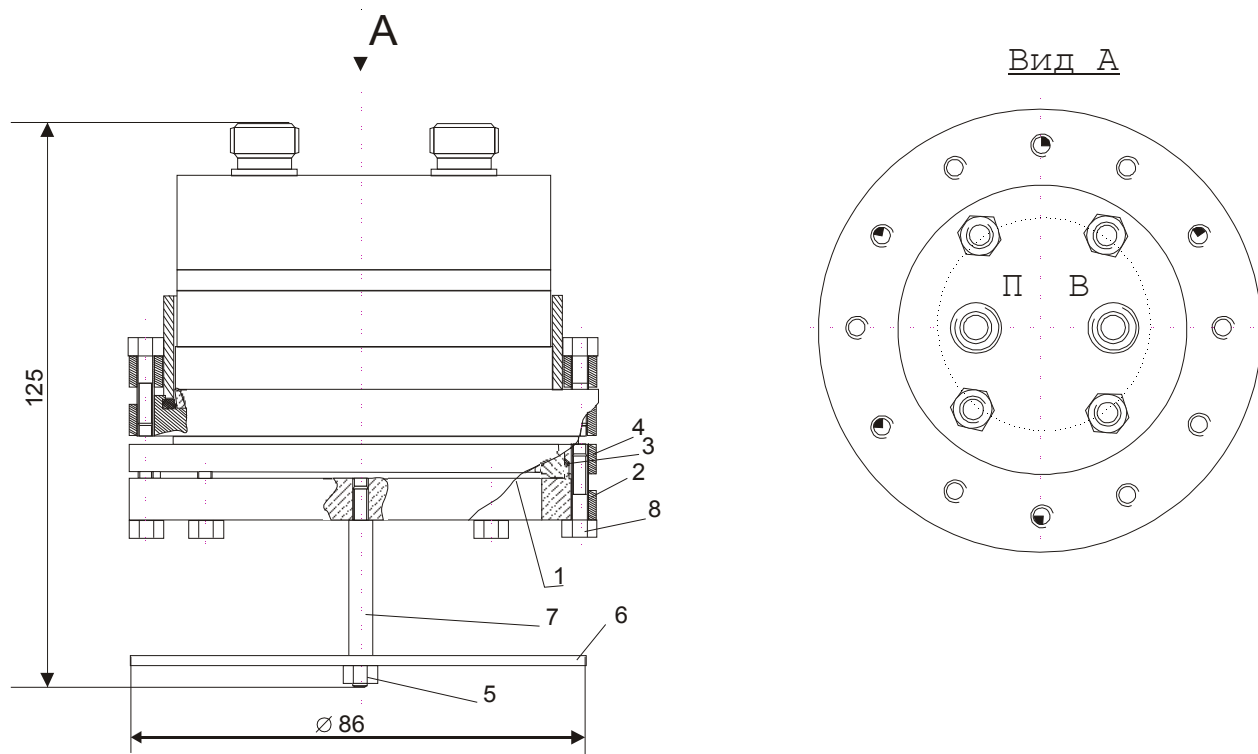


Рис. 2.6. Загальний вигляд конструкції повторювача ПД-4М зануреного монтажу: 1 – мембранний блок; 2,4 – фланець; 3 – прокладка; 5 – гайка; 6 – кришка; 7 – шток; 8 – бовт.

Занурений монтаж має 9 виконань за глибиною занурення, м: 1; 1,5 ;2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6. За діапазоном повторення (вимірювання) тиску робочого середовища прилад має 5 виконань, кПа: 0 – 100; 0 – 160; 0 – 250; 0 – 400; 0 – 600. Вимоги до пневматичних з'єднувальних трубопроводних ліній аналогічні попереднім приладам. Роботопридатний у середовищах, що не руйнують сталь 12X18H10T і фторопласт Ф-4.

*Вимірювальні електричні перетворювачі (датчики) тиску* призначені для безперервного перетворення тиску (перепаду тиску) у пропорційний уніфікований електричний сигнал дистанційної передачі і використовуються у комплекті із вторинними приладами, регуляторами та іншими пристроями автоматизації. Конструктивно вони також складаються із вимірювального блоку, що перетворює величину тиску у переміщення, та блоку дистанційної передачі цього переміщення у відповідний електричний сигнал (взаємної індуктивності чи сили струму) пропорційний величині тиску.

У приладах типу ДМ-3583 застосовується диференційно-трансформаторна система дистанційної передачі показань на відстань з вихідним сигналом взаємної індуктивності  $0 \div 10$  мГн.



Основним елементом вимірювального блоку цих приладів є чутливий елемент, що виконаний у вигляді двомембранної коробки, кожна з яких зварена з двох мембран. Мембранні коробки розташовані по обох боках розподільчої діафрагми. Внутрішні порожнечі коробок заповнені рідиною, герметизовані і сполучені поміж собою. Під впливом перепаду тиску в камерах нижня мембранна коробка (плюсова) стискається і рідина з неї перетікає у верхню (мінусову). Це викликає переміщення плунжера диференційно - трансформаторного перетворювача. В свою чергу це призводить до зміни взаємної індуктивності поміж його первинним (дифманометр) і вторинним (прилад або регулятор) колами. Електрична схема дифманометра наведена на рис.2.7.

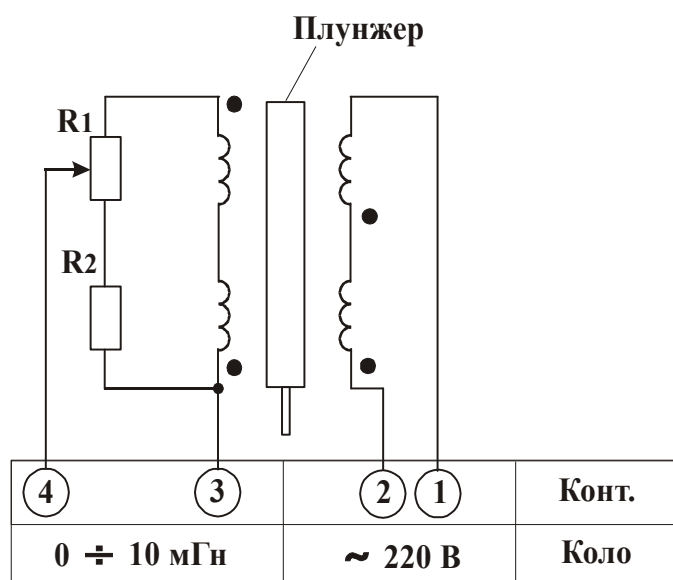


Рис.2.7. Схема електрична принципова дифманометра: 1, 2 – клеми живлення первинної обмотки змінним струмом 0.125 А для моделі ДМ–3583М і 0.32 А для моделі ДМ–3583ФМ частотою 50Гц від приладу або регулятора; 3, 4 – клеми вторинної обмотки для з'єднання з приладом або регулятором;  $R_1$  – опір для настроювання границь вимірювання вхідних сигналів;  $R_2$  – опір постійний.

Деформація чутливого елемента відбувається до тих пір, доки сили, викликані перепадом тиску, врівноважуються пружними силами мембранних коробок. У залежності від міри перепаду тиску у дифманометрі встановлюються мембранні коробки визначеної жорсткості. Завдяки двомембранній конструкції прилад захищений від однобічного перевантаження.

Більш універсальною є система дистанційної передачі показань з уніфікованим струмовим вихідним сигналом, яка використовується у приладах типу МПЭ, ДСЭ і ДМЭ.

Прилади складаються з вимірювального блоку, магнітотрансформаторного перетворювача ММП і підсилювального пристрою типу ПП-МКР. Чутливий елемент ЧЕ вимірювального блоку пов'язаний з ма-

гнітним плунжером ММП. Структурна схема приладів цього типу представлена на рис. 2.8.

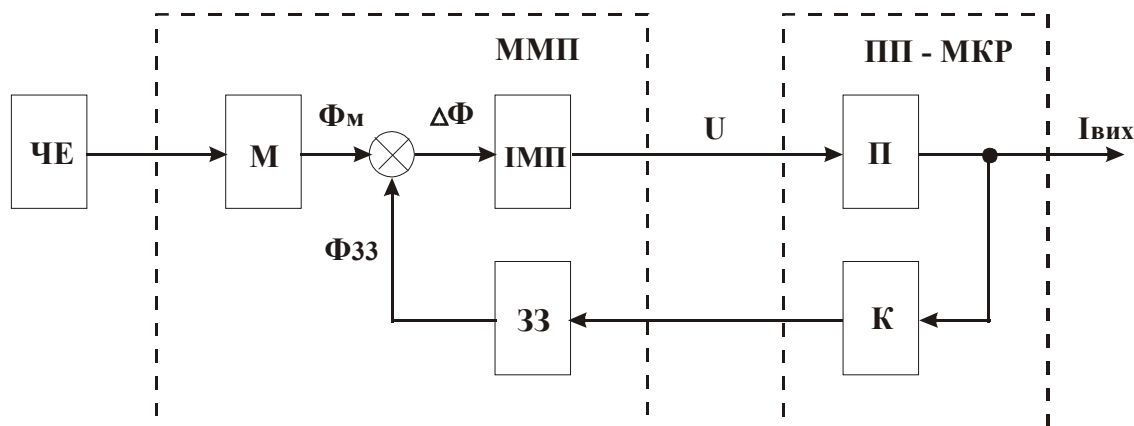


Рис. 2.8. Структурна схема перетворювачів з компенсацією магнітних потоків.

Принцип дії заснований на компенсації магнітного потоку постійного магніту, що утворюється переміщенням магнітного плунжера, магнітним потоком, який виникає при протіканні у обмотці зворотного зв'язку вихідного сигналу постійного струму

Основними функціональними елементами схеми є наступні: ЧЕ – чутливий елемент, що перетворює вимірюваний параметр у переміщення плунжера; М – постійний магніт, який перетворює переміщення плунжера у керуючий магнітний потік  $\Phi_M$ ; ІМП – індикатор магнітних потоків, що перетворює різницю  $\Delta\Phi$  керуючого магнітного потоку  $\Phi_M$  і потоку зворотного зв'язку  $\Phi_{ЗЗ}$  в електричний сигнал розузгодження у вигляді напруги  $U$ ; ПП-МКР – підсилюючий пристрій, що складається з підсилювача П і квадратора К, призначений для підсилення сигналу розузгодження і отримання вихідного сигналу постійного струму  $I_{Вих}$ , пропорційного параметру вимірювання; ЗЗ – елемент зворотного зв'язку, призначений для створення магнітного потоку зворотного зв'язку  $\Phi_{ЗЗ}$  при протіканні у ньому струму  $I_{Вих}$ .

Принцип роботи полягає у наступному. Параметр вимірювання перетворюється чутливим елементом ЧЕ у пропорційне переміщення постійного магніту М, який утворює керуючий вплив у вигляді магнітного потоку  $\Phi_M$  і викликає зміну намагніченості сердечників ІМП. При цьому виникає сигнал розузгодження  $U$ , який керує вихідним сигналом П. Підсилений і перетворений сигнал надходить у лінію дистанційної передачі та одночасно у обмотку зворотного

зв'язку ММП. Остання створює магнітний потік  $\Phi_{33}$ , що компенсує дію керуючого магнітного потоку  $\Phi_M$ .

Чутливим елементом у манометрів типу МПЭ є одновиткова трубчаста пружина, дифманометрів типів ДСЭ і ДМЭ відповідно – сильфон і мембранний блок ідентичний приладам ДМ-3583М.

**Електричні прилади тиску** до недавнього часу використовувались лише у лабораторній практиці дослідницьких робіт. Серед електричних приладів тиску відрізняють: тензометричні, п'єзоелектричні, теплопровідні та іонізаційні манометри.

Дія тензометричних манометрів (тензоперетворювачів) ґрунтується на зміні електричного опору провідника під впливом тиску. Електричними провідниками можуть взагалі бути будь-які метали, сплави і напівпровідники. Але використовують лише ті матеріали, які мають значну залежність електричного опору від тиску і невеликий температурний коефіцієнт електричного опору. Для вимірювання опору найчастіше застосовують мостові схеми, в одне плече яких включено вимірювальний тензоперетворювач. Тензоперетворювачі принципово можна використовувати для вимірювання тиску до 3000 МПа.

Принцип дії п'єзоелектричних манометрів заснований на властивості деяких кристалічних речовин створювати електричні заряди під впливом механічної сили. Це явище (п'єзоэффект) притаманне для кристалів кварцу, турмаліну, сегнетової солі, титану, барія і т. ін. Особливість п'єзоэффекту – безінерційність. Ця обставина робить п'єзоманометри незамінними при дослідженні швидкопротікаючих процесів. П'єзокварцові манометри дозволяють вимірювати тиск до 100 МПа.

Теплопровідні манометри застосовуються для вимірювання низького тиску, за умов якого теплопровідність газу залежить від тиску. Цю залежність використовують у теплопровідних манометрах для вимірювання тиску газів у межах від 0,0133 до 1333 Па.

Для вимірювання тиску в діапазоні від  $10^{-1}$  до  $10^{-8}$  Па використовують іонізаційні манометри, основним елементом яких є скляна манометрична лампа. Дія цих вакууметрів ґрунтується на іонізації молекул розрідженого газу потоком електронів, що утворюються розжареним катодом лампи, балон якої з'єднаний з вимірювальним середовищем. Електрони, що вилітають з катоду притягуються позитивно зарядженим анодом. У залежності від тиску газу електрони на своєму шляху іонізують більшу або меншу кількість молекул. Вони

збираються колектором і утворюють струм, сила якого пропорційна силі анодного току і тиску газу.

У промисловості найбільше розповсюдження знайшли тензоперетворювачі, які в подальшому і розглядаються більш докладніше.

*Вимірювальні тензоперетворювачі тиску* призначені для роботи у системах автоматичного контролю, регулювання та керування технологічними процесами і забезпечують безперервне перетворення значення параметра надмірного, абсолютного, гідростатичного тисків, розрідження, різниці тисків нейтральних і агресивних середовищ в уніфікований струмовий вихідний сигнал дистанційної передачі. Перетворювачі різниці тисків можуть використовуватись для перетворення значень рівня рідини, витрати рідини або газів у комплекті з вирівнювальними та конденсаційними посудинами, а при використуванні блоку витягання квадратного кореня може бути отримана лінійна залежність поміж вихідним сигналом і витратою, що вимірюється. Перетворювачі застосовуються для роботи із вторинною реєструючою і показуючою апаратурою, регуляторами та іншими пристроями автоматизації у складі АСКТП, працюючими від стандартного вихідного сигналу 0 – 5, 0 – 20 чи 4 – 20 мА постійного струму.

Тензоперетворювачі тиску “САПФІР-22”, що випускаються промисловістю мають наступні найменування: “САПФІР – 22 ДА” – абсолютного тиску (верхні границі від 2,5 кПа до 16 МПа); “САПФІР – 22 ДИ” – надмірного тиску (верхні границі від 0,06 кПа до 100 МПа); “САПФІР – 22ДД” – різниці тисків (верхні границі від 0,06 кПа до 16 МПа); “САПФІР – 22ДВ” – розрідження (верхні границі від 0,25 до 100 кПа); “САПФІР – 22 ДИВ” – тиску і розрідження (верхні границі від  $\pm 0,125$  кПа до  $-0,1 \div 2,4$  МПа); “САПФІР – 22 ДГ” – гідростатичного тиску (верхні границі від 2,5 до 250 кПа). Перетворювач має виконання вибухозахищене і невибухозахищене.

Перетворювач складається з вимірювального блоку і електронного пристрою. Перетворювачі різних параметрів (моделей) мають уніфікований електронний пристрій і відрізняються лише конструкцією вимірювального блоку. Параметр, що вимірюється надходить до камери вимірювального блоку і лінійно перетворюється у деформацію чутливого елемента та зміну електричного опору тензорезисторів тензоперетворювача, розташованого у вимірювальному блоці. Електронний пристрій далі перетворює цю зміну опору у струмовий вихідний сигнал. Чутливим елементом тензоперетворювача є плас-

тина з монокристалічного сапфіру із кремнійовими плівковими тензорезисторами, які міцно з'єднані з металевою мембраною тензоперетворювача. Схеми деяких перетворювачів приведені на рис. 2.9, 2.10.

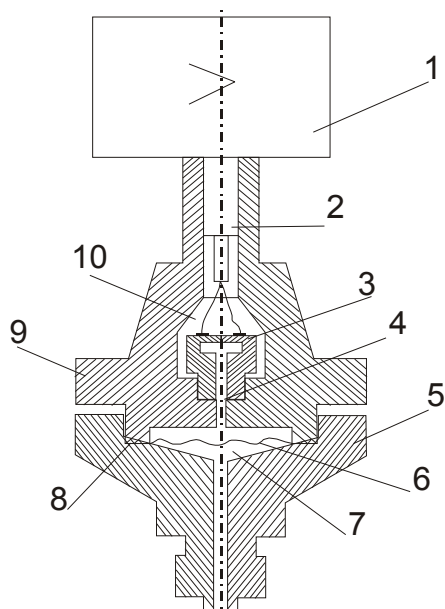


Рис. 2.9. Принципова схема перетворювача типу “Сапфир – 22ДИ”.

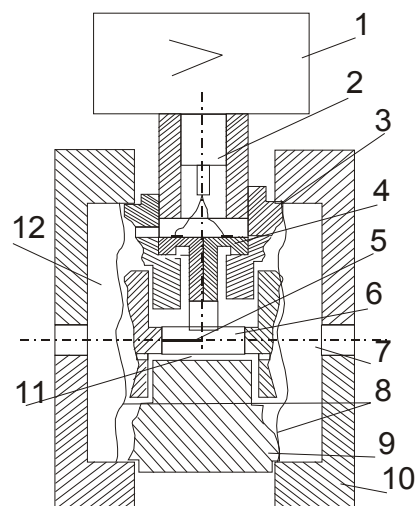


Рис. 2.10. Принципова схема перетворювача типу “Сапфир – 22 ДД”.

У датчиках “САПФИР - 22 ДИ” і “САПФИР - 22 ДИВ” (див. рис.2.9) мембранний тензоперетворювач 3 розміщений усередині основи 9. Внутрішня порожнина 4 тензоперетворювача заповнена кремнійорганічною рідиною і відокремлена від вимірювального середовища металевою гофрованою мембраною 6, що приварена по зовнішньому контуру до основи 9. Порожнина 10 сполучена з навколишньою атмосферою. Тиск, що вимірюється, надходить у камеру 7 фланця 5, який ущільнений прокладкою 8. Цей тиск впливає на мембрану 6 і через рідину – на мембрану тензоперетворювача 3, що викликає її прогинання та зміну опору тензорезисторів. Електричний сигнал від тензоперетворювача передається по проводах через герметичний вивід 2 на електронний блок 1.

У перетворювачах “САПФИР – 22 ДА” порожнина 10 вакуумована і герметизована.

Перетворювачі “САПФИР-22ДД” (див. рис. 2.10) мають тензоперетворювач 4 мембранно - важільного типу, який розташований

усередині основи 9 у замкнутій порожнині 11, що заповнена кремнійорганічною рідиною, і відокремлений від вимірювального середовища металевими гофрованими мембранами 8. Мембрани приварені по зовнішньому контуру до основи 9 і з'єднані поміж собою центральним штоком 6, що пов'язаний з кінцем важеля тензоперетворювача 4 за допомогою тяги 5. Фланці 10 ущільнені прокладками 3. Більший тиск надходить до камери 7, менший – до камери 12.

Під впливом різниці тисків, що вимірюється, мембрани 8 прогинаються. Це викликає прогинання мембрани тензоперетворювача 4 і зміну опору тензорезисторів. Електричний сигнал від тензоперетворювача надходить до електронного блоку 1 по проводах крізь герметичний вивід 2.

У перетворювачах “САПФИР-22ДВ” тиск, що вимірюється надходить до камери 12, а камера 7 сполучена з атмосферою. У перетворювачах “САПФИР-22ДГ” на відміну від перетворювача “САПФИР-22ДД” встановлено фланець з “відкритою” мембраною для монтажу безпосередньо на технологічній ємності. Вимірювальні блоки витримують однобічне перевантаження робочим тиском. Це забезпечується тим, що при однобічному перевантаженні мембрана 8 після додаткового переміщення лягає на профільовану подушку.

Електричне живлення перетворювачів здійснюється від джерела живлення постійного струму напругою 36В. Джерелом живлення рекомендовано використовувати блок 22БП-36, який має два варіанти виконання: 1 – для одночасного живлення трьох перетворювачів; 2 – для живлення шести перетворювачів. При вимірюванні витрати за допомогою звужувальних пристроїв застосовують датчик “САПФИР-22ДД” з вихідним сигналом  $4 \div 20$  мА разом з блоком витягання кореня БИК-1. У цьому випадку живлення перетворювача здійснюється також від БИК-1.

Живлення вибухозахищеного вимірювального перетворювача здійснюється від блоку перетворення сигналів БПС-24, який забезпечує отримання лінійної залежності поміж вихідним уніфікованим сигналом і параметром, що вимірюється, а також лінеаризацію статичної характеристики перетворювача при вимірюванні витрати за допомогою звужувальних пристроїв. Тензоперетворювачі тиску випускаються багатьма приладобудівними підприємствами і фірмами, серед яких слід виділити наступні серії датчиків: САФІР, МТ100, КВАНТ, МЕТРАН та ін.

**Вибір, установка і експлуатація приладів тиску** обумовлені: різноманіттям значень вимірюваного тиску (надмірний, абсолютний, вакууметричний); специфічністю умов, у яких здійснюються вимірювання на підприємствах; вимогами до точності вимірювань; необхідністю передачі показань на ту чи іншу відстань та ін. Проте з різноманіття випадків вимірювання тиску можна виділити деякі загальні вимоги, дотримання яких забезпечує правильність вимірювання.

До початку вимірювання необхідно з'ясувати необхідні величину і точність вимірювання тиску, межі коливань тиску, фізико-механічні властивості середовища. Ці показники дозволяють обрати потрібний тип приладу. При цьому, прилад повинен бути вибраним з урахуванням потрібної точності за умов експлуатації під впливом несприятливих зовнішніх чинників (підвищені температура, вологість, вібрації і т. п.), а величина вимірюваного тиску має бути якомога ближче до верхньої границі шкали приладу, що значно зменшує відносну похибку вимірювання. Місце відбору тиску на об'єктах вимірювання необхідно обирати так, щоб результати вимірювання не викривлялись динамічною дією потоку і завихрюваннями, які утворюються поблизу місцевих опорів (вентилі, коліна, регулюючі органи). У випадку вимірювання тиску газу чи пари у горизонтальних і нахилених трубопроводах тиск слід відбирати з області, що лежить вище вісі трубопроводу, а при вимірюванні тиску рідини – нижче вісі трубопроводу. Імпульсні лінії, що з'єднують місце відбору тиску з манометрами, повинні бути прокладені з ухиленням у бік місця відбору, якщо вимірюване середовище газ чи пара (виключається утворення рідинних пробок усередині трубок) або у бік манометра, якщо вимірюване середовище становить собою рідину (виключаються газові пробки). Для захисту чутливих елементів манометрів від дії високої температури газу чи пари перед приладом найчастіше встановлюють сифонну трубку у вигляді букви "U" чи кільцевого зашморгу. При вимірюванні тиску нагрітого газу сифонну трубку заповнюють водою. Якщо рідина, газ, пара чи його конденсат хімічно активні по відношенню до матеріалу чутливого елемента манометра, то перед приладом встановлюються мембранні роздільники чи захисні роздільні посудини (див розд. 2.3), заповнені до половини інертною рідиною. Технічні характеристики мембранних роздільників зведені до табл. 2.2, а їх конструктивне виконання наведено на рис. 2.11 і 2.12.

Таблиця 2.2.

## Технічні характеристики роздільників мембранних.

Модель РМ	Межа вимірювань, МПа	Габаритні розміри (діаметр-довжина), мм	Маса, кг
5319	Надмірний тиск від	145×78	3,5
5320	0,025 до 2,5 або вакуум від 0,025 до 0,1	145×30	2
5321	Надмірний тиск від 4	100×88	
5322	до 60	100×38	1,5
5494	Надмірний тиск від 0,6 до 2,5	84×66	1,7
5497	Надмірний тиск від 0,025 до 2,5 або вакууметричний тиск 0,1	145×83	3,6

Для середовища, що кристалізується, яке виділяє осадки або несе суспендоподібні тверді частинки, застосовують тільки роздільники моделей 5320 і 5322. Прилади у комплекті з роздільниками моделей 5494 застосовують для вимірювання надмірного тиску в'язкого середовища.

Роздільники моделей 5319, 5321, 5494 і 5497 (див. рис. 2.11) вміщують у собі вузол, що складається з верхнього 1 і нижнього 6 фланців, з'єднаних бовтами 5, поміж якими встановлений корпус 2 з привареною до нього мембраною 4. Ущільнення між корпусом і нижнім фланцем здійснюється прокладкою 7.

У конструкції роздільників моделей 5320 і 5322 (рис.2.12) з відкритою мембраною відсутній нижній фланець. Відкрита мембрана не дає можливості середовищу, що кристалізується, і твердим залишкам накопичуватися у значній кількості. Відкрита мембрана доступна для періодичного очищення. Кожух 8 необхідний для захисту мембрани від ушкодження при транспортуванні і одночасно запобігає від випадання бовтів 5 і прокладки 7.

Температура середовища, що вимірюється, на вході роздільника при роботі з манометрами повинна бути у межах від (-50) до 100 °С, при роботі з вакууметрами і мановакууметрами – у межах від (-50) до 60 °С. При температурі середовища, що вимірюється, поза межами які припустимі для роботи вимірювального пристрою, з'єднання роздільника і вимірювального пристрою здійснюється за допомогою з'єднувального рукава довжиною до 2,5 м. Матеріал



мембрани – сплав 36НХТЮ, корпусу – сталь 12Х18Н10Т, прокладки – поліетилен або фторопласт.

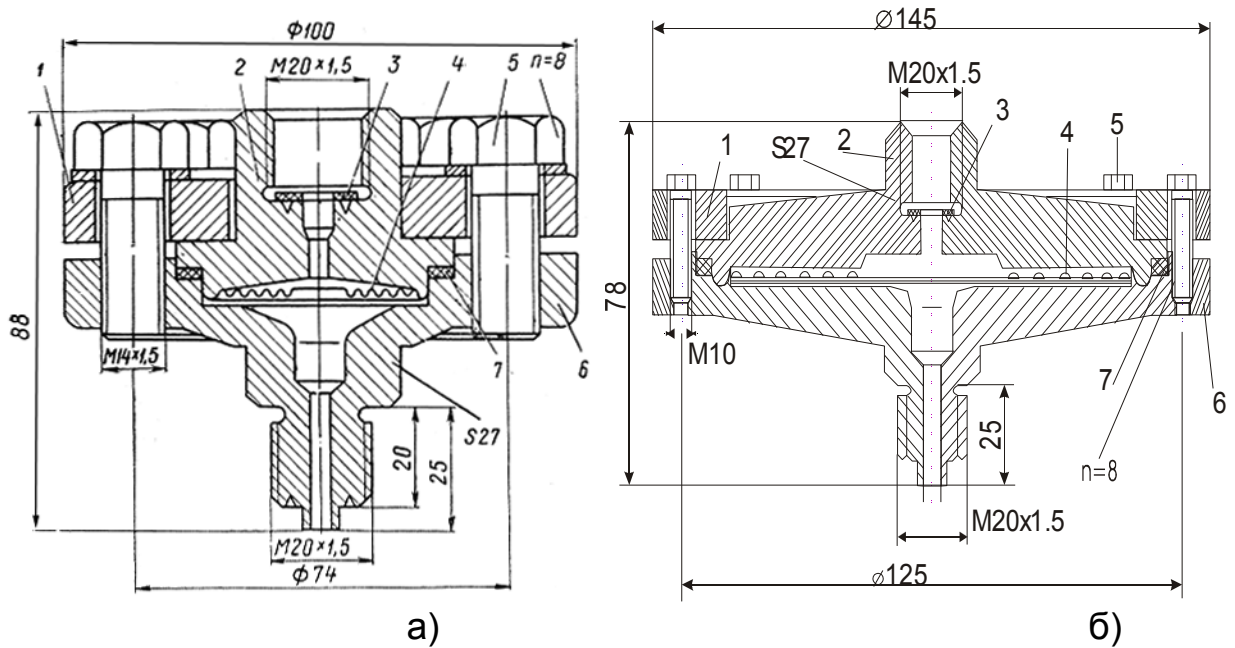


Рис. 2.11. Габаритно-монтажні розміри роздільників типу РМ, моделей 5321 (а) і 5319 (б): S – розмір під ключ; n – кількість бовтів.

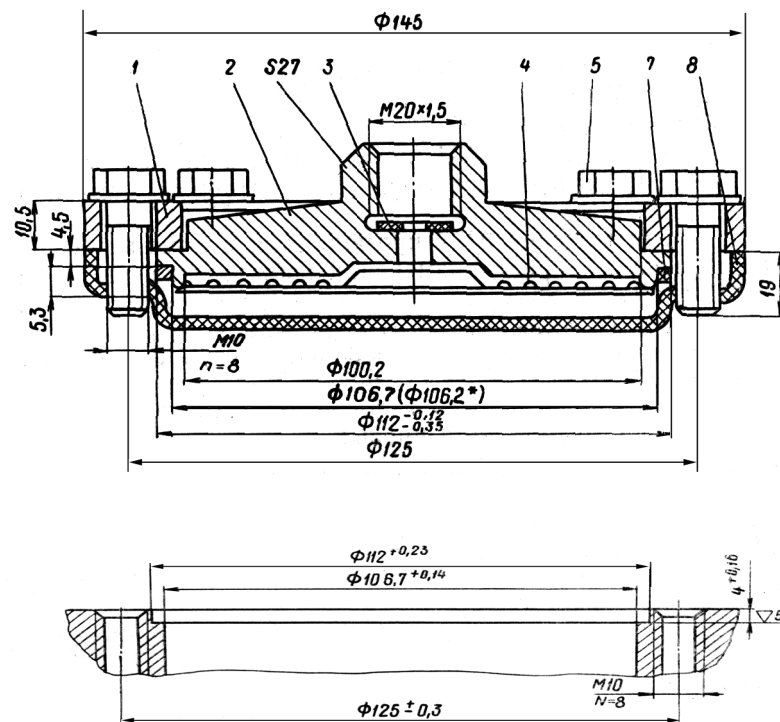


Рис. 2.12. Габаритно-монтажні розміри роздільників типу РМ, моделі 5320: S – розмір під ключ; n – кількість бовтів.

У залежності від властивостей вимірюваного середовища і умов експлуатації у якості роздільних рідин застосовуються вода, технічні мастила, гліцерин та його водні розчини, етиленгліколь, чотирьоххлористий вуглець, керосин та ін. Перед пружинним манометром обов'язково встановлюється триходовий кран, за допомогою якого манометр повільно включається у роботу, здійснюється повірка, а також продувка імпульсних ліній.

Слід відзначити, що викладені вище окремі основні рекомендації по вибору і установці манометрів можуть бути застосовані і для приладів, що вимірюють інші технологічні параметри.

### 2.3. ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ

Основна мета вимірювання рівня рідини або сипучих матеріалів пов'язана з визначенням кількості речовини у ємності чи забезпеченням контролю за положенням рівня у виробничому апараті для підтримки необхідного матеріального балансу технологічного процесу. У деяких випадках підтримка постійного рівня у ємності дозволяє визначити концентрацію чи густину рідини, тобто може виступати як непрямий параметр складу рідини.

За характером роботи рівнеміри можуть бути безперервної і періодичної (релейної) дії. Релейні рівнеміри спрацьовують при досягненні певного рівня і використовуються як сигналізатори. За принципом дії пристрої для вимірювання рівня розподіляють на такі: візуальні, поплавкові, буйкові, дифманометричні, гідростатичні, барботажні, електричні, ультразвукові, радіоізотопні і вагові.

*Візуальні рівнеміри* є найпростішими вимірювачами рівня рідини, а пристроями є показуючі скельця. Показуючі скельця працюють за принципом сполучених посудин. Показуюче скельце з'єднано із апаратом нижнім кінцем (для відкритих посудин) чи обома кінцями (для апаратів з надмірним тиском або розрідженням). Спостерігаючи за положенням рівня рідини у скляній трубці, можна судити про зміну рівня у апараті. Показуючі скельця оздоблюють вентилями чи кранами для відключення їх від апарату або продування системи. У промисловості їх застосовують найчастіше для контролю роботи вимірювальних перетворювачів.

*Поплавкові рівнеміри* – це рівнеміри, принцип дії яких оснований на вимірюванні переміщення поплавка, що плаває на поверхні рідини, тобто поплавков відслідковує рівень рідини. Поплавкові рів-

неміри непридатні для в'язкої рідини (дизпаливо, мазут, смола), що пов'язано із залипанням поплавка, викриванням його в'язким середовищем. При вимірюванні рівня киплячої рідини виникає вібрація поплавка, що безумовно викликає перекручення результатів вимірювання. Найчастіше поплавкові рівнеміри використовуються для вимірювання рівня у великих відкритих резервуарах, а також у закритих ємкостях з низьким надмірним тиском.

*Буйкові рівнеміри* – це рівнеміри, принцип дії яких оснований на вимірюванні переміщення буйка або сили гідростатичного тиску, що діє на буйок. Буйок на відміну від поплавка не плаває на поверхні рідини, а занурений у рідину і переміщується у залежності від її рівня. Найчастіше буйкові рівнеміри застосовуються для вимірювання рівня однорідної, до того ж і агресивної рідини, що знаходиться під високим тиском (до 32 МПа), у широкому діапазоні температур від (-200) до 600 °С. Рідина також не повинна мати властивостей адгезії до буйків. Головна властивість буйкових рівнемірів – це можливість вимірювання рівня границі розподілу фаз рідини. Недолік цих рівнемірів – залежність їх точності від густини і температури середовища, що вимірюється, обмеженість використання для великих діапазонів (понад 16 м) вимірювання рівня рідини і рідини, яким притаманна властивість адгезії.

*Дифманометричні рівнеміри* знайшли найбільше розповсюдження у промисловості завдяки високій надійності і простоті технічного обслуговування. Принцип дії оснований на вимірюванні гідростатичного тиску рідини за допомогою диференційного манометра. Дифманометричні рівнеміри мають широкий діапазон вимірювання рівня і можливість використання для агресивних середовищ.

*Гідростатичні рівнеміри* за звичаєм застосовуються для вимірювання рідини, що знаходиться під атмосферним тиском. Принцип дії оснований на вимірюванні манометром або напороміром гідростатичного тиску рідини, що залежить від висоти її рівня. Недолік цих рівнемірів – велика похибка при зміні густини рідини.

*Барботажні (п'езометричні) рівнеміри* – це рівнеміри, принцип дії яких оснований на перетворенні гідростатичного тиску рідини у тиск повітря, який подається від стороннього джерела та барботує крізь шар рідини. У цього рівнеміра чутливий елемент не знаходиться у безпосередньому контакті з вимірюваним середовищем, а сприймає гідростатичний тиск через повітря. Недолік барботажних рівнемірів також пов'язаний з похибкою при зміні густини рідини.

*Електричні рівнеміри* – це рівнеміри, у яких рівень рідини перетворюється в електричний сигнал. Серед електричних рівнемірів найбільше розповсюджені ємкісні та омичні. У ємкісних рівнемірах використовуються діелектричні властивості контрольованого середовища, в омичних – властивість контрольованого середовища проводити електричний струм.

Перетворювач ємкісного рівнеміра є електричним конденсатором, ємність якого залежить від рівня рідини. Перетворювачі ємкісних рівнемірів виконують циліндричного і пластинчатого типів, а також у вигляді жорсткого стрижня. Електричну ємність за звичаєм вимірюють із застосуванням резонансних і мостових схем. При резонансному методі конденсатор з контрольованою ємністю, яка включена паралельно з котушкою індуктивності, утворює резонансний контур, настроєний у резонанс з частотою напруги живлення при певній початковій ємності перетворювача, що відповідає наявності або відсутності контрольованої речовини на заданому рівні. Зміна ємності перетворювача призводить до зміни власної частоти контуру і зриву резонансу. Цей метод використовують найчастіше у ємкісних сигналізаторах рівня. При мостовому методі контрольована ємність включена в одне із плеч мосту. При зміні рівня змінюється ємність, що викликає розбаланс мосту. Сигнал розбалансу через підсилювач надходить у показуючий електричний прилад, градуйований у одиницях рівня.

Омичні перетворювачі використовують головним чином у якості сигналізаторів. Принцип дії омичних перетворювачів оснований на замиканні електричного поля джерела живлення через контрольоване середовище, що становить собою ділянку електричного кола певного омичного опору. Прийнято середовища з провідністю  $\varepsilon > 10^{-5}$  См/м відносити до електропровідних, а з провідністю  $\varepsilon < 10^{-7}$  См/м – до не електропровідних. У якості електродів в омичних перетворювачах застосовують металеві стрижні чи труби і вугільні електроди (для агресивного середовища).

Основний недолік усіх електродних приладів – неможливість їх застосування у середовищах в'язких, таких, що утворюють тверді осадки, кристалізуються і налипають на електроди перетворювачів.

*Ультразвукові (акустичні) рівнеміри* дозволяють вимірювати рівень за відсутності контакту з середовищем, що вимірюється, і у важкодоступних місцях. Дія цих приладів оснований на принципі відбиття ультразвукових хвиль від границі розподілу двох середовищ з

різними акустичними опірностями. Прийнято розподіляти: в ультразвукових рівнемірах використовується принцип відбиття ультразвукових хвиль з боку рідини, а у акустичних – з боку газового середовища. Рівень рідини у резервуарі визначають за часом запізнення відбитого сигналу відносно надісланого. Час поміж моментом подачі імпульсу і моментом надходження відбитого імпульсу буде функцією висоти рівня. Постійна напруга, пропорційна часу запізнення відбитого сигналу, що утворюється у вимірювачі часу, надходить до вторинного приладу.

*Радіоізотопні рівнеміри* – це рівнеміри, принцип дії яких оснований на поглинанні  $\gamma$  – променів при проходженні їх крізь шар речовини. При цьому у залежності від рівня речовини буде змінюватись інтенсивність  $\gamma$  – випромінювання при поглинанні його речовиною. Використання цих приладів доцільно лише у тих випадках, коли інші методи вимірювання непридатні. До того ж обслуговування цих приладів вимагає особливої уваги і додержання правил техніки безпеки.

*Вагові рівнеміри*, принцип дії яких оснований на визначенні рівня по зміні тиску на чутливий елемент, що утворює маса контрольованого середовища. Найбільше розповсюдження знайшли тензометричні, мембранні і вагові рівнеміри.

Слід відзначити, що деякі прилади вимірювання рівня вміщують виконання, поєднуючи ті чи інші методи вимірювань. За функціональним призначенням у системах автоматизації пристрої вимірювання рівня найчастіше виготовляють як вимірювальні перетворювачі та сигналізатори рівня.

**Буйкові рівнеміри** відносяться до найбільш розповсюджених автоматичних приладів для вимірювання рівня рідини і у залежності від виду встановленого перетворювача можуть мати як пневматичний, так і електричний уніфікований вихідний сигнал пропорційний величині рівня рідини.

*Вимірювальні пневматичні перетворювачі УБ-II* призначені для роботи у системах автоматичного контролю, керування і регулювання параметрів виробничих технологічних процесів з метою отримання інформації у вигляді стандартного пневматичного уніфікованого сигналу 0,02 – 0,1 МПа про рівень рідини або границі розподілу двох рідин, що не змішуються, та які знаходяться під вакууметричним, атмосферним чи надмірним тиском.

Рівнемір складається з вимірювального блоку і уніфікованого перетворювача, принцип дії якого оснований на пневматичній силової компенсації. Схема перетворювача аналогічна наведеній на рис.2.2 і відрізняється лише пристроєм важільної системи зв'язку “заслінка-сопло”. Загальний вигляд рівнеміра наведено на рис.2.13.

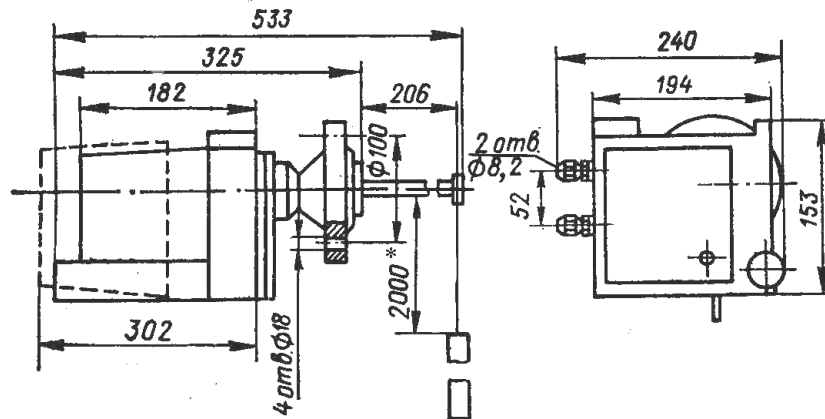


Рис.2.13. Габаритні і установочні розміри рівнеміра буйкового УБ-П і УБ-ПМ. (\* - довжина зв'язку з буйком регулюється у межах 0,02 – 16 м.).

Деталі рівнеміра, що контактують із вимірюваним середовищем, виготовляються з нержавіючої сталі.

Тиск повітря живлення рівнемірів 0,14 МПа, витрата повітря живлення не перевищує 3 л/хвил. Рівнеміри забезпечують передачу вихідного сигналу по пневматичній лінії зв'язку внутрішнім діаметром 6 мм довжиною від 3 до 300 м. У лінії живлення повітрям необхідно встановлювати фільтр і стабілізатор повітря.

*Сигналізатор рівня пневматичний СУ* призначений для контролю і сигналізації досягнення рідиною заданого рівня у сховищі, ємності, цистерні і т.ін. У залежності від виконання може бути буйкового або п'єзометричного типу дії. При п'єзометричному типу дії застосовується гідравлічний затвор, що встановлює межевий тиск у пневматичній системі. Для вимірювання рівня (див. рис.2.14) застосовуються повітря чи інертні гази. При цьому повинна виконуватись нерівність:

$$P_{\Pi} > P_X + \rho g H, \quad (2.3)$$

де  $P_{\Pi}$  – тиск повітря, що продувається крізь п'єзометричну трубку;  $P_X$  – тиск над рідиною у ємності;  $H$  – висота рівня рідини;  $\rho$  – густина рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння.

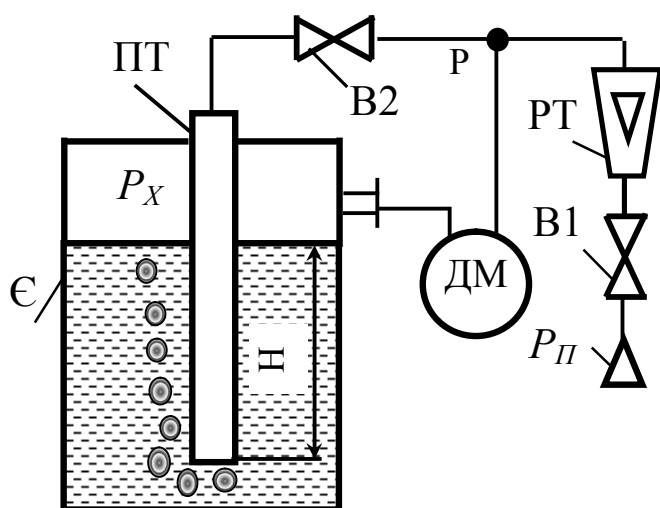


Рис. 2.14. Схема п'езометричного вимірювання рівня рідини: Є – ємність з рідиною; ПТ – п'езометрична трубка; ДМ – дифманометр; РТ – ротаметр для контролю витрати повітря; В1 – регулювальний вентиль витрати повітря; В2 – запірний вентиль.

Повітря продувають крізь шар рідини. Кількість повітря контролюють ротаметром РТ і регулюють вентилем В1. Рівень рідини визначається дифманометром ДМ, що вимірює перепад тиску:

$$H = (P - P_X) / \rho g \quad (2.4)$$

Застосовуючи дифманометри з різними перетворювачами можна здійснювати передачу величини рівня на відстань. У сигналізаторах типу СУ використовується дифманометр з двопозиційним виходом. Сигналізатори застосовуються для рідкого середовища з густиною у діапазоні  $600 \div 1600 \text{ кг/м}^3$ , окрім таких, що кристалізуються або полімеризуються.

При спрацьовуванні на виході сигналізатора відбувається зміна дискретних сигналів “0” і “1” на протилежне значення. Сигналу “0” – відповідає розімкнений електричний контакт; сигналу “1” – замкнений. Встановлюється сигналізатор у верхній частині ємності на фланці, що розташований горизонтально, і виготовляється з різних корозійно стійких матеріалів. Має широкий температурний діапазон роботи – до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  при температурі навколишнього повітря від  $(-30)$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , звичайне та вибухозахищене виконання (ІЕхdsПТС6).

Вимірювальні електричні тензоперетворювачі “Санфир-22ДУ” призначені для роботи у системах автоматичного контролю, регулювання і управління технологічними процесами з вибухонебезпечними умовами виробництва і забезпечують безперервне перетворення значення рівня рідини чи рівня розподілу рідких фаз як нейтральних, так і агресивних середовищ у стандартний вихідний сигнал постійного струму. При цьому середовище, що контролюється, не повинно мати компонентів, конденсат яких замерзає при температурах навколишнього повітря, можливих в процесі експлуатації. В

протилежному випадку датчики необхідно розміщувати в обігрівальних шафах. Пристрої “Сапфир-22ДУ-ВН” мають виконання вибухозахищене з маркуванням “ІЕхdПВТ4/Н<sub>2</sub>”, а пристрої “Сапфир-22ДУ-Ех” – маркування “ОЕхiaПСТ6”. Організація живлення та схем підключення аналогічне тензоперетворювачам тиску “Сапфир-22”. Датчики є вібростійкими і сейсмоміцними.

Кожний датчик має пристрій для регулювання, який дозволяє настроїти його на будь-яку густину рідини або на будь-яку різницю густини рідких середовищ із тих, що встановлюються для окремої моделі.

Перетворювач “Сапфир-22ДУ” складається з вимірювального і електронного блоків. На рис.2.15. наведена схема улаштування вимірювального блоку. Згідно з рис.2.15 буйок 1 жорстко з'єднаний з важелем 2, що має опору у вигляді мембрани 4. Остання закріплена по периферії на циліндричній втулці 3, яка приварена до трубчастого корпусу 12 з фланцем для приєднання перетворювача до об'єкту. На втулці за допомогою клемного затискача 8 закріплений кронштейн, поміж двома листовими платами якого встановлений тензоперетворювач 7 і сильфонний гідравлічний демпфер 5. Елементи вимірювального блоку закриті кришкою 10, яка накинута на основу 11. Основа закріплюється бовтами на трубчастому корпусі 12. Важіль 2 і тензоперетворювач 7 з'єднані поміж собою металевою стрічкою 6. Зміна рівня рідини призводить до повороту важеля 2, а через стрічку 6 і важеля тензоперетворювача 7. У підсумку змінюється опір і рівновага мостової електричної схеми перетворювача, живлення якої здійснюється постійним струмом від електронного блоку. Гідравлічний демпфер 5 вирівнює коливання рухливої системи, для чого внутрішня порожнина його заповнена в'язкою рідиною. При цьому рідина плавно перетікає з одної порожнини демпфера у другу крізь гідравлічний опір – регульований дросель 9. Ковпачок 14 запобігає витіканню рідини при транспортуванні. Обмежувач 13 запобігає надмірному переміщенню важеля при випадкових перевантаженнях його під час монтажу.

Межі зміни струмових вихідних сигналів для “Сапфир-22ДУ-ВН” –  $0 \div 5$  мА або  $0 \div 20$  мА, або  $4 \div 20$  мА, а для “Сапфир-22ДУ-Ех” –  $4 \div 20$  мА. Довжина поміж джерелом живлення і перетворювачем не повинна перевищувати 600 м по трасі.



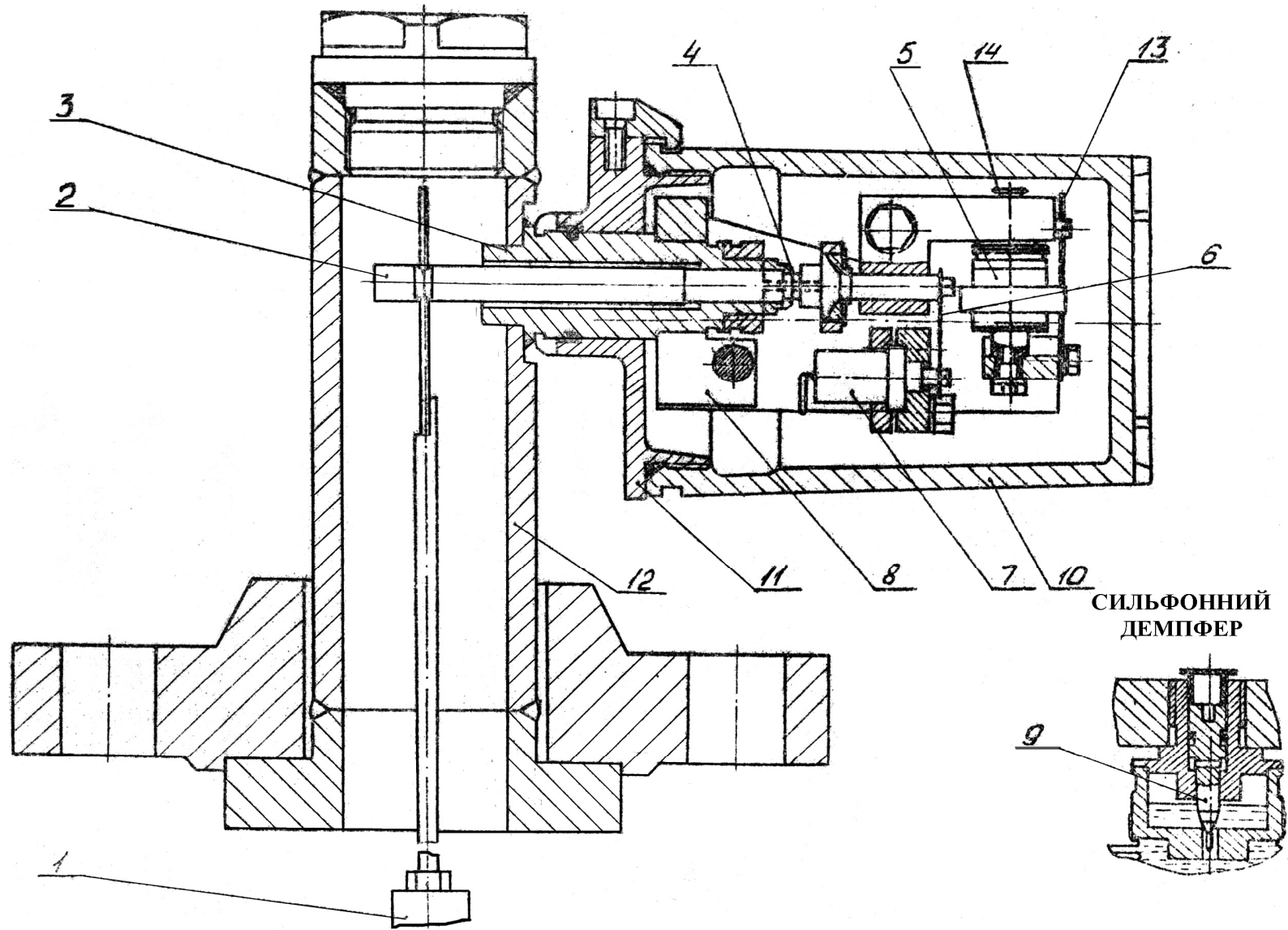


Рис. 2.15. Конструктивне оформлення вимірювального блоку перетворювача "Сапфір22ДУ".

**Поплавкові** рівнеміри найчастіше застосовуються для вимірювання рівня у відкритих резервуарах, величина якого сягає десятки метрів.

*Показуючий пристрій дистанційного спостереження рівня і напору рідини УМ2-3* призначено для вимірювання рівня і напору неагресивної рідини і мазуту, нагрітого до  $60 \div 80^\circ\text{C}$  у відкритих резервуарах.

Принцип роботи пристрою ґрунтується на способі слідкування за рівнем за допомогою поплавка, який знаходиться на поверхні рідини і переміщується разом з її рівнем. Пристрій складається з датчика Д і приймача П, пов'язаних поміж собою сельсинною дистанційною передачею (рис.2.16).

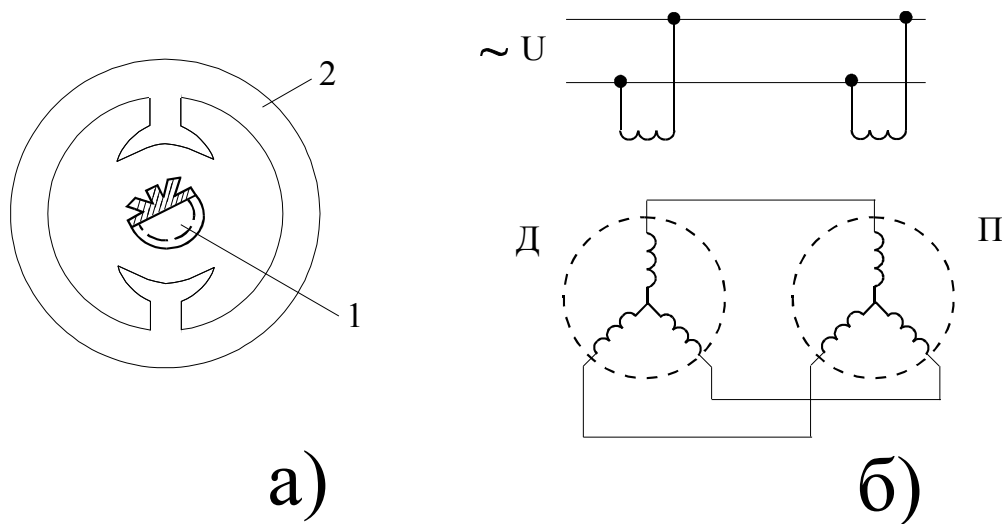


Рис. 2.16. Сельсинна передача: а – схема побудови; б – схема включення; 1 – ротор; 2 – статор.

Сельсин – це мініатюрна трифазна електрична машина, що схожа з синхронним генератором чи двигуном. Ротор сельсина має одну обмотку (обмотка збудження), а статор – три обмотки (обмотки синхронізації), вісі яких зсунені на  $120^\circ$  одна відносно іншої.

Обмотки збудження живляться змінним струмом, а кінці трифазної обмотки поєднані поміж собою. В процесі роботи обмотка ротора сельсина-датчика Д створює змінний магнітний потік, який індукуює у обмотках статора електрорушійну силу (ЕДС). Величина ЕДС в кожній з обмоток статора буде пропорційна куту повороту і відрізнятись у зв'язку із зсуванням їх на  $120^\circ$ . Аналогічна картина буде відбуватись і у сельсині-приймачі П.

Якщо положення роторів відносно обмоток статорів буде однаковим, то струми, що утворюються у цих обмотках, будуть рівними завдяки однаковості наведених ЕДС. При цьому синхронізуючий момент дорівнює нулю. У випадку відхилення ротора сельсина-датчика, тобто при зміні рівня, наведені ЕДС у відповідних обмотках Д і П будуть відрізнятись за величиною. Виникне струм у зустрічно включених обмотках статора, який приведе до виникнення синхронізуючого моменту, величина якого буде залежати від різниці кута повороту. Ротор датчика з'єднаний з чутливим елементом (поплавком) приладу, а ротор приймача – з відліковою частиною (шкалою). Типи датчиків відрізняються матеріалом поплавка. Приймач виконаний у пластмасовому корпусі. На лицьовому боці приладу є лічильник і шкала з рухливим індексом. Приймач може відрізнятись типом застосованого сельсина.

Сельсинні приймачі виготовляють у кількох модифікаціях: УСП-1М – для вимірювання рівня у діапазоні від 1,25 до 20 м; УСП-2М – для вимірювання напору у діапазоні від 1,25 до 40 м.

*Сигналізатори (датчик-реле) рівня рідини електричний ДУЖЭ-200М* та пневматичний ДУЖП-200М призначені для сигналізації межового рівня однорідної рідини або рівня розподілу двох рідин в агрегатах з робочим тиском до 20 МПа і видачі дискретного, відповідно електричного чи пневматичного сигналу, на вторинні сигналізуючі прилади. Датчики - реле не призначені для рідини, що агресивна до сталі 12Х18Н10Т чи сталі 20. Густина контрольованого середовища може змінюватись у діапазоні  $700 \div 1500 \text{ кг/м}^3$ , а температура - від (-55) до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сигналізатор ДУЖЭ-200М виготовлено у вибухобезпечному виконанні для застосування на відкритих майданчиках, а також у приміщеннях всіх класів, де можливо утворення вибухонебезпечної суміші газу і пари з повітрям. На рис.2.17 представлені загальний вигляд сигналізатора та варіант штуцерного монтажу його на апараті.

Чутливий елемент датчика (рис.2.17) становить собою двоплечий важіль, що обертається навколо вісі 8, на плечах якого розташований поплавок 9 і утримувач 10 з магнітом. У початковому стані, тобто за відсутності рідини, поплавок 9 знаходиться у нижній позиції, а утримувач 10 з магнітом у верхньому. При зануренні поплавка у рідину змінюється співвідношення моментів оберту на кожному з плеч важеля, що призводить до спливання поплавка і опадання магніту утримувача.

Принцип роботи сигналізатора ґрунтується на взаємодії двох магнітів. Магнітна взаємодія здійснюється через торці однойменних полюсів магнітів утримувача і встановленого у корпусі 12. При спливанні поплавка відстань поміж торцями магнітів зменшується, що призводить до зростання сили магнітної взаємодії магнітів елементів 10 і 12, за підсумком чого магніт утримувача 10 переміщується угору. Магніт, що знаходиться у корпусі 12, пов'язаний з мікровимикачем. Тому таке переміщення призведе до перемикання контактів, тобто появи або зникнення, у залежності від типу задіяних контактів, електричного сигналу про підвищення рівня рідини. У сигналізаторі ДУЖП - 200М замість контактної групи встановлені два сопла і магніт – заслінка. Напруга електроживлення ДУЖЭ-200М складає 220В з частотою 50 Гц, а живлення ДУЖП-200М здійснюється стислим повітрям тиском 0,14 МПа. вихідний дискретний пневматичний сигнал при значенні “0” – від 0 до 0,01 МПа, а при значенні “1” – від 0,11 до 0,14 МПа.

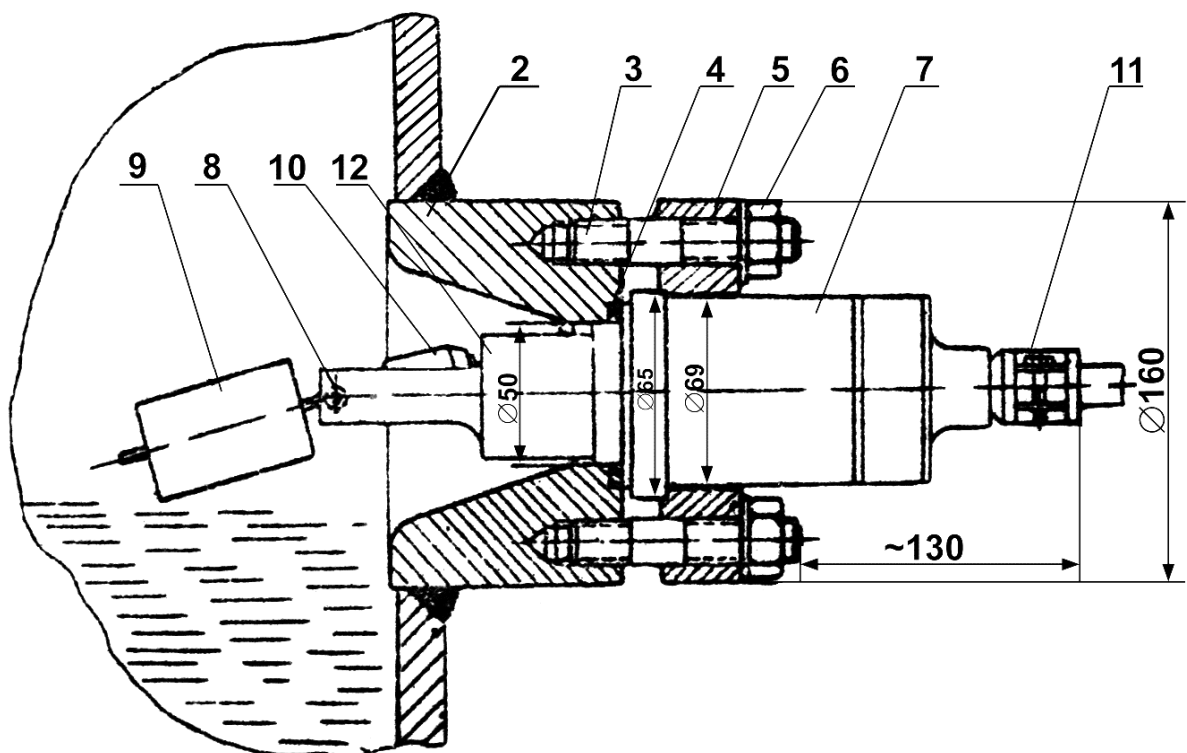


Рис.2.17. Загальний вигляд і варіант штуцерного монтажу сигналізатора: 1 – апарат; 2 – штуцер; 3 – шпилька; 4 – прокладка; 5 – фланець; 6 – гайка; 7 – втулка сигналізатора; 8 – вісь; 9 – поплавок; 10 – утримувач з магнітом; 11 – з'єднувальний увід; 12 – корпус.

Датчики також поставляються з тросом довжиною 3,5м після закріплення поплавка у потрібному положенні залишок тросу відрі-

зають. Проводячи монтаж необхідно слідкувати, щоб вісь установки була вище контрольованого рівня на 0,35 - 1м. Окрім наведеного на рис.2.17 можливий і виносний (камерний) монтаж сигналізатора. Діапазон спрацьовування датчиків регульований і складає від 0,1 до 3м.

**Дифманометричні і гідростатичні рівнеміри** застосовуються для вимірювання рівня рідини постійної густини, що знаходиться під атмосферним, надмірним чи вакууметричним тиском. При цьому гідростатичний тиск вимірюється за допомогою дифманометрів чи манометрів. Види дифманометрів і манометрів, їх характеристики та умови застосування достатньо докладно розглянуті у розділі 2.2. З метою забезпечення правильного вимірювання перепаду тиску, а також створення умов надійної і безперервної роботи дифманометра, необхідно застосування допоміжних пристроїв, що встановлюються на з'єднувальних лініях поміж ємністю і дифманометром. До цих пристроїв відносяться вирівнювальні і роздільні посудини та мембранні роздільники. Останні розглянуті у розділі 2.2. Конструктивні особливості цих пристроїв залежать від роду вимірювального середовища, їх властивостей і параметричних характеристик. На рис.2.18 показані найбільш розповсюджені схеми трубних з'єднань у відкритому резервуарі та резервуарі, що знаходиться під тиском, із застосуванням дифманометрів.

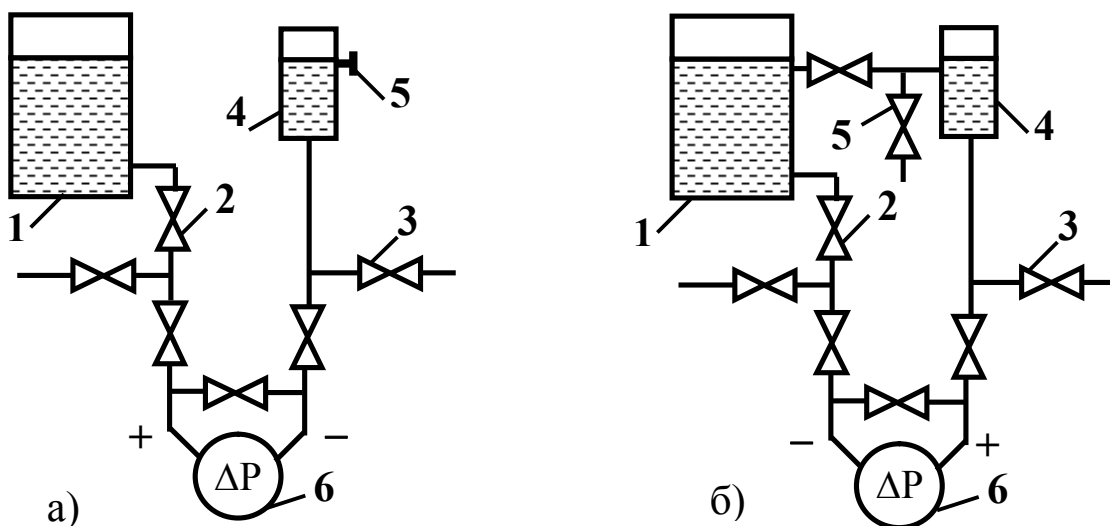


Рис.2.18. Схема вимірювання рівня рідини у відкритому (а) і закритому (б) резервуарах дифманометром – рівнеміром: 1 – резервуар з рідиною; 2 – запірний вентиль; 4 – вирівнювальна посудина; 5 – пробка (у закритому резервуарі – вентиль для контролю рівня); 6 – дифманометр.

Слід відзначити, що вирівнювальна посудина може встановлюватись як на висоті максимального рівня (рис.2.18), так і на висоті мінімального рівня. В останньому випадку посудина з'єднується з “мінусовою” камерою дифманометра.

*Вирівнювальні посудини*, як виходить з рис.2.18., застосовують при вимірюванні рівня у резервуарах для виключення впливу на результат вимірювання висоти стовпа рідини у посудині по відношенню до змінного рівня у резервуарі, що вимірюється. Стандарт передбачає наявність великих (Б) і малих (М) посудин. Тому тип посудини позначають відповідно СУБ і СУМ. Приладобудівними підприємствами серійно випускаються тільки малі посудини СУМ, загальний вигляд, яких наведені на рис.2.19.

До складу позначення посудин входять: умовний тиск у МПа; виконання передбачає комплектацію штуцерів посудини тими чи іншими ніпелями, пробками і т.ін.; код матеріалу, з якого він виготовлений. Якщо посудина виготовлена із сталі 35 додається позначення “а”, із сталі 12Х18Н10Т – позначення “б”, а із сталі 10Х17Н13М2Т – позначення “в”. Таким чином, мала вимірювальна посудина на умовний тиск 25 МПа виконання 3, виготовлена із сталі 12Х18Н10Т буде позначена наступним чином: СУМ-25-3б.

Посудини вимірювальні для дифманометрів-рівнемірів при вимірюванні рівня у барабанах парових котлів виготовляються у різних виконаннях. Загальний вигляд посудин модифікацій П-198 та П-234 наведено на рис.2.20.

Ці посудини приєднуються до штуцерів барабану парового котла (див. рис.2.20). внутрішня порожнина посудини постійного рівня 1 з'єднується через штуцер 3 з паровим простором котла. Посудина змінного рівня 2, що з'єднана з нижнім штуцером барабану через штуцер 4, розташована усередині посудини 1. Цим забезпечується рівність температур стовпів рідини в обох посудинах і виключається відповідна температурна похибка в показаннях приладу.

Рівень рідини у посудині 1 підтримується постійним за рахунок безперервної конденсації пари. Рівень у посудині 2 змінюється у залежності від зміни рівня рідини у барабані котла. Надлишок конденсату зливається через верхній штуцер 3 назад у барабан котла. Для зменшення теплової втрати посудина 1 і паропровід покривають ізоляцією. З'єднувальна трубка від посудини 1 через отвір 5 надходить до плюсової камери дифманометра, а від посудини 2 через отвір 6 – до мінусової камери.

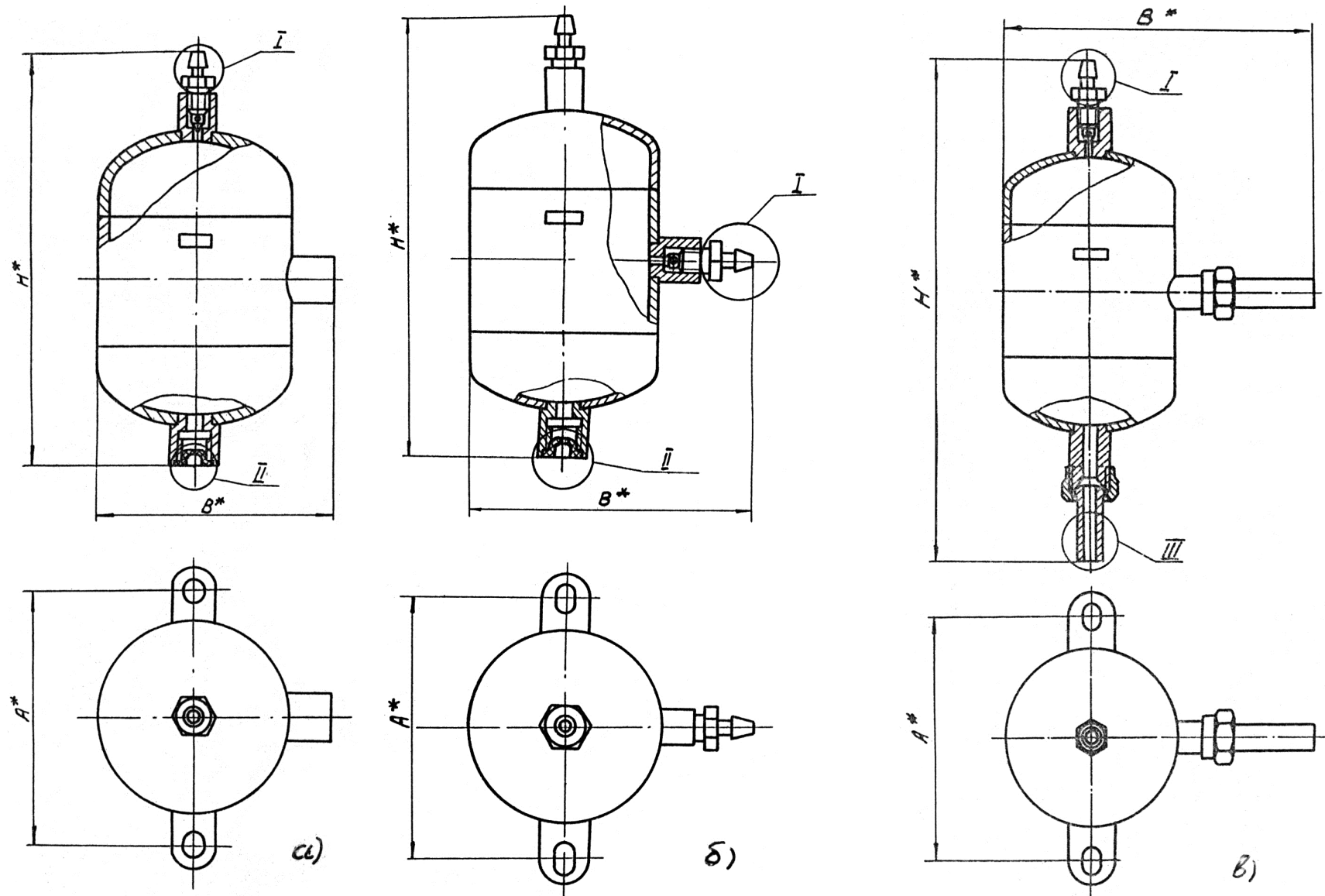


Рис. 2.19. Вирівнювальні посудини: а – СУМ-6,3-1; б – СУМ-6,3-3; в – СУМ-25-2 і СУМ-40-2 (розміри штуцерів I – IV наведені на рис.2.20).

Верхній отвір посудини призначений для заповнення пристрою рідиною і закривається герметично. Границя вимірювання (шкала) у посудин моделей П-198 складає  $\pm 31,5$  см, а у моделей П-234 складає  $\pm 50$  см.

*Роздільні посудини* застосовують при вимірюванні рівня агресивної рідини, які заповнюються роздільною рідиною. Роздільні посудини згідно стандарту мають три розміри: великий (Б), середній (С) і малий (М). Серійно випускаються тільки середні на тиск 25 і 63 МПа, а малі посудини на тиск 40 МПа. На рис.2.21 наведено загальний вигляд посудини типу СРС. Приєднувальні розміри відповідають виконанням, що наведені на рис.2.20. Склад позначення роздільних посудин однаковий з вирівнювальними.

У залежності від співвідношення густини середовища, що вимірюється, і роздільною рідиною. Перша з них підводиться або у верхню, або у нижню частину роздільної посудини. Роздільна рідина (водоглицеринова суміш, дибутилфталат, етиленгліколь та ін.) не повинна хімічно взаємодіяти з вимірювальним середовищем, змішуватись з ним, а також давати відкладення або діяти на матеріал з'єднувальних ліній, роздільних посудин і чутливих елементів дифманометрів. Особливістю конструкції усіх роздільних посудин є наявність контрольних пробок для контролю рівня рідини, що заповнює посудину. Рівні рідини у посудинах, що застосовані на плюсовій і мінусовій з'єднувальних лініях дифманометра, повинні бути однаковими при нульовому перепаді тиску.

**Електричні рівнеміри** здійснюють перетворення рівня рідини у який-небудь дискретний чи аналоговий електричний сигнал.

*Сигналізатори рівня СУС і СУС-М* призначені для контролю рівня рідкого та твердого (сипучого) середовища і контролю рівня розподілу середовищ: нафтопродукти – вода та іншої рідини, у яких діелектрична проникність значно відрізняється одна від другої.

Сигналізатор рівня складається із первинного (ПП) і вторинного (ВПП-1) перетворювачів при контролі одного рівня і з двох первинних (ПП) і одного вторинного (ВПП-2) перетворювачів при контролі двох рівнів. Сигналізатори рівня СУС-И мають виконання первинного перетворювача іскробезпечне з маркуванням по вибухозахисту "0ExiaIICT6". Припустиме їх встановлення у вибухонебезпечних зонах приміщень і зовнішніх установок. При цьому вторинні перетворювачі призначені для встановлення поза вибухонебезпечних зон приміщень.



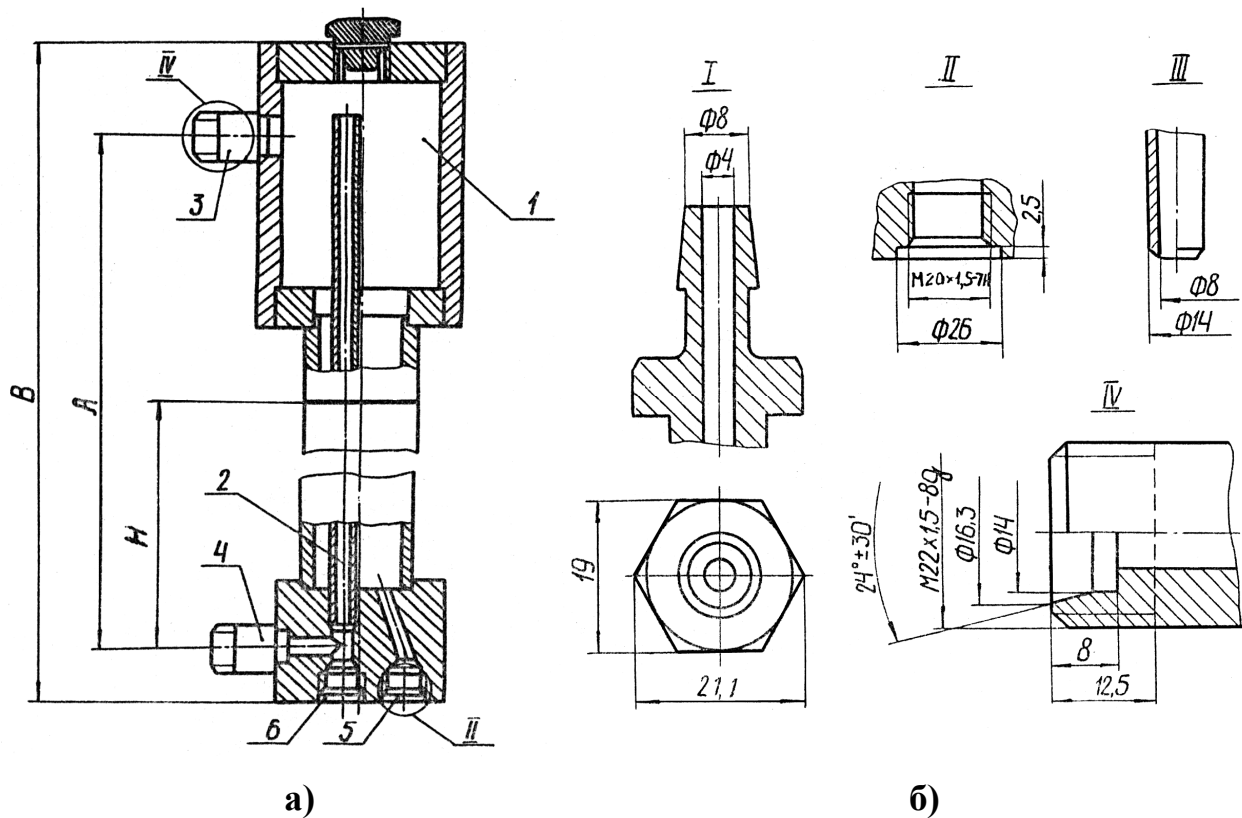


Рис. 2.20. Вирівнювальні посудини: а – П-198 і П-234; б – конструктивні розміри штуцерів I – IV (дивись рис. 2.19) вирівнювальних посудин.

Сигналізатори рівня типу СУС сейсмостійкі, випускаються із різним виконанням первинних перетворювачів та їх чутливих елементів, довжиною занурюваної частини і параметрами контрольованого середовища. Загальний вигляд первинних перетворювачів наведено на рис.2.22.

В основу роботи сигналізатора покладено явище виникнення резонансу у коливальному контурі при зміні електричних параметрів елементів (ємність, індуктивність), що містить він. При зміні контрольованого рівня буде змінюватись величина ємності (індуктивності) чутливого елемента (ПП) 1 (циліндричний конденсатор), яка потім перетворюється електричною схемою 3 (ПП) у напругу постійного струму. Ця напруга далі керує роботою вихідного реле, встановленого у ВПР.

Деталі первинних перетворювачів, що контактують із вимірювальним середовищем, виготовляються з матеріалів сталь 12Х18Н10Т і фторопласту 4.

*Сигналізатор рівня СУЛЖ-1 (омічний)* безперервної дії, призначений для видачі сигналу про досягнення заданого верхнього чи нижнього межового рівня легкоспалахуючої рідини у ємності з в'язкістю не більше 1500 Па·с. Серед цих рідин можуть бути наступні: аліловий і аміловий спирти, ацетони, бензин, спирти, і т. ін.

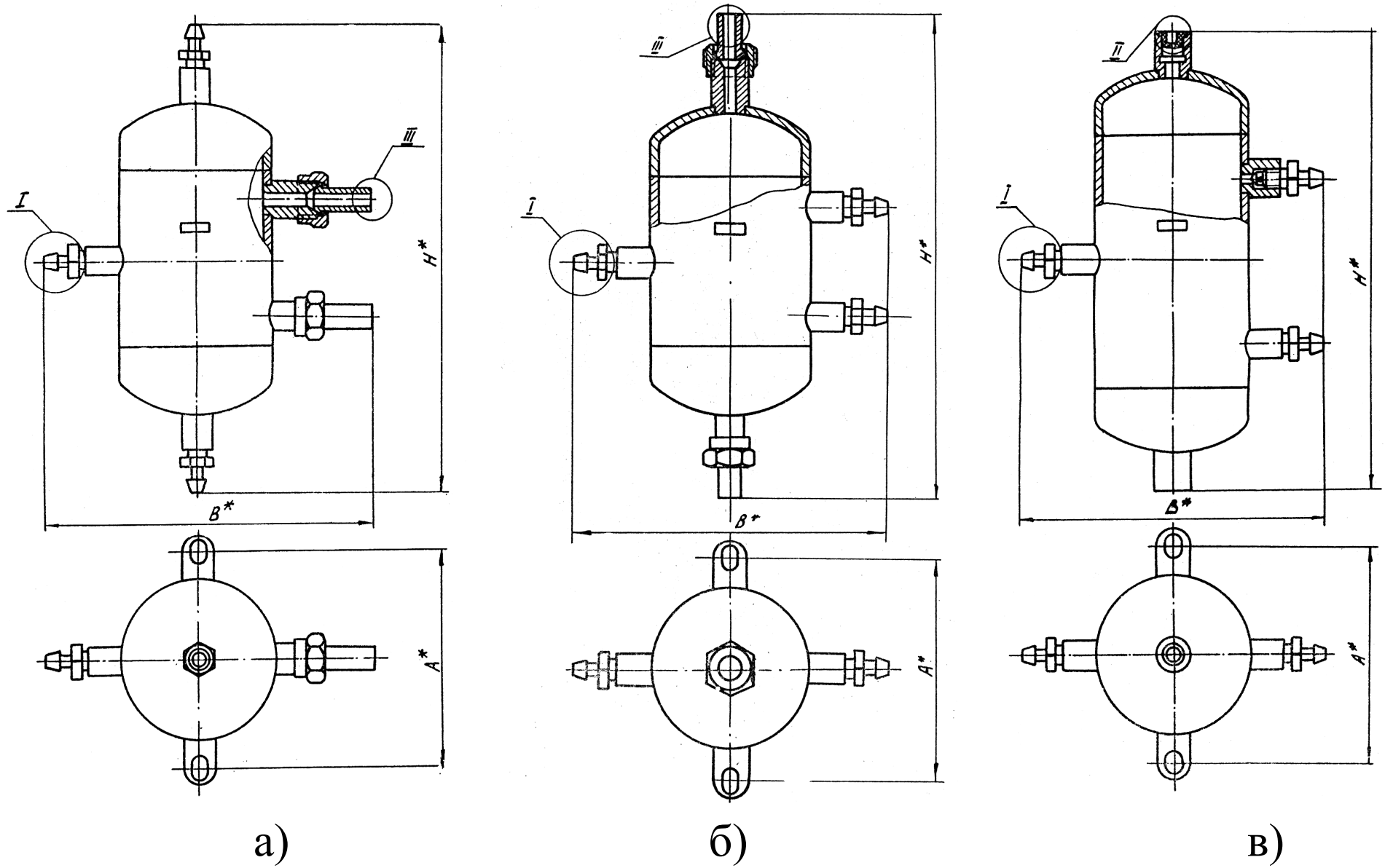


Рис. 2.21. Посудини роздільні: а – CPC-6,3-1; б – CPC-25-2 і CPC-40-2; в – CPC-25-4.

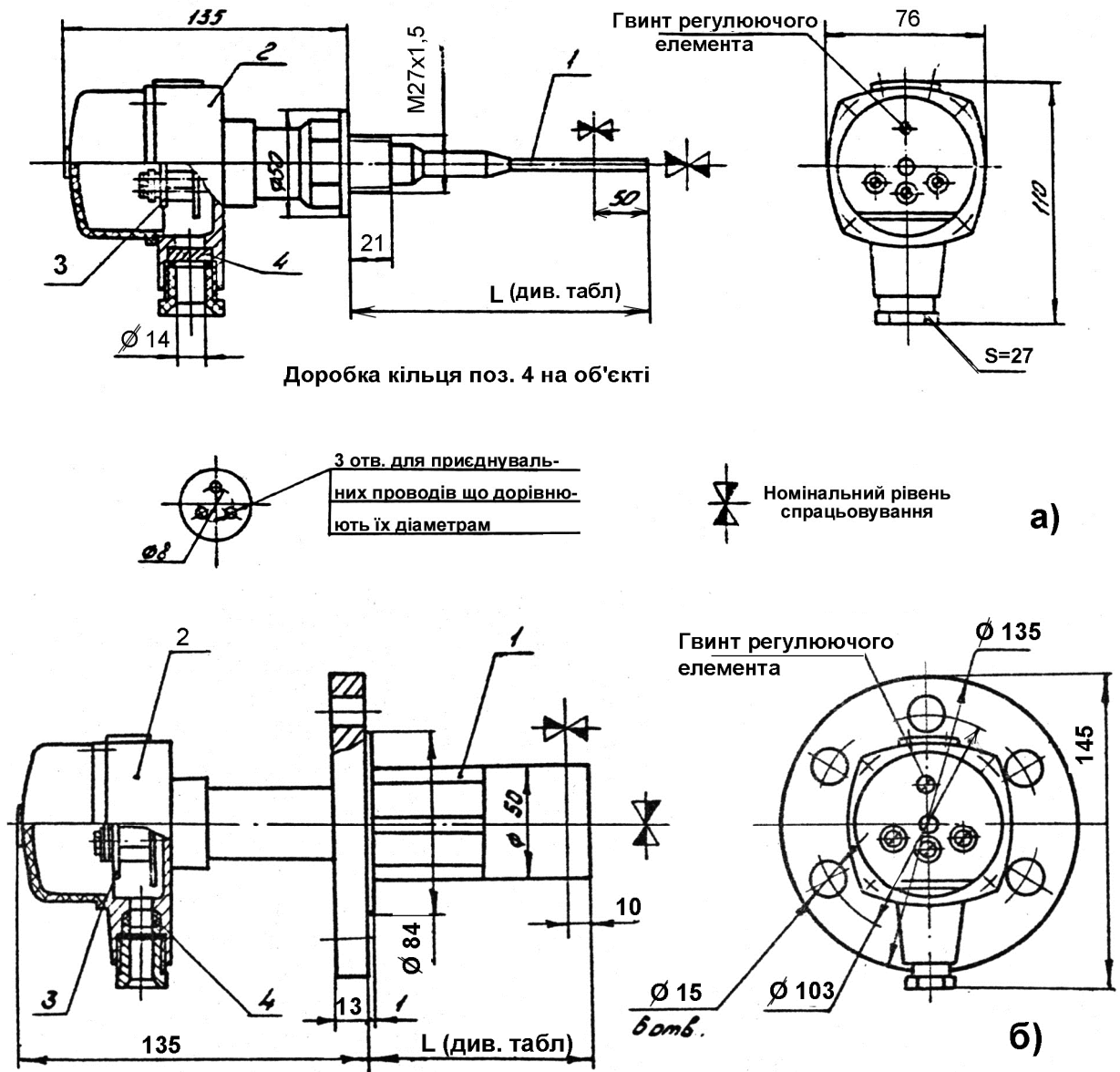


Рис.2.22. Загальний вигляд і габаритно-монтажні розміри перетворювачів первинних ПП-02, ПП-04(а); ПП-05, ПП-06(б): 1 – чутливий елемент, 2 – корпус, 3 – електронний блок, 4 – кільце; L – довжина занурюваної частини.

Сигналізатор складається з блоку живлення і сигналізації БПС-1 або БПС-1-1 та датчиків ДУ-1 відповідно у кількості 2 або 7 штук у залежності від виконання. Датчики ДУ-1 мають маркування вибухозахисту “ОЕхіаПАТ6” і можуть бути встановлені у вибухонебезпечних зонах приміщень і зовнішніх установок. Блоки БПС-1 (БПС-1-1) з вхідними іскробезпечними електричними колами рівня “іа” мають маркування вибухозахисту “ЕхіаПА” і призначені для встановлення у вибухобезпечних зонах. Датчик ДУ-1 має пилеводозахисне виконання.

Принцип дії сигналізатора ґрунтується на ефекті розриву електричного кола, що вимірює ЕДС на електродах, занурених у буферну рідину U-подібної порожнини датчика, внаслідок виникнення перепаду тиску у цій порожнині при зануренні імпульсних трубок датчика у рідину, рівень якої контролюється.

Структурна схема сигналізатора представлена на рис. 2.23 і містить наступні функціональні вузли: датчик ДУ-1 (В1 і В2), блок живлення БП (А1), блок сигналізації БС (А2), блок розв'язування БР (А3), вузли іскробезпечності (XS1 і XS2). Блок живлення служить для перетворення напруги живлення 220 В частотою 50 Гц у високостабільну постійну напругу  $\pm 15\text{В}$  для живлення блоку сигналізації. Блок БС є пороговим пристроєм, що перетворює вхідний сигнал датчика у вихідний сигнал нормально відкритих ("сухих") контактів реле К, і забезпечує світлову індикацію на блоці БПС. Блоки сигналізації мають вузли іскробезпечності XS, які виконані на резисторах R опірністю 2 МОм.

Функціональна схема одного каналу складається з датчика рівня ДУ-1, вузла іскробезпечності XS, блоку сигналізації БС і блоку розв'язування БР, з'єднаних послідовно. Кола сигналізації мають гальванічну (оптронну) розв'язку з іскробезпечними і зв'язаними з ними колами. Живлення кіл сигналізації здійснюється від окремої обмотки трансформатора БП. Блок БП має додатковий електронний захист від перевантаження.

Загальний вигляд датчика ДУ-1 та його принципова схема наведені на рис.2.24.

Датчик містить (рис. 2.24 б) корпус 11, два електроди – короткий 13 і довгий 2, імпульсні трубки 6 і 7, кришку 14. У корпусі 11 є U-подібна порожнина 5 для буферної рідини. Порожнина 5 каналами 4 і 8 з'єднана з імпульсними трубками. Імпульсні трубки датчика мають різну довжину. У корпусі є патрубок з герметичним входом для кабелю. В U-подібну порожнину заливається буферна рідина до рівня зливного отвору 9. Датчик верхнього межевого рівня діє наступним чином. Якщо імпульсні трубки датчика не занурені у контрольовану рідину, в електродних камерах 3 і 12 тиск повітря однаковий. При цьому обидва електроди занурені у буферну рідину і, отже, вимірювальне коло замкнене. ЕДС, що виникає на електродах датчика, перетворюється в блоці БПС у сигнал, який розмикає "сухі" контакти вихідного реле. Коли рівень контрольованої рідини досягне заданого межевого значення. Імпульсні трубки датчика занурю-

ються у рідину. Поміж електродними камерами U-подібної порожнини, внаслідок різної довжини імпульсних трубок, виникає перепад тиску повітря (частина буферної рідини при цьому перетече до другого електроду) і контакт короткого електроду з буферною рідиною порушиться. Вимірювальне електричне коло буде розімкнене, “сухі” контакти реле стануть замкнені, а на блоці БПС увімкнеться світловий індикатор. Блок БПС призначений для щитового монтажу.

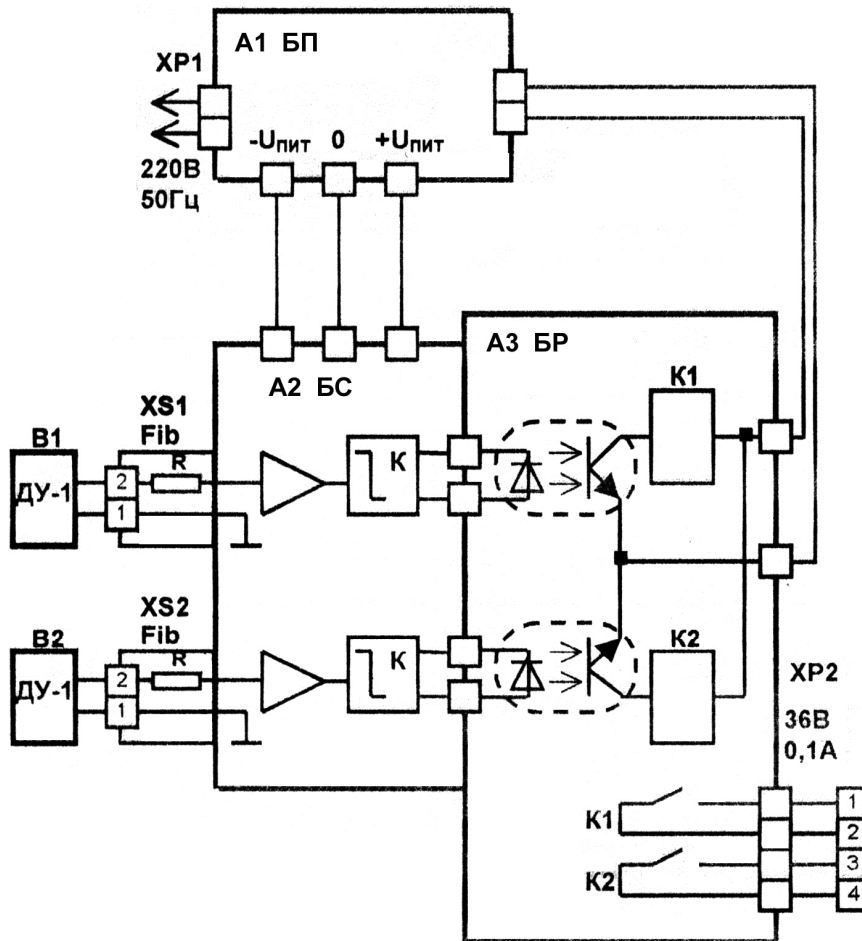


Рис. 2.23. Структурна схема сигналізатора рівня СУЛЖ – 1.

*Датчик-реле рівня РОС 101И* призначений для контролю рівня рідких, твердих (сипучих) середовищ, контролю рівня розподілу рідин, відносна діелектрична проникність яких значно відрізняється одна від другої (вода – мастило, нафтопродукт – вода і т.п.). Датчик-реле складається з первинного ПП і передавального ППР перетворювачів. Перетворювач ПП має маркування вибухозахисту “ОЕх-іаІСТ6 у комплекті РОС101И” і може встановлюватись у вибухонебезпечних зонах приміщень і зовнішніх установок. Перетворювач ППР має маркування вибухозахисту “ЕхіаІС у комплекті

РОС101И”, іскробезпечні вихідні кола рівня “іа” і призначений для встановлення зовні вибухонебезпечних зон.

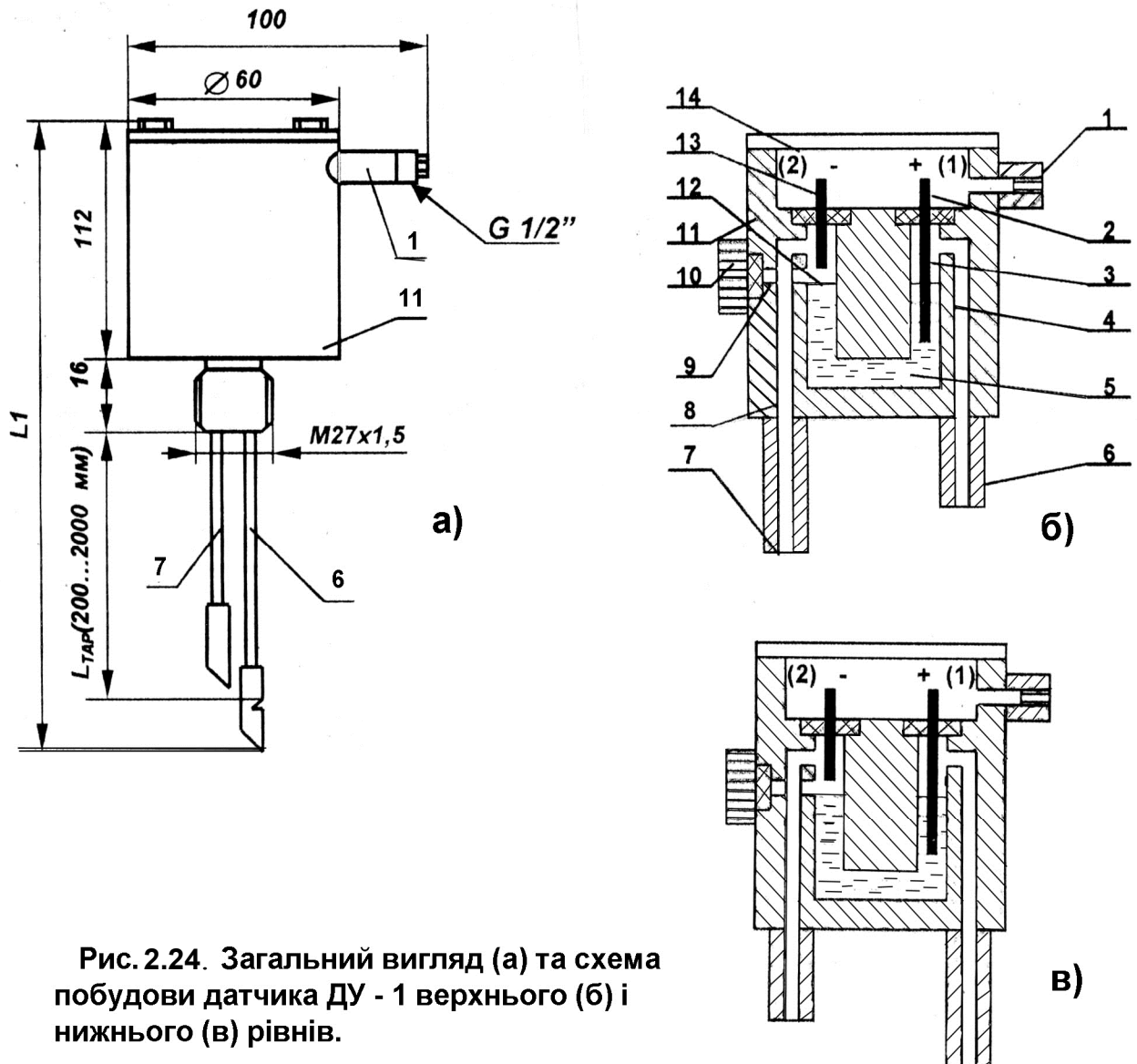


Рис. 2.24. Загальний вигляд (а) та схема побудови датчика ДУ - 1 верхнього (б) і нижнього (в) рівнів.

За принципом дії і конструктивним оформленням прилади РОС майже ідентичні сигналізаторам типу СУС. Передавальний перетворювач встановлюється на щиті, первинний – на резервуарі з контрольованим середовищем вертикально, горизонтально чи з нахилом. Перетворювачі ПП з довжиною занурюваної частини понад 0,25 м встановлюються тільки вертикально. При цьому, ПП встановлюється таким чином, щоб контрольований рівень знаходився у робочій зоні чутливого елемента, яка наводиться у технічній документації на датчик-реле.

**Ультразвукові рівнеміри** мають виконання як контактне з вимірюваним середовищем, так і безконтактне.

*Рівнемір РУ-ПТ1* призначений для вимірювання рівня різних середовищ, у тому числі і високов'язких, нафтопродуктів, зріджених газів та інших середовищ нафтопереробної і нафтохімічної промисловості.

До складу рівнеміра входять первинний і проміжний перетворювачі та блок живлення. Первинний перетворювач рівнеміра має маркування вибухозахисту “ОЕхівПАТ5 у комплекті РУ-ПТ1” і може застосовуватись у вибухонебезпечних зонах приміщень і зовнішніх установках. Проміжний перетворювач з іскробезпечними електричними колами рівня “ів” має маркування вибухозахисту “ЕхівПА у комплекті РУ-ПТ1” і встановлюється у вибухобезпечних зонах. Блок живлення має маркування “В - у комплекті РУ-ПТ1” і встановлюється зовні вибухонебезпечних зон.

Принцип дії рівнеміру оснований на зворотному магнітопружному ефекті, а сам рівнемір відноситься до імпульсних ультразвукових пристроїв. Первинний перетворювач розміщується на об'єкті вимірювання і містить електронний блок та електромеханічний перетворювач, робоча зона якого поміщується у посудину. Електронний блок містить два підсилювача і генератор імпульсів для збудження п'єзоелементів та створення ультразвукових коливань у стрижні М.

Електромеханічний перетворювач складається з випромінювача, що містить (див. рис.2.25) два п'єзокерамічних діоди ВQ1 і ВQ2, стрижень М (хвильовід) з магнітом'якого матеріалу, охоплений обмотками L1 і L2, поплавок з постійним магнітом, який переміщується з рівнем уздовж обмотки L1 і жорстоко закріплений біля обмотки L2 опірний постійний магніт.

Пружна деформація, що викликана ультразвуковою хвилею від ВQ1 і ВQ2, змінює магнітну проникність стрижня М, яка у свою чергу (за наявності підмагнічуючого поля від постійних магнітів) змінює магнітний потік крізь приймальні обмотки L1 і L2. При цьому рівень функціонально визначається вимірюванням часу поміж моментами проходження фронту ультразвукової хвилі у стрижні біля поплавка і опорної точки відліку, де встановлені постійний магніт і обмотка L2. Отже, у первинному перетворювачі формується інтервал часу у вигляді електричного імпульсу, тривалість якого пропорційна значенню вимірюваного рівня і зворотно пропорційна швидкості ультразвукової хвилі у стрижні. У проміжному перетворювачі здійснюється вимірювання інтервалу часу і перетворення його в зна-

чення числоїмпульсного коду, який далі перетворюється у десятичний код з подальшою його індикацією на цифровому табло.

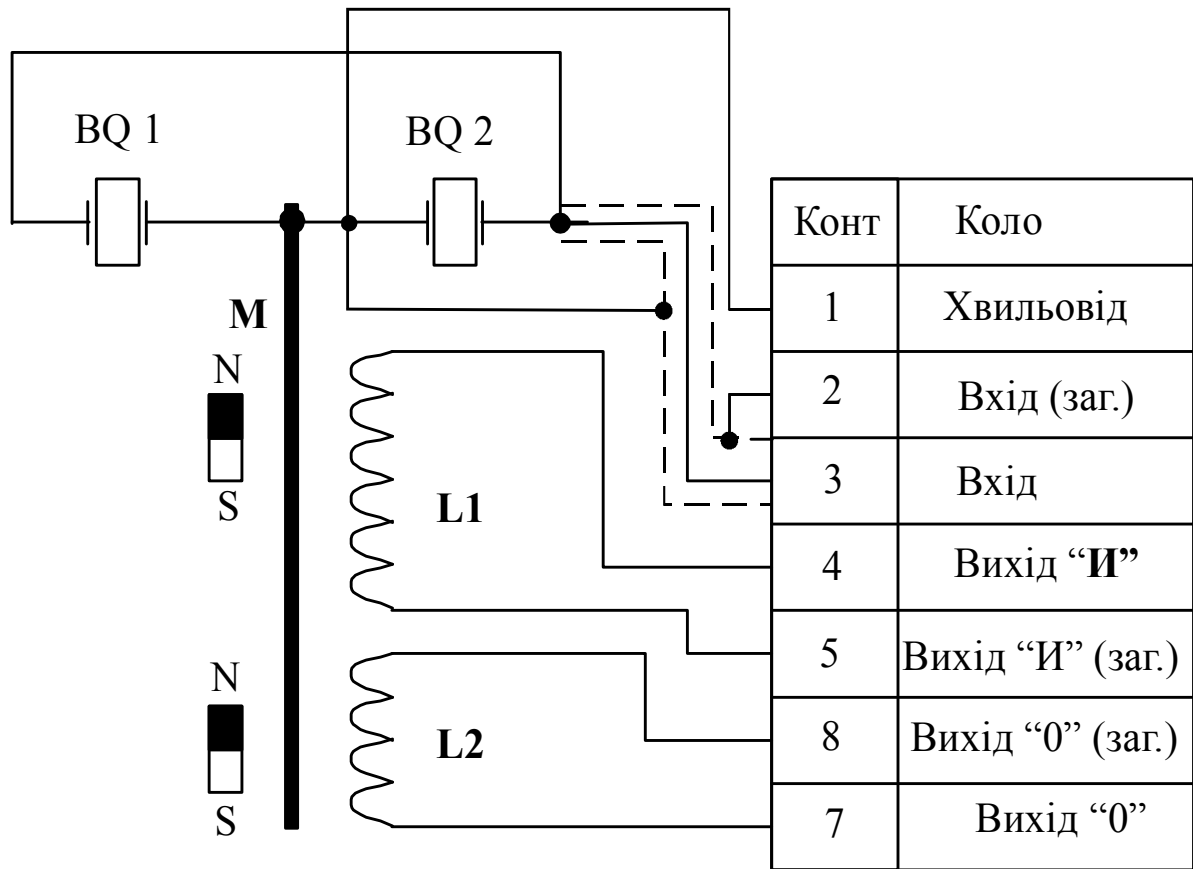


Рис.2.25. Принципова схема електромеханічного перетворювача (датчика) рівнеміра РУ-ПТ1.

Довжина лінії зв'язку між первинним і проміжним перетворювачем складає до 400 м, між блоком живлення і проміжним перетворювачем – до 2 м. Монтаж первинного перетворювача на об'єкті може здійснюватись за двома варіантами (див. рис. 2.26). Варіант 1 передбачає монтаж рівнеміра на об'єкті у заспокійливій трубі, варіант 2 монтаж на розтягувачах.

*Сигналізатор рівня рідини акустичний АСУ* призначений для контролю і сигналізації межових значень рівня рідини у ємностях і трубах без безпосереднього контакту з середовищем через стінку ємності, а також для сигналізації "проскоку" рідини через контролюємий рівень. Вихідні сигнали сигналізатора: світлова сигналізація і комутація контактів реле при переході рідини у ємності через рівень, що контролюється. Виготовляється у двох виконаннях: АСУ-1 – одноканальний; АСУ-4 – чотирьохканальний з інтерфейсним виходом RS485.



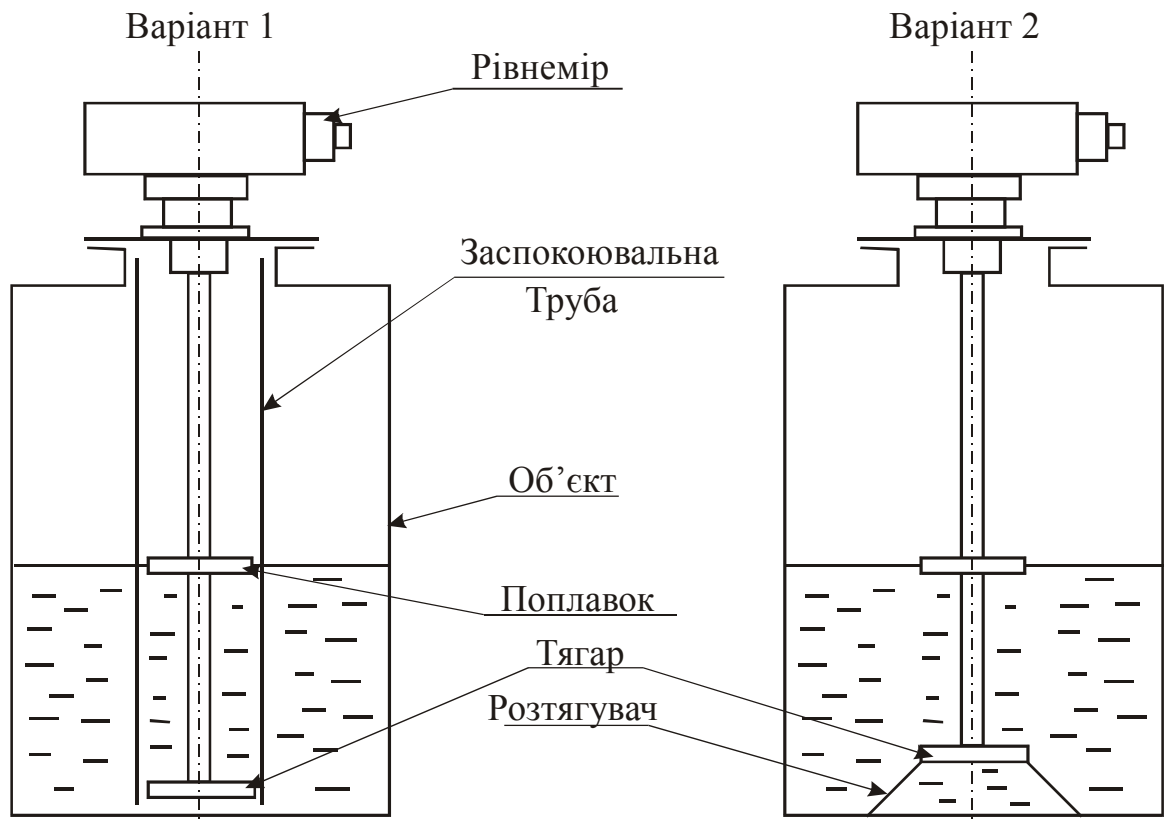


Рис. 2.26. Варіанти монтажу первинного перетворювача рівнеміра РУ-ПТ1.

Принцип дії сигналізатора оснований на контролі величини амплітуди акустичних хвиль визначеного виду, що збуджуються і приймаються первинними перетворювачами у стінці ємності на контролюємому рівні за наявністю чи відсутністю на цьому рівні рідини у середині ємності. Сигналізатор містить: електронний блок БЭ-68 (АСУ-1) чи БЭ-67 (АСУ-4); блок первинних перетворювачів БП-2(АСУ-1) чи чотири блоки БП-1 (АСУ-4); блок керування первинними перетворювачами БУП-2 (АСУ-1) чи чотири блоки БУП-1 (АСУ-4).

Електронні блоки з іскробезпечними вхідними колами рівня “іа” мають маркування вибухозахисту ЕхІаІІС і встановлюють зовні вибухонебезпечних приміщень. Блоки первинних перетворювачів і керування ними мають маркування вибухозахисту ОЕхІІСТ6 і можуть експлуатуватись у вибухонебезпечних зонах. Блок БП встановлюється на зовнішній поверхні труби діаметром понад 50 мм чи ємності з товщиною стінки у місті контролю від 4 до 10 мм і закріплюється хомутами або бандажем та не потребує виготовлення додаткових отворів у стінці ємності (див. рис.2.27).

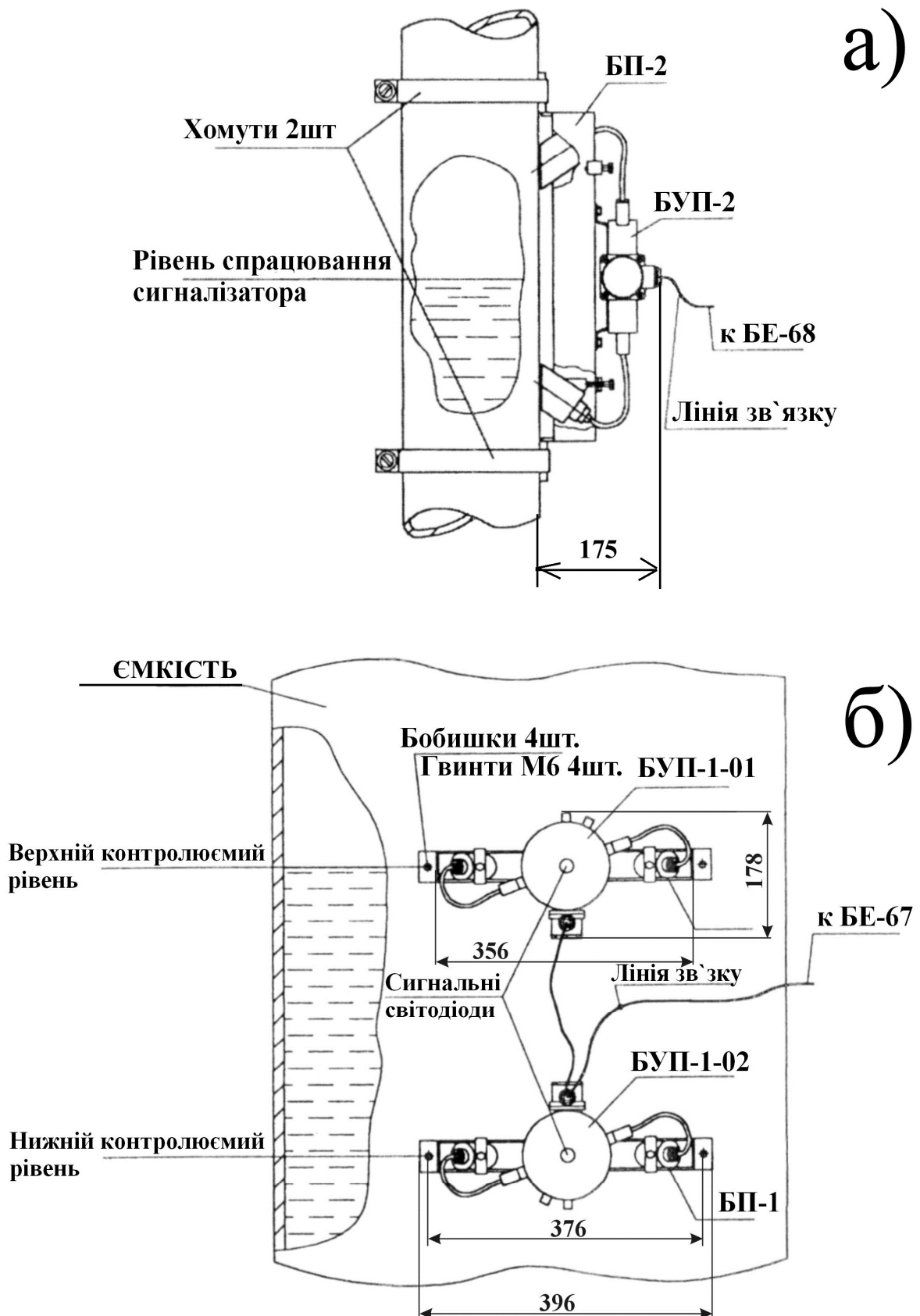


Рис.2.27. Монтаж блоків БП з блоком БУП: а – на контролюємій ділянці труби; б – на контролюємій ємності.

Блок БУП забезпечує роботу блоків БП, світлову сигналізацію рівня безпосередньо на місті контролю і формування електричних сигналів у лінії зв'язку з електронним блоком БЭ, по яких в останньому вмикається (чи вимикається) реле і світлова сигналізація рівня. Блок БУП монтується на блоці БП і підключається до електронного блоку за допомогою двопровідної лінії зв'язку.

Температура поверхні ємності у місті установки блоку БП не повинна виходити за діапазон  $(-50) \div 150^{\circ}\text{C}$ , а у місці установки блоку БУП – за діапазон  $(-40) \div 70^{\circ}\text{C}$ . Якщо температура стінки ємності виходить за ці межі, то блок БУП не може бути закріплений на БП, а з'єднування блоків проводять спеціальним кабелем довжиною до 1 м.

Акустичний метод, що застосовується у деяких сучасних типах приладів, дозволяє здійснювати вимірювання не тільки рівня, але й витрати рідини. В останньому випадку необхідне застосування стандартних лотків (Вентурі чи Паршалья). Такі прилади носять назву рівнемірів-витратомірів, більш детальна характеристика яких наведена у розд. 2.4.

## 2.4. ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ І ВИТРАТИ

Вимірювання кількості і витрати речовини, а також теплоти дозволяє контролювати та підтримувати матеріально-тепловий баланс технологічного процесу, завдяки чому може бути забезпечена необхідна економічність виробництва.

Кількість речовини виражають у одиницях об'єму ( $\text{м}^3$ ) чи маси (кг), а кількість теплоти – у одиницях енергії (Дж, ГДж). Прилади для вимірювання кількості називають *лічильниками*. Лічильники вимірюють об'єм величини або величину енергії за будь-який проміжок часу: доба, тиждень, місяць і т.п.. Кількість при цьому визначається як різниця показань лічильника. *Лічильники речовин* найчастіше є приладами прямого вимірювання і відлік по їх шкалі дає значення кількості без додаткових обчислень, а *теплोलічильники* – це прилади посередніх вимірювань, де результат визначається обчисленням по значенням прямих вимірювань температур прямого і зворотного потоків та витрати потоку теплоносія. За принципом дії лічильники речовин переважно виготовляють об'ємні і швидкісні. У швидкісних лічильників потік речовини приводить в обертання вертушку (крильчатка, турбінка), в об'ємних лічильниках – переміщує

механізм, що відмірює об'єм, а далі рух передається на відліковий пристрій. Сучасні лічильники випускаються багатофункціональними, що значно поширило їх застосування при автоматизації виробництв.

Витрата речовини також може бути об'ємною ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) або масовою ( $\text{кг}/\text{с}$ ) і визначається кількістю речовини, що проходить крізь той чи інший переріз каналу за одиницю часу. Прилади для вимірювання витрати називають *витратомірами*. Ці прилади додатково можуть бути оснащені лічильниками (інтеграторами), що дозволяє проводити вимірювання витрати і кількості.

У залежності від метода вимірювання можна виділити наступні витратоміри: змінного перепаду тисків, що оснований на залежності від витрати перепаду тисків у звужувальному пристрої в наслідок часткового переходу потенційної енергії потоку у кінетичну; витратоміри критичного стікання із звужувальним пристроєм, витрата потоку крізь яке не залежить від тиску за звужувальним пристроєм і визначається лише тиском потоку перед ним; швидкісного напору для вимірювання витрати динамічного напору потоку за допомогою пневмометричних трубок; змінного рівня, що оснований на залежності від витрати висоти рівня рідини у посудині при вільному стіканні її крізь отвір у дні чи боковій стінці посудини; постійного перепаду тисків, що оснований на залежності від витрати речовини вертикального переміщення тіла (поплавка), який змінює при цьому площину перерізу прохідного отвору приладу таким чином, щоб перепад тисків по обидва боки поплавка залишався постійним; безконтактні, серед яких переважно застосовуються електромагнітні, ультразвукові і теплові.

Останнім часом знайшли розповсюдження комбіновані лічильники – витратоміри, до складу яких входять будь-які перетворювачі витрати з уніфікованими вихідними сигналами.

**Об'ємні лічильники** застосовуються для вимірювання кількості як газу так і рідини. До того ж часто ці прилади, що випускаються підприємствами, поєднують функції суто лічильників і витратомірів. Показання лічильників відповідають вимірюванню об'єму газу за робочих температур і тисків. У зв'язку з чим при вимірюванні витрати і кількості газу необхідно показання об'ємних лічильників (фізична витрата) приводити до нормальних умов. Встановлення кількості і витрати у нормальних умовах експлуатації здійснюють у відповідності з одним із наступних рівнянь:

$$\bar{Q} = Q\rho; \quad (2.5)$$

$$Q_H = Q\rho/\rho_H; \quad (2.6)$$

$$Q_H = QPT_H/(P_HTK), \quad (2.7)$$

де  $Q_H$  – витрата газу за нормальних умов,  $\text{нм}^3/\text{год}$ ;  $\bar{Q}$  і  $Q$  – витрата газу відповідно масова ( $\text{кг}/\text{год}$ ) і об'ємна ( $\text{м}^3/\text{год}$ );  $\rho$  – фактична густина у робочих умовах,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_H$  – густина газу за нормальних умов  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $P$  – робочий тиск,  $\text{кгс}/\text{см}^2$ ;  $P_H = 1,0332$  нормальний атмосферний тиск,  $\text{кгс}/\text{см}^2$ ;  $K$  – коефіцієнт стисливості;  $T_H = 293,15$  нормальна температура газу,  $\text{K}$ ;  $T$  – робоча температура газу,  $\text{K}$ .

У реальних умовах тиск і температура газових потоків може змінюватись у значних межах. Тому при використуванні лічильників необхідно вести реєстрацію температури і тиску або густини, що дозволить уводити поправку до результату вимірювання за одною з наведених формул (2.5 - 2.7). Багато сучасних приладів мають відлікові пристрої, які забезпечують автоматичне обчислення витрат, зведених до нормальних умов.

Відлік об'єму або маси газу і рідини проводять за допомогою різних відлікових пристроїв: механічних, електромеханічних і електронних.

На рис. 2.28 представлена принципова схема електромеханічного лічильника електричних імпульсів. Лічильник діє наступним чином. При надходженні електричного імпульсу від перетворювача витрати на обмотку електромагніта 1 якір 3 притягується до нього, внаслідок чого товкаюча собачка 6 повертає храпове колесо 8 і зв'язаний з ним вал лічильника обертів на кут, що відповідає одному зубу храпового колеса, тобто на 0,1 оберту. Гальмівна собачка 9 під впливом пружини 10 фіксує нове положення колеса 8, а опір 7 перешкоджає проскоку колеса 8 за інерцією завдяки фіксації у крайньому положенні собачки 6 поміж опорою 7 і зубом храпового колеса. З надходженням кожного електричного імпульсу до обмотки електромагніту барабан молодшого розряду лічильника обертів 11 буде змінювати своє показання на одну одиницю. Важіль 2 закріплений жорстко на опорі 5 і зв'язаний з пружиною вороття 4. Лічильники розраховані на підрахунок однополярних імпульсів, що надходять на обмотку електромагніту.

Останнім часом знайшли широке застосування електронні лічильники. Електронні лічильники не мають рухливих частин, мають високу надійність, дозволяють застосовувати будь-яку кількість

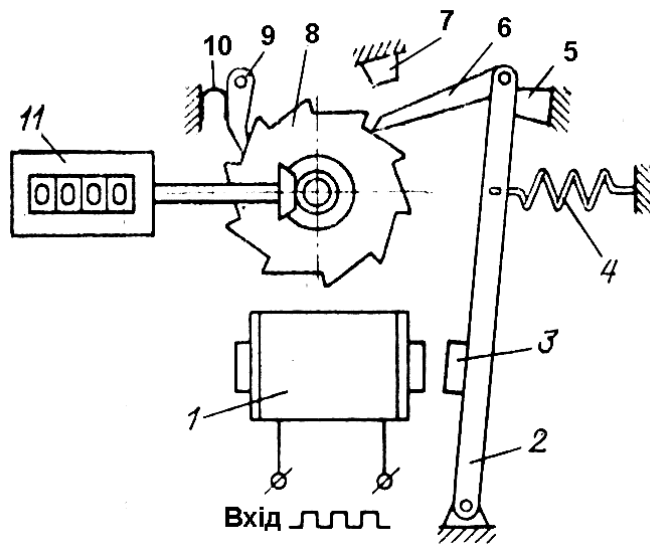


Рис. 2.28. Схема електромеханічного лічильника електричних імпульсів.

Лічильник містить формувач імпульсів ФІ, велику інтегральну мікросхему ВІС багаторозрядного двоїчного лічильника, електронний багаторозрядний цифровий індикатор ЦІ і блок резервного живлення БРЖ. Блок БРЖ містить постійний конденсатор, що підзаряджується через діод напругою  $E_{П}$ , завдяки чому при короткочасних зникненнях напруги живлення ( $\pm E_{П}$ ) забезпечується живлення мікросхеми ВІС.

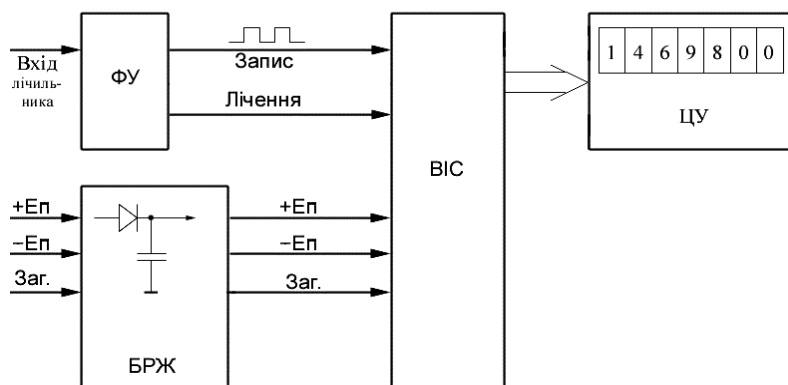


Рис. 2.29. Структурна схема електронного лічильника імпульсів.

Сформовані формувачем ФІ прямокутні імпульси надходять на входи "Лічення" і "Запис" мікросхеми ВІС, яка і виконує лічення вхідних імпульсів та перетворення їх у двоїчно-десятковий код, формуючий відповідне число на індикаторі ЦІ. Таке виконання дозволяє додатково із застосуванням цифроаналогових перетворювачів отримувати вихідний електричний уніфікований сигнал.

Об'ємні лічильники у залежності від конструктивного оформлення вимірювального механізму переважно виготовляють барабанні, ротаційні, поршневі, шестерінчасті, лопасні і гвинтові.

*Барабанний лічильник ГСБ-400* призначений для обліку газу, що споживається побутовими, індивідуальними і груповими газовими установками, невеликими котельними, при лабораторних дослідженнях і т.п., де робочий тиск не перевищує 0,06 МПа. Діапазон

розрядів цифр індикаторного табло. До того ж як і механічні відлікові пристрої зберігають інформацію в умовах зниження електричного живлення. Структурна схема електронного лічильника імпульсів наведена на рис.2.29.

Лічильник містить формувач імпульсів ФІ, велику інтегральну мікросхему ВІС багаторозрядного двоїчного лічильника, електронний багаторозрядний цифровий індикатор ЦІ і блок резервного живлення БРЖ. Блок БРЖ містить постійний конденсатор, що підзаряджується через діод напругою  $E_{П}$ , завдяки чому при короткочасних зникненнях напруги живлення ( $\pm E_{П}$ ) забезпечується живлення мікросхеми ВІС. Сформовані формувачем ФІ прямокутні імпульси надходять на входи "Лічення" і "Запис" мікросхеми ВІС, яка і виконує лічення вхідних імпульсів та перетворення їх у двоїчно-десятковий код, формуючий відповідне число на індикаторі ЦІ. Таке виконання дозволяє додатково із застосуванням цифро-

вимірювання складає  $0,02 \div 0,6 \text{ м}^3/\text{год}$ , а номінальна витрата  $0,4 \text{ м}^3/\text{год}$ . Клас точності лічильника 1, втрата напору не більше  $80 \text{ Па}$  (при номінальній витраті), а об'єм вимірювальної камери  $5 \text{ дм}^3$ . Принципова схема барабанного лічильника наведена на рис. 2.30, а його загальний вигляд та габаритні розміри – на рис. 2.31.

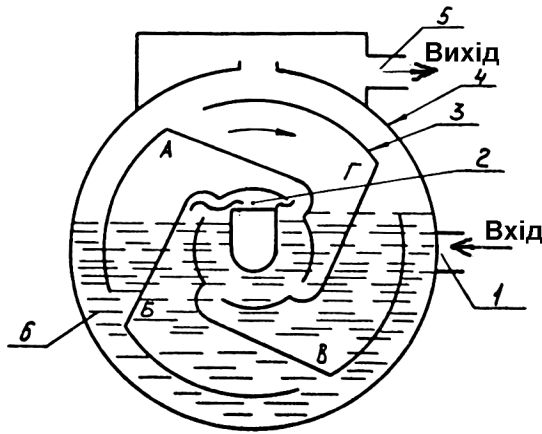


Рис. 2.30. Принципова схема барабанного лічильника.

Робота лічильника полягає у наступному (рис.2.30.). Газ крізь вхідний штуцер 1 надходить до газорозподільної камери 2, а звідти до сполучених з нею вимірювальних камер А і Б ротора 3. Внаслідок підвищеного тиску газу на перегородці ротора з боку входу у порівнянні із боком виходу ротор починає обертання. При цьому вимірювальні камери В і Г занурюються у запірну рідину 6 (використовується вода) і газ витискається

у порожнину корпусу 4 над ротором, що пов'язане з вихідним штуцером 5. При подальшому обертанні ротору газом будуть заповнюватись вимірювальні камери Б і В, а камери А і Г будуть звільнюватись від нього. Таким чином, за один оберт ротора витискається кількість газу, яка дорівнює об'єму чотирьох вимірювальних камер. Цей об'єм називають вимірювальним об'ємом лічильника.

Конструктивно лічильник вміщує наступні основні вузли: корпус, ротор і відліковий пристрій (див. рис.2.31). Корпус 3 – це циліндр з передньою 2 і задньою 4 кришками. Остання з'єднується з корпусом за допомогою шести заціпок 5 натяжної дії, що дозволяє розбирати лічильник для ремонту. Механічний відліковий пристрій у вигляді роликового і стрілкового відлікових механізмів розташований на передній кришці корпусу. Роликовий механізм складається з шести барабанчиків 8 з цифрами від 0 до 9, розміщених на одній осі і пов'язаних поміж собою трибками ( передаточне відношення 1:10). Перший відліковий барабан пов'язаний з віссю ротора через систему зубчастих коліс ( передаточне відношення 1:2). Ємність механізму  $999999 \text{ дм}^3$ . Стрілковий механізм має покажчик 9, що закріплений на кінці осі ротора, і кругову шкалу 10 з ємністю  $5 \text{ дм}^3$ . На передній кришці лічильника розташовані також водомірний пристрій 6 з краном 7 та кран 1 для зливу води. На задній кришці є вхід-

ний штуцер 16 і трубка 17 для наповнення водою. У верхній частині корпусу розташовані штуцера 12, 13 і 14 для підключення мановакууметра і термометра входу газу та виходу газу відповідно. З правого боку корпусу є штуцер 15 для встановлення термометра води. Опори 11 регулюються і дають можливість встановлювати лічильник за показником рівня 18 у робочий стан.

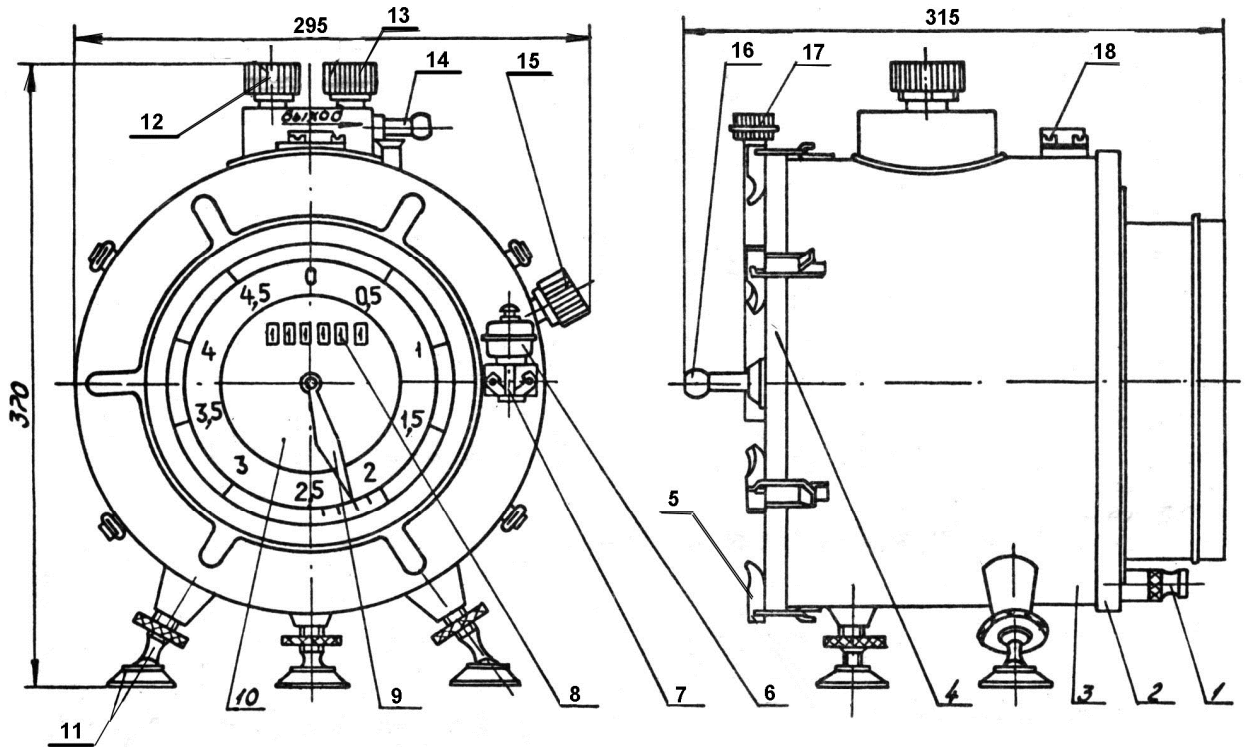


Рис. 2.31. Загальний вигляд лічильника ГСБ-400.

Барабанні лічильники витрати газу серії TG фірми "Ritter" призначені для обліку об'ємної кількості і вимірювання витрати, агресивних та інертних газових потоків у широкому діапазоні від 0,1 до 18000 л/год. За принципом дії прилади серії TG ідентичні вищерозглянутому лічильнику, але вимірювальний барабан може бути заповнений як водою так і чистими (світлими) мастилами малої в'язкості. Клас точності таких приладів не перевищує  $\pm 0,2\%$ . Температура газових потоків, що вимірюються, може складати від  $(-50)$  до  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а припустимий тиск потоків від 5 кПа до 1 МПа. На рис. 2.32. наведено загальний вигляд та габаритні розміри лічильників серії TG.

Моделі лічильників у залежності від температур та агресивності вимірювального середовища відрізняються конструкційними матеріалами корпусу і вимірювального барабану.



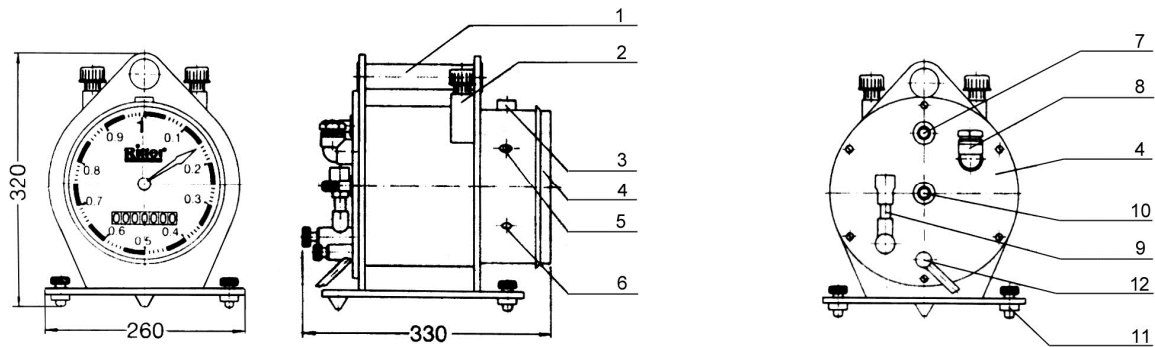


Рис. 2.32. Загальний вигляд та габаритні розміри лічильника серії TG (моделі 5–7): 1–ручка; 2–додатковий вимірювальний комплект (газовий термометр, термометр для рідини, манометр); 3–візуальний рівнемір положення установки; 4–кришка; 5–вихід імпульсного генератора; 6–кнопка вмикання; 7, 10 - штуцери виходу і входу газового потоку, що вимірюється; 8–штуцер для заповнення рідиною; 9–індикатор рівня рідини у барабані; 12–кран для зливу води; 11–опори регулювання положення лічильника.

Для виводу інформації на зовнішній пристрій типу EDU32FP, що входить до комплекту приладу, у лічильнику умонтований генератор (“Smart PG”) з пульсуючим електронним виходом величина амплітуди якого  $5 \pm 12$  В відповідає застосованому джерелу живлення постійного струму. Генератори “Smart PG” утворюють: щілинний диск фотодатчика і 5-ти клемне роз’язття. Диск має 200 радіально розташованих щілин та перегородок – “прапорців” по периферії, обертання якого синхронізоване з вимірювальним барабаном. Повне коло обертання відповідає одному електронному імпульсу. Таким чином кількість імпульсів буде прямо пропорційна поточному об’єму газу крізь лічильник, а частота безперервних пульсацій свідчить про швидкість обертання барабану, забезпечуючи досить точне вимірювання витрати. Якщо витрата газового потоку постійна – графік вихідної напруги буде мати трохи хвилястий характер.

Зовнішній пристрій EDU32FP – це мініатюрний керований лічильник і дисплей-апарат з наступними функціональними можливостями: програмування типу лічильника – витратоміра; мова дисплея (англ./німецька) та інші; візуальна індикація на двостроковому дисплеї об’єму потоку газу, поточної витрати, тип лічильника; вивід інформації на ПЕОМ за інтерфейсом RS232; перетворення поточної витрати в уніфікований сигнал постійного струму  $4 \div 20$  мА чи напруги  $0 \div 1$  В.

*Ротаційні лічильники типу РГ* призначені для обліку об'ємної кількості очищених не агресивних горючих газів (природного, сланцевого, генераторного, водяного, коксового, доменного, світильного, масляного, змішаного, зрідженого пропан - бутанового) і використовуються в установках комунальних та промислових підприємств. Лічильники типу РГ розраховані на номінальні витрати від 40 до 1200 м<sup>3</sup>/год. Клас точності лежить у межах від 1 до 2 %.

Лічильник (див. рис. 2.33.) має корпус 1 і два ротори 3 і 7, що обертаються потоком газу. Вали роторів з'єднані поміж собою зубчастою передачею 2. Обертання ротору 3 через жорстко зв'язаний з ним вал, встановлений у шарикових підшипниках або у підшипниках сковзання, через магнітну муфту 6 і редуктор 5 передається відліковому механізму 4, у якості якого використовується шести - чи восьмирозрядний десятичний барабанний лічильник обертів. При обертанні ротори сковзаються по поверхні один одного боковими поверхнями, одночасно стикаючись з внутрішньою поверхнею корпусу боковою поверхнею своїх вершин. У положенні, зображеному на рис. 2.33, тиск Р1 у порожнині А більше тиску Р2 у порожнині Б. При цьому на верхню половину ротора 7 буде діяти сила F1, що дорівнює добутку різниці тисків (Р1-Р2) на площину Sб бокової поверхні верхньої частини ротору, розташованого у зоні дії тиску Р1. Сила F1 на плече радіусу ротора R утворює обертальний момент  $M_{об} = F1 \cdot R$ , викликаючи поворот ротора 7 відносно своєї вісі. При цьому на ротор 3, який знаходиться у горизонтальному положенні, обертальний момент не діє, тому що тиск Р1 у камері А діє на обидві половини ротора 3, розташовані симетрично відносно його вісі, однакові і сили  $F2 = F3$ . Внаслідок того, що вали обох роторів з'єднані поміж собою зубчастою передачею, обертання одного ротора викликає обертання іншого. Тому обидва ротори обертаються синхронно, витискаючи на вихід лічильника по чергово об'єми газу V0, що відсікаються боковими поверхнями роторів і внутрішньою поверхнею корпусу при вертикальному розташуванні ротора. Таким чином, за один повний оберт витискається чотири таких об'єми. Для зменшення витіку газу зазори поміж роторами, що обертаються, і корпусом, а також поверхнями сковзання роторів робляться мінімальними (від 0,04 до 0,1мм), а самі поверхні ретельно доводяться. Газ у лічильниках подається зверху, завдяки чому суспендовані частки не засмічують лічильник, і падають донизу. Гострі кромки на вершинах роторів сприяють самоочищенню лічильника

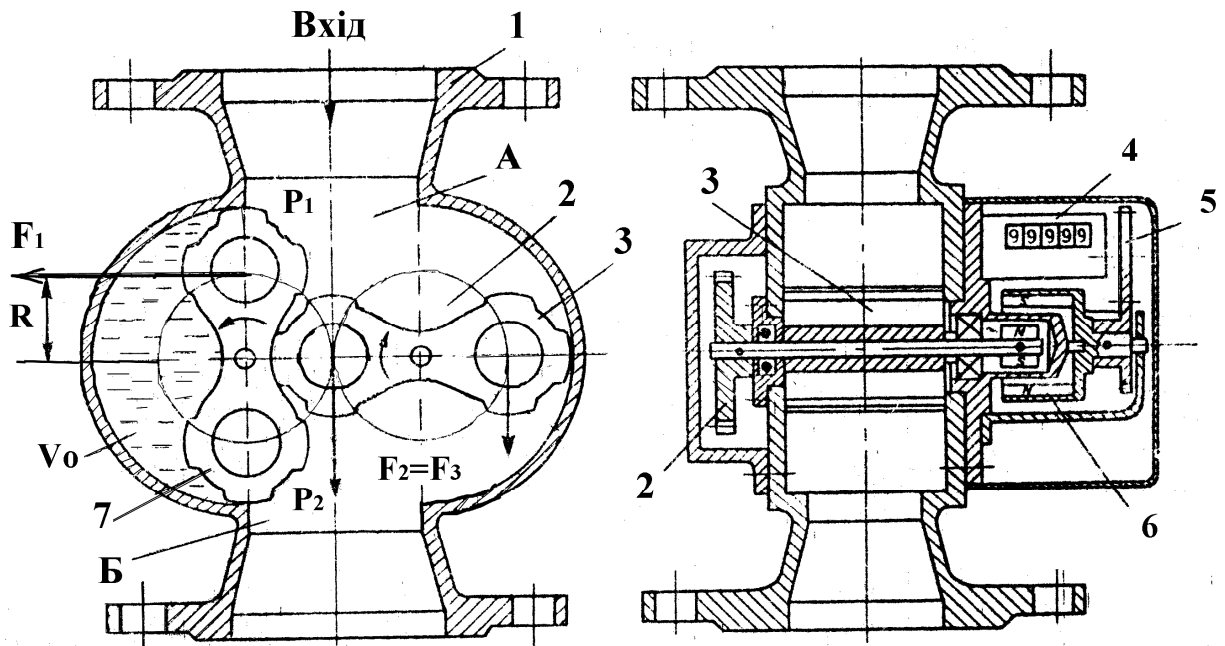


Рис. 2.33. Принципова схема ротаційного лічильника газу.

*Ротаційні лічильники типу РЛ* – призначені для комерційного обліку об’ємної кількості неагресивних газів і розраховані на номінальні витрати від 4 до 20 м<sup>3</sup>/год. Середовище, що вимірюється – природний та інші гази, що припускають контакт з мастилом. Клас точності лежить у межах від 1,5 до 2,5 %.

Застосовуються в основному у комунально–побутовому господарстві. Максимальний надмірний робочий тиск 0,2 МПа.

*Поршневі лічильники типу СМ* призначені для вимірювання витрати мазуту, а також неагресивної в’язкої рідини, яким притаманна змазувальна здатність. Прилади виготовляють у двох модифікаціях: типу СМО із вмонтованим підсумовуючим пристроєм і СМ2 для дистанційної передачі показань. Параметри контрольованого середовища: температура 10 ÷ 120°C, найбільший робочий тиск на місці встановлення лічильника 2 МПа, кінематична в’язкість від 0,2·10<sup>-4</sup> до 1,2·10<sup>4</sup> м<sup>2</sup>/с. Діапазон вимірювання номінальної витрати лежить у межах від 50 до 4000 дм<sup>3</sup>/год.

Витратомір СМО складається з двох вузлів: чотирьох поршневого гідромотору і тахометричної головки. Чотири поршні які жорстко зв’язані зі штоком, переміщуються у циліндрах, штоки за допомогою диску перетворюють прямолінійне переміщення поршнів у обертальний рух валу. На нижньому кінці валу закріплений кривошип, що приводить до руху золотник, послідовно з’єднуючий цилін-

дри з порожниною впуску та випуску рідини. При заповненні під тиском рідини двох циліндрів поршні у них підіймаються. При цьому поршні, що розташовані діаметрально протилежно опускаються, і витискають рідину з циліндрів. Таким чином, за один оберт валу через гідромотор проходить рідина, що витискається чотирма поршнями. Хід поршнів, а відповідно, і об'єм рідини, що проходить через гідромотор за один цикл, визначається кутом нахилу диска, встановленого за допомогою регульованих гвинтів. Обертальний рух валу через редуктор передається відліковому механізму.

Лічильник СМ2 складається з первинного перетворювача – лічильника СМ1, виконаного на базі лічильника СМО, і нормуючого перетворювача ПН. На виході первинного перетворювача формується електричний сигнал, частота якого пропорційна швидкості обертання вала, тобто витраті рідини. Нормуючий перетворювач далі перетворює цей частотний сигнал у вихідний сигнал постійного струму:  $0(4) \div 20\text{мА}$ ,  $0 \div 5\text{мА}$ . Довжина лінії зв'язку поміж лічильником СМ1 і перетворювачем ПН повинна бути до 100м. Лічильники монтують на горизонтальних ділянках трубопроводів і встановлюють перед ними фільтр.

*Лічильники рідини з овальними шестернями* (тип ШЖУ, ШЖО) застосовуються у нафтовій, нафтохімічній, та інших галузях промисловості. Лічильники забезпечують вимірювання підсумкової кількості і облік разової номінальної витрати рідини у межах від 2 до 16 м<sup>3</sup>/год. Літера “А” у шифрі приладу позначає, що лічильник призначений для вимірювання витрати агресивної рідини, а буква “О” – для вимірювання витрати застигаючої рідини. Останні мають парову оболонку з температурою пари до 200 °С і тиском до 1,6 МПа.

Лічильники типу ШЖАО застосовуються для вимірювання жирних кислот, непромитих жирних кислот, парафіну, різних фракцій дистильованих жирних кислот. Лічильники ШЖУА рекомендується застосовувати для вимірювання витрати аміаку, аніліну, пероксидів натрію, калію, барію і водню, хлористого барію, борної кислоти, бутилового спирту, дихлоретану, малеїнової кислоти, масляної кислоти, морської води, пропіонової і вуглецевої кислоти, фенолу, формальдегіду етилового спирту, та для вимірювання витрати рідини, що містить домішки цих речовин.

Вимірювання кількості рідини відбувається за рахунок періодичного відсікання визначених її об'ємів, що містяться у порожне-чах поміж циліндричною поверхнею корпусу вимірювального при-

строю і овальними шестернями. За один повний оберт шестернею відсікається чотири таких об'єми, а їх підсумкова величина дорівнює об'єму її вимірювальної камери. Облік рідини, що пройшла різь лічильник, відбувається за рахунок відліку кількості обертів овальних шестерень. Обертання шестерней передається взагалі роликівому і стрілковому покажчикам. При цьому роликівий покажчик підсумовує загальну кількість рідини, що пройшла крізь лічильник, а двострілковий покажчик відраховує разову кількість рідини. У лічильнику передбачена можливість встановлення коректора показань кількості рідини за температурою і густиною, а також первинного перетворювача витрати для дистанційної передачі показань. Монтаж лічильника можна проводити на горизонтальних і вертикальних ділянках трубопроводів. Перед лічильником необхідно встановлювати фільтр (для рідини в'язкістю до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), або фільтр - газодокремлювач (для рідини в'язкістю більше  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с).

*Лічильники рідини лопасні типу ЛЖ* призначені для вимірювання сумарної кількості і обліку разової витрати нафтопродуктів та інших не агресивних рідин з кінематичною в'язкістю  $(0,55 \div 300) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Застосовують у нафтовій, нафтохімічній та інших галузях промисловості при тиску робочого середовища до 6,4 МПа і температурі у діапазоні  $(-40) \div 50$  °С. Розраховані у залежності від в'язкості на номінальні витрати від 45 до 280 м<sup>3</sup>/год.

Вимірювання об'ємної кількості рідини забезпечується періодичним відсіканням визначених об'ємів рідини, що заключені у порожнині поміж двома висувними лопастями і циліндричними поверхнями вимірювальної камери та барабану. За один повний оберт ротору відсікається чотири об'єми, сумарна величина яких дорівнює ємкості вимірювальної камери. Облік кількості рідини також оснований на відліку кількості обертів барабану. Обертання барабану через систему зубчастих передач і магнітну муфту передається на рахункову головку. Має двострілковий із скиданням на нуль і роликівий покажчики. Лічильники побудовані за блочним принципом і мають уніфіковані приєднувальні розміри. Монтаж, з'єднання з трубопроводом та умови експлуатації аналогічні попередньому лічильнику.

*Гвинтові лічильники типу ТМ2С* призначені для вимірювання кількості в'язких рідин (мазуту) у діапазоні максимальних витрат  $1,2 \div 16$  м<sup>3</sup>/год. Принцип дії гвинтових лічильників полягає у наступному. Потік рідини, що вимірюється, проходить крізь вимірювач

об'єму, втрачає частину напору на створення обертального моменту, завдяки чому починають обертання ведучий і ведений гвинти. Вимірювання кількості рідини відбувається за рахунок періодичного відсікання визначених її об'ємів, що знаходяться у порожнинах між циліндричними розточками корпусу вимірювача об'єму і гвинтами. Для цих приладів температура рідини, що вимірюється, повинна бути у межах  $50 \div 125$  °С, в'язкість у діапазоні  $20 \div 35$  м<sup>2</sup>/с, а тиск рідини до 6,4 МПа.

Витратомір складається з перетворювача витрати і вимірювального перетворювача. У перетворювачі витрати шестерінчастий відзначник магнітного поля, обертаючись разом з ведучим гвинтом, перетворює частоту його обертання у зміну магнітного потоку індуктивного датчика. Підсилені сигнали надходять у вимірювальний перетворювач, вихідними елементами якого є електромеханічний лічильник кількості і перетворювач “частота – струм”, що забезпечує вимірювання витрати. Перетворювач має пилевологозахищене виконання і може встановлюватися у вибухонебезпечних зонах. Довжина лінії зв'язку між перетворювачем витрати і вимірювальним перетворювачем до 1,5 км.

**Швидкісні турбінні лічильники** застосовуються також для вимірювання кількості газу і рідини. Принцип дії заснований на вимірюванні швидкості потоку речовини що рухається у трубопроводі. Вона зв'язана з кількістю (м<sup>3</sup>/год) речовини співвідношенням:

$$Q = V_{\Pi} S \quad (2.8)$$

де  $V_{\Pi}$  – середня швидкість руху речовини, м/с;  $S$  – переріз трубопроводу, м<sup>2</sup>.

При цьому швидкість  $V_{\Pi}$  пропорційна швидкості обертання турбінки  $n$  (об/хвил), тобто:

$$n = 30V_{\Pi} / \pi r \operatorname{tg} \varphi \quad (2.9)$$

З урахуванням рівняння (2.8) швидкість обертання буде зв'язана з витратою  $Q$  наступною формулою:

$$n = 30 Q / \pi * r * S \operatorname{tg} \varphi \quad (2.10)$$

де  $r$  – радіус турбінки, м;  $\varphi$  – кут нахилу лопасті турбінки до напрямку потоку, град.

Отже, кількість обертів вертушки буде також пропорційна витраті речовини. При малих витратах ця залежність не зберігається, що обумовлено витоком речовини крізь щілини поміж лопастями вертушки і корпусом лічильника, а також тертям в опорах рухливої системи. Для зменшення тертя вертушку і її вісь виготовляють з легких матеріалів. Величина  $n$  помітно змінюється у залежності від характеру потоку. Для заспокоєння потоку перед вертушкою з боку входу речовини встановлюють струменевипрямовувач, дільниці трубопроводу до лічильника і після нього роблять прямими.

За формою вертушки (турбінки) швидкісні лічильники розподіляють на крильчасті та гвинтові. Гвинтові вертушки розташовані паралельно потоку речовини, а крильчасті – перпендикулярно йому. У залежності від способу підводу речовини до вертушки лічильники з крильчастою турбінкою можуть бути одноструменевими і багатоструменевими.

*Турбінні витратоміри-лічильники газу типу ЛГ* призначені для комерційного обліку об'ємної витрати неагресивних газів, у тому числі природного, густиною не менше  $0,67 \text{ кг/м}^3$  і перетворення витрати газу у частотно - імпульсний сигнал. Застосовуються для роботи у системах контролю, регулювання і керування технологічними процесами. При цьому живлення датчика імпульсів лічильника здійснюється напругою 5 В від зовнішнього джерела. Кількість розрядів відлікового механізму – 9, діапазон вимірювання фізичної витрати складає від 16 до  $2500 \text{ м}^3/\text{год}$ , а клас точності – 1.

Принцип дії турбінних витратомірів і лічильників полягає у перетворюванні швидкості потоку газу, що проходить крізь відомий переріз трубопроводу, у частоту обертання турбіни, встановленої у трубопроводі, яка у свою чергу перетворює її у частоту електричних імпульсів. При цьому частота електричних імпульсів пропорційна миттєвій об'ємній витраті газу, а підсумкова кількість підрахованих імпульсів – підсумковому об'єму речовини за певний період часу, що пройшла крізь прилад. Турбінний витратомір (див. рис. 2.34) містить корпус 1, турбінку з магнітом'якого матеріалу 2, яка вільно обертається у підшипниках корпусу під впливом потоку, два струменевипрямлячі 4, індукційний перетворювач 3 частоти оберту  $n$  у пропорційну частоту змінної напруги з підсилювачем напруги, формувачем імпульсів і лічильником цих імпульсів. При цьому частота  $f$  вихідної напруги  $u$  та сама напруга, що знімається з індукційного перетворювача, визначаються рівняннями:

$$f = n \cdot z / 60 \quad (2.11)$$

$$u = k \cdot B \cdot V n \cdot \sin z \omega t \quad (2.12)$$

де  $z$ - кількість лопастей;  $k$ - коефіцієнт перетворювання турбінного витратоміра;  $B$ -індукція магнітного поля постійного магніту;  $\omega$  - кутова швидкість;  $t$ - час.

Прилади розраховані на робочий тиск до 10 МПа при температурі газу від (-10) до 60°C. Точність вимірювання складає  $\pm 2\%$ . Довжина прямих ділянок трубопроводу: два діаметри до і один - після лічильника.

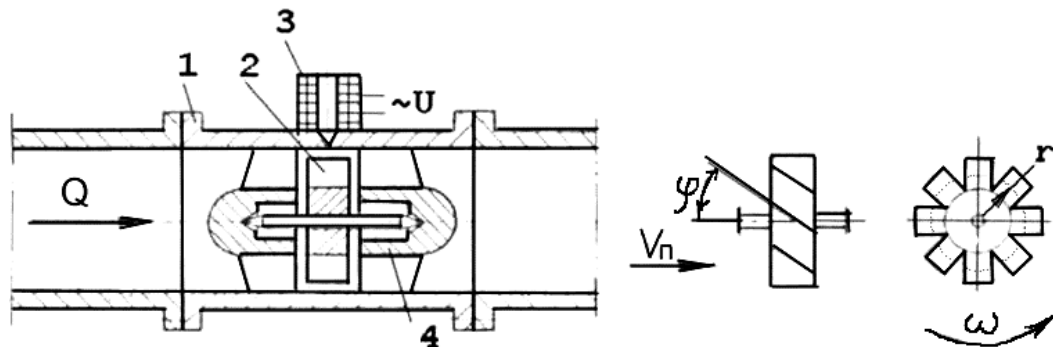


Рис. 2.34. Схема турбінного лічильника.

Турбінні витратоміри-лічильники газу типу ТУРГАС призначені для автоматичного, безперервного вимірювання об'ємної витрати з верхньою межею від 100 до 1600 м<sup>3</sup>/год і обліку об'ємної кількості очищеного неагресивного природного газу (метану), повітря, інертних газів густиною не менше 0,7 кг/м<sup>3</sup>, температурою 0 ÷ 50 °С і тиску до 0,6 МПа. Комплект витратоміра – лічильника складається з турбінного перетворювача витрати газу типу ПРГ і електронного блоку типу БИР. Перетворювач ПРГ має єдиний для усіх типорозмірів перетворювач швидкості обертання турбіни типу ПСК-1.

Перетворювач ПСК-1 виконаний водонепроникаючим і має вибухозахищене виконання. Клас точності приладу 1 чи 1,5. За принципом дії витратомір - лічильник ідентичний попередньому. Електронний блок БИР випускається у трьох модифікаціях: вимірювач витрати БИР-1 з вихідним уніфікованим сигналом 0÷5 мА постійного струму; вимірювач сумарної кількості БИР-2 з інтегруючим пристроєм і шестирозрядним лічильником; вимірювач витрати і кількості БИР-3, що поєднує функції двох попередніх модифікацій.

Перетворювач ПРГ встановлюють на горизонтальній ділянці трубопроводу. Перед і після нього повинні бути прямі ділянки дов-



жиною відповідно 10Д і 5Д (Д – діаметр трубопроводу). Перед перетворювачем встановлюється сітка.

*Турбінні лічильники типу СТВ, СТВГ* використовують у системах комунальних і промислових водопроводів для вимірювання витрати води до 350 м<sup>3</sup>/год тиском до 1 МПа. Лічильники СТВ розраховані на температуру води від 5 до 40 °С, а СТВГ – на температуру до 90 °С. Тип рахункового показчика стрілково-роликовий. Приєднання до трубопроводу фланцеве.

*Крильчасті лічильники – водоміри* (типу КВ, ВСКМ, КВБ) призначені для вимірювання витрати питної води до 20 м<sup>3</sup>/год або об'єму води у системах гарячого водопостачання з тиском до 1 МПа.

Вони вміщують крильчастий модуль, що представляє собою проточну камеру з крильчаткою і лічильний механізм, герметично ізольований від крильчастого модуля. Обертання крильчатки передається на лічильний механізм через магнітну муфту.

Відлік загальної кількості води крізь лічильник здійснюється цифровим і стрілковим індикаторами, розташованими на вимірювальній панелі лічильника. Встановлюють лічильники на горизонтальних ділянках трубопроводів. Довжина прямих ділянок трубопроводу: до п'яти діаметрів перед і два діаметри після лічильника.

*Крильчасті електронно-механічні лічильники типу ЭСК* призначені для комерційного обліку витрати і об'єму води з температурою від 5 до 90 °С і тиском до 1 МПа. Основні елементи лічильника: вимірювальна камера, лічильний блок, регулятор і блок зняття інформації. Перші три елементи ідентичні відповідним елементам попередніх водомірів з місцевою шкалою. Блок зняття інформації призначений для перетворення обертання стрілки відлікового пристрою в лічильний електричний імпульс, який потім електронним блоком перетворюється в аналоговий вихідний сигнал постійного струму 0÷5 мА, 0(4) ÷ 20 мА. Додатково має інтерфейсний канал зв'язку RS232. У залежності від діапазону вимірювання витрати виготовляється у двох виконаннях: ЭСК-32Г-01М з межею вимірювання 0,05÷12 м<sup>3</sup>/год і ЭСК-40Г-01М – з межею 0,08 ÷ 20 м<sup>3</sup>/год.

*Крильчасті лічильники (водоміри) типу JS, WS* призначені для вимірювання витрати і об'єму холодної (до 50°С) теплої (до 90°С) та гарячої (до 130°С) води. Знайшли широке застосування у сучасних теплолічильниках “Січ”, що випускаються вітчизняною промисловістю. Розраховані на вимірювання максимальної витрати у межах від 3 до 20 м<sup>3</sup>/год. Лічильники типу JS – одноструменеві, а WS – багато-

струменеві. На рис. 2.35 схематично показані одноструменеві і багатоструменеві лічильники.

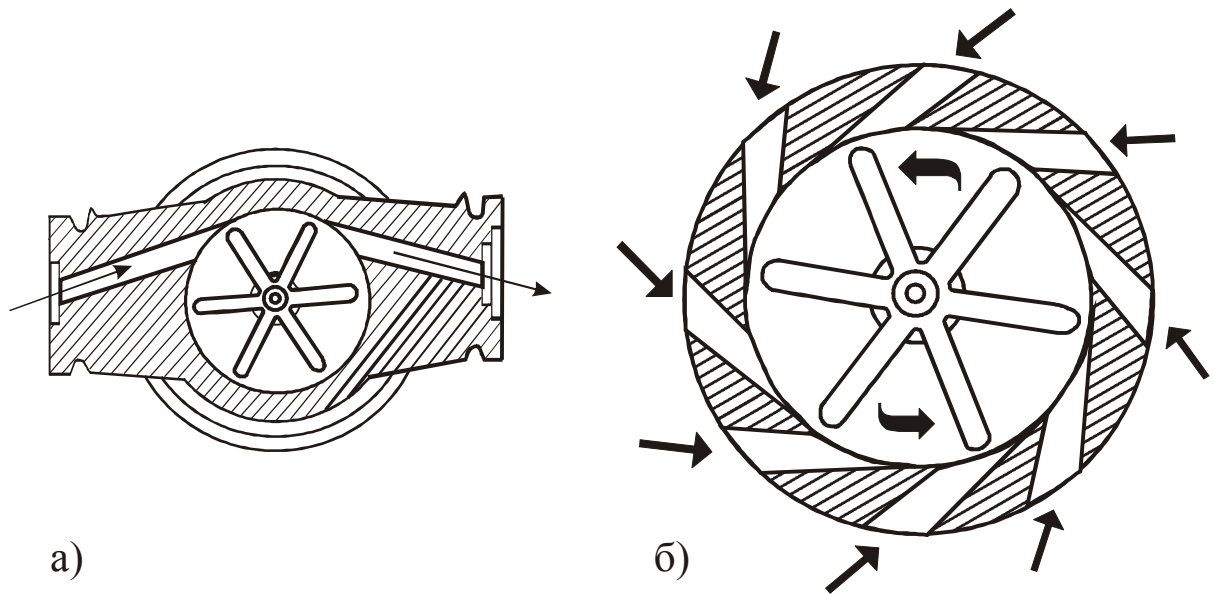


Рис. 2.35. Схеми руху рідини у одноструменевому (а) і багатоструменевому (б) лічильниках.

Як в одноструменевих, так і у багатоструменевих лічильниках рідина підводиться тангенціально до лопастей вертушки.

Усі типи лічильників мають лічильний стрілково–барабанний сухий з магнітним зчепленням механізм з антимагнітним екраном, а додатково можуть вміщувати герконовий датчик імпульсів знаття даних НК або датчик з імпульсним виходом для тепломірів НС. Ці модифікації входять до позначання типу лічильника. Наприклад, JS-90-6НК (90 – тепла вода до 90 °С, 6 – номінальна витрата 6 м<sup>3</sup>/год). Лічильники встановлюють на горизонтальній ділянці трубопроводу. Довжина прямої ділянки перед лічильником повинна бути не менше 5Dу, а після нього – понад 2Dу. Прямі відрізки не обов'язкові, якщо лічильник монтують за допомогою з'єднувачів, що можуть бути замовлені за бажанням споживача.

На рис.2.36 наведені загальний вигляд лічильників типу JS і WS з позначенням основних типорозмірів, необхідних для монтажу.

**Витратоміри змінного перепаду тиску** є одними з найбільш розповсюджених приладів, що застосовуються у різних галузях промисловості. Цим витратомірам притаманні переваги, що забезпечили їм не тільки широке застосування, але і тривалу живучість незважаючи на існування великої кількості інших приладів вимірювання ви-

трати і кількості матеріальних потоків. До цих переваг можна насамперед віднести наступні: простота конструкції і експлуатації; універсальність застосування, для потоків рідини, газу і пари; можливість повірки і атестації звужувальних пристроїв шляхом розрахунку по результатах вимірювань геометричних розмірів трубопроводу і звужувального пристрою; зручність масового виробництва, що передбачає індивідуальне виготовлення тільки звужувальних пристроїв, а дифманометри і вторинні прилади є серійними пристроями, випуск яких промисловістю не залежить ні від виду, ні від параметрів вимірювального середовища.

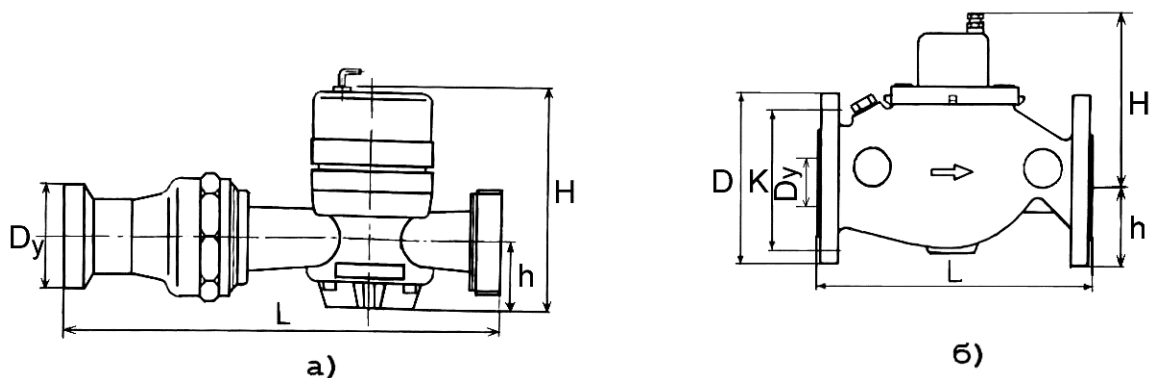


Рис.2.36. Загальний вигляд лічильників типу JS (а) муфтового виконання і WS (б) фланцевого виконання.

Основні недоліки цих витратомірів: квадратична залежність поміж витратою і перепадом, що не дозволяє вимірювати витрату менш 30% від максимальної внаслідок високої похибки вимірювання; невелика точність (1,5 ÷ 3%), яка залежить від стану звужувального пристрою, діаметру трубопроводу і параметрів (тиск, температура) потоку.

Вимірювальний комплект витратоміра містить (див. рис. 2.37): звужувальний пристрій, дифманометр, прилади для вимірювання параметрів середовища і з'єднувальні лінії. При цьому до і після звужувального пристрою повинні бути певні прямі ділянки трубопроводу. Витратоміри змінного перепаду тиску є єдиними нормалізованими засобами вимірювання витрати з усіх, що використовуються у світовій практиці. Ці витратоміри нормалізовані Міжнародним стандартом ДГСТ 8.563.(1-3)-97, де наведено алгоритм розрахунку і вибору звужувальних пристроїв. Наведені у стандарті положення справедливі при дотриманні наступних умов вимірювання: характер руху потоку у прямих ділянках трубопроводів до і після звужувального пристрою повинен бути турбулентним, стаціонарним; фазо-

вий стан потоку не повинен змінюватися при його течії крізь звужувальний пристрій (рідина не випаровується, розчинені у рідині гази не виділяються, не припустима конденсація водяної пари з газів з наступним випаданням рідкої фази у трубопроводі поблизу звужувального пристрою); у внутрішній порожнині прямих ділянок трубопроводів до і після звужувального пристрою не накопичуються осадки у вигляді пилу, піску, металевих предметів та інших видів забруднень; на поверхнях звужувального пристрою не утворюються відкладення, змінюючи його конструктивні параметри; пара є перегрітою при цьому для неї справедливі усі положення, що торкаються вимірювання витрати газу; при вимірюванні витрати газу відношення абсолютних тисків на виході і вході звужувального пристрою більше або дорівнює 0,75.

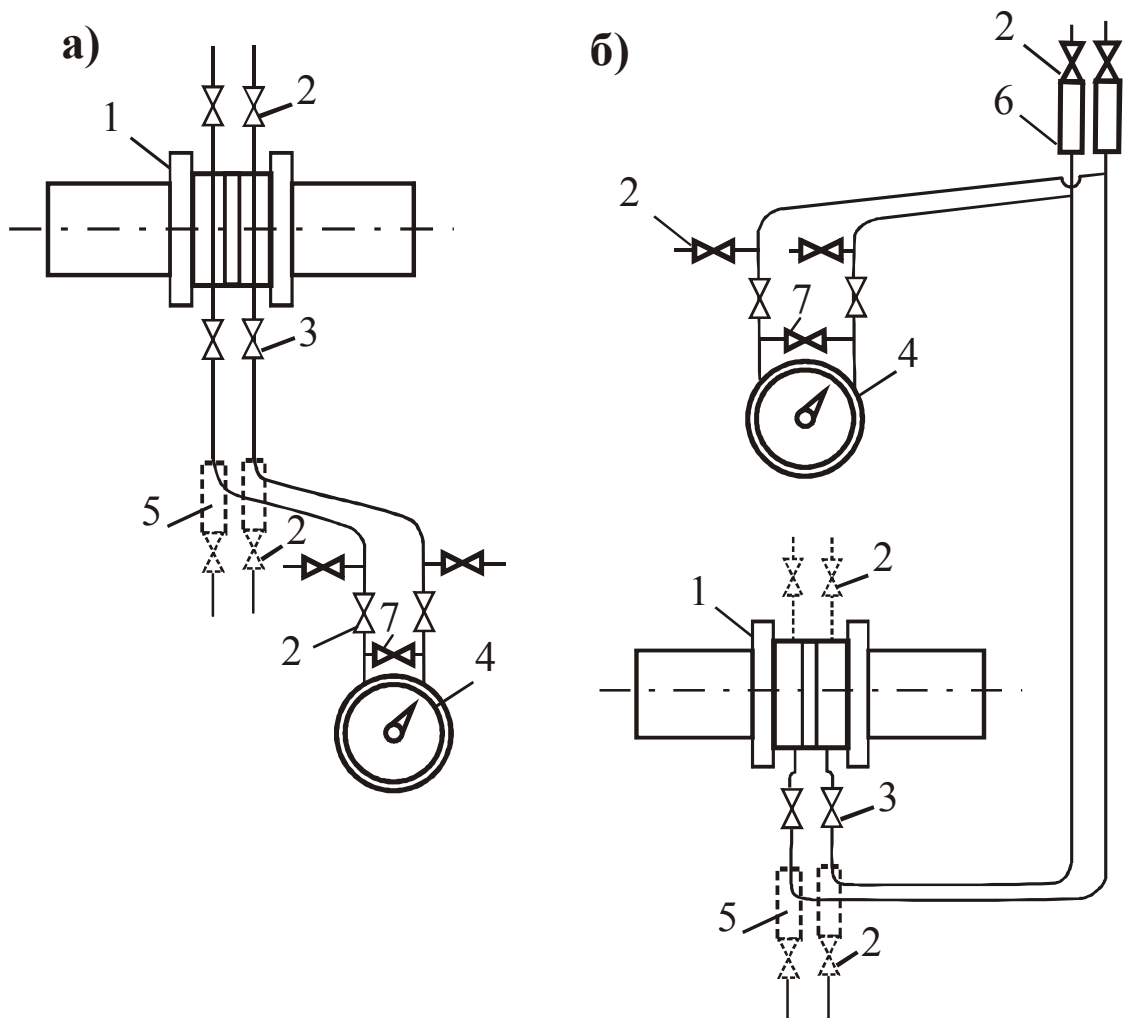


Рис. 2.37. Схеми з'єднувальних ліній для вимірювання витрати рідини при встановленні дифманометра нижче (а) і вище (б) звужувального пристрою: 1 – звужувальний пристрій; 2 – продувний вентиль; 3 – запірний вентиль; 4 – дифманометр; 5 – відстійна посудина; 6 – газозбірник; 7 – вирівнювальний вентиль.

Існують як стандартні (нормалізовані), так і нестандартні звужувальні пристрої.

*Стандартні звужувальні пристрої* – це діафрагми, сопла, сопла Вентурі і труби Вентурі, що задовольняють вимогам ДГСТ 8.563.(1-3)-97 і застосовуються для вимірювання витрати речовини без індивідуального градуювання. Основними параметрами цих приладів є модуль  $m$  і коефіцієнт витрати  $\alpha$  звужувального пристрою, які визначаються відношеннями:

$$m = \frac{d^2}{D^2}; \quad \alpha = \frac{Q}{Q_T} \quad (2.13)$$

де  $d$  і  $D$  – відповідно діаметри звужувального пристрою і трубопроводу, мм;  $Q$  і  $Q_T$  – об'ємні витрати відповідно дійсна і теоретична, м<sup>3</sup>/год.

Коефіцієнт витрати характеризує гідродинамічні якості звужувального пристрою, завжди менш одиниці, залежить від числа Рейнольдса та модулю  $m$  і встановлюється в основному експериментальним шляхом. При цьому, експериментально доведено, що  $\alpha$  залежить від  $Re$  тільки до визначеної межі числа Рейнольдса ( $Re_{GP}$ ), вище якого коефіцієнт витрати визначається тільки величиною  $m$ . Тому в процесі розрахунку встановлюється межове значення  $Re_{GP}$ , за якого  $\alpha = const$  для окремого звужувального пристрою.

Визначення величини  $\alpha$  в значній мірі залежить від способу відбору тиску до та після звужувального пристрою. На рис.2.38 наведені характер потоку і розподіл тиску при встановленні звужувального пристрою у трубопроводі, та способи відбору тиску. Якщо до звужувального пристрою статичний тиск у трубопроводі дорівнює  $P_1'$ , то у звужувальному пристрої він різко спадає до  $P_2$  а потім поступово зростає до нового сталого значення  $P_2'$ . При цьому тиск у трубопроводі за звужувальним пристроєм не досягає значення  $P_1'$ , оскільки частина енергії потоку втрачається на тертя о стінки звужувального пристрою і завихрення потоку після звужувального пристрою. Величина безповоротних втрат дорівнює  $P_{II}$ . Перед звужувальним пристроєм тиск біля стінок трубопроводу дещо зростає до  $P_1$  внаслідок підпору потоку. Мінімальний тиск спостерігається на деякій відстані від звужувального пристрою, а тиск у прохідному перерізі звужувального пристрою дорівнює  $P_2$ . Різниця тисків ( $P_1 - P_2$ ) є перепадом, що залежить від втрат потоку речовини крізь трубоп-

ровід. Величина витрати об'ємна  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) і масова  $\bar{Q}$  ( $\text{кг}/\text{с}$ ) обчислюється за формулами:

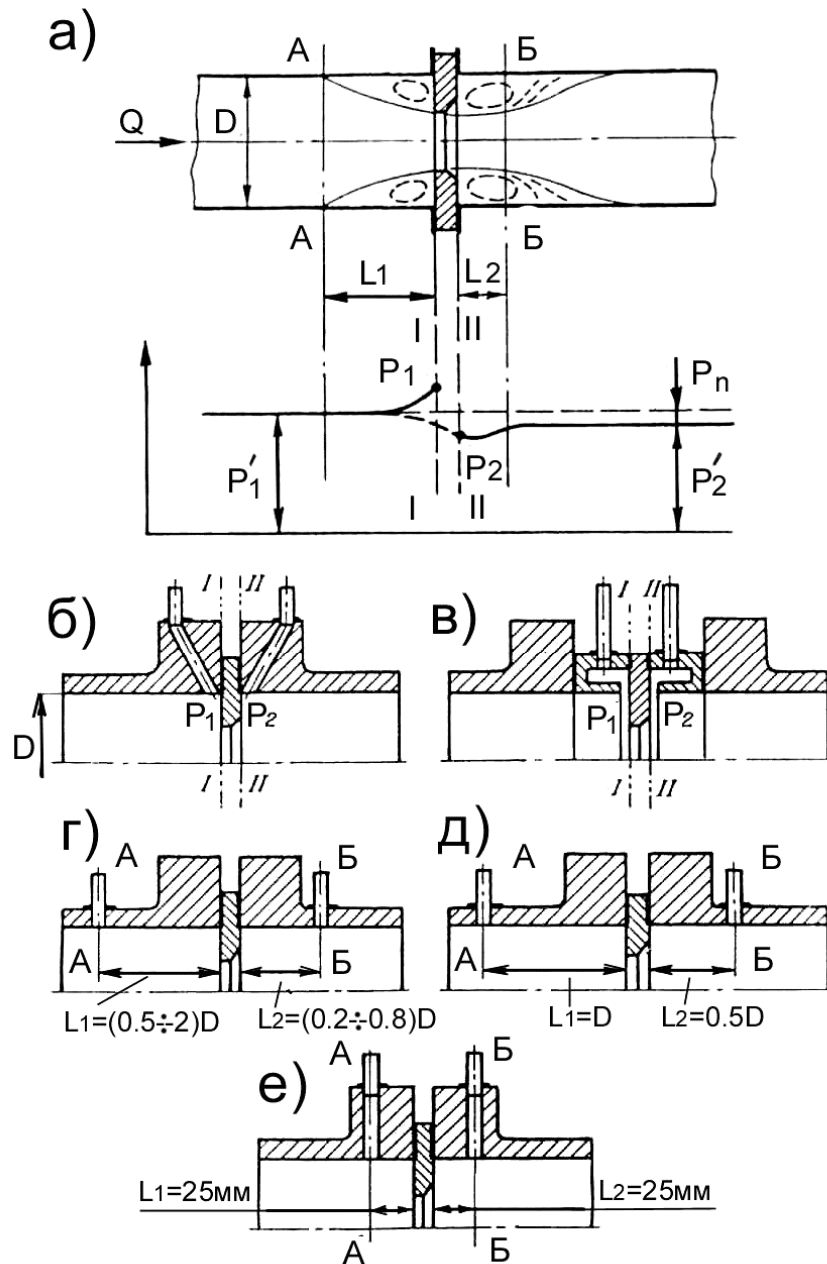


Рис.2.38. Способи відбору тиску від звужувальних пристроїв: а – графік розподілу тиску; б, в – кутовий спосіб; г – за методом звуженого струменя; д – радіальний; е – фланцевий.

$$\bar{Q} = \alpha \varepsilon F \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}; \quad (2.14)$$

$$Q = \alpha \varepsilon F \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho}, \quad (2.15)$$

де  $\varepsilon$  - виправний множник на поширення вимірюваного середовища (коефіцієнт поширення, який для рідини дорівнює одиниці);  $\rho$  - гус-

тина потоку перед входом його у отвір звужувального пристрою;  $F$  – площа отвору звужувального пристрою.

З урахуванням того, що  $F = 0,785d^2$  формули (2.14) і (2.15) можуть бути представлені у вигляді:

$$\bar{Q} = 1,11\alpha\epsilon d^2 \sqrt{\rho(P_1 - P_2)} ; \quad (2.16)$$

$$Q = 1,11\alpha\epsilon d^2 \sqrt{(P_1 - P_2) / \rho} . \quad (2.17)$$

Слід відзначити, що значення  $\epsilon$  для різних типів звужувальних пристроїв та різних випадків вимірювання визначаються за експериментальними формулами.

Способи відбору відрізняються за розташуванням отворів для відбору тисків у перерізі трубопроводу відносно звужувального пристрою (діафрагми). В нашій країні передбачені стандартом і розповсюджені два способи відбору тисків – кутовий і фланцевий. При кутовому способі відбору, тиск відбирається безпосередньо у звужувального пристрою за допомогою кутових отворів (рис. 2.38 б) чи кільцевих камер (рис. 2.38 в). Фланцевий спосіб (рис. 2.38 е) передбачає відбір тисків  $P_1$  і  $P_2$  крізь отвори у фланцях, що знаходяться на рівній відстані  $L_1 = L_2 = 25$  мм, або на відстані  $L_1 = L_2 = 0,5D$  від відповідної площини звужувального пристрою. У США застосовується метод звуженого струменя (рис. 2.38 г), за яким тиск  $P_1$  відбирається на відстані  $L_1 = (0,5 \div 2)D$  від передньої площини пристрою (переріз А–А), а  $P_2$  на відстані  $L_2 = (0,2 \div 0,8)D$  від заданої площини пристрою (переріз Б–Б). Радіальний спосіб (рис. 2.38 д) вельми близький методу звуженого струменя, але відстані у відповідних перерізах інші. Вплив способу відбору тиску може бути урахованим за формулою:

$$\alpha = \alpha_{\text{пу}} K_y \quad (2.18)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт витрати за обраним способом відбору тиску;  $\alpha_{\text{пу}}$  – початковий розрахунковий коефіцієнт витрати для кутового способу відбору тиску.

На рис. 2.39 представлена залежність зміни коефіцієнта  $K_y$  від модуля  $m$  при переході від кутового способу до інших.

Наведені залежності свідчать, що при  $m \leq 0,5$  перепади тисків за умов кутового способу відбору практично дорівнюють перепадам при відборах методами звуженого струменя, радіальному і фланце-

вому. Це свідчить про рівність значень  $\alpha$  для усіх способів з похибкою, що не перевищує  $0,2 \div 0,3\%$  для вказаного діапазону зміни  $m$ . При  $0,5 < m < 0,7$  коефіцієнти  $K_y$  для різних способів різні і вони повинні бути ураховані. Перевага кутового способу пояснюється можливістю застосування кільцевих камер для відбору середніх тисків до і після звужувального пристрою. Кутовий і фланцевий способи застосовують при вимірюванні витрат за допомогою діафрагми. При застосуванні сопел, сопел Вентурі і труб Вентурі використовують тільки кутовий спосіб відбору тисків.

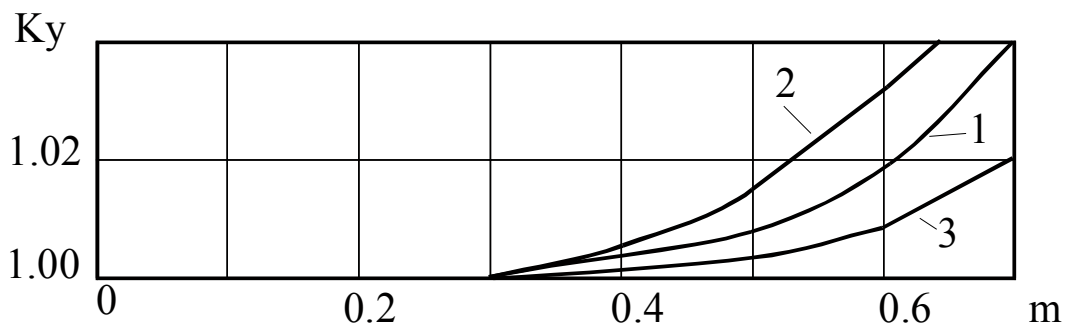


Рис.2.39. Залежність коефіцієнту  $K_y$  від модуля  $m$ : 1 – для метода звуженого струменя; 2 – для радіального відбору; 3 – для фланцевого відбору.

*Діафрагма* серед стандартних звужувальних пристроїв найчастіше застосовується у виробництві. Це пояснюється тим, що виготовлення і монтаж діафрагми значно простіший, ніж інших пристроїв. Конструкції і основні розміри стандартних вимірювальних діафрагм представлені на рис. 2.40.

Перепад тиску за умов кутового способу відбору тисків може відбиратися за допомогою косих отворів (рис. 2.40 г) або за допомогою кільцевих камер (рис. 2.40 в). Ширина кільцевої щілини  $C$ , що з'єднує камеру з трубопроводом, не повинна перевищувати  $0,03D$  при  $m \leq 0,45$ , а при  $m > 0,45$  повинна задовольняти умові:

$$0,01D \leq C \leq 0,02D \quad (2.19)$$

Розміри перерізу камери  $a$  і  $b$  обираються за умови, що площа перерізу камери складає не менш половини площини перерізу кільцевої щілини шириною  $C$ , тобто:

$$ab \geq 0,5\pi cD \quad (2.20)$$

Товщина  $h$  стінки корпусу камери повинна бути не менш  $2C$ . Камерні діафрагми застосовуються для трубопроводів діаметром до



500 мм і розраховані на тиск до 10 МПа. Припустимі діапазони значень діаметрів трубопроводів  $D$  (мм) і відносної площини діафрагм  $m$  повинні знаходитись у наступних межах:  $50 \leq D \leq 1000$ ;  $0,05 \leq m \leq 0,64$  – для діафрагм з кутовим способом відбору перепаду тисків;  $50 \leq D \leq 760$ ;  $0,04 \leq m \leq 0,56$  – для діафрагм з фланцевим способом відбору перепаду тисків, при цьому діаметр отвору діафрагми незалежно від способу відбору перепаду тиску  $d \geq 12,5$  мм.

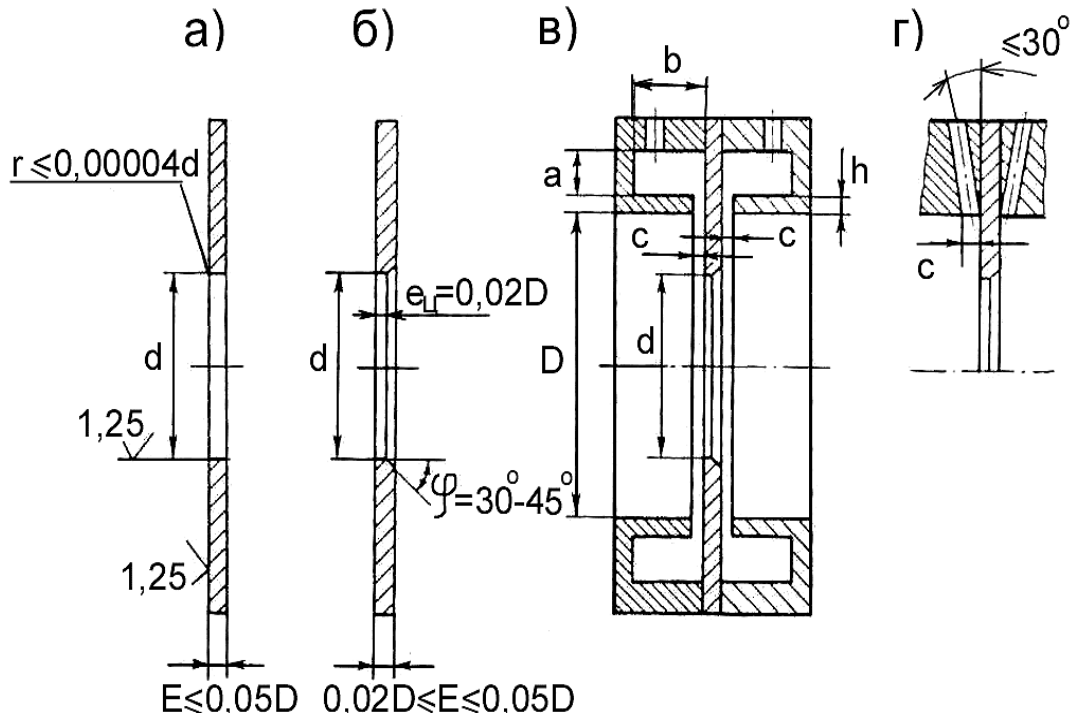


Рис. 2.40. Конструкції і основні розміри стандартних вимірювальних діафрагм: а – з циліндричним отвором; б – циліндрична з конічним переходом; в – кільцева камера з діафрагмою; г – діафрагма безкамерна.

Стандартні камерні діафрагми мають позначення ДКС, а безкамерні – ДБС.

До складу позначення діафрагм входить: умовний тиск, умовний прохід трубопроводу, виконання посадкових місць, матеріал корпусів камер і диску, номер з'єднання з імпульсними трубками або посудинами і ДГСТ.

Виконання посадкових місць камер діафрагм під фланці може бути з виступом (I) та із западиною (II). Корпуси камер виготовляють із сталі 20, 25, 30 (умовне позначення  $a$ ), сталі 12X18H10T (умовне позначення  $b$ ). Диски камерних і безкамерних діафрагм виготовляють із сталі 12X18H10T, 12X17 (умовне позначення  $c$ ). Прокладки для діафрагм виготовляють із пароніту.

Номери умовних позначень з'єднань діафрагм з імпульсними трубками, вирівнювальними посудинами і вирівнювальними конденсаційними посудинами залежить від вимірювального середовища, напрямку потоку і розташування трубопроводу. Ці номери наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Номери з'єднань діафрагм з імпульсними трубками, вирівнювальними та вирівнювальними конденсаційними посудинами

Трубопровід	З'єднання діафрагм		
	З імпульсними трубками (вимірювальне середовище – рідина з температурою до 120 °С або газ)	З вирівнювальними конденсаційними посудинами (вимірювальне середовище – водяна пара)	З вирівнювальними посудинами (вимірювальне середовище – рідина з температурою понад 120 °С)
Горизонтальний, віддалений від стіни	1	5	10
Горизонтальний, біля стіни. Напрямок потоку зліва на право	2	6	11
Горизонтальний, біля стіни. Напрямок потоку справа наліво	2	7	11
Вертикальний напрямок потоку зверху до низу	3	8	12
Вертикальний напрямок потоку знизу до верху	4	9	13

Припустимо застосовувати як фланцевий, так і кутовий спосіб відбору перепаду тисків. Наприклад умовне позначення камерної діафрагми має позначення: ДКС 0,6-50-1-а/б-9ДГСТ8563.1. Це свідчить, що діафрагма камерна розрахована на умовний тиск 0,6 МПа, для трубопроводу з умовним проходом 50 мм, виконання 1, має матеріал корпусу камер – сталь марки 20, а матеріал диску – сталь марки 12Х18Н10Т, утворює діафрагма з привареними конденсаційними посудинами з'єднання 9. Слід відзначити, що фланцеві з'єднання підприємства не виготовляють.

Сопла можна застосовувати без індивідуального градуювання у

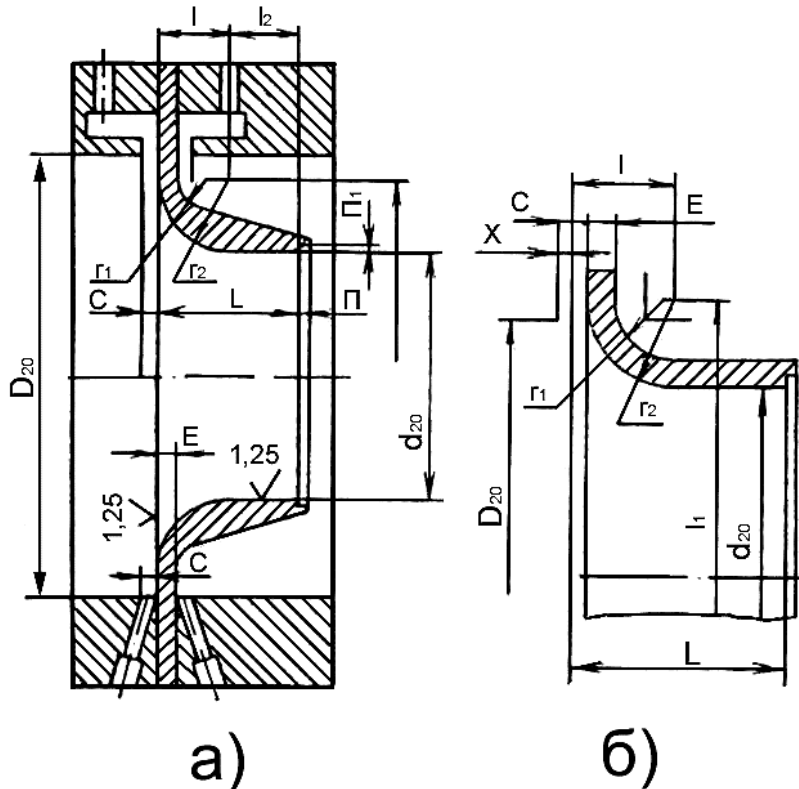


Рис. 2.41. Основні геометричні параметри сопел: а – для  $m \leq 0,444$ ; б – для  $m \geq 0,444$ .

трубопроводах діаметром не менше 50 мм, а у випадку вимірювання витрати рідини - не менше 30 мм. При цьому відносна площа звужувального пристрою повинна бути у межах  $0,05 \leq m \leq 0,64$ , а діаметр отвору сопел –  $d \geq 15$  мм. Сопла особливо зручні для вимірювання витрати газів і перегрітої пари, якщо  $(P_1 - P_2)/P_2 < 1$ , а також для вимірювання витрати пари високого тиску і агресивної рідини у трубо-

проводах діаметром до 200 мм.

У порівнянні з діафрагмами сопла менше чутливі до корозії, забруднень і забезпечують дещо більшу точність вимірювання. Форма сопла і його геометричні параметри представлені на рис.2.41. Відбір перепаду тисків припустимий тільки кутовий. Вказані на рис. 2.41 розміри повинні мати значення у відповідності з наступними рівняннями:

$$x = 0,2d - \sqrt{0,75dD - 0,25D^2 - 0,5225d^2} \quad (2.21)$$

$$r_1 = 0,2d; r_2 = 0,333d; \quad (2.22)$$

$$l = 0,304d; l_1 = 1,5d; l_2 = 0,3d; \quad (2.23)$$

$$E \leq 0,1D; L = 0,604d \quad (2.24)$$

$$n_1 \geq 0,03d; n \leq 0,03d. \quad (2.25)$$

Сопла Вентурі застосовуються без індивідуального градуювання для діаметрів трубопроводів з  $D = 65 \div 500$  мм для  $m = 0,05 \div 0,6$  і  $d \geq 20$  мм. На рис. 2.42 представлені основні геометричні параметри сопла Вентурі.

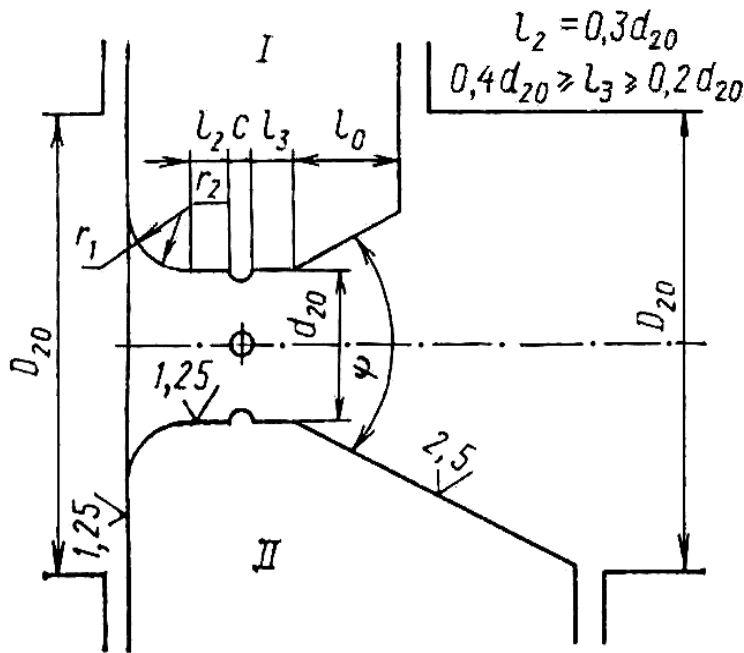


Рис. 2.42. Основні геометричні параметри сопел Вентурі: I – коротке; II – довге для  $m \leq 0,444$  (при  $m > 0,444$  профіль виконується ідентично соплам з  $m > 0,444$ ).

конусу  $l_0$  коротких сопел Вентурі повинна бути не менше  $d$ . Відбір перепаду тиску припустимий тільки кутовий і слід вимірювати через кільцеві камери. Задня (мінусова) камера з'єднується з циліндричною частиною сопла Вентурі крізь групу радіальних отворів, діаметр яких повинен бути не більше  $0,13d$ , але не менше 3 мм (звичайно  $4 \div 12$  мм).

Труба Вентурі застосовується без індивідуального градуювання і встановлюється на трубопроводах діаметром від 50 до 1400 мм з відносною площиною  $m = 0,1 \div 0,6$ . Відбір перепаду тисків здійснюється за допомогою кутового способу. Труба Вентурі (рис. 2.43) складається з вхідного патрубку  $l_1$ , вхідного конусу  $l_2$ , горловини  $l_3$  і дифузору  $l_4$ . У залежності від умовного проходу  $D$ , умовного тиску  $P_y$  і матеріалу труби Вентурі виготовляють трьох типів: А – сталеві зварені з листового матеріалу для  $D$  від 200 до 1400 мм,  $P_y$  до 1,6 МПа; Б – з литими неопрацьованими вхідними частинами і литою опрацьованою горловиною для  $D$  від 100 до 800 мм,  $P_y$  до 2,5 МПа; В – литі з опрацьованими вхідними патрубками, конусом і горловиною для  $D$  від 50 до 250 мм,  $P_y$  до 4 МПа.

Труба Вентурі є довгою, якщо найбільший діаметр вихідного конусу дорівнює діаметру  $D$  або короткою, якщо діаметр цього ко-

Сопло Вентурі складається з профільної вхідної частини, циліндричної середньої частини і вихідного конусу. Циліндричний отвір безпосередньо (без радіального спряження) переходить у конус. Сопло Вентурі може бути довгим і коротким. У першому випадку найбільший діаметр вихідного конусу дорівнює діаметру трубопроводу, у другому – менше. Кут вихідного конусу сопла Вентурі не повинен виходити за межі  $5^\circ \leq \psi \leq 30^\circ$ . Довжина

нуса менше діаметра трубопроводу  $D$ . Співвідношення основних розмірів труб Вентурі наведені у ДГСТ 8.563.(1-3)-97.

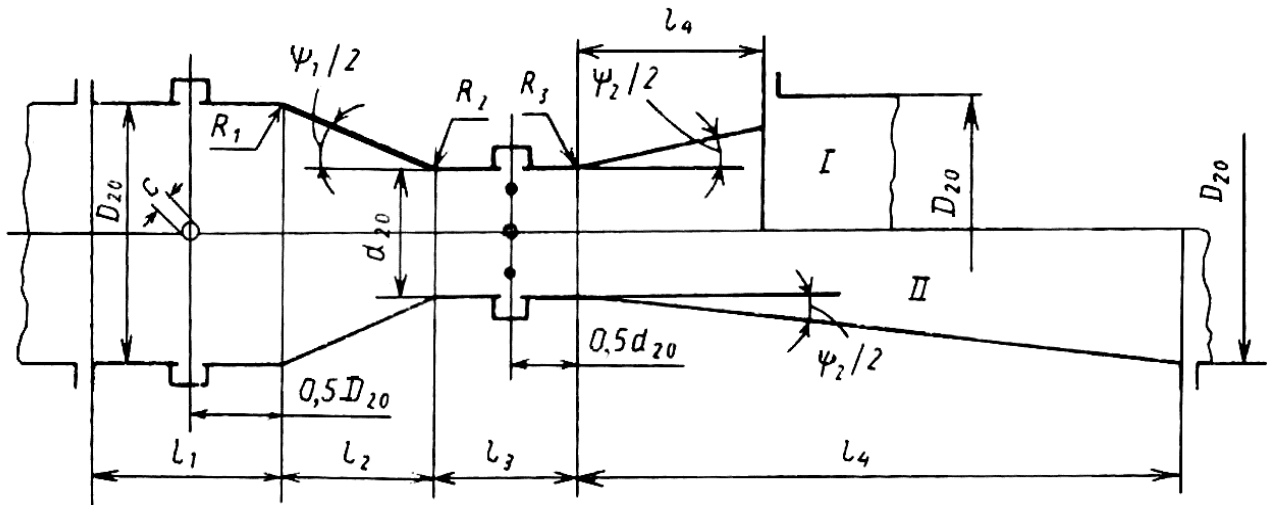


Рис.2.43. Геометричні параметри труби Вентурі: I- коротка; II- довга.

Тиск у горловині і вхідному патрубку слід відбирати крізь отвори у стінках та крізь осереднюючі камери. Діаметр отворів  $C$  не повинен перевищувати значень  $0,1D$  на вхідному патрубку і  $0,13d$  на горловині (рекомендовані значення  $4 \div 12$  мм). Труби Вентурі виготовляють серійно двох типорозмірів на кожний умовний діаметр у залежності від величини модулю  $m$ . Для вимірювання витрати з швидкостями  $0,5 \div 2$  м/с визначено  $m = 0,2$ , а для вимірювання витрати з швидкостями  $1 \div 4$  м/с визначено  $m = 0,4$ .

Основний недолік звичайних труб Вентурі: великі розміри і маса, що ускладнює монтаж, особливо на діючих трубопроводах. Тому частіше застосовують скорочені труби. Використовують ці прилади у випадках, коли втрати тиску за високих швидкостей можуть бути занадто великими, зокрема при вимірюванні великих витрат рідини.

*Монтаж конструкцій звужувальних пристроїв здійснюється за схемами, що наведені на рис.2.44. На рис.2.44 а показана конструкція звужувального пристрою з діафрагмою 1, яка встановлена безпосередньо поміж фланцями і ущільнюючими прокладками або кільцями 2. Отвори 4 і 5 необхідні для відбору тисків. Перший за потоком отвір необхідний для відбору більшого тиску  $P_1$  (плюсового), а за діафрагмою – меншого  $P_2$  (мінусового). Тиски можуть відбиратися безпосередньо у діафрагми (кутовий відбір) або на відстані  $25,4$  мм від площини діафрагми (фланцевий відбір). Для зручності монтажу і демонтажу діафрагма іноді обладнана ручкою. У трубоп-*

риводах з діаметром понад 100 мм заміна діафрагм пов'язана із значними труднощами у зв'язку з необхідністю розсунення жорстко змонтованого трубопроводу. Для полегшення цієї операції діафрагмові блоки оснащені декількома розсувними бовтами 3, що встановлюються поміж затягуючими шпильками.

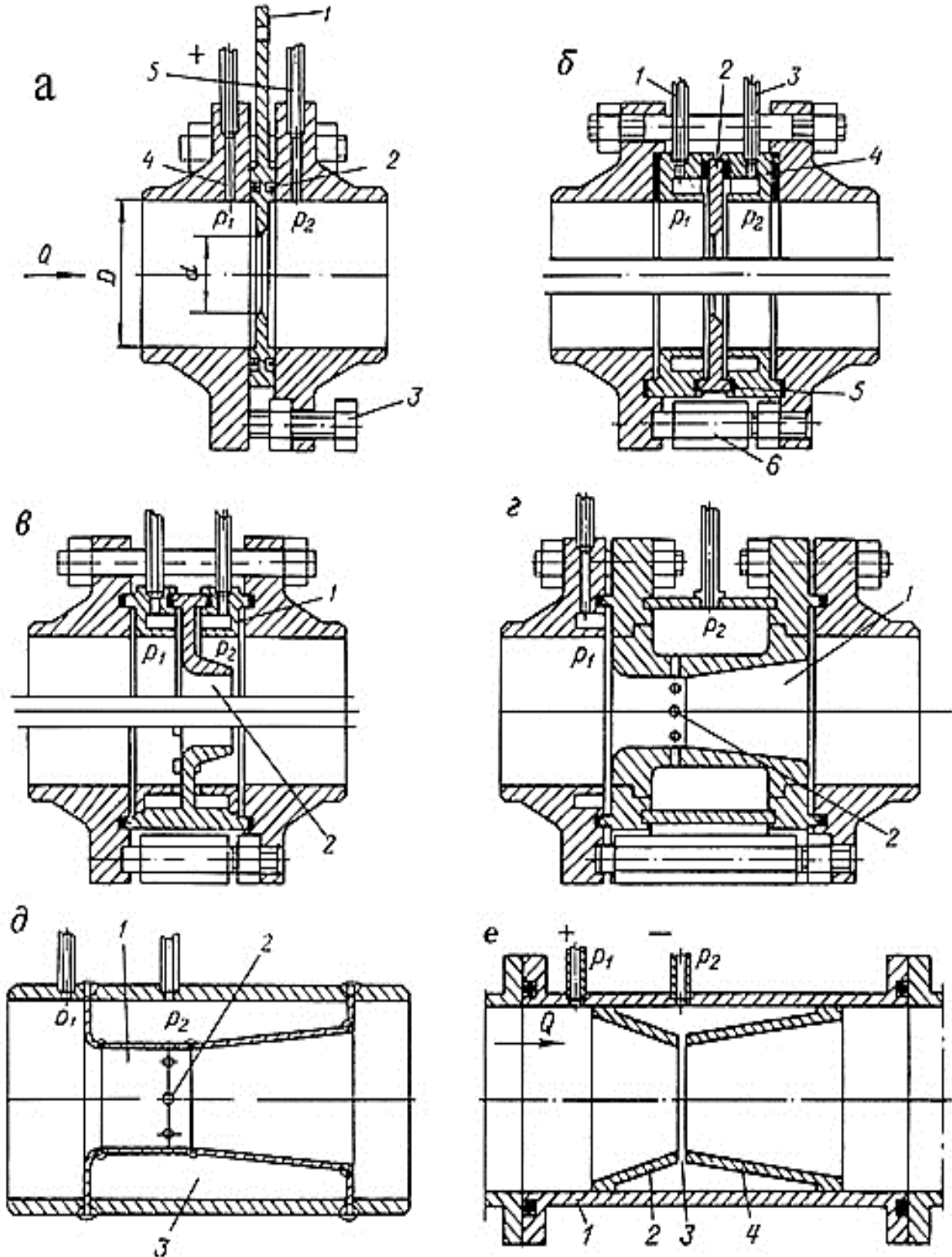


Рис 2.44. Конструкції звужувальних пристроїв.

На рис.2.44 б показані два варіанти установки діафрагми 2 за допомогою двох додаткових дисків 4 з кільцевими камерами для відбору тисків. Один варіант ущільнення плоскої діафрагми плоскими дисками наведений у верхній частині рисунку, а другий, з ущільненням типу “виступ-упадина”, знизу. Перший варіант простіший, але ущільнення і центрування відносно осі трубопроводу пов’язано з певними труднощами. Другий варіант з ущільненням “виступ-упадина” забезпечує просте і надійне ущільнення з одночасним центруванням отворів діафрагми. Отвори 1 і 3 служать для відбору тисків з кільцевих камер, а бовти 6 призначені для полегшення монтажу і демонтажу діафрагми. Ущільнення діафрагми 2 і дисків 4 забезпечується герметизуючими прокладками 5.

Розглянуті діафрагмові вузли широко застосовуються у трубопроводах діаметром від 50 до 700 мм. Для трубопроводів діаметром понад 700 мм і тисках  $3 \div 7,5$  МПа установка діафрагми ускладнюється через велику жорсткість трубопроводу. Замість діафрагми у блок, що представлений на рис. 2.44 б може бути встановлене сопло 2 (див. рис. 2.44 в) поміж дисками 1. Сопло (труба) Вентурі можна встановлювати поміж фланцями (рис. 2.44 г) чи вварювати безпосередньо у розрив трубопроводу (рис. 2.44 д). Установка сопла (труби) Вентурі 1 поміж фланців (рис. 2.44 г) доцільна у трубопроводах діаметром менше 700 мм, а вварювання (рис. 2.44 д) – у трубопроводах діаметром понад 700 мм. Більший тиск  $P_1$  відбирається безпосередньо на вході у сопло 1, а менший  $P_2$  – у циліндричній частині сопла (горловині для труби) крізь отвори 2. Для підвищення жорсткості зварювальні сопла (труби) оздоблюються ребрами жорсткості 3 (рис. 2.44 д). Менший тиск  $P_2$  у цьому випадку також відбирається крізь отвори 2.

*Вимірювальні конденсаційні посудини* призначені для підтримки незмінності і однаковості рівнів конденсату у плюсовій і мінусовій імпульсних трубках при вимірюванні витрати водяної пари. Промисловістю серійно виготовляються і поставляються комплектно з дифманометрами малі посудини СКМ на  $P_y = 4$  і  $10$  МПа. Позначення посудин будується аналогічно посудинам типу СУМ (див. розд. 2.3). Посудини виготовляють найчастіше із сталі 20 і позначаються буквою “а”. У технічно обґрунтованих випадках застосовують сталь 12Х18Н10Т. Остання цифра у позначенні свідчить про виконання посудини (1-5), загальний вигляд яких наведений на рис. 2.45.

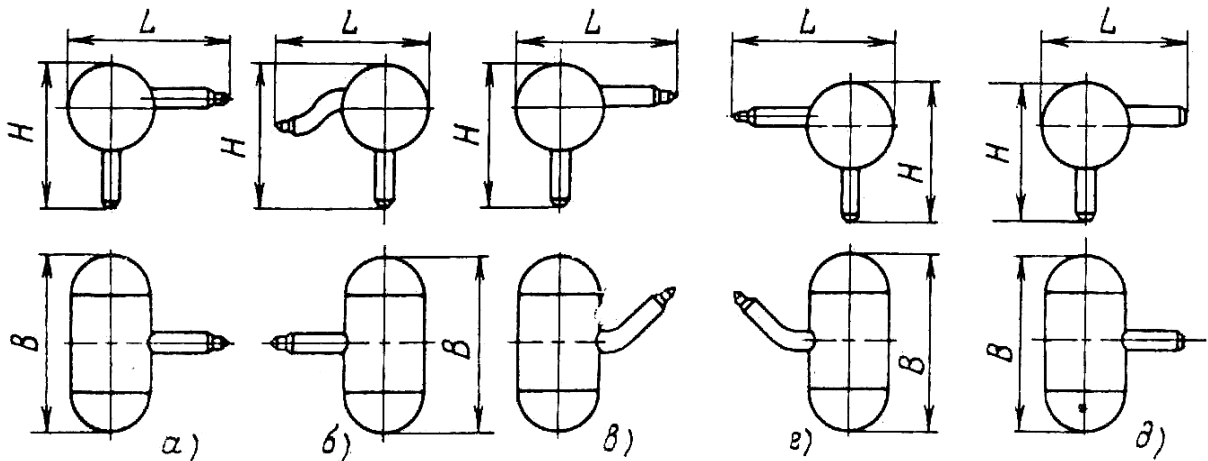


Рис. 2.45. Вирівнювальні конденсаційні посудини: а – СКМ-40-1, СКМ-100-1; б – СКМ-40-2, СКМ-100-2; в – СКМ-40-3, СКМ-100-3; г – СКМ-100-4; д – СКМ-100-5.

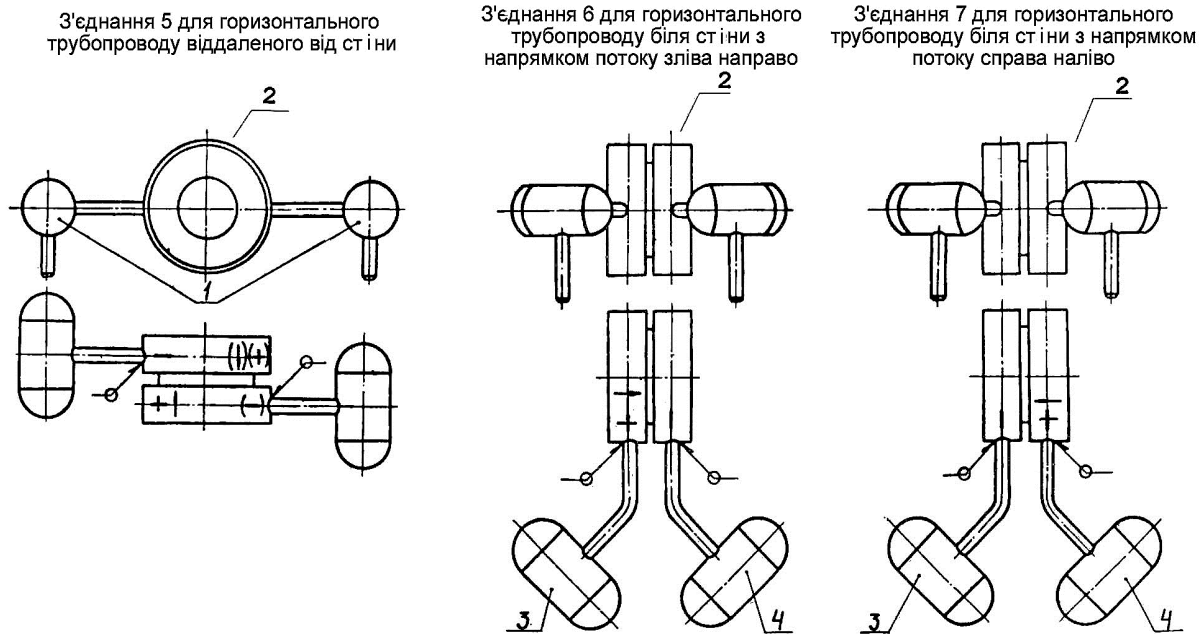
Наприклад посудина має позначення СКМ-100-3-а, що свідчить про наступне: посудина мала на  $P_y = 10$  МПа, виконання 3, виготовлений із сталі 20.

Відбір перепаду тиску від звужувального пристрою для вимірювання витрати водяної пари повинен здійснюватись за допомогою конденсаційних посудин СКМ з'єднань 5 – 9, які представлені на рис. 2.46.

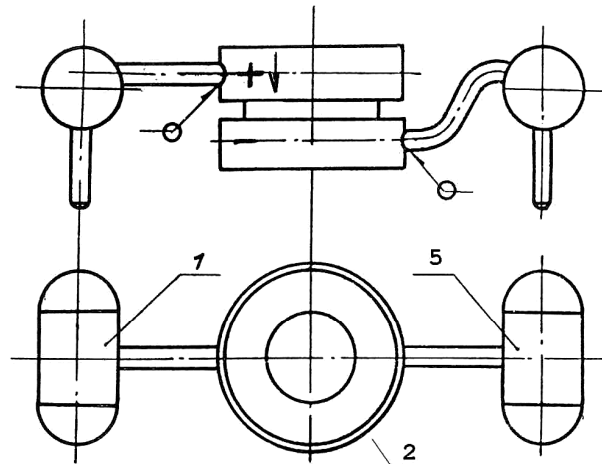
Постійність і однаковість рівнів конденсату досягається встановленням посудин СКМ, які разом з дільницями з'єднувальних ліній поміж посудинами і дифманометром заповнюються водою. Обидві посудини, а також бокові отвори у них повинні знаходитись на одній висоті. Для вертикальних трубопроводів бокові отвори у посудинах повинні розташовуватись у площині верхнього отвору для відбору тиску у звужувальному пристрої.

*Нестандартизовані (спеціалізовані) звужувальні пристрої* застосовують за умов, що відрізняються від встановлених ДГСТ 8.563.(1-3)-97. Приладобудівними підприємствами серійно не виготовляються. Ці пристрої застосовують для вимірювання витрати при малих числах Рейнольдса ( $Re$ ), для вимірювання запиленних і забруднених середовищ і у деяких інших випадках. Основні положення ДГСТ 8.563.(1-3)-97 для вимірювання витрати за допомогою не стандартизованих звужувальних пристроїв ті самі, що і для стандартних пристроїв. Рівняння і робочі формули вимірювання витрати залишаються незмінними, незмінний і алгоритм розрахунку. Відрізняються лише рівняння для визначення коефіцієнтів витрати та діапазони вимірювання по діаметрах і числах  $Re$ .





З'єднання 8 для вертикального трубопроводу з напрямком потоку зверху донизу



З'єднання 9 для вертикального трубопроводу з напрямком потоку знизу догори

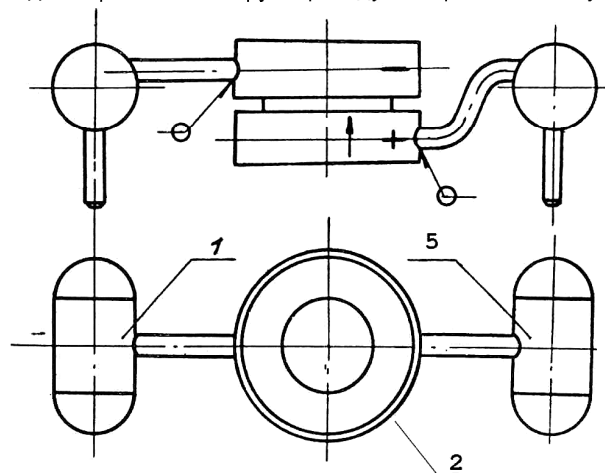


Рис. 2.46. З'єднання 5 – 9 звужувальних пристроїв (діафрагми) з вирівнювальними конденсаційними посудинами при вимірюванні витрати водяної пари: 1 – СКМ-100-1; 2 – звужувальний пристрій; 3 – посудина СКМ-100-3; 4 – посудина СКМ-100-4; 5 – посудина СКМ-100-3.

Типи спеціальних звужувальних пристроїв визначаються профілем їх перерізів, які представлені на рис. 2.47. До спеціальних звужувальних пристроїв відносяться циліндричні сопла (рис. 2.47 а), сопла “чверть круга” (рис. 2.47 б), зносотривкі діафрагми (рис. 2.47 в), діафрагми з конічним входом (рис. 2.47 г), сегментні діафрагми (рис. 2.47 д), а також стандартні діафрагми для вимірювальних трубопроводів з внутрішнім діаметром менше 50 мм.

Галузі застосування цих звужувальних пристроїв, що визначаються діапазонами припустимих значень внутрішніх діаметрів вимірювальних трубопроводів і звужувальних пристроїв, а також припустимими значеннями відносних площин (модулів) звужувальних пристроїв, представлені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Припустимі значення внутрішніх діаметрів вимірювального трубопроводу  $D$  і звужувального пристрою  $d$ , а також модулю  $m$  спеціальних звужувальних пристроїв.

Тип пристрою	$D, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$m$
Циліндричні сопла	25÷100	2,5÷70	0,01÷0,49
Сопло “чверть круга”	25÷100	6÷70	0,05÷0,49
Зносотривкі діафрагми	30÷1000	16÷800	0,05÷0,64
Діафрагми з конічним	12,5÷100	6÷50	0,01÷0,25
Стандартні діафрагми для трубопроводів з внутрішнім діаметром менш 50 мм	14÷50	7÷40	0,05÷0,64
Подвійні діафрагми	40÷100	12,7÷70,5	0,1÷0,5
Сегментні діафрагми	50÷1000	—	0,1÷0,5

При вимірюванні витрати газу відношення перепаду тиску ( $P_1 - P_2$ ) до абсолютного тиску  $P_1$  на вході звужувального пристрою для циліндричних сопел не повинно перевищувати 0,29, а для решти типів звужувальних пристроїв – 0,5. Розрахунки коефіцієнтів витрат для стандартних і спеціальних звужувальних пристроїв проводять за індивідуальними формулами, що враховують метод відбору перепаду тиску.

**Витратоміри постійного перепаду тисків** мають досить широке розповсюдження серед приладів для вимірювання невеликих витрат рідини і газу, які називають ротаметрами.

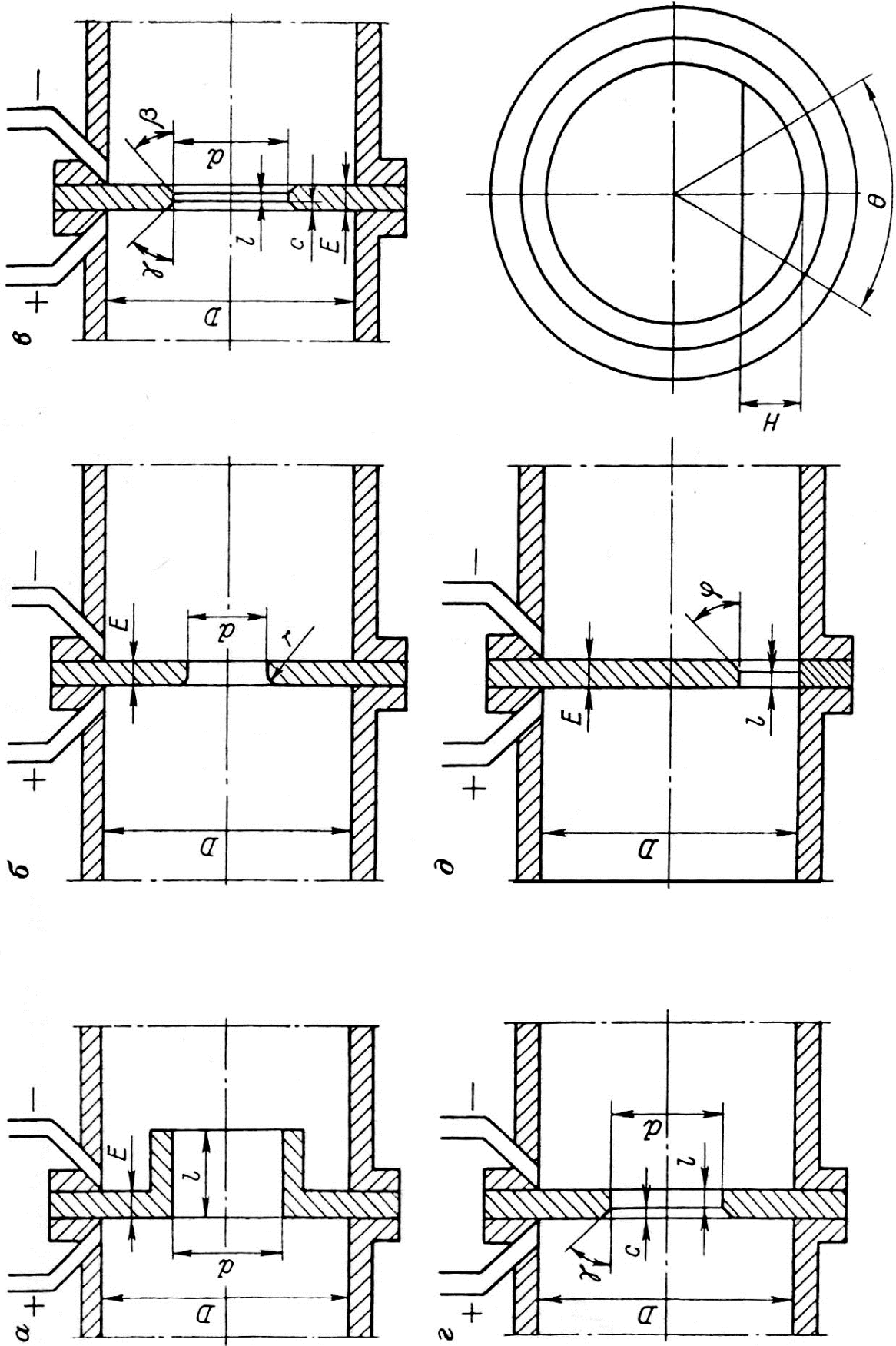


Рис. 2.47. Конструкції спеціальних звукувальних пристроїв.

Перевага ротаметрів: незначні втрати тиску, їх незалежність від витрати і високий діапазон вимірювання ( $Q_{\max}/Q_{\min} = 10:1$ ). Недоліками ротаметрів є висока чутливість до температурної зміни в'язкості, неможливість вимірювання витрати забруднених рідин та рідин, з яких випадає осадок, можливість установа тільки на вертикальній ділянці трубопроводу.

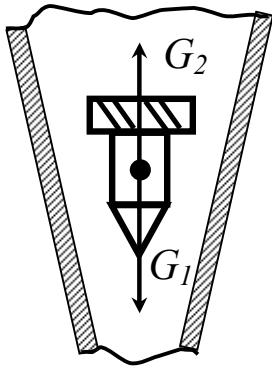


Рис. 2.48. Схема ротаметру з конічною трубкою.

Основними елементами ротаметру є конусна трубка (див. рис. 2.48), що розширюється знизу догори, і поплавковий механізм, розташований у середині трубки. Потік речовини, що проходить крізь ротаметр знизу, піднімає поплавок до тих пір, доки кільцева щілина поміж тілом поплавка і стінками конусної трубки не досягне такої величини, за якої діючі на поплавок сили врівноважуються. За умов рівноваги сил поплавок встановлюється на такій висоті, що однозначно буде характеризувати витрату. В процесі роботи ротаметра поплавок повністю занурений у вимірюване середовище. Вага зануреного поплавка  $G_1$  визначається за формулою:

$$G_1 = V_{\text{п}}g(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}}), \quad (2.26)$$

де  $V_{\text{п}}$  – об'єм поплавка;  $g$  прискорення вільного падіння;  $\rho_{\text{п}}$  і  $\rho_{\text{с}}$  – відповідно густина поплавка і вимірюваного середовища.

Сила  $G_2$ , що діє на поплавок з боку вимірюваного потоку, обчислюється за рівнянням:

$$G_2 = (P_1 - P_2)F, \quad (2.27)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  тиск середовища перед поплавком і за ним;  $F$  – найбільший поперечний переріз поплавка.

У стані рівноваги, коли поплавок нерухливий, спостерігається рівність значень  $G_1$  і  $G_2$ , тобто

$$V_{\text{п}}g(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}}) = (P_1 - P_2)F \quad (2.28)$$

У відповідності з рівністю (2.28) різниця тисків ( $P_1 - P_2$ ) складе:

$$(P_1 - P_2) = V_{\Pi} g (\rho_{\Pi} - \rho_C) / F \quad (2.29)$$

Рівняння (2.29) свідчить, що незалежно від положення поплавка перепад тисків на ньому постійний і не залежить від значення вимірюваної витрати. Це пояснюється постійністю швидкості потоку середовища в процесі вимірювання внаслідок зміни площі кільцевого зазору поміж поплавком і конічною трубкою. Ця швидкість згідно рівняння Бернуллі і безперервності потоку буде дорівнювати:

$$v = \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho_C} = \sqrt{2gV_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho_C) / \rho_C F} \quad (2.30)$$

Об'ємна витрата з урахуванням коефіцієнта витрати  $\alpha$  визначиться рівнянням:

$$Q = \alpha F_K \sqrt{2gV_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho_C) / \rho_C F}, \quad (2.31)$$

де  $F_K$  – площа кільцевого зазору між поплавком і конічною трубкою.

Аналіз останнього рівняння показує, що для окремого вимірюваного середовища величини правої частини, за винятком  $F_K$ , постійні і позначивши їх коефіцієнтом  $\kappa$  можна рівняння (2.31) представити у вигляді:

$$F_K = \kappa Q \quad (2.32)$$

Залежність (2.32) положення поплавка від витрати, що вимірюється, лінійна, тобто шкала ротаметрів рівномірна. Установлення цих приладів на трубопроводах вимагає додержання певних правил. При цьому довжина прямої ділянки трубопроводу перед ротаметром повинна бути не менше  $10D_y$ , а після ротаметра не менше  $5D_y$ . Для забезпечення безперервності технологічного процесу повинна бути прокладена обвідна лінія, яка б дозволяла тимчасово відключати ротаметр для проведення профілактичних робіт (ремонт, чистка і т. ін.). Ротаметри випускають для місцевого вимірювання витрати без дистанційної передачі, а також з дистанційною передачею показань (пневматична, електрична). Тарировка (градування) ротаметрів здійснюється по воді або повітрю. Для іншого середовища необхідно індивідуальне градування. Звичайно у інструкціях до ротаметрів наведені характеристики або формули для проведення пере-

рахунків цих характеристик з води чи повітря на рідину чи газ, що вимірюються. Ротаметри призначені для вимірювання однорідних потоків, що плавно змінюються, чистих і слабо забруднених рідин і газів з дисперсними включеннями інородних частинок. Верхня фактична межа вимірювання ротаметру не повинна перевищувати значень верхньої межі, що вказана для кожного приладу, більше ніж 20%, а нижня межа не більше 20% від верхньої фактичної межі вимірювання.

*Ротаметри з місцевими показуванням типу РМ у залежності від витрати вимірювальних середовищ випускаються у семи базових моделях з верхніми межами вимірювань:  $0,0025 \div 2,5 \text{ м}^3/\text{год}$  по воді і  $0,063 \div 40 \text{ м}^3/\text{год}$  по повітрю.*

Основні елементи ротаметрів є ротаметрична (конічна) скляна трубка 1 і поплавки 2 (див. рис.2.49). Ущільнення по зовнішньому діаметру трубки у верхньому і нижньому кінцях досягається за рахунок прокладок 3 які можуть бути виготовлені з кислотостійкої резини або полівінілхлоридного пластикату. Для обмеження ходу поплавка у крайніх положеннях передбаченні упори 4 (рис.2.49 а) чи діафрагми 5 (рис.2.49 б). Шкала приладу безпосередньо нанесена на скляну трубку. Відлік показань слід проводити по верхній кромці поплавка. Для моделей ротаметрів РМ і РМ-А у залежності від границь вимірювання поплавки виготовляють із сталі Х18Н9Т, анодованого дюралюмінія, ебоніту та титану. Моделі, у яких поплавки футерується фторпластом, мають позначення РМФ і призначенні для вимірювання витрати агресивного середовища. Величина втрати тиску у приладах не перевищує  $0,01 \text{ МПа}$ . Тиск вимірювального середовища не повинен перевищувати  $0,6 \text{ МПа}$ . Основна припустима похибка ротаметрів РМ-А складає  $\pm 4\%$  від верхньої межі вимірювання, для всіх інших моделей –  $\pm 2,5\%$ .

*Ротаметри пневматичні* призначені для вимірювання об'єму витрати потоків рідини і перетворення її в уніфікований пневматичний сигнал. Виготовляються наступні типи ротаметрів: РП – для вимірювання витрати рідини нейтральної до сталі 12Х18Н9Т; РПФ – для вимірювання витрати рідини нейтральної до фторопласту – 4; РПО з паровим обігрівом – для вимірювання витрати рідини, що кристалізується, та нейтральної до сталі 10Х17Н13М2Т. Діапазон верхньої межі вимірювань по воді складає  $0,1 \div 16 \text{ м}^3/\text{год}$ .

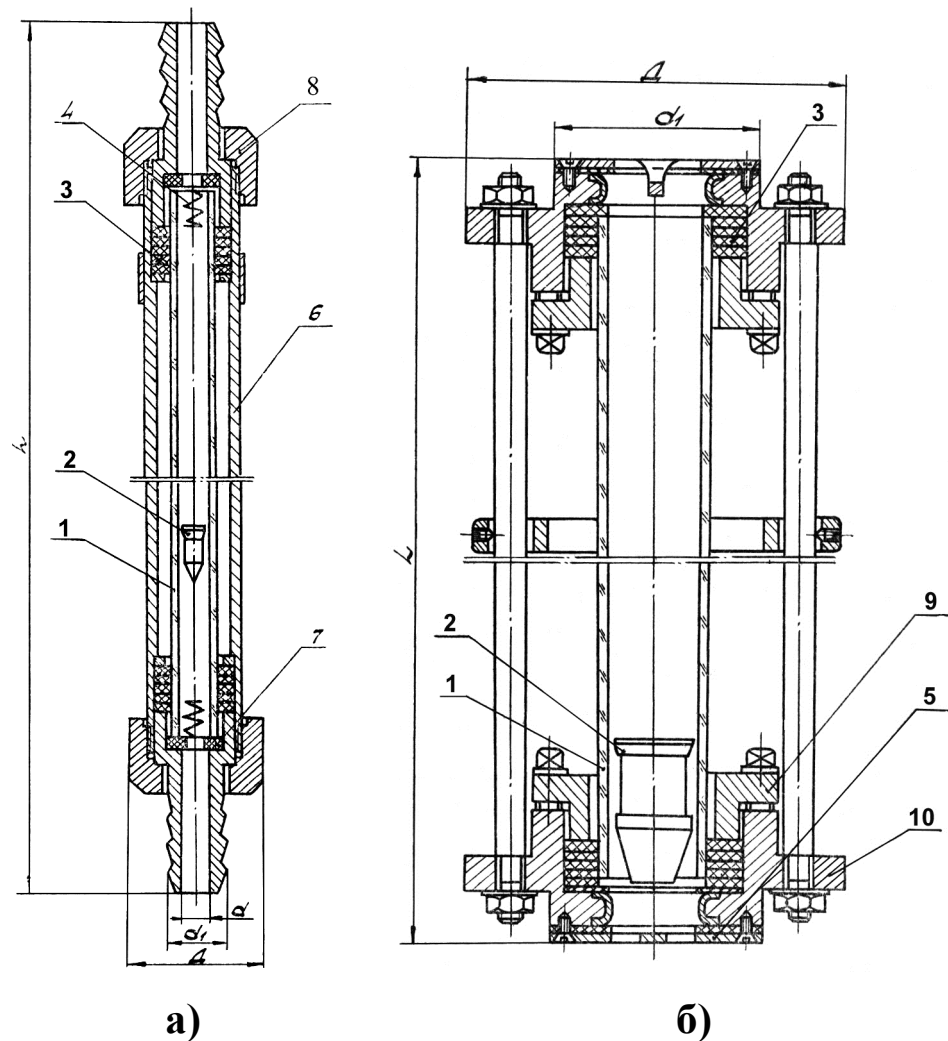


Рис. 2.49. Ротаметр для місцевого вимірювання витрати типу РМ: 1 – трубка рота метрична; 2 – поплавок; 3,7 – прокладка; 4 – упор; 5 – діафрагма; 6 – обойма; 8 – гайка; 9 – фланець; 10 – корпус.

Ротаметр складається з двох основних частин: ротаметричної і пневматичної. Принципові схеми ротаметричної і пневматичної частин наведені на рис. 2.50. Ротаметрична частина приладу РП призначена для розміщення ротаметричної пари (мірний конус, поплавок), що реагує на зміну витрати рідини, та з'єднання приладу у технологічну лінію. Корпус ротаметричної частини 2 (див. рис. 2.50 а) має вигляд прямої труби з привареними на кінцях кільцями. Усередині корпусу розташовані: поплавок 1, який жорстко зв'язаний із здвоєними магнітами 7 і конусом 3, конус мірний 5, напрямуючі 4 і гайка спеціальна 6. До корпусу приварена плата 8 для закріплення пневмоголовки (пневматичної частини). Пневмоголовка здійснює перетворення висоти положення поплавка у пневматичний сигнал. Основним елементом пневматичної частини (див. рис. 2.50 б) є магнітопневматичний перетворювач.

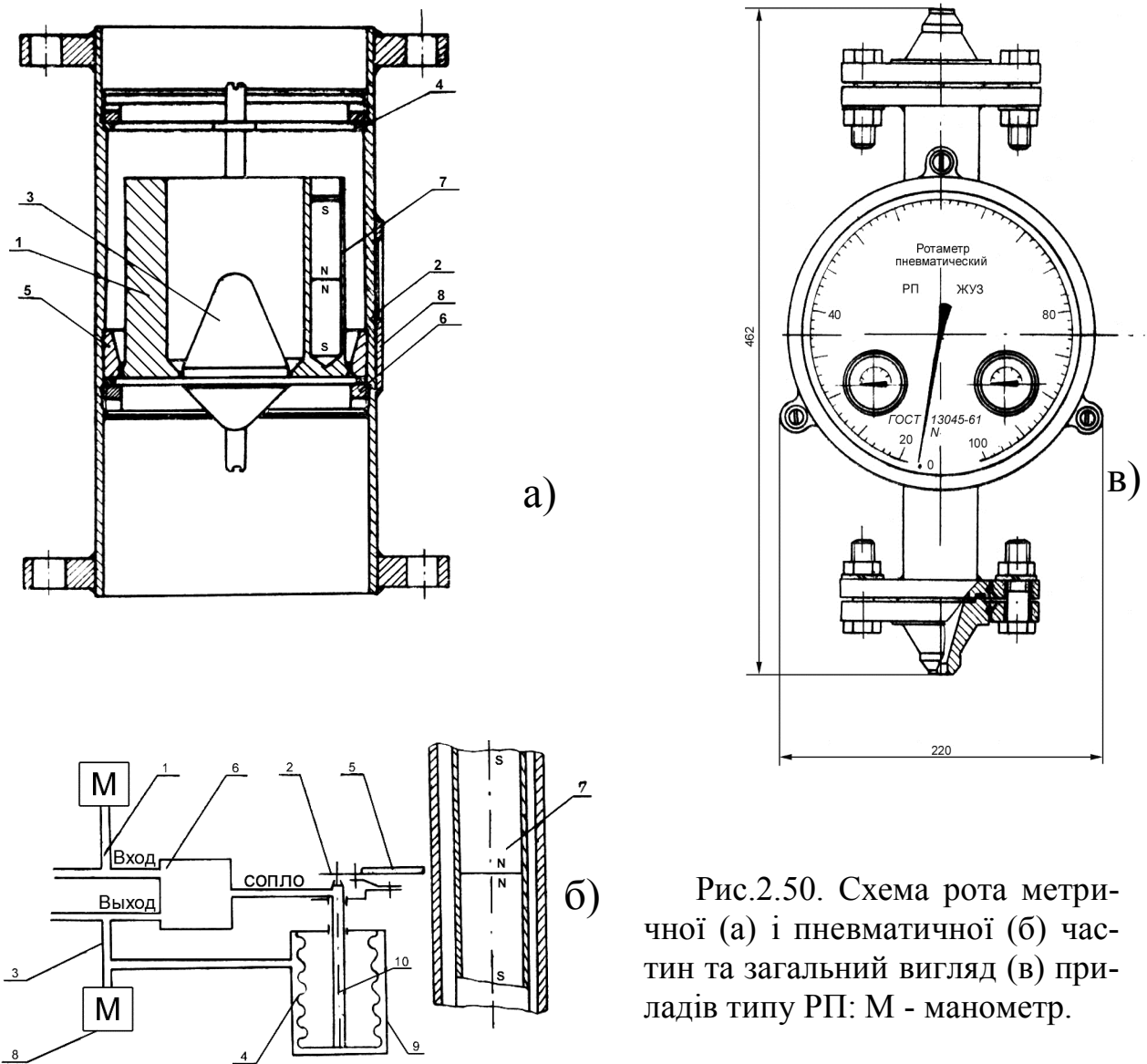


Рис.2.50. Схема рота метричної (а) і пневматичної (б) частин та загальний вигляд (в) приладів типу РП: М - манометр.

При переміщенні догори поплавка 1 і здвоєних магнітів 7 буде змінюватись положення відслідковуючого магніту 5 і жорстко зв'язаної з ним заслінки 2. При цьому зазор поміж соплом і заслінкою зменшиться, командний тиск підвищиться, що призведе до підвищення тиску на виході пневмопідсилювача 6. Підсилений за потужністю сигнал надійде до внутрішньої порожнини стакану 9. Внаслідок цього сильфон 4 дещо стиснеться і перемістить шток 10 з соплом 2, яке закріплене на кінці штоку. Рух буде відбуватись до тих пір, доки відслідковуючий магніт 5 із заслінкою 2 не займуть початкового положення відносно здвоєних магнітів. Переміщення штоку 10 за допомогою кінематичної передачі перетворюється в обертальний рух стрілки місцевого вказування витрати. Шкала місцевих показань – 100% - ва, рівномірна. Вихідний тиск і тиск живлення контролюються манометрами 8. Діапазон вихідного тиску



0,02 ÷ 0,1 МПа, тиск живлення – 0,14 МПа. Матеріал ущільнення – пароніт. Приєднання приладу до трубопроводу – фланцеве. Відстань для передачі показань не більше 300 м. У ротаметрах РПО використовується пар з температурою до 200 °С і тиском до 1,7 МПа.

Ротаметри електричні призначені для вимірювання у комплекті з вторинними приладами диференціально-трансформаторної системи об'ємної витрати рідини нейтральної до сталі Х18Н9Т. Ротаметри типу РЭ є пилебризкозахищеними, а типу РЭВ мають вибухозахищене виконання. Діапазон верхньої межі вимірювань по воді складає 0,025 ÷ 16 м<sup>3</sup>/год.

Ротаметр складається з двох частин – ротаметричної і електричної, які розподілені трубкою поміж собою. Основний елемент ротаметричної частини є конічний поплавков, що переміщується усередині кільцевої діафрагми (для витрати від 0,63 до 16 м<sup>3</sup>/год), або тарілчастий поплавков, що переміщується усередині вертикально розташованої конічної трубки (для витрати від 0,025 до 0,4 м<sup>3</sup>/год). Електрична частина містить індукційну котушку з сердечником, що жорстко зв'язаний з поплавком, і два резистори, умонтованих у клемну колодку. Конструкція котушки та маркування клем ідентичні розглянутим у розділі 2.2, і становить собою диференційно-трансформаторний перетворювач, характеристика якого визначається за формулою

$$M(S) = \left( \frac{S}{S_{НОМ}} \right) * M_E \cos \varepsilon * e^{-i\varepsilon} \quad (2.33)$$

де  $M(S)$  – значення взаємної індуктивності;  $S$  – переміщення сердечника;  $S_{НОМ}$  – номінальний робочий хід сердечника;  $M_E$  – номінальне значення для верхньої межі еквівалентної взаємної індуктивності, що відповідає номінальному робочому ходу;  $\varepsilon$  – номінальне значення кута втрат.

Для ротаметрів за  $S$  приймають половину робочого ходу сердечника угору чи вниз від середнього положення (електрична нейтраль). Прилади розраховані на тиск середовища 0,6; 1,6 чи 6,4 МПа, температуру від (-40) до 70 °С. Клас точності 2,5. Максимальна відстань від ротаметра до вторинного приладу 250 м.

**Ультразвукові витратоміри** останнім часом знайшли широке розповсюдження у промисловості завдяки таким перевагам як швидкодія, перешкодосталість, висока точність, великий діапазон вимі-

рювання, багатофункціональність, можливість застосування для будь-якої форми поперечного перерізу трубопроводу. Ультразвуковий метод вимірювання ґрунтується на явищі зміщення звукового коливання рідкого середовища, що рухається. При цьому використовують найчастіше три способи. Перший спосіб побудований на вимірюванні різниці фазових зсувів двох ультразвукових коливань (УЗК), направлених за потоком і проти нього. Ці прилади називають *фазовими витратомірами*. Інший спосіб побудований на вимірюванні різниці частот повторення коротких імпульсів чи пакетів ультразвукових коливань, направлених одночасно за потоком і проти нього. Ці прилади називають *частотними витратомірами*. Перевага останніх полягає у незалежності показань від швидкості розповсюдження у середовищі, тобто виключається вплив фізичних параметрів середовища (густина, температура) на результати вимірювання. І нарешті останній спосіб ґрунтується на акустичній локації рівня рідини у тому чи іншому відкритому каналі та в подальшому перерахуванні його у миттєве значення рівня і витрати. Ці прилади називають *комбінованими витратомірами* і можуть використовуватися лише для потоків рідини з атмосферним тиском.

Основними елементами перетворювачів ультразвукових витратомірів є випромінювачі і приймачі УЗК. Їх дія оснований на п'єзоелектричному ефекті, який полягає в тому, що при стисканні і розтягуванні у певних напрямках деяких кристалів (п'єзоелементів) на їх поверхнях виникають електричні заряди. Якщо до цих поверхонь прикласти різницю електричних потенціалів, то п'єзоелемент буде розтягуватись чи стискатись у залежності від того, на якій з цих поверхонь буде більша напруга. Це явище носить назву зворотного п'єзоефекту. Воно покладено в основу роботи випромінювачів УЗК, що перетворюють змінну електричну напругу у механічні коливання тієї ж частоти. Приймачі, що перетворюють ці коливання у змінну напругу, характеризуються прямим п'єзоефектом.

Найбільш відомим природним п'єзоелементом є кварц. Проте в ультразвукових витратомірах у якості п'єзоелементів найчастіше використовуються п'єзокерамічні матеріали: титанат барію  $\text{BaTiO}_2$ ; цирконат титанату свинцю, що є твердим розчином цирконату  $\text{PbZrO}_3$ ; титанат свинцю  $\text{PbTiO}_3$  та ін. П'єзоелементи виготовляються у вигляді круглих дисків діаметром  $10 \div 20$  мм, які утворюють чутливий елемент – електрод. При цьому їх спеціально оброблені поверхні покривають шаром металу (срібла). Срібне покриття сприяє

високій степені зчеплення з поверхнею кераміки, а також дозволяє здійснювати припаювання з'єднувальних проводів.

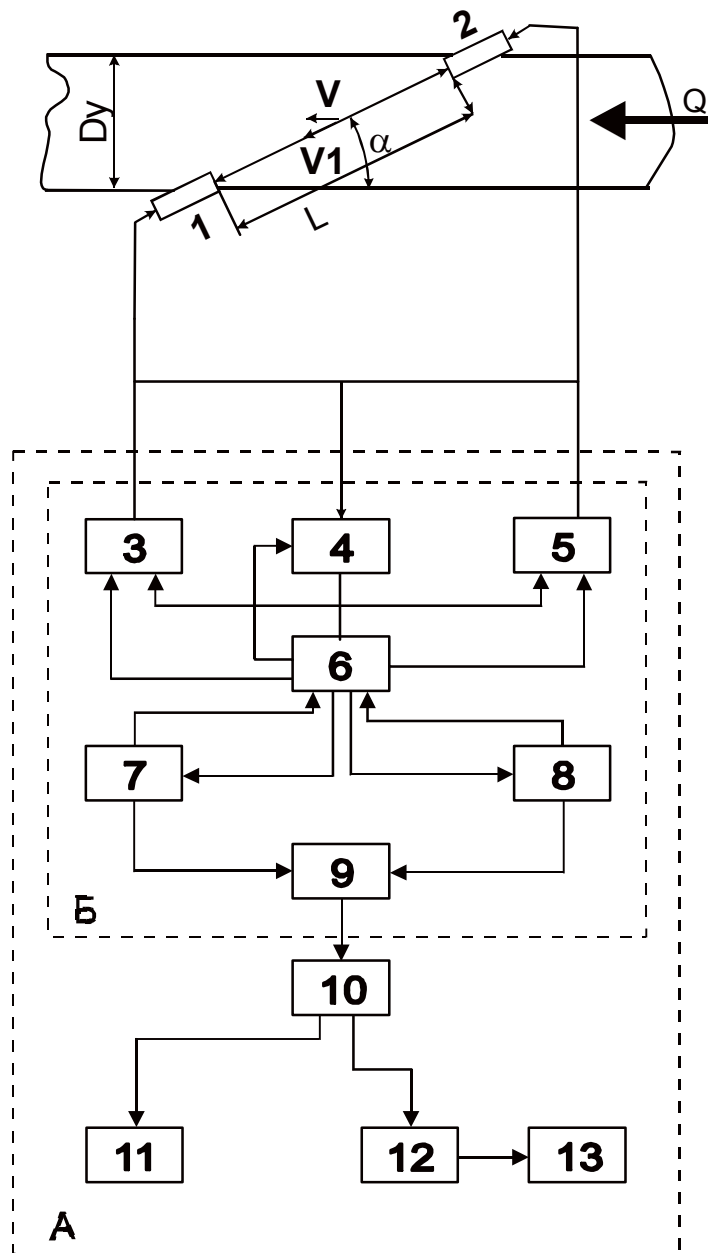


Рис. 2.51. Структурна схема ультразвукового витратоміру води "АКУСТРОН" ( $Q$  – напрямок руху потоку рідини).

режимі вимірювання кількості до 1 %.

Комплект витратоміра складається з вимірювально – керуючого приладу і двох п'єзодатчиків, що врізаються у трубопровід. Первинним перетворювачем витратоміра є відрізок труби, на якому під кутом  $\alpha$  до її вісі встановлені два п'єзоелектричних датчика (див. рис. 2.51). Кожен з двох п'єзоелементів по черзі діє випромінюючим

Частотний ультразвуковий витратомір з лічильником "АКУСТРОН" призначений для вимірювання об'ємної витрати і кількості води у трубопроводах систем водопостачання, зрошення, каналізації та теплопостачання. Діапазон витрат, що вимірюється, від 0,01 до 12,5 м<sup>3</sup>/с. Нижня межа вимірювання дорівнює нулю. Температура контрольованої рідини від 0 до 150 °С, тиск не більше 6,3 МПа. Витратоміри мають два незалежних виходи постійного струму 0 ÷ 5 мА для підключення зовнішніх пристроїв, а також з частотний вихід з амплітудою 2,4 ÷ 5 В і частотою 10 ÷ 2000 Гц. Прилади мають систему самоконтролю з індикацією режиму роботи на передній панелі. Кратність діапазону вимірювання 1:10. Похибка вимірювання в цьому діапазоні складає: у режимі вимірювання витрати до 1,5 %; у ре-

і приймальним. За допомогою високочастотного кабелю вони з'єднуються з вимірювально–керуючим приладом.

Основним функціональним вузлом вимірювально–керуючого приладу А є субпанель вимірювання Б, яка містить два синхрокільця. Імпульс з виходу формувача імпульсів 3 надходить на п'єзоелектричний первинний перетворювач 1, який випромінює короткий ультразвуковий сигнал. Цей сигнал проходить крізь контрольоване середовище і приймається п'єзоелектричним датчиком 2, за час  $t_1 = L / (C - V \cos \alpha)$ , що залежить від відстані поміж датчиками  $L$  і різниці  $C - V_1$  ( $C$  – швидкість ультразвуку у контрольованому середовищі,  $V_1$  – проекція швидкості  $V$  потоку на напрямок розповсюдження ультразвукового сигналу). Прийнятий ультразвуковий імпульс підсилюється блоком 4 і надходить у формувач імпульсів 3, який знов формує імпульс на перетворювачі 1.

Таким же чином діє друге синхрокільце. У цьому випадку імпульс з виходу формувача імпульсів 5 надходить на п'єзоелектричний перетворювач 2, який випромінює короткий ультразвуковий сигнал. Цей сигнал за час  $t_2 = L / (C + V \cos \alpha)$  проходить крізь контрольоване середовище і приймається п'єзодатчиком 1 за час, що залежить від відстані  $L$  і суми  $C + V_1$ . У підсумку між п'єзоелементами 1 і 2 будуть проходити пакети УЗК з періодом  $2 t_1$ , частотою  $f_1 = 1/2 t_1$ , а між п'єзоелементами 2 і 1 – з періодом  $2 t_2$ , частотою  $f_2 = 1/2 t_2$ . Прийнятий п'єзодатчиком 1 ультразвуковий імпульс підсилюється блоком 4 і надходить до формувача імпульсів 5, який знову формує імпульс на п'єзоелектричний перетворювач 2. В наслідок повторення процесу проходження сигналів виникає авто циркуляція імпульсів у другому (веденому) синхрокільці. Обидва синхрокільця одночасно діють в одному електроакустичному каналі. Відмінність веденого синхрокільця від ведучого, полягає у тому, що до складу формувача імпульсів 5 входить схема контролю співпадання робочих імпульсів обох синхрокільців і відновлення роботи веденого синхрокільця із зсувом на півперіоди. Роботою синхрокільця керує блок 6, який забезпечує необхідну їх синхронізацію. За допомогою системи автопідстроювання блок 6 керує роботою генераторів імпульсів 7 і 8. Імпульси з виходів керованих генераторів 7 і 8 зв'язані за частотою та фазою з імпульсами ведучого і веденого синхрокільців, але частоти надходження їх вище частот надходження імпульсів синхрокільців у 200 разів. Послідовність імпульсів з частотою  $f_1$  і  $f_2$  від

керованих генераторів 7 і 8 надходить до змішувача 9 для виділення різниці частот  $\Delta f = f_2 - f_1$ . При цьому

$$\Delta f = \frac{C + V \cos \alpha}{2L} - \frac{C - V \cos \alpha}{2L} = \frac{V \cos \alpha}{L}. \quad (2.34)$$

Аналіз рівняння (2.34) свідчить, що показання частотних витратомірів не залежать від швидкості звуку і лінійно залежать від швидкості потоку.

Послідовність імпульсів різниці частот з виходу змішувача 9 через масштабований перетворювач 10 прямує на аналоговий перетворювач 12 для перетворення частоти в аналоговий сигнал, який далі надходить на стрілковий індикатор витрати 13. Електромеханічний лічильник імпульсів 11 (шести розрядний) дозволяє контролювати кількість рідини.

Максимальна віддаленість приладу від трубопроводу – 150 м. Застосовують у трубопроводах діаметром від 0,1 до 1,4 м.

*Фазовий комплект витратомірний ИРКА* призначений для вимірювання об'ємної витрати і об'єму рідин, що протікають по напорних і самостічних, повністю заповнених за перерізом рідиною трубопроводах діаметром від 50 до 1200 мм, а також вимірювання часу знаходження витратомірного комплексу у роботоздатному стані (час наробки). Комплекс може застосовуватись для контролю і керування технологічними процесами, в тому числі для комерційного обліку рідини на промислових об'єктах і об'єктах комунального господарства. У якості вимірювального середовища може бути будь яка однофазна чи багатфазна рідина (вода, стоки, кислота) з температурою від 1 до 150 °С і тиском до 2,4 МПа.

Комплекс складається з чотирьох перетворювачів ультразвукових ПУ, блока первинної обробки БПО, блока вимірювання БИ, блока цифрової індикації БЦИ і лінії зв'язку поміж ними. Максимально припустима довжина лінії зв'язку БПО з БИ – 600 м, а БИ з БЦИ – 1200 м. Перетворення витрати здійснюється у пропорційний вихідний сигнал постійного струму у діапазонах  $0 \div 5$  мА,  $0(4) \div 20$  мА,  $0 \div 5$  В. Має можливість підключення до ПЕОМ за допомогою стандартного інтерфейсу RS485. Забезпечує можливість вибору споживачем верхньої і нижньої границь діапазону вимірювання витрати ( $Q_{\text{МАКС}}$  і  $Q_{\text{МИН}}$ ) при співвідношенні  $Q_{\text{МАКС}}/Q_{\text{МИН}}$  не більше 50.

Межа відносної припустимої похибки вимірювання витрати і об'єму рідини складає  $\pm 1,5\%$ , а абсолютної похибки при вимірюванні часу наробки  $\pm 10$  с за добу.

Принцип дії комплексу побудований на кореляційній дискримінації часу проходження випадковими, наприклад, турбулентними флуктуаціями контрольної відстані  $L$  поміж двома ультразвуковими перетворювачами, що складаються з двох діаметрально протилежних пар: випромінювач-приймач. Час переміщення рідини вздовж трубопроводу на відстань  $L$  – це контрольний час  $\Delta t$  (час заміщення) і є мірою витрати потоку рідини у трубопроводі. Функціональна схема комплексу наведена на рис. 2.52.

Датчики Д1 і Д2 (рис. 2.52), що розташовані на відстані  $L$  один від одного і збуджуються генератором БПО, випромінюють ультразвукові коливання. Ці коливання проходять крізь потік рідини та викликають електричні коливання відповідно на приймачах Д3 і Д4. Внаслідок взаємодії ультразвукових коливань з неоднорідностями потоку, обумовлених, наприклад, турбулентністю цього потоку, електричні коливання на кожному п'єзоприймачі будуть модульованими по фазі. При цьому, різниця фаз  $\Delta\phi$  прямо пропорційна часу транспортного запізнення:  $\Delta\phi = 2\pi\Delta t/T = 2\pi f\Delta t$  ( $T$  – період,  $f$  – частота коливань). Таким чином кожна пара п'єзовипромінювач – п'єзоприймач утворюють ультразвуковий перетворювач флуктуацій неоднорідностей потоку у флуктуацію фази електричних коливань. Сигнали  $S1$  і  $S2$  з приймачів Д3 і Д4 підсилюються у підсилювачі, після чого надходять на входи фазового детектора. Фаза сигналів  $S1$  і  $S2$  порівнюється з фазою опорних імпульсів  $U_{оп}$ , внаслідок чого флуктуації фази в обох каналах перетворюються у флуктуації напруги  $F1$  і  $F2$  на виходах цих каналів. Отримані напруги у формувачі БПО підсилюються, після чого по лінії зв'язку передаються у БИ.

У БИ сигнали  $F1$  і  $F2$  подаються на входи корелятора, де проводиться їх кореляційна обробка, внаслідок якої визначається час запізнення  $\Delta t$  (ВТЗ).

Схема корелятора побудована таким чином, що кореляційна обробка сигналів проходить безперервно, а отримання при обробці значення  $\Delta t$  передається з корелятора у процесор БЦИ один раз за секунду. Процесор БЦИ, використовуючи збережені у енергонезалежній пам'яті параметри витратомірного вузла, обчислює значення витрати і об'єму рідини, часу наробки. Для обчислення часу наробки і об'єму процесором використовуються опорні імпульси, що фор-



(год) чи контрольного часу (мкс). Отримана інформація при натисканні кнопок “об’єм” і “наробка” на передній панелі БЦИ відбивається на дев’ятирозрядному цифровому індикаторі. Для виклику інформації про  $\Delta t$  потрібне одночасне натискання кнопок “об’єм” і “наробка”.

Процесор БЦИ формує дані для цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), який служить для формування одного з чотирьох стандартних аналогових вихідних сигналів. Індикація стану ПУ і сигнальних трас відбувається за допомогою двох світлодіодів, розташованих на лицьовій панелі БЦИ. Можлива робота і без БЦИ. При цьому запити про значення параметрів, що вимірюються, надходять до БИ по мережі RS - 485 від ПЕОМ.

При встановленні врізних датчиків ПУ необхідно мати прямолінійні ділянки трубопроводу не менше  $10D_y$  до першої пари датчиків і не менше  $5D_y$  – після другої пари датчиків. Припустимий монтаж ПУ як на горизонтальних так і вертикальних ділянках трубопроводів. При цьому рівень пульсації швидкості потоку рідини у трубопроводі повинен складати не більше 20 %.

*Витратоміри – рівнеміри з інтегратором акустичні “ЕХО - Р”* призначені для вимірювання об’ємної витрати (кількості) рідини, у тому числі стічних вод, у відкритих каналах шириною до 4 м і глибиною до 3 м, обладнаних стандартними вимірювальними лотками (Вентурі чи Паршалья), у безнапорних трубопроводах діаметром від 0,1 до 3 м. До складу витратоміру входять: перетворювач первинний акустичний – АП, що встановлюється у вимірювальному колодці над трубопроводом або над каналом на відкритому повітрі; перетворювач передавальний вимірювальний – ППИ; механічний лічильник об’єму рідини і лічильник часу наробки (на вимогу замовника). Принцип дії будується на акустичній локації рівня рідини, що тече у водоводі, звуковими імпульсами, які проходять крізь газове середовище, що знаходиться над контрольованою рідиною, і явищі відбиття цих імпульсів від границі розподілу “газ – контрольоване середовище”. Мірою рівня є час розповсюдження звукових коливань від джерела випромінювання до контрольованої границі розподілу середовищ і назад до приймача. В подальшому здійснюється перерахування значення миттєвого рівня у величину об’ємної витрати і перетворення її в уніфікований сигнал постійного струму  $0 \div 5$  мА. На рис. 2.53 наведені ескізні схеми монтажу первинних перетворювачів при вимірюванні витрати у трубопроводах і відкритих каналах.



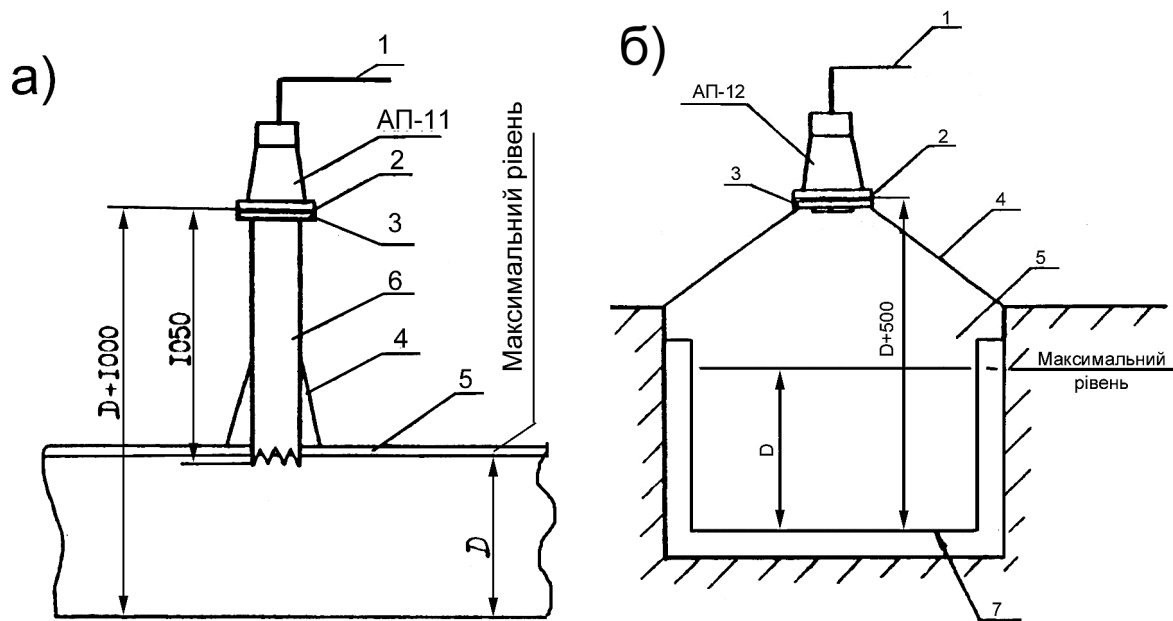


Рис. 2.53. Загальні схеми монтажу перетворювачів АП-11 у трубі (а) і АП-12 у відкритому каналі (б):  $D$  – діапазон вимірювання рівня, 1 – кабель, 2 – прокладка, 3 – фланець, 4 – кріплення, 5 – водовід, 6 – звуковід ( $100 \div 130$  мм), 7 – дно (кромка) звукувального пристрою (лоток).

Довжина лінії зв'язку між АП і ППИ не більше  $100$  м. Межа припустимої основної відносної похибки становить: у діапазоні витрати  $10 \div 100$  % та у діапазоні рівня  $20 \div 100$  % - ( $\pm$ ) 3 %.

**Електромагнітні витратоміри** основані на взаємодії рідини, що рухається, з магнітним полем. Ця взаємодія підпорядкована закону електромагнітної індукції, у відповідності з яким при протіканні електропровідного середовища (вода – середовище з іонною провідністю – провідник другого роду) у магнітному полі, у ньому індукується електрорушійна сила (ЕДС)  $E$ , що пропорційна середній швидкості середовища  $V$  і індукції  $B$  магнітного поля і визначається шляхом вимірювання різниці потенціалів двох електродів, занурених у рідину.

$$E = \kappa B V l, \quad (2.35)$$

де  $l = D_y$  – відстань між електродами;  $\kappa$  – безрозмірний коефіцієнт, що визначається геометричними і конструктивними параметрами первинного перетворювача (датчика).

Оскільки площа  $S$  перерізу каналу і індукція  $B$  магнітного поля датчика величини фіксовані, значення індукованої ЕДС буде пропорційно об'ємній витраті  $Q$  потоку середовища, що вимірюється.

$$E = CQ, \quad (2.36)$$

де  $C = 4kB/\pi D_y^2$  - постійний коефіцієнт перетворення витрати, який встановлюється під час градування перетворювача (датчика).

Застосовують електромагнітні витратоміри загалом лише для рідини з електричною провідністю не менше  $10^{-3} \div 10^{-5}$  См/м і не більше 10 См/м. Електромагнітні витратоміри мають цілу низку переваг. Насамперед вони практично безінерційні, що дуже важливо для вимірювання хутко змінюючихся витрат при використанні їх у складі систем автоматичного регулювання. На результат вимірювань не впливає наявність завислих частин у рідині і пазирів газу. Показання витратоміру не залежать від властивостей контрольованої рідини (в'язкість, густина) і характеру потоку (ламінарий, турбулентний). При відповідному підборі матеріалу із застосуванням антикорозійного і іншого покриття електромагнітні витратоміри можна застосовувати для вимірювання витрати агресивних рідин, а також рідин і паст з абразивними властивостями. Внаслідок лінійної залежності наведеної ЕДС від витрати шкала приладу лінійна. Цим витратомірам притаманний достатньо широкий діапазон вимірювання витрати. Перетворювачі електромагнітних витратомірів не мають елементів, що рухаються, та звужень.

До недоліків електромагнітних витратомірів слід віднести необхідність компенсації перешкод, які виникають при змінному полі у колі електродів, а також обставину неможливості вимірювання витрат газів і таких рідин, як мастила, бензин та інші нафтопродукти, внаслідок малої електропровідності. Неприпустимо застосовувати електромагнітні витратоміри поблизу електросилових пристроїв, які утворюють сильні електромагнітні поля, а також для потоків рідини з завислими феромагнітним частинками.

Випускаються витратоміри з електромагнітним перетворювачем витрати і з електромагнітним перетворювачем швидкості потоку. Процеси, що протікають в них мають однакову фізичну основу.

*Перетворювачі витрати вимірювальні електромагнітні ИР-61М* складаються з первинного вимірювального перетворювача ПР і передавального вимірювального перетворювача ИУ. Перетворювачі з ИУ-61М1 призначені для перетворення в уніфікований (0 – 5 чи 4 – 20 мА) вихідний сигнал об'ємної витрати вибухобезпечних рідких середовищ з питомою електричною провідністю від  $10^{-3}$  до 10 См/м. Перетворювачі з ИУ-61М2 використовуються у складі теплолічиль-

ника ТС-35 і служать для визначення сумарного об'єму теплоносія у комплекті з інтегратором И-1 і формування інформаційного сигналу постійного струму до блоку обробки сигналів для теплотільників БОСМ2.

Прилади ИР-61М1 у залежності від типу первинного перетворювача забезпечують вимірювання максимальної витрати у діапазоні  $(0,8 \div 2500) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  у трубопроводах діаметром від 10 до 300 мм при лінійній швидкості руху рідини від 1,25 до 10 м/с з температурою у межах  $(-30) \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Клас точності 1.

Первинний перетворювач складається з двох основних вузлів – вузла труби і вузла електромагніта. Вузол труби ПР усіх типорозмірів має принципово однакову конструкцію. Труба виготовлена з немагнітної нержавіючої сталі, а її внутрішня поверхня покрита ізоляційним матеріалом (поліуретан або фторопласт).

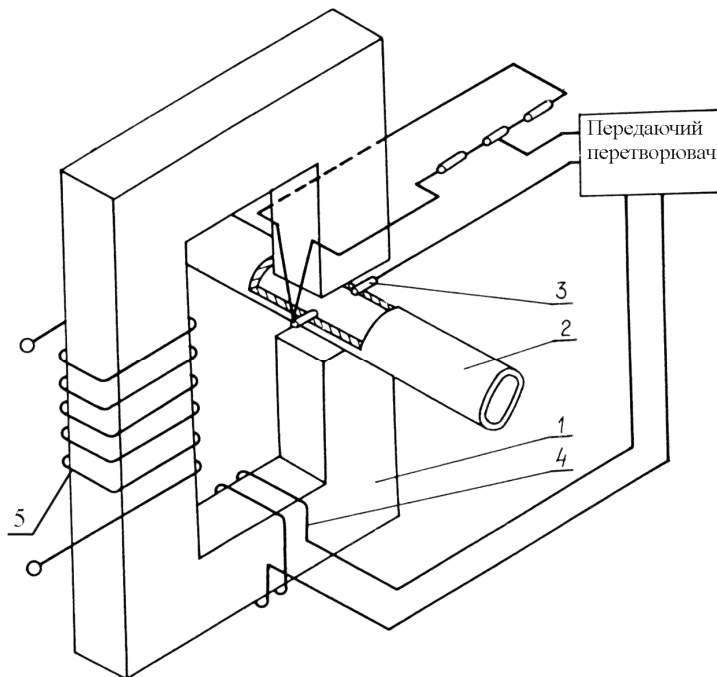


Рис.2.54. Схема устрою первинного перетворювача ПР.

У середньому перерізі труби 2 діаметрально протилежно один одному у стінку вставлені два електроди 3 (див. рис. 2.54). Електроди ізольовані від стінки труби. По обидва боки труби розміщується електромагніт 1 так, щоб електроди знаходились усередині зони магнітного поля. Обмотка збудження 5 електромагніта містить дві однакові котушки, які розташовані по обидва боки від труби ПР. Обмотки встановлюються на трубі на ізоляційних прокладках. Магнітопровід електромагніта зібраний з пластин електротехнічної сталі. Обмотка опорної наружи 4 намотана на котушці збудження електромагніта (ПР-10, ПР-15, ПР-25) або прикріплена до труби первинного перетворювача у зоні магнітного поля. Кінці двох проводів, що йдуть від одного електрода, утворюють петлю, після чого припаюються до крайніх контактів змінного резистора. Вузол труби з елект-

труби ПР. Обмотки встановлюються на трубі на ізоляційних прокладках. Магнітопровід електромагніта зібраний з пластин електротехнічної сталі. Обмотка опорної наружи 4 намотана на котушці збудження електромагніта (ПР-10, ПР-15, ПР-25) або прикріплена до труби первинного перетворювача у зоні магнітного поля. Кінці двох проводів, що йдуть від одного електрода, утворюють петлю, після чого припаюються до крайніх контактів змінного резистора. Вузол труби з елект-

ромагнітом розміщується у кожусі, що відлитий із сплаву алюмінію. Установка ПР на трубопроводі здійснюється за допомогою фланців.

Електрорушійна сила від первинного перетворювача містить, окрім корисної складової напругу завад, трансформаторну і ємкісну ЕДС. Трансформаторна завада наводиться магнітним полем ПР у витку, що складається з електродів, вимірювального середовища, з'єднувальних проводів від електродів до навантаження і навантаження як у вторинному витку трансформатора. Трансформаторна завада зміщена по фазі відносно ЕДС корисного сигналу на  $90^\circ$ . Компенсація трансформаторної завади здійснюється на самому первинному перетворювачі (див. рис. 2.55). Для цього виводи від одного з електродів В1 монтуються двома провідниками, розташованими симетрично відносно перерізу електродів і замикаються на низькоомне резисторне коло R1, R2, R3. Напруга сигналу, що отримана від первинного перетворювача знімається із середнього виводу змінного резистора R2 і другого електрода В2. При настроюванні ПР (вимірювальне середовище нерухливе) регулюванням резистора R2 обирається точка, потенціал якої дорівнює потенціалу електрода.

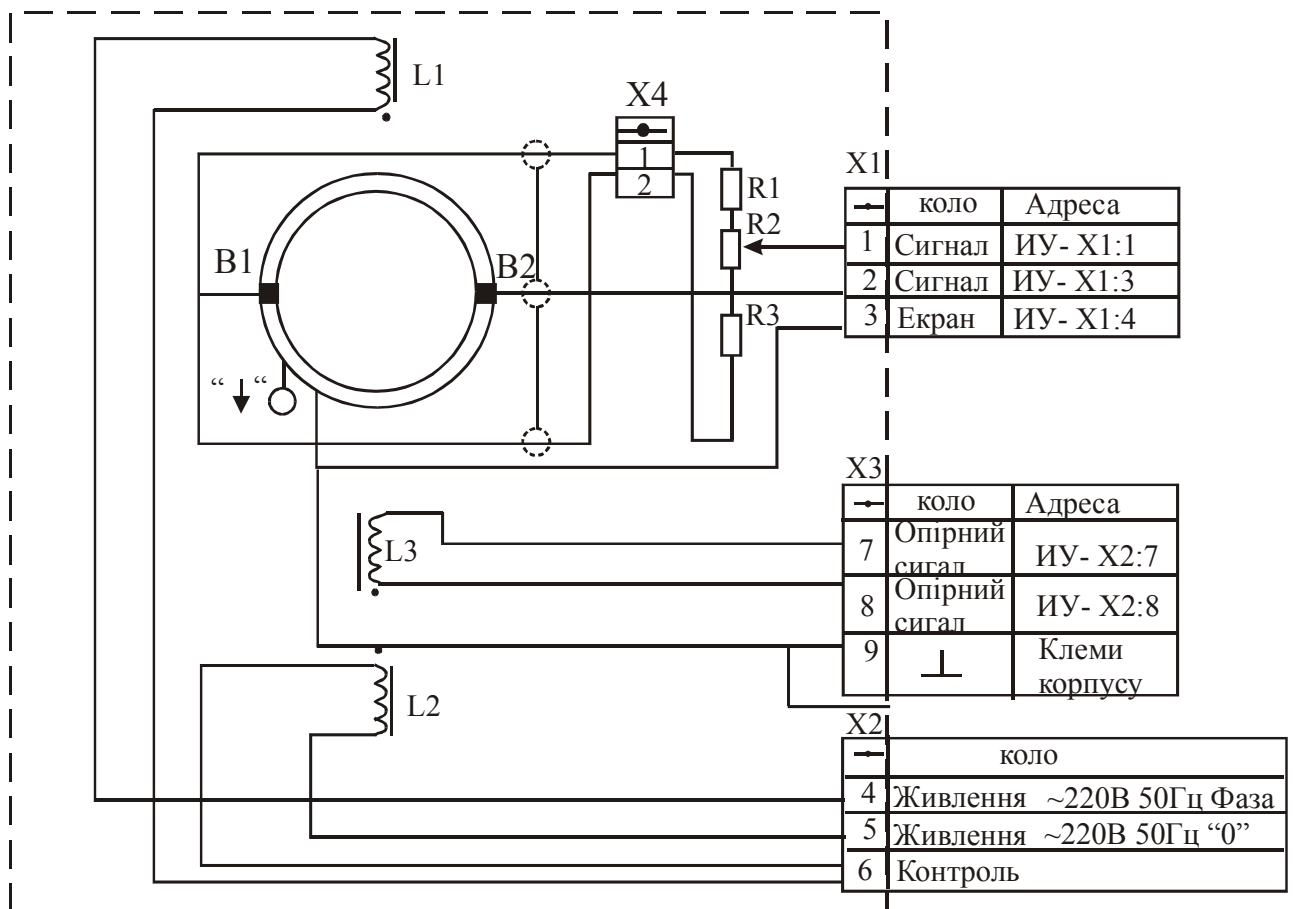


Рис.2.55. Схема електрична принципова первинного перетворювача ПР.

Напруга ємкісної завади утворюється за рахунок паразитного ємкісного зв'язку поміж обмоткою збудження і електродами з монтажними проводами (сигнальним колом). Зменшення цієї завади досягається за рахунок екранування всього сигнального кола у ПР.

Фаза ємкісної завади приблизно співпадає за фазою ЕДС корисного сигналу чи повернена на  $180^\circ$ . Сигнал від ПР подається на сигнальний вхід передавального перетворювача по екранованому кабелю.

Для виключення небажаного впливу флуктуацій напруги живлення (від  $187$  до  $242$  В) на показання приладу, у ПР встановлена додаткова (опірна) обмотка L3. Напруга в опірній обмотці індукується аналогічно вторинній обмотці трансформатора, у якому первинними обмотками служать обмотки збудження L1 і L2. Величина напруги в опірній обмотці дорівнює  $2,5$  В, а фаза цієї напруги зсунена відносно корисного сигналу на  $90^\circ$ . Опірна напруга передається по двожильному проводу на вхід опірного сигналу перетворювача ІУ.

Передавальний перетворювач ІУ, структурна схема якого наведена на рис. 2.56, сприймає вхідний сигнал від ПР у вигляді змінної напруги. Двокаскадний підсилюючий пристрій ПП перетворювача ІУ підсилює цей сигнал симетричної напруги, перетворює його у несиметричний і заглушує синфазні завади, що виникають від поздовжніх струмів по вимірювальному середовищу чи трубопроводу. Вхідний опір ПП складає не менше  $100$  МОм. Живлення ПП здійснюється з виходу стабілізатора напруги СН двополярною напругою, яка додатково стабілізується параметричними стабілізаторами ПС. Сигнал з виходу ПП передається на вхід підсилювача різничного сигналу ПРС, який підсилює цю різницю вихідної напруги від ПП, а також напругу кола загального негативного зворотного зв'язку КЗНЗЗ (компенсаційна напруга) до необхідного для детектування рівня. Синхронний детектор СД з фільтром низьких частот ФНЧ і покажчиком Р1 далі здійснюють вимірювання вектора корисного сигналу. Синхронність детектору обумовлена тим, що є опірний сигнал від опірного каналу ОК, який викликає синхронну з ним зміну стану детектора і має таку саму частоту і фазу комутації, як і вхідний корисний сигнал. ФНЧ з підсилювачем постійного струму призначений для згладжування пульсацій детектованого корисного сигналу, осереднення завад і перетворення напруги корисного сигналу в уніфікований сигнал постійного струму. Живлення ФНЧ проводиться від СН, а для забезпечення двополярного уніфікованого вихідного

сигналу постійного струму підведена згладжена напруга з виходу СН.

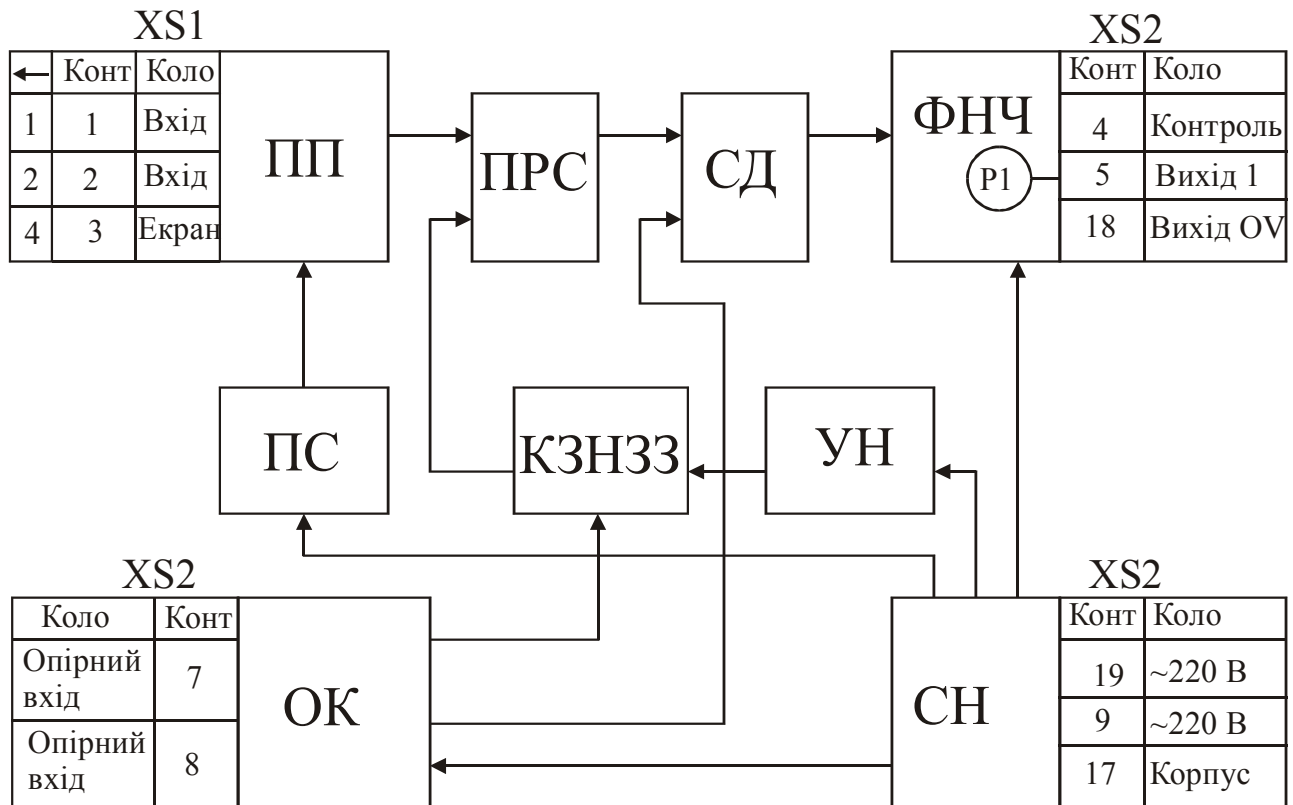


Рис. 2.56. Структурна схема передавального перетворювача ИУ.

Опірний канал ОК призначений для компенсації напруги збудження (живлення) ПР на точність перетворювача, а також для живлення кола загального зворотного зв'язку КЗНЗЗ (дроселя Хола) змінним струмом синфазним з корисним сигналом і формування імпульсів керування (комутації) для СД. Живлення ОК (підсилювача потужності) здійснюється двополярною нестабілізованою напругою від СН.

Коло КЗНЗЗ і установки нуля УН призначені для стабілізації коефіцієнту передачі вимірювального каналу ИУ до необхідного ступеня, для компенсації зміни магнітного поля у ПР і встановлення нуля. Стабілізатор СН забезпечує стабілізованою двополярною напругою живлення інші блоки ИУ.

Перетворювач ИУ можна встановлювати у шафі чи на щиті, а перетворювач ПР може бути встановлений на вертикальній, горизонтальній або нахилій ділянці трубопроводу, за умов, що увесь об'єм труби перетворювача ПР буде заповнений потоком рідини. При цьому необхідно забезпечити ділянку прямолінійної труби  $5D_y$  перед і  $3D_y$  після ПР. До тогож, внутрішній діаметр прямоліній-

них ділянок трубопроводу повинен по можливості дорівнювати (чи дещо більше) внутрішнього діаметру встановленого ПР. Максимальна відстань між ПР і ІУ складає не більше 100 м.

Перетворювач витрати електромагнітний ПРЭМ-1 призначений для вимірювання об'ємної витрати у напірних трубопроводах вибухобезпечних середовищ (рідина, розчин, пульпи і т. ін), фізико-хімічні властивості яких можуть змінюватись у широких межах, і перетворення її в уніфікований сигнал. Перетворювач складається з первинного, що врізається у трубопровід, перетворювача витрати ПР, електронного вимірювального блоку БИ, і кабельної лінії зв'язку поміж ними, довжина якої не повинна перевищувати 50 м. За принципом дії та конструкцією перетворювач ПРЭМ-1 майже ідентичний вищенаведеному. Загальний вигляд первинного перетворювача наведено на рис. 2.57.

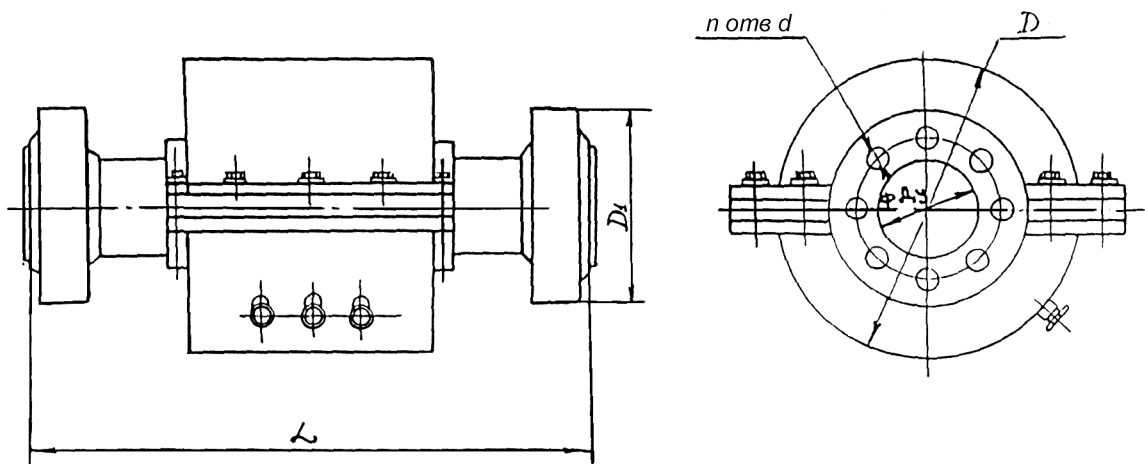


Рис. 2.57 Габаритні і установчі розміри первинного перетворювача ПР.

Діапазон вимірювання максимальної витрати приладів ПРЭМ-1 у залежності від швидкості рідини у трубопроводі і діаметра умовного проходу складає  $1,5 \div 250 \text{ м}^3/\text{год}$ . Вихідний сигнал ПРЭМ-1 – струмовий з діапазоном  $0 \div 5 \text{ мА}$ . Перетворювач дозволяє проводити вимірювання витрати потоку рідини у діапазоні зміни температур від 1 до 150 °С і тиску до 1,6 МПа. Загальні вимоги до монтажу перетворювача витрати аналогічні попередньому. Максимальна відстань при підключенні навантаження (міліамперметри, самопишучі прилади, лічильні пристрої) від блоку БИ не повинна перевищувати 1000 м. Межі припустимої відносної основні похибки перетворювачів  $\delta$  дорівнюють  $\pm 1,5\%$ .

**Вихрові витратоміри** останнім часом знайшли широке застосування завдяки відсутності рухливих елементів усередині трубопроводу. Принцип дії вихрових витратомірів оснований на ефекті Кармана. Цей ефект полягає в тому, що коли в потоці середовища поставити призму з гострими ребрами, наприклад трикутниківі, у перерізі, перпендикулярно до потоку, то на цих ребрах відбувається зрив потоку з утворенням вихрів, частота яких буде пропорційна швидкості потоку.

Основним елементом вихрового витратоміра (див. рис. 2.58а) є призма 1 з гострими ребрами, яка встановлюється у трубопроводі 2 у перерізі, перпендикулярному до напрямку потоку. При обтіканні потоком призми відбувається прискорення струменя, що призводить до підвищення швидкості і зниження статичного тиску. За призмою тиск поступово відновлюється і швидкість спадає. В ідеальному потоці без тертя перетворення потенційної енергії у кінетичну і навпаки відбувається без втрат і без вихроутворення. Насправді внаслідок втрати кінетичної енергії і впливу мертвої зони безпосередньо за призмою струмені під дією зростаючого тиску починають ухилятися в область мертвої зони і скручуватися у вихор 3, який відривається від призми та прагне рухатися у зворотному напрямку. Це явище має місце як у верхній, так і у нижній точці призми. Проте, завдяки тому, що розвиток вихра з одного боку перешкоджає такому ж розвитку з іншого боку, то утворення вихорів з того і іншого боку призми відбувається по чергово. У підсумку існують дві вихрові стежки з шаховим розташуванням вихорів у них. Частота  $f$  зриву вихорів (пульсацій) визначається рівнянням:

$$f = (v - u) / l, \quad (2.37)$$

де  $v$  – швидкість потоку у зоні вихроутворення;  $u$  – швидкість вихра, що спрямована протилежно швидкості потоку;  $l$  – відстань поміж вихрами.

Періодичність виникнення і зриву вихорів (утворення пульсацій) при обтіканні потоком нерухомого тіла характеризується критерієм Струхана  $Sh$ .

$$Sh = fd / \nu, \quad (2.38)$$

де  $d$  – характерний розмір (наприклад діаметр циліндру, середній діаметр призми і т. ін.).



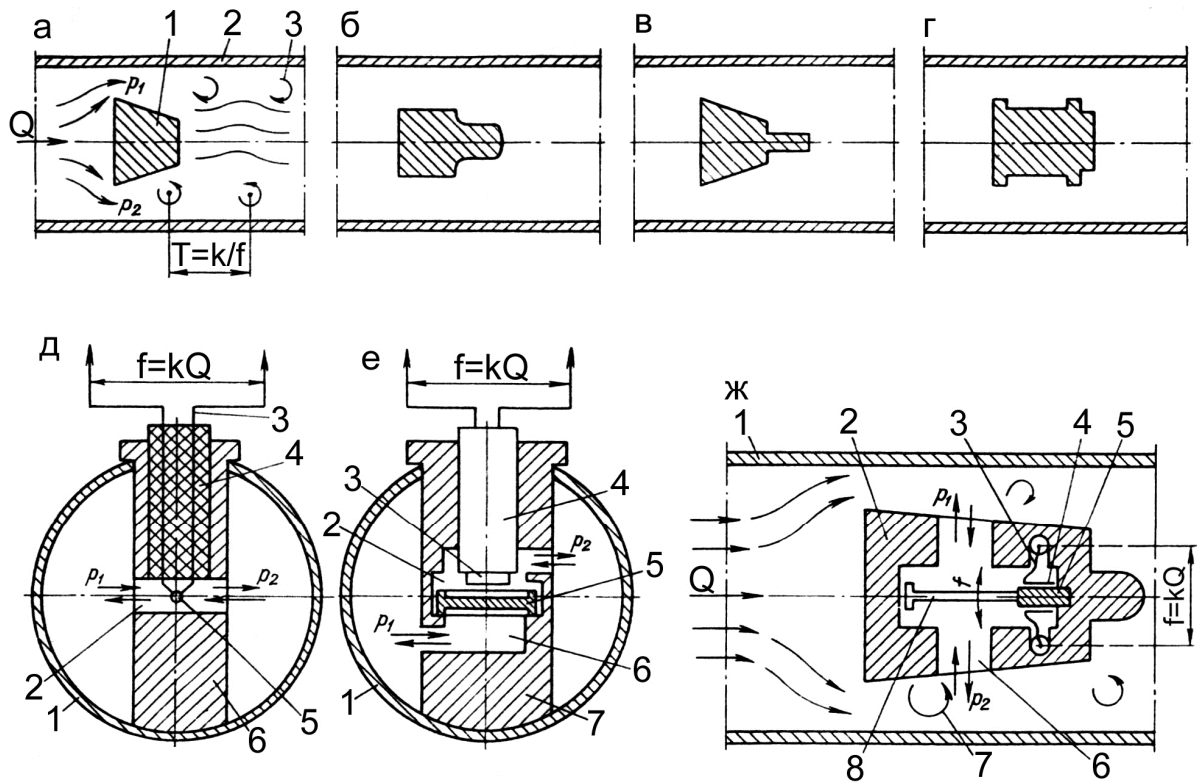


Рис. 2.58. Загальні схеми конструктивного оформлення первинних перетворювачів вихрових витратомірів.

Розв'язуючи сумісно рівняння (2.37) і (2.38) відносно  $Sh$  отримаємо:

$$Sh = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{d}{l} \quad (2.39)$$

З урахуванням рівняння для об'ємної витрати  $Q = vs$  (де  $s$  – найменший переріз потоку навколо призми) та формули (2.39) частота  $f$  утворення вихорів  $3$  за рахунок зриву потоку на гострих ребрах призми буде пропорційна витраті  $Q$ , тобто

$$f = \frac{Sh}{sd} Q = kQ, \quad (2.40)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності вихрового витратоміра, визначається при градуванні індивідуально для кожного приладу.

Вихрі  $3$ , що проходять у зоні призми  $1$ , утворюють поле змінного пульсуючого тиску, пропорційного частоті  $f$ , що дозволяє вимірювати їх частоту. Переріз призм може бути найрізноманітніший, деякі з котрих наведені на рис. 2.58 б, в, г. При цьому картина вихрів за призмою залежить від виду перерізу призми. Однак для усіх видів призм характерне утворення пульсуючих тисків  $P_1$  і  $P_2$  (рис. 2.58 а),

частота яких може бути достатньо легко перетворена у електричні вихідні частотні сигнали, за допомогою різних сучасних типів перетворювачів (терморезисторні, п'єзоелектричні, індукційні та інші типи перетворювачів). Будови перетворювачів різниці пульсуючих тисків вихрових витратомірів у електричні частотні сигнали можуть бути найрізноманітнішими, деякі з них наведені на рис. 2.58 д, е, ж.

На рис. 2.58 д наведений устрій терморезисторного перетворювача різниці пульсуючих тисків. Терморезистор 5 розміщується у каналі 2 призми 6, яка розташована у трубопроводі 1. Виводи 3 терморезистора герметизовані в електричній втулці 4. При русі потоку рідини чи газу по трубопроводу 1 на гранях призми 6 утворюються вихрі, які збуджують у каналі 2 пульсуючу витрату під впливом різниці  $\Delta P$  пульсуючих тисків. Пульсуючий потік у каналі 2 призводить до пропорційної зміни опору підігрітого вище температури вимірюваного потоку терморезистору 5 і відповідну зміну частоти вихідного струму перетворювача згідно з рівнянням (2.40).

Будова електромагнітного (індукційного) перетворювача вихрових витратомірів наведена на рис. 2.58 е. Згідно з рис. 2.58 е перетворювач містить призму 7 з приймальними камерами 2 і 6, яка встановлена у трубопроводі 1, незакріплену мембрану 5 з феромагнітного сплаву і індукційну катушку 4 з магнітним сердечником 3. Під впливом різниці пульсуючих тисків  $\Delta P$  у камерах 2 і 6 легка незакріплена мембрана 5 переміщується по вертикалі з частотою вихрів  $f$ , що призводить до збудження у катушці 4 змінної напруги частотою  $f$ , яка і буде пропорційна об'ємній витраті у відповідності з формулою (2.40).

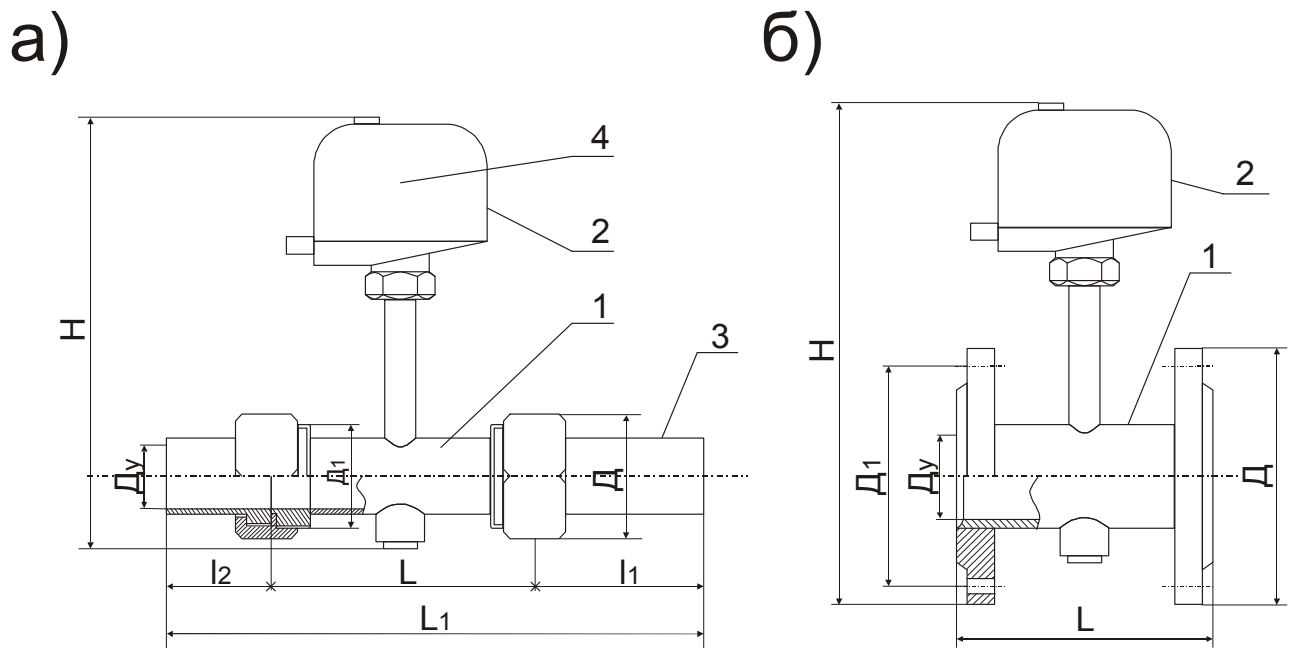
Загальна конструкція п'єзоелектричного перетворювача представлена на рис. 2.58 ж. Перетворювач містить призму 2, що встановлена у трубопроводі 1, у якій розташовані приймальні камери 6 прапорця 8 і п'єзоелектричний перетворювач 5. Для зняття електричного сигналу по обидва боки п'єзоелектричного перетворювача закріплені дві обкладинки 4 з електричними виводами 3, які герметизовані у тілі призми 2. Під впливом вихрів 7 у приймальних камерах 6 виникає різниця пульсуючих тисків  $\Delta P$ , яка збуджує коливання прапорця 8 з частотою, пропорційною частоті вихрів  $f$ . Оскільки прапорець 8 жорстко закріплений на п'єзоелектричному перетворювачі 5, коливання прапорця будуть деформувати п'єзоелемент і на його обкладинках 4 виникне змінна напруга з частотою  $f$ , яка також буде пропорційна витраті потоку згідно рівняння (2.40).

Основними перевагами вихрових витратомірів є відсутність будь-яких рухливих елементів усередині трубопроводу, можливість вимірювання витрати потоків рідини, пари і газу, а також лінійність шкали у великому діапазоні вимірювання. Найчастіше застосовуються для вимірювання витрати потоків рідини. До недоліків цих витратомірів слід віднести необхідність їх індивідуальної повірки.

*Вихровий електромагнітний перетворювач лічильника рідини* ВЭПС призначений для застосування у якості первинного перетворювача при вимірюванні витрати і (чи) об'єму рідини у діапазоні від 0,3 до 1600 м<sup>3</sup>/год з питомою електричною провідністю понад  $5 \cdot 10^{-4}$  См/м, тиском до 1,6 МПа і температурою до 150 °С у наповнених напорних трубопроводах як для технологічних, так і обліково-розрахункових цілей. Перетворювач ВЭПС виготовляється у трьох модифікаціях: ВЭПС-NN-ПБ-1 – перетворює значення витрати рідини у частоту електричного сигналу у відповідності з індивідуальною градуовальною характеристикою і має зовнішнє джерело живлення напругою постійного струму 8 – 25 В; ВЭПС-NN-ПБ-2 – перетворює значення витрати в імпульсний вихідний сигнал з нормованою ціною імпульсу одиниці об'єму і має автономне джерело живлення від елементів напругою 2÷3,3 В; ВЭПС-NN-ПБ-3 – перетворює значення витрати рідини у струмовий вихідний сигнал  $0 \div 5$  чи  $4 \div 20$  мА і має зовнішнє джерело живлення напругою постійного струму  $23 \div 30$  В (індекс NN у позначенні встановлює діаметр умовного проходу  $D_v$ ).

До складу лічильника ВЭПС входять вихровий електромагнітний перетворювач ВЭП і підсилювач – формувач імпульсів УФИ, що розташований у коробці на стійці безпосередньо на ВЭП (див. рис. 2.59).

Принцип дії ВЭПС оснований на вимірюванні кількості періодів частоти вихрових коливань, що виникають при обтіканні потоком нерухливої призми (турбулізатора), встановленій по діаметру трубопроводу. Вихрі, що прямують у потоці пропорційно швидкості руху рідини, реєструються електродом перетворювача. Останній знаходиться у колі постійного магніту, який розташований зовні трубопроводу. Підсумковий об'єм рідини, що пройшов крізь трубопровід, буде пропорційним кількості періодів частоти  $T$ , зареєстрованому протягом контролюемого часу. Частота наведеної ЕДС, пропорційна об'єму витрати рідини, знімається електродом ВЭП і перетворюється УФИ у вихідний електричний сигнал.



В)

Ду, мм	L, мм	H, мм	Д, мм	Д1, мм	L1, мм	l1, мм	l2, мм
20	128	262	38*	1G	268	100	40
25	132	268	50*	1 1/4 G	307	125	50
32	200	315	60*	1 3/4 G	420	150	70
40	200	320	65*	2G	500	200	100
50	200	350	160	125/4**	-	-	-
80	300	395	195	160/4**	-	-	-
100	300	410	215	180/8**	-	-	-
150	300	450	280	240/8**	-	-	-
200	300	480	335	295/12**	-	-	-
250	300	520	405	355/12**	-	-	-
300	300	570	460	410/12**	-	-	-

\* - розмір "під ключ";

\*\*- діаметр, мм / кількість отворів у фланці.

Рис. 2.59. Загальний вигляд муфтового (а) і фланцевого (б) виконань та габаритно – монтажні розміри (в) лічильника типу ВЭПС: 1–ВЭП; 2 – УФИ; 3 – трубопровід; 4 – шильдик.

ВЭП представляє собою відрізок трубопроводу (див. рис. 2.59) з нержавіючої немагнітної сталі типу 12Х18Н10Т (для  $D_y = 20 \div 100$  мм) або із сталі Ст.3, Ст.20 з вузлами кріплення (фланцеве з'єднання для  $D_y = 50 \div 300$  мм і муфтове – для  $D_y = 20 \div 40$  мм). Усередині труби встановлені: турбулізатор з нержавіючої сталі, генератор вихрів і сигнальний електрод у вигляді стержня з нержавіючої сталі, з якого і знімається змінна ЕДС часто-

ти вихроутворення. На зовнішній стороні стінки труби розташований контейнер для розміщення у ньому постійного магніту і стійка-теплоізолятор, на якій кріпиться коробка з УФІ. На коробці УФІ розташований роз'єм для зовнішніх приєднань типу 2РМ14 і приладний шильдик з позначенням моделі і заводського номера.

ВЭПС може бути змонтовано на горизонтальній і вертикальній ділянці трубопроводу, але рідина повинна заповнювати увесь переріз трубопроводу. При цьому стійка з УФІ має бути у горизонтальній площині або під кутом  $45^{\circ}$  (тільки для ВЭПС з  $D_V = 20 \div 150$  мм). У місці монтажу мають бути прямолінійні ділянки трубопроводу довжиною понад  $5D_V$  до і  $2D_V$  після ВЭПС. За стійкістю до механічних впливів, ВЭПС має вібростійке і вітроміцне виконання. Припустимий вплив зовнішнього магнітного поля напруженістю до  $400$  А/м.

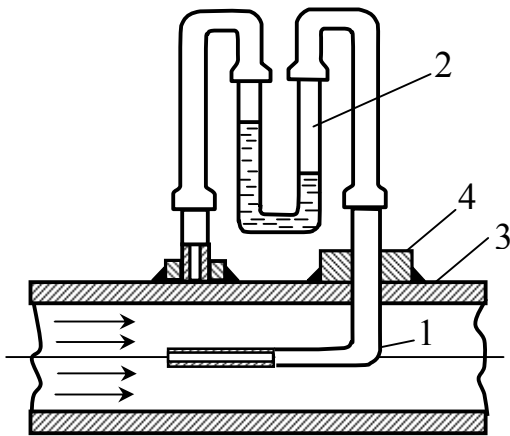


Рис. 2.60 Схема вимірювання динамічного напору: 1 – напорна труба; 2 – динамометр; 3 – трубопровід; 4 – бобишка з ущільненням.

Вимірювання витрати характеризується залежністю динамічного тиску (напору) від швидкості потоку. Динамічний напір, а отже і швидкість, вимірюється напірними трубками у комплекті з диференційним манометром. У відповідності зі схемою (див. рис. 2.60) у праве коліно дифманометра 2 надходить повний тиск  $P_{\Pi}$ , а у ліве – статичний тиск  $P_C$ . При цьому, різниця тисків визначає динамічний тиск:

$$P_D = P_{\Pi} - P_C = (\rho_l - \rho)gh, \quad (2.41)$$

де  $\rho_l$  – густина рідини у дифманометрі;  $h$  – різниця рівня рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\rho$  – густина потоку речовини у трубопроводі.

Згідно рівняння Бернуллі різниця  $P_D$  дорівнює:

**Витратоміри динамічного тиску** застосовуються переважно у лабораторних умовах, у комплекті сучасних газоаналізаторів (Testo 350, MSP) для визначення об'єму шкідливих викидів з димовими газами, для вимірювання витрати рідин і газів у трубопроводах великих діаметрів і при великих швидкостях потоку, а також у трубопроводах з не круглим перерізом. Вимірювання витрати характеризується залежністю динамічного тиску (напору) від швидкості потоку. Динамічний напір, а отже і швидкість, вимірюється напірними трубками у комплекті з диференційним манометром. У відповідності зі схемою (див. рис. 2.60) у праве коліно дифманометра 2 надходить повний тиск  $P_{\Pi}$ , а у ліве – статичний тиск  $P_C$ . При цьому, різниця тисків визначає динамічний тиск:

$$P_D = v^2 \rho / 2 \quad (2.42)$$

Розв'язуючи рівняння (2.41) і (2.42) відносно швидкості потоку  $v$  отримаємо наступну формулу:

$$v = \sqrt{\frac{2g}{\rho} h(\rho_1 - \rho)} \quad (2.43)$$

При цьому величина об'ємної витрати, як відомо, визначається рівнянням:

$$Q = vs, \quad (2.44)$$

де  $s$  – переріз трубопроводу.

Серед усіх типів напірних пристроїв найбільш розповсюджена диференційна трубка Піто, яка уявляє собою подвійну трубку. Вона складається з двох трубок, близьких до Г-подібної форми, які мають різні діаметри і одна з них розташована концентрично усередені другої. Відкритий кінець центральної трубки спрямований назустріч вимірюваної швидкості і вимірює повний тиск. Трубка, що зовні центральної (більшого діаметру) має на своїй циліндричній поверхні кілька отворів, вісі яких спрямовані радіально до вісі трубки, а отже перпендикулярно спрямовані до напрямку потоку. Крізь ці отвори у кільцевий простір поміж трубками надходить статичний тиск. Перепад тиску  $\Delta P$  у такій диференційній трубці Піто дорівнює динамічному тиску  $P_D$ , тобто швидкість  $v$ , що відповідає цьому перепаду, визначається рівнянням:

$$v = k_T \sqrt{2\Delta P / \rho}, \quad (2.45)$$

де  $k_T$  – коефіцієнт трубки, що встановлюється експериментально і дорівнює одиниці за умови  $Re > 700$ .

У разі підвищеного тиску газу необхідно враховувати коефіцієнт стискання  $k_C$ , що здійснюється помноженням попередньої формули на цей коефіцієнт. Для визначення витрати газу у трубопроводі за допомогою диференційної трубки Піто слід користуватися рівнянням:

$$Q = 0,785 k_V k_C k_T D^2 \sqrt{2\Delta P / \rho}, \quad (2.46)$$

де  $k_V = v_C / v_{МАКС}$  – відношення середньої швидкості по перерізу трубопроводу до швидкості у місці установки трубки по осі трубопроводу;  $D$  – діаметр трубопроводу.

**Лічильники теплової енергії** (тепло лічильники) призначені для контролю і обліку теплової енергії, що споживається чи виробляється теплоенергетичними об'єктами і установками, які використовують у якості теплоносія воду або пар (насичений, перегрітий). Кожний теплотлічильник становить собою комплекс, що містить витратоміри для вимірювання об'ємної витрати теплоносія, перетворювач тиску і теплообчислювач з програмним забезпеченням.

*Схеми тепло- і водопостачання* можуть бути закритими, відкритими і різними за цільовим призначенням (системи опалення, ГВП і холодного водопостачання). На рис. 2.61 наведені найбільш розповсюджені варіанти схем тепло- і водопостачання з зображенням необхідних місць встановлення тих чи інших перетворювачів для вимірювання витрати і температури. Різноманітність варіантів, що зображені на рис. 2.61 природно вимагає і відповідний склад теплотлічильника – кількість витратомірів, термоперетворювачів і перетворювачів тиску (у системах споживання пари).

*Лічильник теплової енергії “Січ”* призначений для вимірювання і комерційного обліку теплової енергії у відкритих і закритих системах теплопостачання і ГВП, а також для використання у автоматизованих системах обліку, контролю і регулювання теплової енергії. Основні технічні характеристики теплотлічильника “Січ” представлені у табл. 2.5.

Теплотлічильнику притаманні наступні особливості: багатоканальність (5 каналів вимірювання витрати і 5 каналів вимірювання температури), що дозволяє одночасно вести облік теплової енергії на опалення; ГВП та витрати холодної води; можливість на одному вимірювально-обчислювальному блоці (ВОБ) здійснювати облік на двох уводах системи опалення; виклик на табло ВОБ середньодобових та середньодобових значень витрат і температур за останні 62-і доби без додаткових пристроїв (принтер, ЕОМ); автономне живлення від умонтованої акумуляторної батареї з ресурсом на 60 годин безперервної роботи; наявність інтерфейсів RS232 та RS485 для зв'язку із зовнішніми пристроями і об'єднання тепло лічильників у мережу.

Теплотлічильник вимірює, обчислює, фіксує у внутрішній пам'яті і індицирує на табло ВОБ такі параметри (по кожній тепло-

вій системі): миттєва витрата ( $m^3/год$ ), об'єм теплоносія ( $m^3$ ), миттєву теплову потужність ( $kWt$ ), кількість теплової енергії ( $ГДж$ ), температура і різниця температур води ( $^{\circ}C$ ), час роботи приладу ( $год$ ), календар поточного часу (рік, місяць, число, година, хвилина). До того ж здійснює автоматичну само діагностику і автокалібровку, фіксує порушення заданих режимів роботи систем тепlopостачання і власних вузлів.

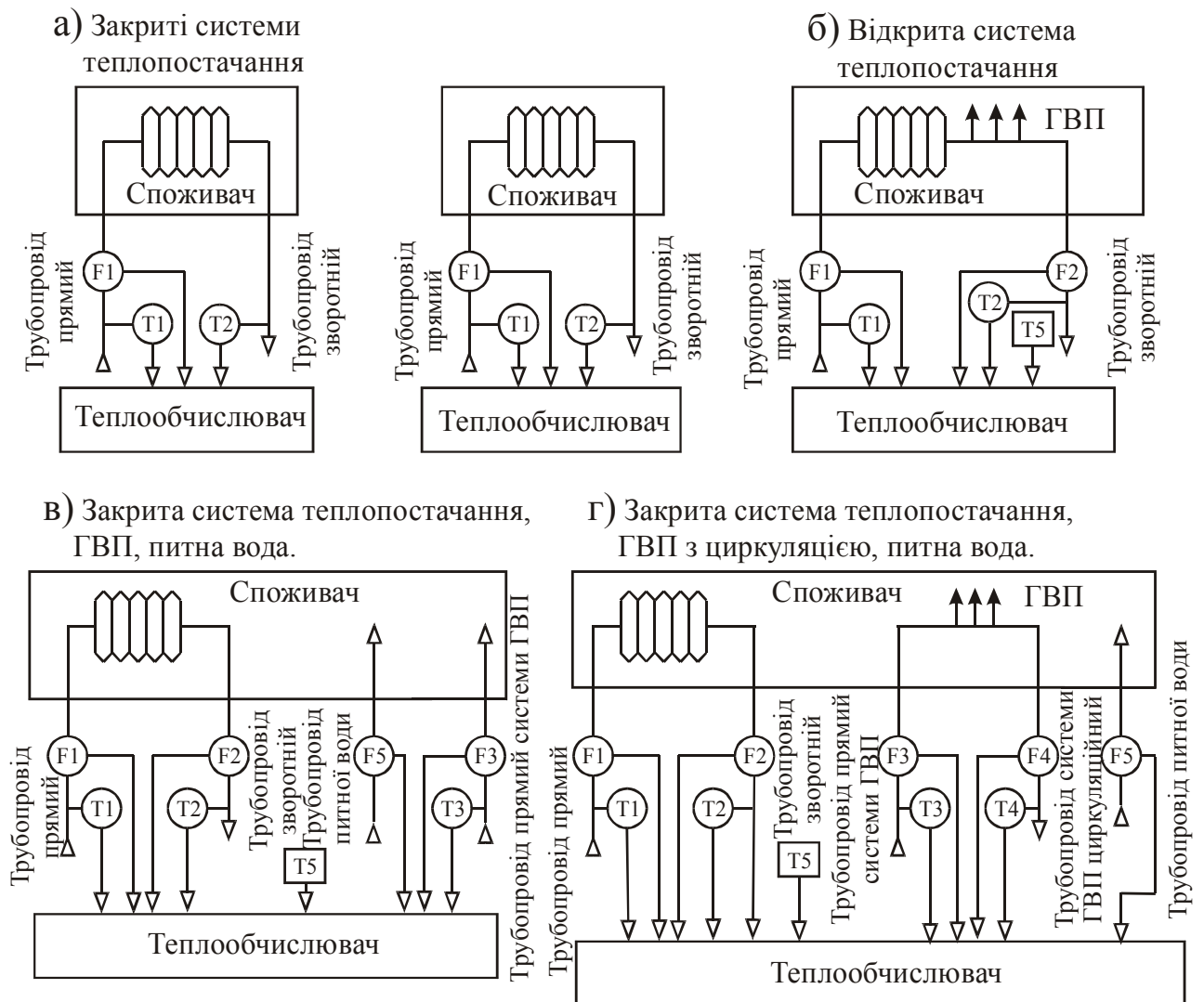


Рис. 2.61. Можливі варіанти організації обліку у схемах тепло- і водопостачання: F1, T1 – датчик витрати і температури теплоносія у прямому трубопроводі системи опалення; F2, T2 – теж саме, але у зворотному трубопроводі системи опалення; F3, T3 – датчик витрати і температури гарячої води у прямому трубопроводі системи ГВП; F4, T4 – теж саме, але у зворотному трубопроводі системи ГВП; F5 – витрата питної води; T5 – температура питної води.

Теплолічильник “Січ” може бути укомплектований водолічильниками різних фірм-виготовників. Окремі характеристики швидкі-



сних водолічильників наведені вище і призначені для встановлення у трубопроводах діаметром  $D_u$  від 15 до 250 мм.

Таблиця 2.5

Технічні характеристики теплолічильника “Січ”.

Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
Кількість каналів вимірювання : витрати температури	-	1 ÷ 5
	-	2 ÷ 5
Діаметр датчиків витрати (витратоміри з імпульсним виходом)	мм	15 ÷ 250
Діапазон вимірювання витрати	м <sup>3</sup> /год	0,6 ÷ 400
Діапазон вимірювання температури: у прямому трубопроводі у зворотному трубопроводі у трубопроводі холодного водопостачання (у разі необхідності значення температури холодної води можна задаватись програмно)	°C	20 ÷ 150
		5 ÷ 145
		5 ÷ 50
Діапазон вимірювання різниці температур	°C	5 ÷ 145
Живлення від мережі змінного струму: напруга частота	В	220
	Гц	50
Споживча потужність	В*А	Не більше 5
Довжина ліній зв'язку між вимірювально-обчислювальним блоком (ВОб) і датчиками витрати та температури	м	Не більше 100
Відстань виносу інтерфейсу RS 232	м	Не більше 100
Габаритні розміри ВОб	мм	215x180x90
Маса обчислювача	кг	2
Припустима температура навколишнього повітря	°C	5 ÷ 50
Припустима вібрація: частота амплітуда	Гц	До 25
	мм	До 0,1
Припустима вологість при температурі 25°C	%	85
Відносна похибка вимірювання витрати теплової енергії	%	± 4

У комплекті теплотічильника застосовуються термоперетворюючі опору типу ТСРР – 100П з діапазоном вимірювання температури  $5 \div 155 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Лічильник тепла SUPERCAL 431 призначений для комерційного обліку споживчої теплової енергії у закритих системах теплопостачання. У залежності від потреби, може встановлюватись в індивідуальних будинках, на промислових, побутових та інших об'єктах. Лічильник SUPERCAL 431 складається з трьох основних елементів: мікропроцесорного інтегратора для обчислення теплової енергії на підставі виміру об'єму і температури теплоносія; крильчастих чи турбінних водомірів з імпульсним виходом; двох термоперетворювачів опору типу Pt500. Основні технічні характеристики лічильника тепла SUPERCAL 431 представлені у табл. 2.6, а загальний вигляд і габаритні розміри інтегратора наведені на рис. 2.62.

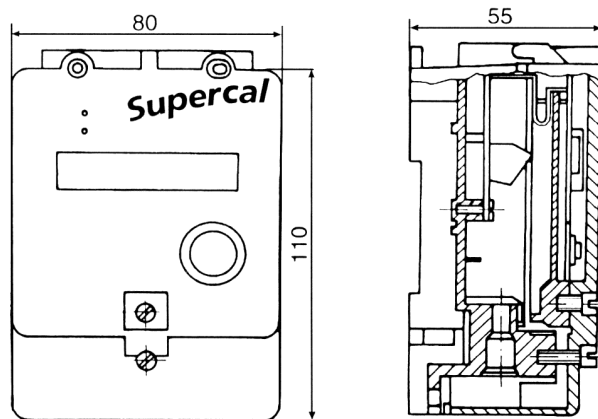


Рис 2.62 загальний вигляд і габаритні розміри мікропроцесорного інтегратора лічильника тепла SUPERCAL 431.

Лічильник тепла має наступні функціональні особливості: підвищений об'єм постійної пам'яті EEPROM, що дозволяє зберігати велику кількість інформації (особливо місячне значення); можливість програмування маскою з метою запобігання проникнення до програми сторонніх осіб і зміни експлуатаційних параметрів системи програмуванням пам'яті EEPROM; підвищений дисплей на 8 цифр з двома режимами його роботи (основний і сервісний), розрахованого на стандартні показання параметрів (енергія, об'єм, тест дисплея, температура на прямому і зворотному трубопроводі, різниця температур, час роботи, миттєва витрата і потужність та ін. у залежності від моделі); обчислення максимальної місячної пікової потужності періодично, кожні 15 і 60 хвилин; вимірювання миттєвої витрати і потужності з точністю 2% в усьому діапазоні динамічної зміни; наявність годинника реального часу; програмування дати реєстрації коду помилок і моменту їх появи; зберігання у пам'яті місячних даних за останні 12 місяців (енергія, об'єм, пікова потужність); можливість

безпосереднього підключення до ПЕОМ за інтерфейсом RS232 і об'єднання у мережу за інтерфейсами RS485 (необхідне додаткове живлення напругою 9В) чи ModBus; наявність автоматичного налаштування частоти вимірів у залежності від змін витрати; виявлення аварійних ситуацій і висвітлення коду помилок. Додатково на замовлення може бути проведена комплектація лічильника тепла інкасаторським комплектом, який складається з багатофункціонального програмного калькулятора PSION і інтерфейсу з оптоелектронною головкою зчитування.

Таблиця 4.62.

## Технічні характеристики лічильника тепла SUPERCAL 431.

Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення параметра
Кількість каналів вимірювання:		
витрати	-	1 ÷ 3
температури	-	2
Діаметр датчиків витрати (витратоміри з імпульсним виходом)	мм	15 ÷ 250
Діапазон вимірювання витрати	м <sup>3</sup> / год	0,6 ÷ 400
Діапазон вимірювання температури	°С	10 ÷ 180
Діапазон вимірювання різниці температур	°С	3 ÷ 150
Ресурс роботи батареї живлення	рік	5
Відстань виноси інтерфейсу RS 232	м	Не більш 100
Припустима температура навколишнього повітря	°С	5 ÷ 55
Припустима вологість повітря	%	85
Значення імпульсації водоміру:		
повільний вихід імпульсу	л/імп	1; 10; 100; 1000 2,5; 25; 250; 2500
швидкий вихід імпульсу	імп/л	0,0007 ÷ 6553,5
Похибка вимірювання теплової енергії	%	±(2,3/δt+0,3)
Похибка вимірювання різниці температур	%	±(2,0//δt+0,1)
Примітка: δt-різниця температур.		

Щоб зняти інформацію з теплोलічильника необхідно накласти оптоелектронну головку на нього у розміщених на корпусі спеціальних гачках і викликати та запустити програму зчитування в інкаса-

торському комплекті. Зняття інформації відбувається автоматично. Дані можна читати вибірково або повністю. Збережену у пам'яті інкасаторського комплекту інформацію можна переглянути на його дисплеї і (або) передати на ПЕОМ. Інкасаторський комплект має програму, яка дозволяє передавати дані на ПЕОМ у вигляді файлу. Цей файл потім можна піддавати обробці і аналізу. До того ж програма дозволяє при необхідності чистити пам'ять калькулятора. Його стандартна пам'ять надає можливість читати і зберігати у пам'яті інформацію з 60-ти лічильників тепла.

Інкасаторський комплект лічильника SUPERCALa дозволяє читати інформацію з лічильників тепла інших виробників. У цьому випадку прочитані безпосередньо на дисплеї лічильника тепла дані виводяться у пам'ять калькулятора за допомогою клавіатури. Таким чином можна створити однорідну структуру даних, отриманих з лічильників тепла різного типу.

При комплектації лічильника тепла дистанційним блоком зчитування для зняття інформації можна проводити на відстані до 25 м від місця, де встановлений інтегральний блок.

Монтаж комплектуючих елементів лічильника тепла здійснюється у відповідності зі схемою, що наведена на рис. 2.63.

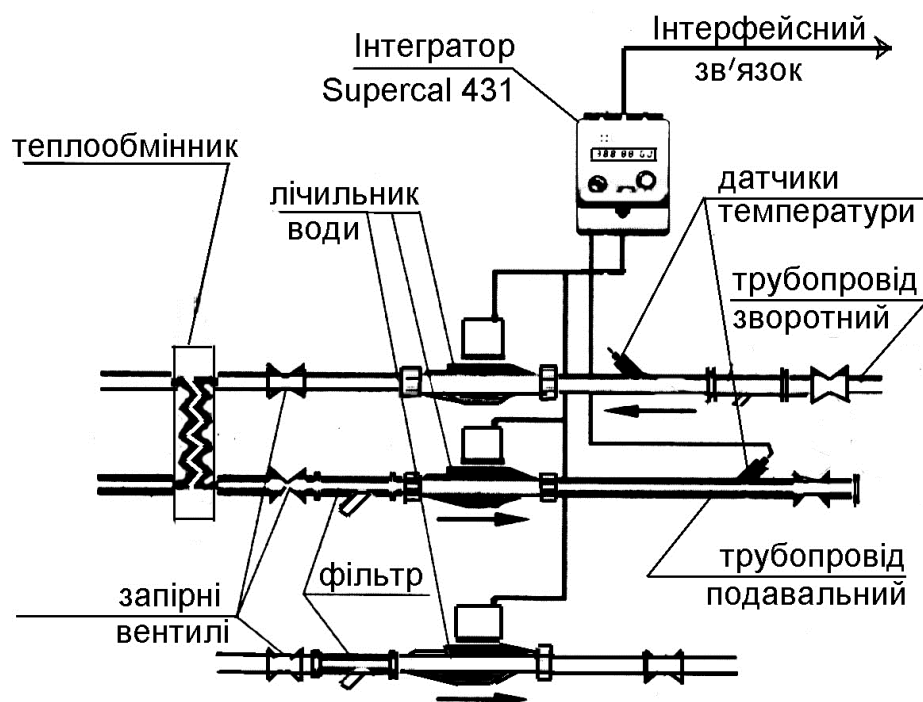


Рис. 2.63. Схема обладнання системи тепlopостачання комплектом засобів лічильника тепла SUPERCAL 431.

## 2.5. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

У технологічних процесах різних галузей промисловості діапазон температур, що контролюється, досить великий. Тому застосовуються різноманітні методи і засоби вимірювання. Температура – це умовна статистична величина, прямо пропорційна середній кінетичній енергії частинок речовини. Вимірювання температури практично можливо лише методом порівняння нагріву двох тіл. При цьому ступінь нагріву одного з тіл передбачається відомою. Для порівняння ступеня нагріву тіл використовують зміну якої-небудь фізичної їх властивості, що залежить від температури і легко піддається вимірюванню. З метою переходу до кількісного визначення температури встановлюється шкала температур, тобто обирається початок відліку (нуль шкали) і одиниця виміру температурного інтервалу (градус). На сьогодні припускається застосування двох температурних шкал: абсолютної термодинамічної і міжнародної практичної. Температура по обом шкалам може бути виражена в одиницях Кельвіна ( $K$ ) і градусах Цельсія ( $^{\circ}C$ ) у залежності від початку відліку по шкалі. Абсолютна температура позначається буквою  $T$  і пов'язана з практичною температурою  $t$  наступним рівнянням:

$$T = t + T_0 \quad (2.47)$$

де  $T_0 = 273,15 K$  – температура абсолютного нуля.

Сучасна термометрія передбачає різні методи і засоби вимірювання. Кожний з відомих методів специфічний і не може бути універсальним. У залежності від принципу дії прилади для вимірювання температури можна розподілити на такі групи: термометри розширення (рідинні і механічні), дія яких ґрунтується на зміні об'єму робочої речовини із зміною температури; манометричні термометри, дія яких ґрунтується на зміні тиску робочої речовини при постійному об'ємі із зміною температури; термоелектричні термометри включають термоелектричний перетворювач, дія якого ґрунтується на використанні залежності термоелектрорушійної сили (ТЕДС) від температури; термометри опору містять термоперетворювач опору, дія якого ґрунтується на використанні залежності електричного опору чутливого елемента (провідника чи напівпровідника) від температури; пірометри випромінювання, дія яких оснований на вимірюванні теплового випромінювання нагрітих тіл.

**Термометри розширення** у залежності від виду термометричних речовин, що використовуються у приладах, термометри розширення розподіляються на рідинні і механічні. Термометри розширення прості за конструкцією, дешеві і мають достатню для практичних вимірів точність. У той же час у зв'язку з обмеженими функціональними можливостями вони майже не застосовуються у системах автоматичного керування. Іноді їх використовують тільки як контактні у схемах сигналізації і блокування. До недоліків цих термометрів також слід віднести значну теплову інерцію, неможливість реєстрації і передачі даних на відстань.

*Рідинні технічні скляні термометри* виготовляють як загальнопромислові типу ТТЖ (спиртові), ТТ, ТП (ртутні), так і спеціальні типу СП (ртутні). У виробничих умовах використовують разом із захисною арматурою (оправою), яка виготовляється у вигляді сталеві трубки з вікном для спостереження за показаннями термометра.

Вибір робочої рідини залежить від діапазону вимірюваних температур. Найчастіше застосовують органічну рідину і ртуть. Перші використовують для вимірювання низьких температур (спирти до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , толуол до  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), другі – для вимірювання температур до  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У зв'язку з тим, що температура кипіння ртуті дорівнює  $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то у високо градусних термометрах ртуть у капілярах знаходиться під тиском інертного газу від 2 до 7 МПа.

Термометри встановлюють так, щоб термобалон з рідиною був розташований у середині потоку і мав направлення на зустріч потоку середовища, яке вимірюється. Для монтажу термометрів на трубопроводах діаметром менше 57 мм застосовують відповідні розширювачі.

Різновидом ртутних термометрів є електроконтактні типу ТПК (ТПЭ) із змінним положенням верхнього контакту, завдяки чому можна встановлювати межу температуру на будь-якій позначці шкали. Робочим контактом служить вольфрамова проволока, що знаходиться у середині капіляру. Контакт переміщується за допомогою гвинта і овальної гайки, яка укладена у овальну трубку. Для обертання гвинта передбачений підковоподібний магніт, встановлений на діамагнітному ковпачку у верхній частині термометра. Термометр має дві шкали: верхню для встановлення контакту на задану температуру і нижню, по якій проводять відлік температури. Контакти розраховані на струм не більше  $0,5\text{ A}$  при напрузі  $10 \div 12\text{ V}$ .

*Механічні термометри* застосовуються як для вимірювання, так і для регулювання (сигналізації) температури. У залежності від конструкції чутливого елемента відрізняють дилатометричні і біметалеві термометри. При вимірюванні температури дилатометричними термометрами використовується різниця абсолютного лінійного подовження двох стрижнів, виготовлених із різних матеріалів. Біметалевий термометр складається з двох спаяних поміж собою та зогнутих металевих пластинок з різними коефіцієнтами лінійного розширення. Внаслідок зміни температури в обох конструкціях утворюється сила пружної деформації, а переміщення, що виникає при цьому буде пропорційним величині зміни температури. Біметалеві термометри останнім часом знайшли широке застосування, завдяки відсутності споживання при вимірюваннях зовнішньої енергії. Клас точності приладів не перевищує  $\pm 2\%$ .

**Манометричні термометри** становлять собою систему, яка містить термобалон, капілярну трубку і пружинний манометр, заповнені робочою речовиною. У залежності від заповнювача манометричні термометри виготовляються чотирьох видів: газові, рідинні, конденсаційні і зі спеціальним наповнювачем. Термометри зі спеціальним наповнювачем застосовуються для вимірювання температур до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Термометрична система газових манометричних термометрів заповнюється азотом, гелієм чи аргоном. Рідинні прилади заповнюються кремнійорганічною поліметилсилоксановою рідиною ПМС-5, а конденсаційні заповнюються низькокиплячою рідиною (фреоном, хлористим метилом, ацетоном, етилбензолом), пари якої при температурі вимірювання частково заповнюють термобалон. Шкали манометричних газових і рідинних термометрів рівномірні, а конденсаційних – нерівномірні, стиснуті на першій третині шкали.

Використання манометричного термометра при вимірюваннях не вимагає споживання зовнішньої енергії. Вони прості за улаштуванням, надійні в роботі, а за відсутності електроприводу діаграми – вибухо- і пожаробезпечні. Основний недолік манометричних термометрів – значне запізнення показань, яке залежить від фізичного стану наповнювачів та їх теплофізичних характеристик. Менші показники інерційності у газових термометрах, більші – у рідинних і конденсаційних. Улаштування усіх типів манометричних термометрів майже не відрізняються.

Принципова схема манометричного термометра представлена на рис. 2.64. Термобалон 1 розташовують у зоні виміру температури.

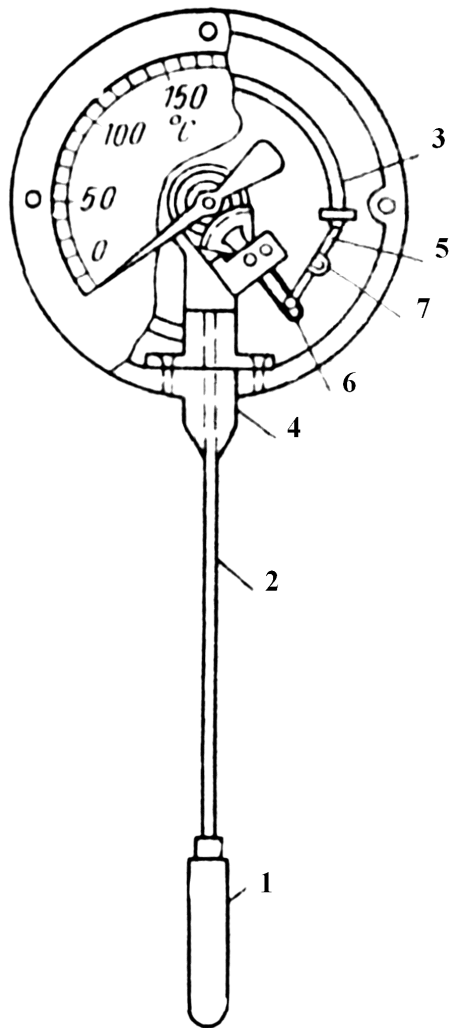


Рис. 2.64. Принципова схема манометричного термометра з трубчастою пружиною: 1 – термобалон; 2 – капілярна трубка; 3 – манометрична трубка; 4 – утримувач; 5 – поводок; 6 – зубчастий сектор; 7 – біметалевий компенсатор.

При нагріванні термобалону тиск робочої речовини усереднені замкнутої системи підвищується. Підвищення тиску сприймається манометричною трубкою (пружиною) 3, яка діє через передаточний механізм (поводок 5, зубчастий сектор 6) на стрілку чи перо приладу. Термобалон виготовлений з корозійностійкої сталі і розрахований на тиск до 6,5 МПа, а капіляр – з мідної або сталеві трубки з внутрішнім діаметром  $0,15 \div 0,5$  мм. Іноді капіляр може бути відсутнім і термобалон безпосередньо з'єднується з манометричною частиною. Для захисту від механічних пошкоджень капіляр розміщують у захисній оболонці із сталевого плетеного рукава.

Монтаж манометричних термометрів необхідно здійснювати із додержанням наступних вимог: прилади і капіляри не повинні бути поблизу нагрівальних чи охолоджувальних пристроїв для запобігання додаткової похибки; прилади не повинні підлягати вібрації; шкала повинна бути у зоні видимості робочого місця; капіляр необхідно кріпити на гачках або скобах до стіни; радіус закруглення у місцях згинання капіляру повинен бути не менше 50 мм; корпус приладів повинен установлюватись тільки вертикально.

Термометри призначені для вимірювання температури у наступних діапазонах: газові типу ТГП –  $(-200) \div 600$  °С; конденсаційні типу ТКП –  $(-25) \div 300$  °С; рідинні типу ТЖС –  $(-100) \div 300$  °С. Для можливості виконання різних функцій термометри виготовляються: показуючі, самописні, з сигнальним чи регулювальним пристроєм.

**Термоелектричні термометри** становлять собою термоелектричний перетворювач (термопару), дія якого основана на термоелект-



тричному ефекті Зеебека: у замкненому колі, що складається з двох або декількох різнорідних провідників, виникає електричний струм, якщо хоча б два місця з'єднання (спаю) провідників мають різну температуру.

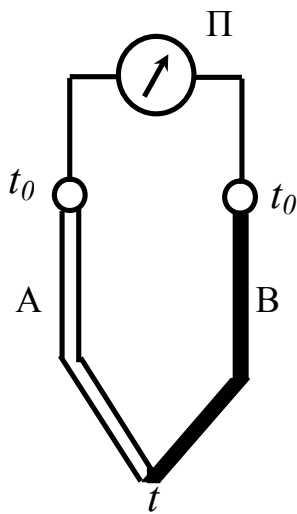


Рис. 2.65. Схема термоелектричного кола із застосуванням третього провідника для підключення вимірювального приладу.

Термоелектричний перетворювач (ТЕП) складається з двох різнорідних провідників А і В (див. рис. 2.65), які носять назву термоелектродів і утворюють з вимірювальним приладом П електричне коло. Спай, що занурюється у вимірювальне середовище з температурою  $t$ , називається робочим, а кінці термоелектродів, що приєднуються до вимірювального приладу і мають постійну температуру  $t_0$ , називаються вільними.

Термоелектричний ефект пояснюється наявністю у металі вільних електронів, кількість яких у одиниці об'єму різна для різних металів. У спаї з температурою  $t$  електрони з металу А, де їх більше дифундують у метал В з меншою кількістю вільних електронів більш інтенсивно, ніж у зворотному напрямку. Тому перший метал (електрод) заряджується позитивно, а другий – негативно. За таким станом між електродами виникає деяка різниця потенціалів (термоелектрорушійна сила – ТЕДС). При цьому за умов  $t_0 = const$  ця різниця потенціалів однозначно буде визначатися величиною робочої температури, тобто  $E_{AB}(t, t_0) = f(t)$ . З метою вимірювання цієї різниці потенціалів застосовують вторинні прилади (мілівольтметри, потенціометри, вимірювальні перетворювачі). З'єднання ТЕП з цими приладами здійснюють компенсаційними провідниками, які в парі між собою утворюють ту саму ТЕДС (за тих самих температур), що і ТЕП, до якого вони приєднуються. Компенсаційних провід фактично продовжує термоелектроди ТЕП. ТЕП підлягає градуюванню при температурі  $t_0 = 0$  °С, рідше при  $t_0 = 20$  °С.

У відповідності зі стандартом вітчизняна промисловість виготовляє термоелектричні перетворювачі дев'яти типів. Технічні характеристики ТЕП наведені у табл. 2.7, а їх номінальні статичні характеристики (НСХ) представлені на рис. 2.66.

Таблиця 2.7.

Технічні характеристики  
термоелектричних перетворювачів температури

Тип	Умовне позначення НСХ	Матеріал термо-електроду		Діапазон вимірювання, °C	Клас допуску	Межі припустимих відхилень температури, ±°C
		Позитивного	Негативного			
1	2	3	4	5	6	7
ТПП	ПП(S)	Сплав платино-родій. ПР-10 (90% Pt +10% Rh)	Платина ПлТ (Pt)	0 ÷ 600	2	1,5
				600 ÷ 1600		0,0025t
				0 ÷ 1100	1	1
				1100 ÷ 1600		1 + 0,003(t-1100)
ТПР	ПР(В)	Сплав платино-родій ПР-30 (70% Pt + 30% Rh)	Сплав платино-родій ПР-6 (94% Pt + 6%Rh)	600 ÷ 800	3	0
				800 ÷ 1800		0,005t
				600 ÷ 1800	2	0,0025t
ТХК	ХК(L)	Сплав хромель ТНХ 9,5 (90,5%Ni + 9,5%Cr)	Сплав копель МНМц43-0,5 (56%Cu + 44%Ni)	(-200) ÷ (-100)	3	1,5 + 0,01t
				(-100) ÷ 100		2,5
				(-40) ÷ 300	2	2,5
				300 ÷ 800		0,7 + 0,005t
ТХК	ХК(Е)	Сплав хромель ТНХ 9,5 (90,5%Ni + 9,5%Cr)	Мідно-нікелевий сплав МН-2,4	-200 ÷ (-166,7)	3	0,015t
				(-166,7) ÷ 40		2,5
				(-40) ÷ 333,4	2	2,5
				333,4 ÷ 900		0,0075t
				(-40) ÷ 375	1	1,5
				375 ÷ 800		0,004t
ТЖК	ЖК(J)	Залізо	Мідно-нікелевий сплав МН-2,4	(-40) ÷ 333,4	2	2,5
				333,4 ÷ 900		0,0075t
				(-40) ÷ 375	1	1,5
				375 ÷ 750		0,004t

Продовження табл. 2.7

1	2	3	4	5	6	7
ТХА	ХА(К)	Сплав хромель ТНХ 9,5 (90,5%Ni + 9,5%Cr)	Сплав алюмель НмцАК2-2-1 (94,5%Ni + 5,5%Al, Si, Mn, Co)	-250 ÷ (-166,7)	3	0,015t
				(-166,7) ÷ 40		2,5
				(-40) ÷ 333,4	2	2,5
				333,4 ÷ 1300		0,0075t
				(-40) ÷ 375	1	1,5
375 ÷ 1300	0,004t					
ТВР	ВР(А)	Сплав вольфра-мреній ВР-5 (95%W + 5%Re)	Сплав во-льфра-мреній ВР-20 (80%W + 20%Re)	1000 ÷ 2500	3	0,007t
				1000 ÷ 2500	2	0,005t
ТМК	МК(М)	Мідь М2 (Cu)	Сплав ко-пель МНМц 43-0,5 (56%Cu + 44%Ni)	(-200) ÷ (-66)	3	0,015t
				(-66) ÷ 40		1
				(-40) ÷ 135	2	1
				135 ÷ 400		0,0075t
				(-40) ÷ 125	1	0,5
125 ÷ 350	0,004t					

Примітка: клас допуску – це узагальнююча характеристика термоперетворювача, яка визначає припустиме відхилення похибки вимірювання температури  $\Delta t$  від номінальних значень.

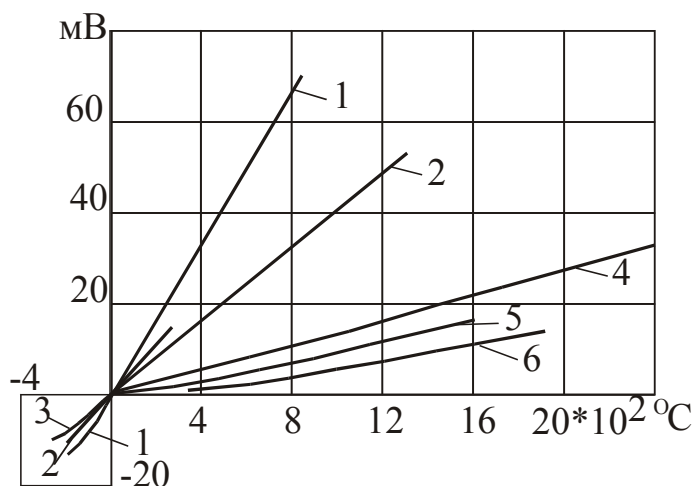


Рис. 2.66. Номінальні статичні характеристики ТЕР: 1 – ХК(Л); 2 – МК(М); 3 – ХА(К); 4 – ВР(А) – 1; 5 – ПП(С); 6 – ПР(В). (Примітка: у скобках наведено позначення ТЕР за міжнародним стандартом).

Типові термоелектричні перетворювачі мають різноманітне конструктивне оформлення, яке залежить, головним чином, від умов їх застосування. На рис. 2.67 наведено ТЕР типової конструкції. При цьому довжина  $L$  визначається місцем, де вимірюється температура. Діаметр захисної трубки як правило складає 6, 8, 10 і 21 мм. Замість фланця може бути приварений штуцер з різьбою, або установлений пересувний штуцер з упором.

Робочий спай може бути ізольований або з'єднаний із захисною арматурою. Виконання усіх типів ТЕП вібростійке. Маса ТЕП залежить від типів і монтажної довжини і знаходиться у межах від 0,27 до 4,3 кг.

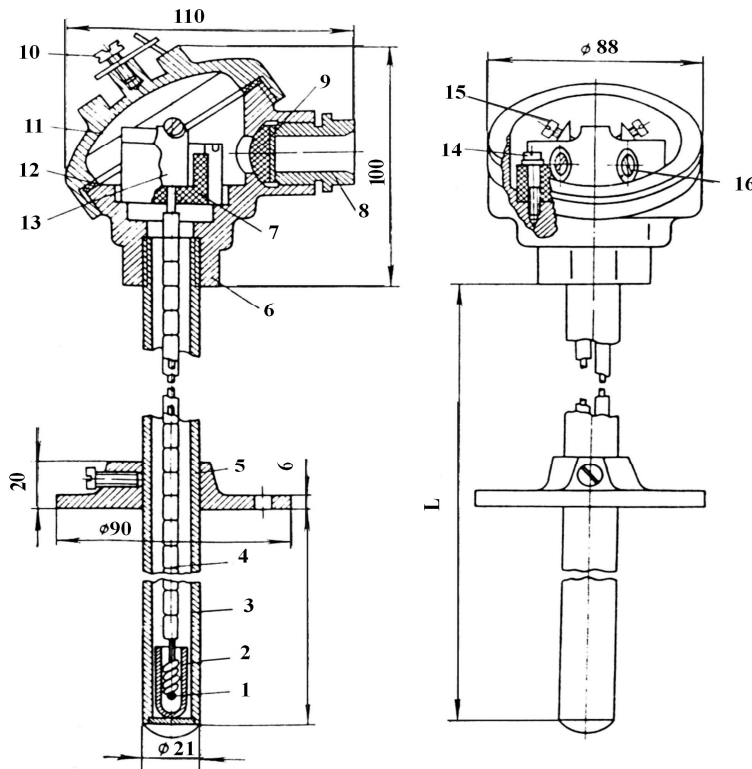


Рис. 2.67. ТЕП у захисній арматурі з пересувним фланцем: 1 - робочий спай; 2 - фарфоровий наконечник; 3 - захисна трубка; 4 - фарфорові двоканальні буси; 5 - пересувний фланець для кріплення ТЕП; 6 - корпус головки; 7 - фарфорова головка; 8 - штуцер для проводів; 9 - азбестовий шнур; 10 - гвинт для ланцюжка; 11 - кришка; 12 - прокладка; 13 - затискачі; 14 - гвинти для кріплення проводів; 15 - гвинти для кріплення колодки; 16 - гвинти для кріплення термоелектродів у затискачах.

При виборі типу ТЕП необхідно керуватися наступними положеннями: відповідність статичної характеристики ТЕП характеристикі вторинного приладу, чи перетворювача; відповідність температурі в об'єкті вимірювання межах виміру, міцності матеріалу і конструкції захисної арматури умовам експлуатації; вибір довжини монтажної частини, яка б забезпечила розташування робочого спаю у середині об'єкту; показник теплової інерції повинен задовольняти вимогам системи керування.

*Термоелектричні перетворювачі з уніфікованими вихідними сигналами (ТХАУ) виготовляються як у звичайному так і у вибухозахищеному виконанні. Призначені для вимірювання температури до 900 °С у рідких, газоподібних та сипучих речовинах і застосовуються у різних галузях промисловості. При цьому ТЕП типу ТХАУ-0288 і ТХАУ-0388 мають звичайне виконання, а ТХАУ-0289 – вибухозахищене, що дозволяє використовувати їх у нафтодобувній, нафтопереробній, нафтохімічній промисловості та у виробництвах мінеральних добрив. Розраховані для вибухонебезпечних зон усіх класів, де*

можуть утворюватись вибухонебезпечні суміші пари і газу усіх категорій і груп.

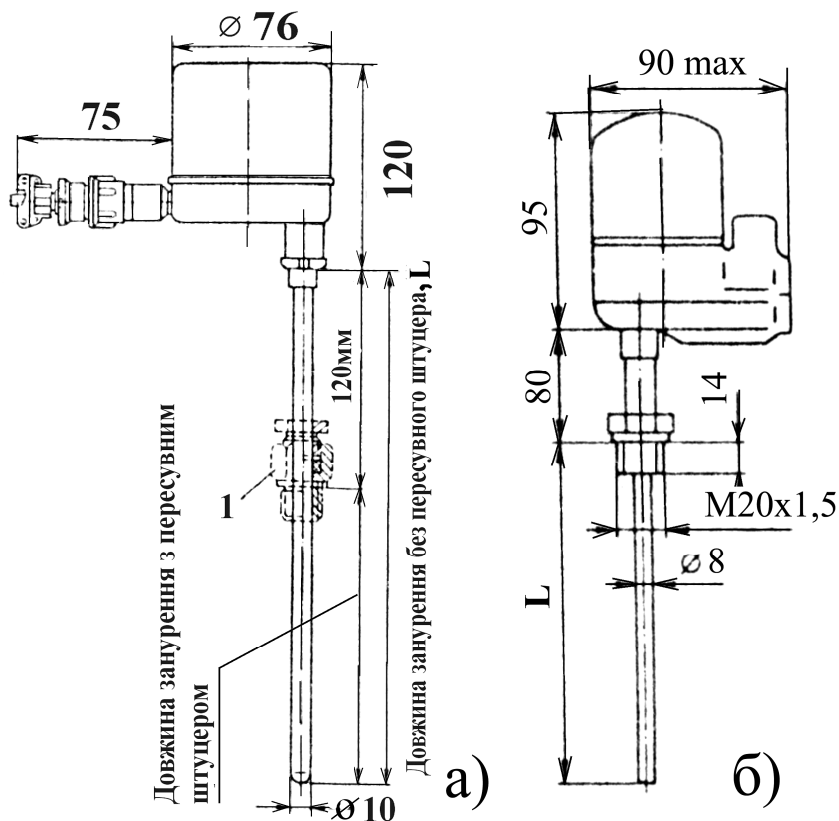


Рис. 2.68. Габаритно-монтажні розміри термоперетворювачів ТХАУ-0288, 0388 (а) і ТХАУ-0289 (б): 1 – пересувний штуцер або без нього.

Термоперетворювачі типу ТХАУ-0288, 0289 мають вихідний сигнал постійного струму  $4 \div 20$  мА, а ТХАУ-0388 має гальванічний розподіл поміж джерелом живлення і виходом та десятирозрядний послідовний інтерфейсний код ІРПС. Загальний вигляд і габаритні розміри деяких ТЕП представлені на рис. 2.68.

Термоперетворювачі ТХАУ-0289 поставляються з комплектом монтажних частин під

трубний і кабельний монтаж. Діаметр захисної гільзи усіх ТЕП може складати 8 і 10 мм, а довжина монтажної частини  $L$  до 1 м. Схеми включень термоперетворювачів наведені на рис. 2.69.

**Термоперетворювачі опору** призначені для вимірювання більш низьких температур у порівнянні з термопарами. Зміна опору металевих провідників термометрів опору (ТС) із зміною температури обумовлена наявністю вільних електронів зв'язку у металевій решітці. Залежність опору металів від температури у невеликому інтервалі температур приблизно можна визначити рівнянням:

$$R_t = R_t' [1 + \alpha(t - t')], \quad (2.48)$$

де  $R_t$  – опір металевого провідника при температурі  $t$ ;  $R_t'$  – опір того ж провідника при температурі  $t'$ ;  $(t - t')$  – інтервал зміни температури;  $\alpha$  – коефіцієнт температурного опору.

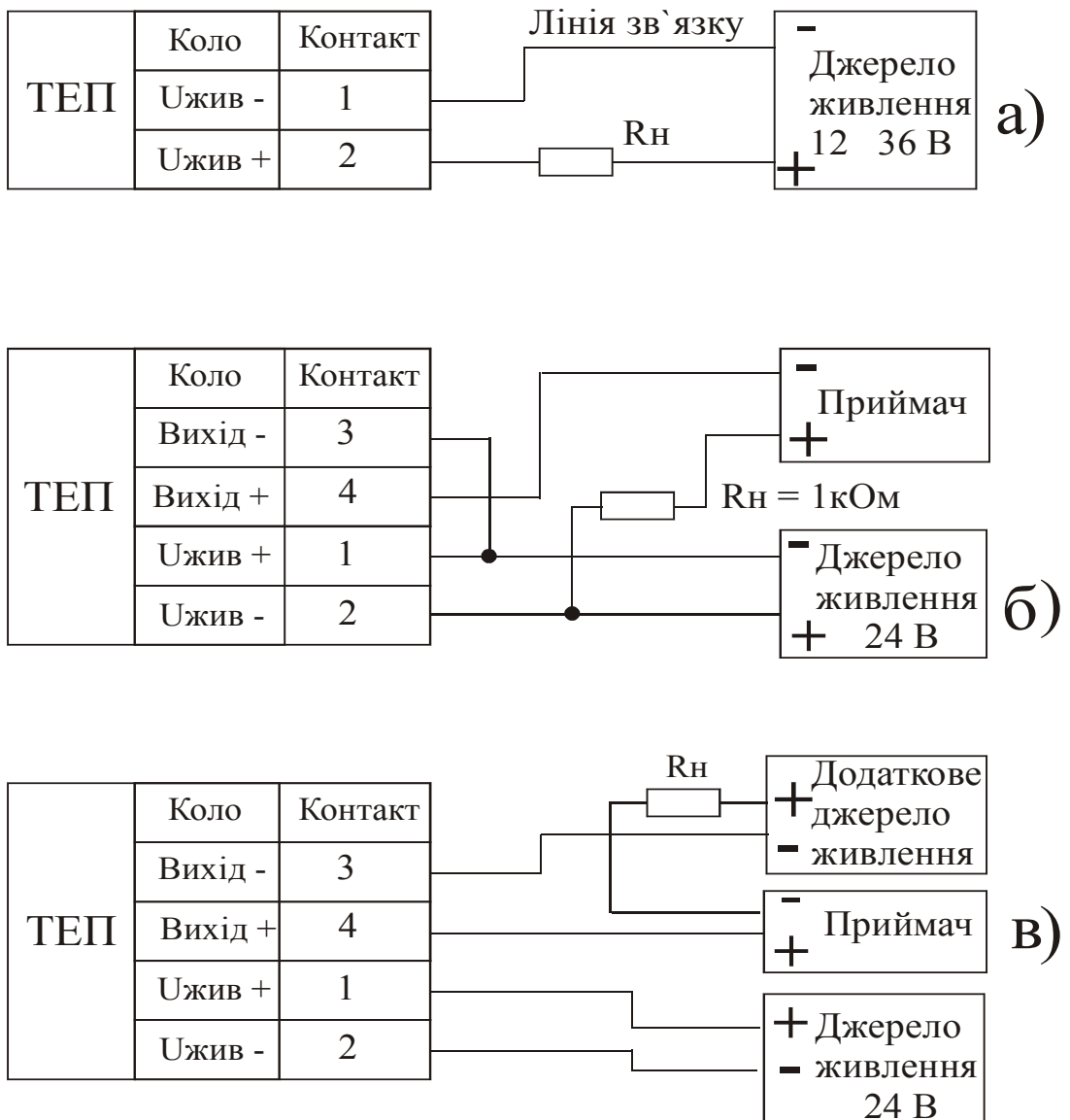


Рис. 2.69. Схеми включення термоперетворювачів типу ТХАУ: а – із струмовим вихідним сигналом; б – з кодовим (ІРПС) вихідним сигналом; в – з кодовим (ІРПС) вихідним сигналом і гальванічним розподілом виходу ТЕП від джерела живлення.

Основною частиною термоперетворювача опору є чутливий елемент. За матеріалами чутливого елемента ТС можуть бути платинові ТСП, мідні ТСМ і в окремих випадках нікелеві ТСН. При цьому метал повинен бути однакової чистоти, що перевіряється співвідношенням  $W_{100} = R_{100}/R_0$  (де  $R_{100}$  і  $R_0$  відповідно опір при температурі 100 і 0 °С). При перевірці ТС достатньо провести вимір цього спів-

відношення, щоб бути впевненим у правильності його роботи на всьому діапазоні температур.

Номинальні статичні характеристики (НСХ) перетворення і значення опору ТС при будь-якій температурі отримують за формулою:

$$R_t = W_t R_0, \quad (2.49)$$

де  $R_t$  – опір ТС при температурі  $t$ , Ом;  $W_t$  – величина відношення опорів при температурі  $t$  і  $0$  °С. Значення  $W_t$  стандартизовані і надаються у таблицях. Технічні характеристики термоперетворювачів типу ТСП і ТСМ представлені у табл. 2.8.

Невелика температурна межа вимірювання термоперетворювачів ТСМ пояснюється окисненням міді при високих температурах. Для вимірювання опору термометрів застосовують логометри, врівноважені і неуврівноважені мости.

*Типові термоперетворювачі опору* конструктивно складаються з чутливого елемента (платинової чи мідної проволочки, яка намотується біфілярно на спеціальний слюдяний, фарфоровий чи пластмасовий каркас) і захисної арматури ідентично ТЕП, що служить для убереження чутливого елемента і затискачів (вивідних) провідників від механічних пошкоджень. Проводи від чутливого елемента до вивідних затискачів по всій довжині ТС ізольовані один від одного та від металевої частини захисної арматури. ТС можуть бути виконані також подвійними (з двома електрично ізольованими один від одного чутливими елементами і з чотирма затискачами на головці термометра опору). У чутливих елементах для ТСМ використовують мідну проволочку діаметром від 0,08 мм, а у ТСП – платинову проволочку діаметром від 0,07 мм. Загальний вигляд і способи кріплення ТС на об'єкті не відрізняються від ТЕП.

Виконання усіх типів ТС вібростійке, а головка приладу має водозахищене виконання. Кількість затискачів у головці може бути два, три чи чотири, що забезпечує двох-, трьох чи чотирьох провідне підключення одинарного приладу ТС. ТС без з'єднувальної головки оснащені вивідними провідниками зі спеціальним закладенням.

*Термоперетворювачі опору з уніфікованими вихідними сигналами* виготовляються як у звичайному так і у вибухозахищеному виконанні. Термоперетворювачі опору типу ТСПУ і ТСМУ призначені для вимірювання температури у рідких, газоподібних та сипучих речовинах і застосовуються у різних галузях промисловості.

Таблиця 2.8.

## Технічні характеристики термоперетворювачів опору.

Тип ТС	Номінальне значення опору при 0 °С ( $R_0$ ), Ом	Умовне позначення НСХ перетворювача	Клас допуску	Припустиме відхилення від номінального опору при 0 °С, $\pm$ %	Номінальне значення відношення опору $W_{100}$	Найменше припустиме значення опору $W_{100}$	Діапазон температур, що вимірюються, °С	Припустимі відхилення $\Delta t$ від температури $t$ , $\pm$ °С			
ТСП	1	1П	В	0,1; 0,2	1,391	1,3905	0 ÷ 1100	0,3+0,005t			
			С					1,385	1,3845	0 ÷ 850	0,6+0,008t
			А	0,05			(-200) ÷ 650 (-200) ÷ 750	0,15+0,002t			
	10	10П	В	0,1; 0,2	1,391	1,3905	(-50) ÷ 1000 (-50) ÷ 850	0,3+0,005t			
			С					1,385	1,3845		0,6+0,008t
			А	0,05			(-260) ÷ 750 (-200) ÷ 650	0,15+0,002t			
	50	50П	В	0,1; 0,2	1,391	1,3905	(-200) ÷ 1000 (-100) ÷ 850	0,3+0,005t			
			С					1,385	1,3845		0,6+0,008t
			А	0,05			(-260) ÷ 750 (-200) ÷ 650	0,15+0,002t			
	100	100П	В	0,1; 0,2	1,391	1,3905	(-200) ÷ 1000 (-200) ÷ 850	0,3+0,005t			
			С					1,385	1,3845		0,6+0,008t
	500	500П	А	0,05			(-260) ÷ 300 (-200) ÷ 300	0,15+0,002t			
ТСМ	10	10М	В	0,1; 0,2	1,428	1,427	(-50) ÷ 200	0,25+0,0035t			
			С					1,426	1,424		0,5+0,0065t
	50	50М	В								0,25+0,0035t
			С								0,5+0,0065t
	100	100М	В								0,25+0,0035t
			С								0,5+0,0065t

Примітка: для термоперетворювачів ТСП з класом допуску А припустиме відхилення  $\Delta t$  у діапазоні (-260) ÷ (-250) °С складає  $\pm$  3 °С, а у діапазоні (-250) ÷ (-200) °С -  $\pm$  1 °С.



Термоперетворювачі типу ТСПУ-, ТСМУ-0,288 і ТСПУ-, ТСМУ-0,388 мають звичайне виконання, а ТСПУ-, ТСМУ-0289 – вибухозахищене, що дозволяє використовувати їх у вибухонебезпечних виробництвах. Термоперетворювачі типу ТСПУ-, ТСМУ-0288 і 0289 мають вихідний сигнал постійного струму  $4 \div 20$  мА, а ТСПУ-, ТСМУ-0388 – містять гальванічний розподіл поміж джерелом живлення і виходом та мають десятирозрядний послідовний інтерфейсний вихід ІРПС. Габаритні розміри і схеми підключення ТС ідентичні термоелектричним термометрам (див. рис. 2.68 і 2.69).

Номінальна статична характеристика ТСПУ і ТСМУ має відповідно позначення 50П і 50М. Термометри ТСПУ-, ТСМУ-0289 поставляються з комплектом монтажних частин під трубний і кабельний монтаж. Діаметр захисної арматури усіх ТС може складати 8 і 10 мм, яка розрахована на тиск до 50 МПа.

Датчики температури типу ДТ-303, ДТ-304 призначені для безперервного контролю температури у діапазоні  $(-50) \div 300$  °С газоподібних і рідких технологічних середовищ і перетворення результатів в уніфікований електричний сигнал постійного струму  $4 \div 20$  мА. Датчики відрізняються конструкцією, матеріалом корпусу, довжиною занурювальної частини і способом кріплення і мають вибухозахищене виконання.

Датчики ДТ-303 виконані в неметалевому корпусі, а ДТ-304 – у металевому корпусі. Конструктивне оформлення датчиків окремих моделей наведено на рис. 2.70.

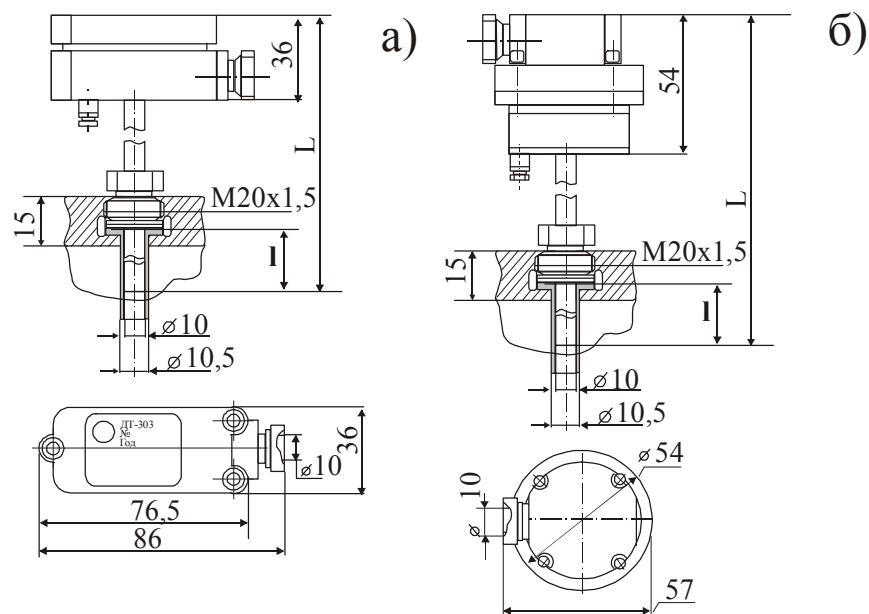


Рис. 2.70. Габаритні розміри датчиків ДТ-303÷ДТ-303-9 (а) і ДТ-304÷ДТ-304-9 (б).

Принцип дії датчиків полягає в перетворенні зміни опору стандартною інтегральною мікросхемою з нормованою залежністю вихідного сигналу від температури у вихідний сигнал  $4 \div 20$  мА. Чутливим елементом пристрою є стандартна інтегральна мікросхема з платиновим (мідним) електроперетворювачем. Живлення датчика від блоку живлення напругою  $16 \div 36$  В постійного струму.

Матеріал захисної арматури сталь 12Х18Н10Т. Тиск робочого середовища не повинен перевищувати  $2$  МПа.

**Пірометри випромінювання** найбільш широко пірометричні прилади застосовують в металургії і хімічній промисловості для вимірювання температури у різних печах, котельних установках та ін.

Пірометри випромінювання у порівнянні з іншими пристроями температури мають наступні переваги: вимірювання здійснюється безконтактним методом, завдяки чому не спостерігається перекручення температурного поля присутністю у вимірюваному середовищі термодатчика; верхня межа вимірювання теоретично майже необмежена; можливість вимірювання високих температур газових потоків і полум'я при високих швидкостях, коли застосування інших приладів пов'язано з великими труднощами.

Теплове випромінювання – це процес розповсюдження внутрішньої енергії випромінюючого тіла електромагнітними хвилями. При поглинанні електромагнітних хвиль від випромінюючого тіла іншими тілами електромагнітні хвилі знову перетворюються у теплову енергію. Тіла випромінюють електромагнітні хвилі довжиною  $\lambda$  в інтервалі від  $0$  до  $\infty$ . Більшість твердих і рідких тіл мають безперервний спектр випромінювання, тобто випромінюють хвилі усіх довжин. Інші тіла (чисті метали, гази) мають селективний спектр випромінювання, тобто випромінюють хвилі тільки на визначених ділянках спектру. Ділянка, починаючи від хвиль довжиною  $\lambda = 0,4$  до  $\lambda = 0,76$  мкм, відповідає видимому спектру. Кожна довжина хвилі видимого спектра відповідає визначеному кольору. Хвилі довжиною від  $\lambda \approx 0,4$  до  $\lambda \approx 0,44$  мкм відповідають темно-фіолетовому кольору; від  $\lambda \approx 0,44$  до  $\lambda \approx 0,49$  мкм – синє-блакитному; від  $\lambda \approx 0,49$  до  $\lambda \approx 0,59$  мкм – темно- і світло-зеленому; від  $\lambda \approx 0,58$  до  $\lambda \approx 0,63$  мкм – жовто – помаранчевому; від  $\lambda \approx 0,63$  до  $\lambda \approx 0,76$  мкм – світло - і темно-червоному. Виділення визначених кольорів у деякій мірі умовно, тому що у суцільному видимому спектрі перехід від одного кольору до іншого відбувається безперервно.

Хвилі довжиною  $\lambda > 0,76$  мкм відносяться до невидимих інфрачервоних теплових променів.

З підвищенням температури нагрітого тіла і зміною його кольору швидко зростає спектральна енергетична яскравість (СЕЯ), тобто випромінювання визначеної довжини хвилі (яскравості), а також помітно підвищується сумарне (інтегральне) випромінювання. Ці властивості нагрітих тіл використовуються для вимірюванні їх температури, а у відповідності з вказаними властивостями пірометри розподіляються на яскраві і радіаційні (повного випромінювання).

Теоретичне обґрунтування має лише явище променевипускання абсолютно чорного тіла (відбувається поглинання всієї променевої енергії, що падає на нього), коефіцієнт променевипускання якого приймається за одиницю. Властивість абсолютно чорного тіла з деяким наближенням притаманна поверхні отвору у замкненій порожнині з непрозорими і рівномірно нагрітими стінками. Це пояснюється тим, що всі промені, попадаючи у такий отвір зовні, практично повністю поглинаються усередині тіла, внаслідок багатократного відбиття від внутрішньої поверхні. СЕЯ і інтегральне випромінювання залежать від фізичних властивостей речовини, тому шкали пірометрів градуують по випромінюванню абсолютно чорного тіла, внаслідок чого температура, що отримана за допомогою вимірювального приладу не завжди відповідає дійсній температурі тіла.

*Яскраві (оптичні) пірометри* – це електричні пристрої, у яких СЕЯ випромінювань  $E_\lambda$  перетворюється в електричний сигнал, пропорційний яскравій температурі (температурі монохроматичного випромінювання) об'єкту. Залежність поміж яскравою  $T_J$  та істинною  $T$  температурами характеризується рівнянням:

$$T = \left( \frac{1}{T_J} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \right)^{-1}, \quad (2.50)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі монохроматичного випромінювання, мкм;  
 $C_2 = NhC / R = 1,44 \cdot 10^{-12}$  м·К ( $N$  – постійна Авогадро,  $h$  – постійна Планка,  $C$  – швидкість світла,  $R$  – універсальна газова постійна);  
 $\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{0\lambda}$  – степінь чорноти тіла для окремої довжини хвилі, що змінюється у межах від 0 до 1.

СЕЯ монохроматичного випромінювання реальних тіл ( $E_\lambda$ ) завжди менше СЕЯ випромінювання чорного тіла ( $E_{0\lambda}$ ) і в області невеликих температур (до 3000 К) відповідає рівнянню Віна:

$$E_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} e^{-(C_2/\lambda T)}, \quad (2.51)$$

де  $T$  – абсолютна температура тіла,  $K$ ;  $E_{\lambda}$  – СЕЯ випромінювання тіла для хвилі довжиною  $\lambda$ ,  $Вт / м^2$ ;  $C_1 = 2\pi h C^2 = 0,369 \cdot 10^{-15} \text{ Вт} / м^2$ .

При більш високих температурах СЕЯ монохроматичного випромінювання тіла характеризується рівнянням Планка:

$$E_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} \left( e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1} \quad (2.52)$$

Рівняння (2.51) і (2.52) використовуються у яскравих пірометрах для хвилі з довжиною  $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$  (червоного кольору видимого спектру).

Принцип дії яскравих (квазімонохроматичних) пірометрів оснований на порівнянні яскравості монохроматичного випромінювання двох тіл: еталонного тіла і тіла, температуру якого вимірюють. У якості еталонного тіла використовують нитку лампи розжарювання, яскравість випромінювання якої регулюється. На рис. 2.71 наведена принципова схема найбільш відомого пірометра оптичного із зникаючою ниттю.

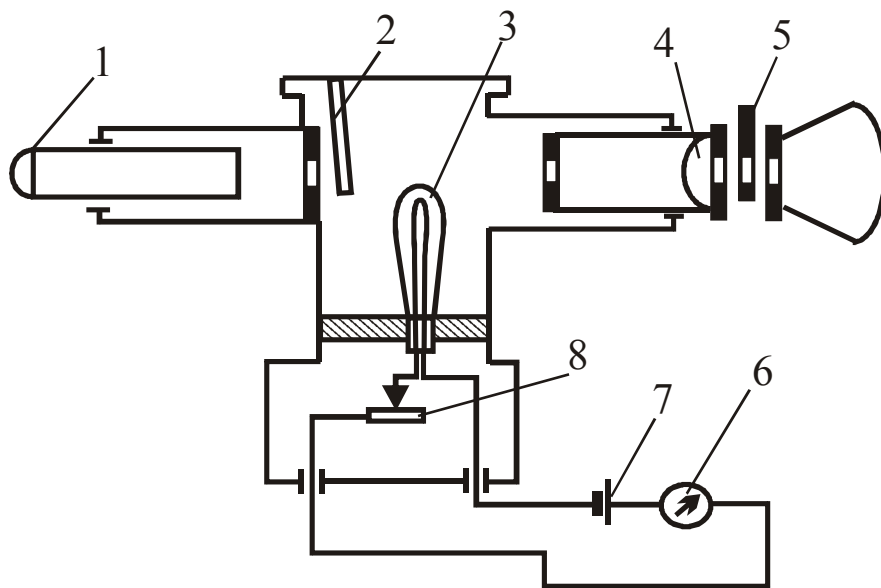


Рис. 2.71. Принципова схема оптичного пірометра.

Пірометр становить собою телескопічну трубку з лінзою 1 об'єктива і лінзою 4 окуляра. Усередені телескопічної трубки у фокусі лінзи об'єктиву знаходиться лампа розжарювання 3 з підковоподібною ниттю. Лампа живиться від джерела струму 7 через реостат 8. У коло живлення лампи включений мілівольтметр 6, конструктивно об'єднаний з трубкою телескопа. Шкала приладу 6 програ-

дуювана у градусах температури. Для отримання монохроматичного потоку світла окуляр містить червоний світлофільтр 5, що пропускає промені тільки визначеної довжини хвилі. В об'єктиві знаходиться сірий поглинаючий світлофільтр 2, що дозволяє поширити межі вимірювання (понад  $1300^{\circ}\text{C}$ ). В процесі підготовки оптичної системи до вимірювань трубку наводять на тіло і пересувають об'єктив до отримання чіткого зображення тіла і лампи розжарювання. Далі вмикають джерело струму і реостатом регулюють яскравість ниті до тих пір доки середня частина її зіллється з освітленим тілом. У цей момент по шкалі мілівольтметра проводять відлік температури.

*Радіаційний метод вимірювання* оснований на залежності між інтегральною енергією випромінювання тіла і його температурою, яка згідно закону Стефана-Больцмана має вигляд:

$$E = \varepsilon C_0 (T/100)^4, \quad (2.53)$$

де  $\varepsilon$  – степінь чорноти тіла для усіх довжин хвиль, що випромінюються;  $C_0 = 5,768 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$  – коефіцієнт променевипромінювання абсолютно чорного тіла.

При цьому залежність для визначення істинної температури характеризується рівнянням:

$$T = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon}, \quad (2.54)$$

де  $T_p$  – умовна температура, що вимірюється радіаційним пірометром.

Пірометри повного випромінювання (див. рис. 2.72) забезпечують вимірювання температури за потужністю випромінювання нагрітого тіла. Пірометр оснащений оптичною системою (лінзою, дзеркалом), що збирає промені, які надходять від нагрітого тіла. Завдяки цьому відбувається концентрація променів на перетворювачі (мініатюрна термоелектрична батарея, яка об'єднує декілька ТЕП). Отже, пірометр з термобатареею складається із телескопу з лінзою 1 об'єктива і лінзою 2 окуляра. На шляху променів лінзи 1 встановлена діафрагма 3, а у фокусі лінзи об'єктива – термоелектрична батарея 4. Робочі спаї ТЕП прикріплені хрестоподібною пластинки з платинової фольги, яка покрита платиновою черню з метою покращення поглинання променів. Вільні кінці ТЕП термометрів закріплені на слюдяній пластинці, а з'єднувальні проводи виведені до клем, що

розташовані у корпусі телескопу. Перед окулярною лінзою розташоване кольорове скло 5 для захисту очей в процесі вимірювання. Температура робочих кінців ТЕП не повинна перевищувати  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для зменшення числа променів, що падають на термобатарей, служить діафрагма 3. Вимірювання термоелектрорушійної сили здійснюється за допомогою мілівольтметра.

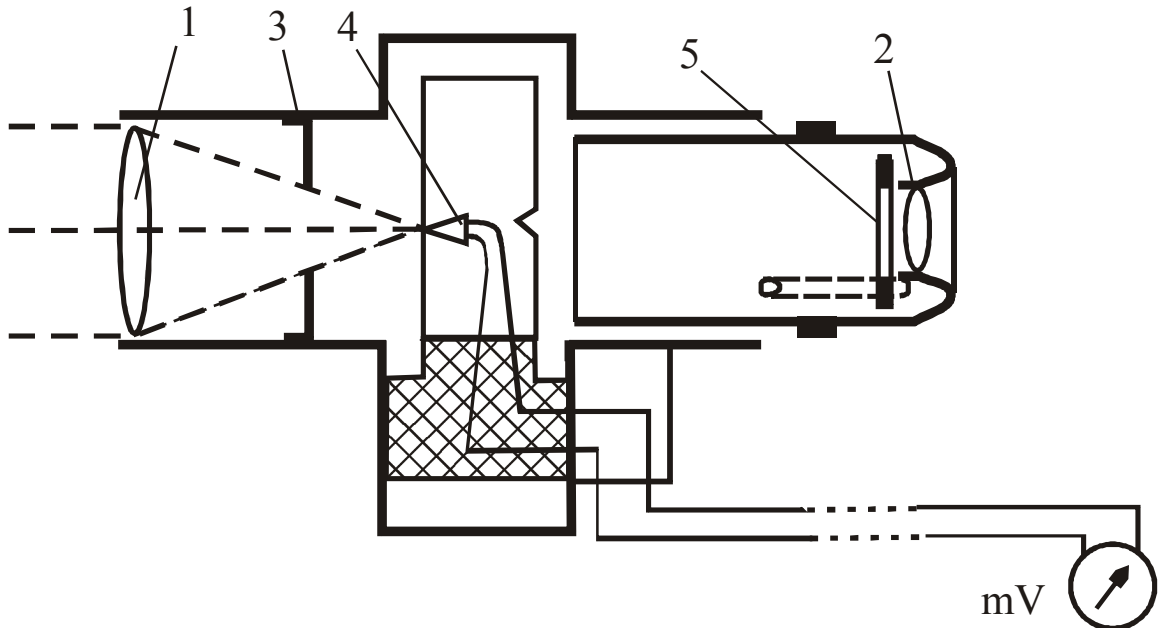


Рис. 2.72. Принципова схема пірометра повного випромінювання.

*Кольорові пірометри* практично майже не вимагають уведення поправки на неповноту випромінювання, що обумовлено виключною подібністю для реальних тіл кривих  $E_{\lambda} = f(\lambda)$  при різних температурах кривим  $E_{0\lambda} = f(\lambda)$  для абсолютно чорного тіла. Дія кольорових пірометрів основана на використанні закону зміщення Віна, що визначає залежність довжини хвилі  $\lambda_{\text{МАКС}}$  за максимальної СЕЯ випромінювання для певної температури  $T$ :

$$\lambda_{\text{МАКС}}T = 2896 \text{ мкм}\cdot\text{К}. \quad (2.55)$$

Отже, по положенню максимуму СЕЯ, яка визначається  $\lambda_{\text{МАКС}}$  для цілком певної температури, можна визначити абсолютну температуру тіла.

Принцип дії більшості конструкцій кольорових пірометрів оснований на визначенні кольору вимірюваного тіла по відношенню СЕЯ для двох довжин хвиль, не дуже близьких одна до одної у видимій частині спектру, тобто показання пірометра є функцією

$f(E_{\lambda 1} / E_{\lambda 2})$ . Це відношення для кожної температури різне, але цілком однозначне. Для запобігання залежності результатів вимірювання від суб'єктивних особливостей спостерігача (втома ока, сприйняття кольору) у кольорових пірометрах вимірювання відношення СЕЯ випромінювання здійснюється за допомогою фотоелементів.

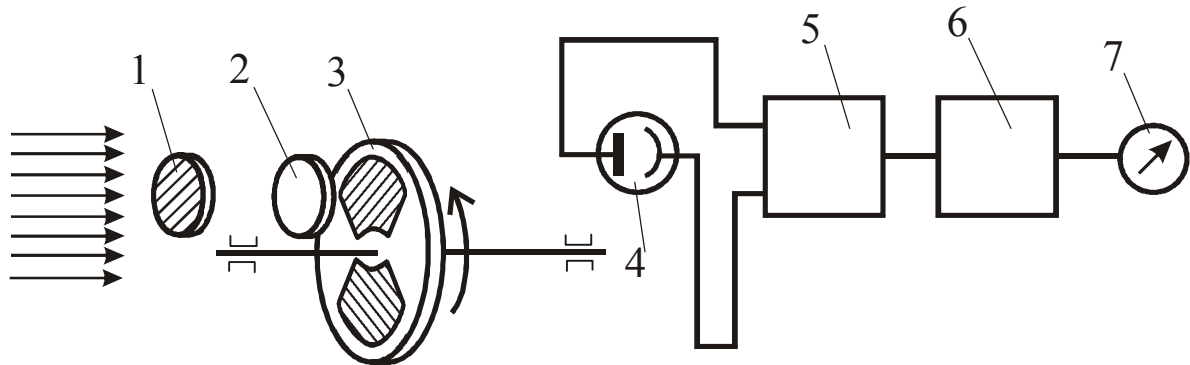


Рис. 2.73. Принципова схема пірометра спектрального відношення.

Згідно рис. 2.73 вимірюване випромінювання крізь захисне скло 1 і об'єктив 2 надходить на фотоелемент 4. Поміж об'єктивом і фотоелементом встановлений обтюратор 3, що обертається синхронним двигуном. Обтюратор виконаний у вигляді диску з двома отворами, один з яких закритий червоним світлофільтром К, а другий – синім С. Таким чином, при обертанні обтюратора на фотоелемент по чергові надходять випромінювання червоної і синьої СЕЯ випромінювання. Спектральна характеристика фотоелемента залежить від температури, тому фотоелемент у пірометрі поміщений у термостат з автоматичним регулюванням. Електричний струм, напруга якого пропорційна відповідним СЕЯ випромінювання, підсилюється електронним підсилювачем 5 і перетворюється спеціальним логарифмічним електронним пристроєм 6 у постійний струм, величина якого залежить від  $(1/T)$ . Вихідний струм далі вимірюється мілівольтметром 7.

*Агрегатний комплекс стаціонарних пірометричних перетворювачів і пірометрів випромінювання АПІР-С* представляє собою сукупність пірометричних перетворювачів, вторинних вимірювальних перетворювачів і необхідних для забезпечення їх роботи допоміжних пристроїв, об'єднаних в уніфіковані параметричні ряди перетворювачів.

Пірометричні перетворювачі комплексу АПІР-С відносяться до пристроїв отримання інформації і призначені як для комплекту-

вання автоматизованих систем керування технологічними процесами, так і для створення локальних приладів і систем вимірювання, контролю і регулювання температури методом пірометрії випромінювання.

Вироби комплексу вміщують пірометричні перетворювачі повного випромінювання термоелектричні (ППТ) і часткового випромінювання фотодіодні – кольорові (ПЧД), вторинні вимірювальні перетворювачі (ПВ), монтажну та захисну арматуру, що забезпечує кріплення і нормальні умови експлуатації пірометричних перетворювачів. Номінальний діапазон вимірювання температури для комплексу з пірометричним термоелектричним перетворювачем повного вимірювання (ППТ) складає  $30 \div 2500$  °С, а з пірометричним перетворювачем часткового випромінювання фотодіодним (ПЧД) складає  $450 \div 2500$  °С. Основна наведена похибка не перевищує  $\pm 1,5$  % від верхньої межі вимірювання.

Швидкодія пірометричних перетворювачів, яка визначається як час від початку опромінення до моменту, коли значення сигналу на виході ПВ досягне 98 % від максимального значення даної температури, для ППТ складає не більше 2 с, а для ПЧД – не більше 0,05 с (в комплекті з ПВ). Вторинні вимірювальні перетворювачі мають на виході сигнали постійного струму  $0 \div 5$  чи  $4 \div 20$  мА і напруги постійного струму  $0 \div 100$  мВ чи 10 В. до складу вторинного перетворювача у різних сполученнях можуть входити: блок живлення; проміжний перетворювач; блок запам'ятовування, що забезпечує запам'ятовування максимального значення вимірюваної температури; блоки вихідного підсилювача, індикації і лінеаризації.

Конструкція перетворювачів ППТ і ПЧД єдина. Зручність монтажу забезпечується циліндричною формою корпусу і роз'ємним з'єднанням електричних кіл. Вторинні перетворювачі конструктивно оформлені у прямокутному корпусі, де розташовуються функціональні блоки. У залежності від кріплення ПВ бувають двох модифікацій: умонтовані ПВВ і настінні ПВН. В якості винесених, що показують, і самописних приладів можуть бути використані міліамперметри і вольтметри з уніфікованими вхідними сигналами.

*Вимірювальні перетворювачі інфрачервоного випромінювання серії THERMALERT* це комплексні мініатюрні пристрої, призначені для вимірювання температури достатньо у широкому діапазоні від (-40) до 2000 °С. Відносна похибка вимірювання температури не перевищує  $\pm 2$  %.



Принцип дії ґрунтується на вимірюванні енергії інфрачервоного випромінювання об'єкта, що проходить крізь оптичну систему перетворювача і передає на його приймач, перетворенні цієї енергії у вихідний сигнал, пропорційний температурі об'єкта. Мініатюрний чутливий елемент, що сприймає випромінювання об'єкта, умонтований в міцний корпус з нержавіючої сталі. З метою використання перетворювача в умовах підвищених температур середовища корпус може бути виготовлений у виконанні з системою охолодження – водяного чи повітряного. Завдяки однаковому з термоелектричними термометрами (термопарами) внутрішньому опорі, що дорівнює  $50 \text{ Ом}$ , – перетворювачі THERMALERT дозволяють проводити точні вимірювання без введення поправочних коефіцієнтів.

Датчик “THERMALET-MI” комплектується у систему “THERMALET-MID”, до складу якої входить мініатюрний вимірювальний електронний блок, за допомогою якого можна здійснювати: регулювання з кроком  $0,01$  коефіцієнту випромінювання, фіксацію пікових значень і розрахунок середньої температури, обирати перемиканням будь-який вихідний сигнал (струмовий чи сигнал термопар). Перетворювачі “THERMALERT CI” розраховані на ударне навантаження до  $50 \text{ г}$  у часі  $11 \text{ мсек}$  по будь-якій осі і вібраційне навантаження до  $3 \text{ г}$  по будь-якій осі частотою до  $200 \text{ Гц}$ .

Усі перетворювачі мають можливість підключення за 4-х провідною схемою до монітора “THERMALERT GP MONITOR”. Монітор має великий 4-х символний СИ дисплей, пристрій з таймером для обробки сигналу з метою розрахунку пікових і середніх поточних значень температури, сигналізатор на два діапазони, контакти якого розраховані для керування додатковими реле на струм до  $3 \text{ А}$  та блок живлення  $24 \text{ В}$  для забезпечення живлення зовнішніх датчиків напругою  $24 \text{ В}$  постійного струму. Вихідний сигнал –  $4 \div 20 \text{ мА}$ , чи сигнал з НСХ J, K, E, N, R, S, T термопар.

## **2.6. ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ І ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РЕЧОВИН**

У багатьох галузях промисловості проведення технологічних процесів пов'язано з отриманням і переробкою різних газоподібних і рідких речовин. Ці речовини ( сировина, проміжні і цільові продукти) характеризуються різними показниками за якими оцінюють якість відповідних речовин. Безперервність і висока швидкість тех-

нологічних процесів несумісні з відносною повільністю лабораторного аналізу, особливо для великотоннажних виробництв. У цих виробництвах запізнення в отриманні результатів аналізу може привести не тільки до суттєвої знижки економічної ефективності, але і до розладнання усього виробничого процесу. Тому для впевненого керування технологічним процесом необхідні засоби автоматичного безперервного діючого контролю, що дозволяють отримувати значення показників складу і якості речовин з мінімальним запізненням.

Значну роль засоби автоматичного контролю відіграють у виробництвах, де шкідливі (токсичні) викиди речовин з газовими чи рідинними сумішами можуть суттєво вплинути на загальний стан персоналу та навколишнього середовища, або привести до утворення вибухонебезпечних газових сумішей. Наявність шкідливих речовин у повітрі робочої (промислової) зони регламентована Держстандартом, згідно якого склад цих речовин не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ПДК). Відомості по ПДК для деяких шкідливих речовин у повітрі робочої зони наведені у табл. 2.9.

Автоматичний промисловий контроль в деякій мірі полегшується, якщо наперед відомий загальний склад речовин і потрібно визначити величину одного чи декількох компонентів, склад яких може коливатися у достатньо вузьких межах. Найчастіше поточному контролю підлягають рідини і газові суміші. При контролі рідин звичайно доводиться визначати концентрацію розчину чи величину фізичного (фізико-хімічного) параметра, що характеризує якість рідини. Аналіз газових сумішей, як правило, зводиться до визначення складу одного чи двох компонентів у об'ємних долях (процентах). Порівняно рідше необхідний повний аналіз складної газової суміші. Прилади для визначення складу називаються аналізаторами. Аналізатори, що призначені для визначення складу тільки одного компонента у суміші, прийнято іноді називати концентратомірами. Далі розглянуті окремі методи і прилади, що знайшли широке застосування у промисловості для визначення складу і показників якості газів і рідин.

**Термомагнітні газоаналізатори**, що виготовляються промисловістю, застосовуються в основному для вимірювання концентрації кисню.

Таблиця 2.9.

Гранично-припустимі концентрації шкідливих речовин  
у повітрі робочої зони.

Найменування речовини	Величина ПДК <sub>3</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Переважаючий агрегатний стан в умовах виробництва	Клас небезпечно-сті	Особливості дії на організм
1	2	3	4	5
Азоту двооксид	2	П	III	0
Азоту оксиди (у перерахунку на NO <sub>2</sub> ), оцтова кислота	5	П	III	0
Акриламід +	0,2	П	II	
Аміак, нафталін	20	П	IV	
Аміачно - карбамідне добриво	25	П + а	IV	
Амонію хлорид	10	а	III	
Амофос + (суміш моно- і диамоній фосфатів), вапняк	6	а	IV	Ф
Ангідрид фосфорний, сірчаний +	1	а	II	
Ангідрид сірчистий	10	П	III	
Анілін +	0,1	П	II	
Ацетон	200	П	IV	
Бензин (розчинник паливний), ізобутилен, пропілен	100	П	IV	
Бутан, гексан	300	П	IV	
Вінілу хлорид	5/1	П	I	
Водень фтористий (у перерахунку на F)	0,5/0,1	П	I	0
Вуглецю оксид	20	П	IV	0
Диметиламін +	1	П	II	
Дифторхлорбромметан (фреон 12В1), спирт етиловий	1000	П	IV	
Дифторхлорметан (фреон 22), дифторхлоретан (фреон 142), дифторетан (фреон 152)	3000	П	IV	
Кислота азотна	2	а	III	

Продовження табл. 2.9

1	2	3	4	5
Поліетилен	10	а	IV	
Сірководень +	10	а	П	0
Хлор +	1	П	П	0
Формальдегід +	0,5	П	П	0, А
Фенол	0,3	П	П	

Примітка: П пари і/чи газу; а – аерозоль; (а + П) – суміш пари і аерозолю; “+” – потрібний спеціальний захист шкіри і очей; 0 – речовина з гостроспрямованим механізмом дії, вимагаючий автоматичного контролю за їх складом у повітрі; А – речовини, що здатні викликати алергічні захворювання у виробничих умовах; К – канцерогени; Ф – аерозолі переважно фіброгенної дії, якщо у графі дві цифри, то це означає, що у чисельнику максимальна, а у знаменнику – середньомісячна ПДК.

Магнітні властивості газів характеризуються об’ємною магнітною сприйманістю  $\chi$ , що представляє собою коефіцієнт пропорційності поміж намагнічуваністю  $I$  одиниці об’єму газу і напруженістю  $H$  магнітного поля у цьому об’ємі, тобто

$$I = \chi H \quad (2.54)$$

Об’ємна магнітна сприйманість, що віднесена до густини газу  $\rho$ , називається питомою магнітною сприйманістю і позначається  $\lambda$ .

$$\lambda = \chi/\rho \quad (2.55)$$

За своїми магнітними властивостями газу поділяються на парамагнітні ( $\chi > 0$ ) і діамагнітні ( $\chi < 0$ ). Парамагнітні газу втягуються у магнітне поле, а діамагнітні виштовхуються з нього. Кисень володіє парамагнітними властивостями, але з підвищенням температури магнітні властивості кисню зменшуються. Магнітна сприйманість суміші газів визначається як сума добутків магнітної сприйманості окремих компонентів  $\chi_i$  на їх відносну об’ємну концентрацію  $a_i$ .

$$\chi = \sum_{i=1}^n \chi_i a_i \quad (2.56)$$

Кисень володіє найбільш високими магнітними властивостями, а його магнітна сприйманість у порівнянні з іншими газу на два-

три порядки вище. Тому магнітна сприйманість газової суміші, що містить кисень, головним чином визначається відсотковим складом у ній кисню. Досить важко провести вимір безпосередньо магнітної сприйманості газової суміші зважаючи на її мале абсолютне значення, тому вимірювання здійснюється побічними методами, з яких найбільше розповсюдження отримав *термомагнітний метод*, оснований на використанні зміни об'ємної магнітної сприйманості кисню при зміні температури. В основі термомагнітного метода лежить явище термомагнітної конвекції, суть якого у наступному. Якщо нагрітий електричним струмом провідник помістити у неоднорідне магнітне поле, то внаслідок зменшення об'ємної магнітної сприйманості кисню, обумовленою нагріванням газової суміші поблизу провідника, утворюється рух газової суміші у напрямку від більших напруженостей магнітного поля до менших, тобто виникає вимушений потік газової суміші, у якому нагріта газова суміш безперервно витискується холодною сумішшю. Потік, що утворюється і називають потоком *термомагнітної конвекції*.

*Термомагнітні газоаналізатори ГТМК-18, ГТМК-18В* призначені для безперервного вимірювання і видачі на вимірювальні і реєструючі прилади інформації про об'ємну долю кисню ( $\% O_2$ ) у двохкомпонентних газових сумішах: кисень – азот (можлива наявність другого не вимірюваного компонента – чи водню, чи диоксиду вуглецю, чи метану), кисень – аргон, кисень – гелій, кисень – диоксид вуглецю, кисень – метан, кисень – водень (з об'ємною долею кисню до 2% у водні чи метані).

До складу газоаналізатора входять: первинний перетворювач ПП-16 чи ПП-16В, перетворювач ПРП-18 та комплект запасних і монтажних частин з пневматичною панеллю.

Принцип дії газоаналізатора оснований на термомагнітному методі вимірювання, що використовує залежність парамагнітних властивостей кисню від температури. Перетворювачем об'ємної долі кисню в аналізованій газовій суміші у пропорційний сигнал напруги постійного струму є камера первинного перетворювача (див. рис. 2.74). Камера має кільцевий канал 3, по діаметру якого розташований чутливий елемент 2, виконаний у вигляді скляної трубки з намотаним на неї двохсекційним опором  $R_1^*$  і  $R_2^*$ . Чутливий елемент знаходиться у неоднорідному магнітному полі, яке утворюється постійним магнітом 1. Секції чутливого елемента включені за схемою неврівноваженого електронного моста  $R_1^*$ ,  $R_2^*$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , жив-

лення якого здійснюється постійною стабілізованою напругою ( $U_{жив}$ ).

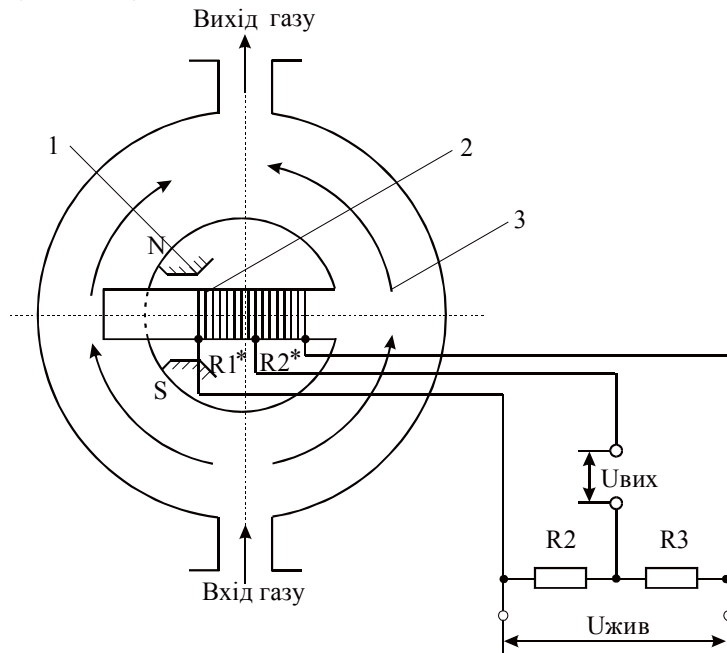


Рис. 2.74. Принципова схема перетворювача ПП-16:  $R_1^*$ ,  $R_2^*$  - опори секцій чутливого елемента,  $R_2$ ,  $R_3$  - опори плеч моста; 1 - постійний магніт; 2 - чутливий елемент; 3 - кільцевий канал.

аналізуемій газовій суміші. Потік газу, що виникає у трубці, спричиняє охолодження першої секції  $R_1^*$  у більшій мірі, ніж другої  $R_2^*$ . Зміна температури секцій призводить до зміни їх опорів, а отже, до розбалансу електричного моста. Величина розбалансу пропорційна об'ємній долі кисню у суміші, яка потім надходить у вигляді електричного сигналу ( $U_{вих}$ ) до попереднього перетворювача. Загальна функціональна структура газоаналізатора представлена на рис. 2.75.

Основне функціональне призначення пристроїв, що входять до складу ГТМК-18 (див. рис. 2.75.): 1 - вимірювач об'ємної долі кисню, що призначений для перетворення фізичного параметра об'ємної долі кисню в аналізованому газі у електричний сигнал; 2 - попередній перетворювач, що призначений для перетворення електричного сигналу  $0 \div 3,3 \text{ мВ}$  чи  $0 \div 10 \text{ мВ}$  і трансляції його по кабелю зв'язку з ПП-16 до ПРП-18; 3 - пристрій цифрової індикації і сигналізації, призначений для відбиття у цифровій формі результатів вимірювання і для сигналізації про відхилення об'ємної долі кисню в аналізованій газовій суміші за установлені межі; 4 - джерело стабілі-

Аналізуєма суміш з невідомим вмістом кисню надходить у камеру. Внаслідок різниці парамагнітних властивостей складових, кисень з частиною газу втягується у магнітне поле по трубці чутливого елемента. У магнітному полі цей газ прогривається чутливим елементом ( $R_1^*$ ,  $R_2^*$ ), його парамагнітні властивості зменшуються і він виштовхується більш холодним газом. У трубці чутливого елемента утворюється потік газу, величина якого залежить від об'ємної долі кисню в

зованої напруги, призначене для живлення стабілізованою напругою блоків, пристроїв і перетворювачів газоаналізатора; 5 – пристрій термостатування, призначений для підтримки температури на рівні  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  усередині первинного перетворювача; 6 – калібратор, призначений для перетворення електричного сигналу  $0 \div 1\text{ мА}$  у  $0 \div 1\text{ В}$  чи  $0 \div 100\text{ мВ}$  для видачі його на реєструючі пристрої і на пристрої цифрової індикації та сигналізації; 7 – пристрій контролю, корекції і керування, призначений для контролю роботи вузлів газоаналізатора, корекції значень границь діапазону вимірювань і керування режимами роботи та колами сигналізації газоаналізатора; 8 – додатковий перетворювач, призначений для перетворення сигналу  $0 \div 1\text{ В}$  у гальванічно розділений сигнал  $0 \div 5\text{ мА}$ , передачі його на більшу відстань (до  $300\text{ м}$ ) і інформаційного зв'язку з іншими приладами.

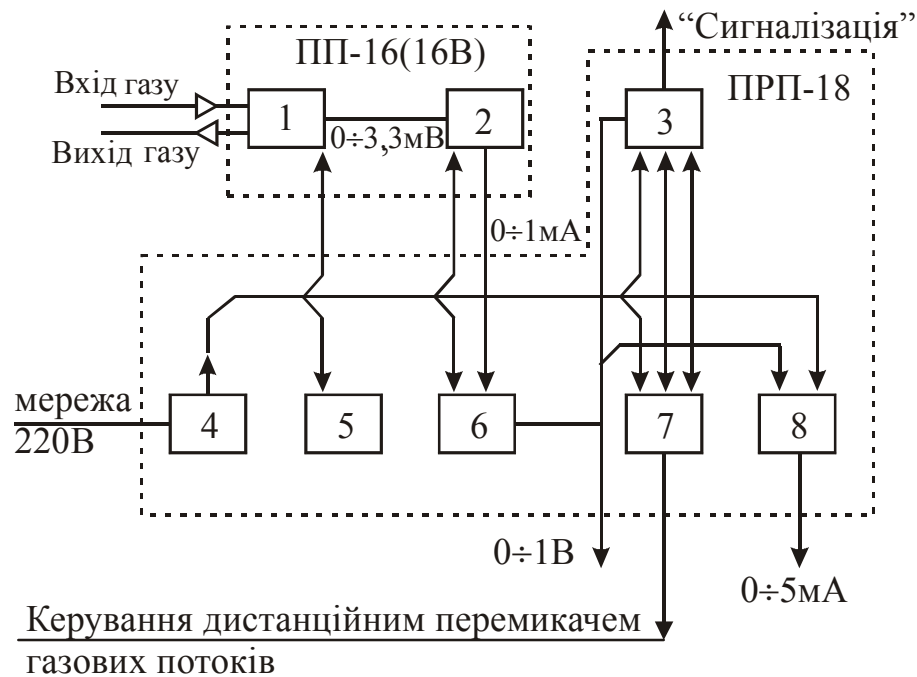


Рис .2.75. Функціональна схема газоаналізатора ГТМК-18.

Перетворювачі ПП-16 і ПРП-18 з'єднуються поміж собою кабельними лініями зв'язку. Конструктивно зовні перетворювач ПП-16 (див. рис. 2.76) представляє собою основу 1, на якій змонтовані рівень 2 для установки перетворювача у робоче положення при монтажі, роз'єм 3 для з'єднання з перетворювачем ПРП-18, гвинт 4 підключення заземлення, штуцери 5 і 6 відповідно входу і виходу газу. При цьому основа 1 кріпиться до кронштейну 7 за допомогою трьох бовтів 8 і має можливість при послаблених бовтах змінювати своє

положення відносно кронштейна під час налагоджування газоаналізатора. Вся конструкція з тильного боку закрита ковпаком 9.

Усі деталі перетворювача ПРП-18 конструктивно поміщені у каркас і захищені стінками. На передній панелі 1 розташовані (див. рис. 2.77): кнопка 2 перемикач повірочних газових сумішей; кнопка 3 вмикання газоаналізатора у мережу; кнопка 4 вмикання настройки сигналізуючого пристрою нижньої границі діапазону вимірювань “мало”; вісь резистора 5 настройки сигналізуючого пристрою “мало”; світлодіодні цифрові індикатори 6 шкали пристрою цифрової індикації, що відбивають відомості про об’ємну долю кисню у відсотках у газовій суміші чи про настройку “мало” або “много” норми при натиснутій відповідній кнопці; вікно світлодіодів 7, за якими розташовані світлодіодні індикатори, сигналізуючі про спрацьовування кіл сигналізації; вісь резистора 8 настройки сигналізуючого пристрою “много”; кнопка 9 вмикання настройки сигналізуючого пристрою верхньої границі діапазону вимірювань “много”; світлодіод 10, сигналізуючий про наявність напруги живлення у блоці ПРП-18; планка 11, що закриває світлодіодні сигналізатори (ФОР – сигналізуючий про роботу форсуючого нагрівача, ОСНОВ – сигналізуючий про роботу основного нагрівача і органів підстройки; ЧУВСТВ – установки чутливості газоаналізатора і УСТ “0” – установка нуля); кнопки керування (РОЗІГРІВ – призначені для вмикання газоаналізатора у режим “розігрівання”, КОНТРОЛЬ – призначена для переключення газоаналізатора у режим “контроль” при контролі показань по повірочним газовим сумішам ПГС I і ПГС II).

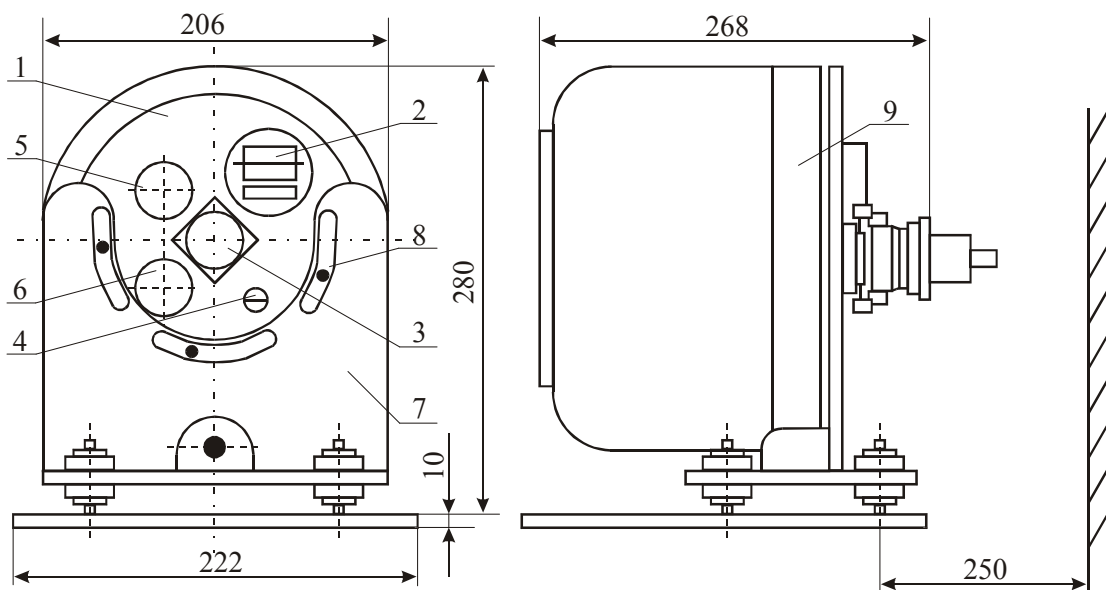


Рис. 2.76. Загальний вигляд і габаритні розміри первинного перетворювача ПРП-16.



Для контролю за параметрами газових сумішей на вході у первинний перетворювач використовується пневматична панель. При цьому параметри газової суміші на вході у панель повинні бути такими: тиск від 20 до 500 кПа; витрата газу від 15 до 130 л/год; масова концентрація завислих твердих частинок не більше 2 г/м<sup>3</sup>; вміст мінеральних мастил у виді пари не більше 1,5·10<sup>-3</sup> г/м<sup>3</sup>; температура від (-10) до 50 °С. Конструкція пневматичної панелі представлена на рис. 2.78.

На плоскій передній панелі установлені: штуцери “Вхід газу”, “Вихід газу”, “до приладу”, “від приладу” для приєднання зовнішніх металевих трубок (Ø6×1) до перетворювача ПП-16; елементи керування, до яких входять опір (загальний потік газу) 4, вентиль 8 (витрата після стабілізатора витрати), стабілізатора витрати газу 6 і стабілізатор тиску 1; індикатори витрати 5 і 7; фільтр 3 візуального контролю якості чистоти аналізованого газу; заглушки 2, 9 контрольних точок КТ2, КТ1 витрати.

Клас точності газоаналізатора: 6 – для діапазонів вимірювання 0 ÷ 1, 0 ÷ 2 і 95 ÷ 100 %об; 4 – для усіх інших діапазонів вимірювання.

*Термомагнітний газоаналізатор кисню МИК-М* призначений для визначення парціального тиску чи об’ємної долі (% об) кисню у газовій суміші і повітрі. Конструктивно газоаналізатор виготовлений у моноблоковому виконанні. Показання відбиваються на цифровому індикаторі. Газоаналізатор має уніфікований аналоговий вихідний сигнал 0 ÷ 10 В, що дозволяє застосовувати його у системах автоматичного регулювання. На лицьову панель виведені світлодіодні індикатори сигналізації установлених мінімальної і максимальної границі об’ємної концентрації кисню.

Основні технічні характеристики: діапазон вимірювання 0 ÷ 100 % об. чи 0 ÷ 106,7 кПа; відносна похибка вимірювання складає  $\pm(0,15 \pm 0,01a)$ , де  $a$  – концентрація вимірюваного компонента. Умонтований у прилад спонукач витрати забезпечує витрату газової проби у межах від 70 до 130 л/хвил.

*Магнітопневматичні газоаналізатори ОКСИД 111 і ОКСИД 103* призначені для безперервного вимірювання об’ємної долі кисню у багатокомпонентних і забруднених газових сумішах, що містять вибухонебезпечні і агресивні гази. Основні технічні характеристики приладів наведені у табл. 2.10.

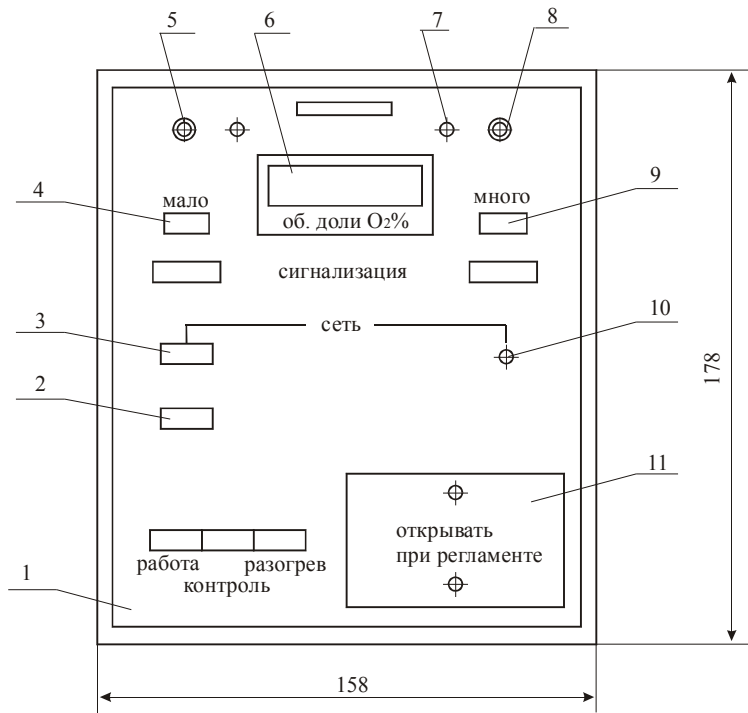


Рис. 2.77. Загальний вигляд і габаритні розміри перетворювача ПРП – 18 (довжина 322 мм).

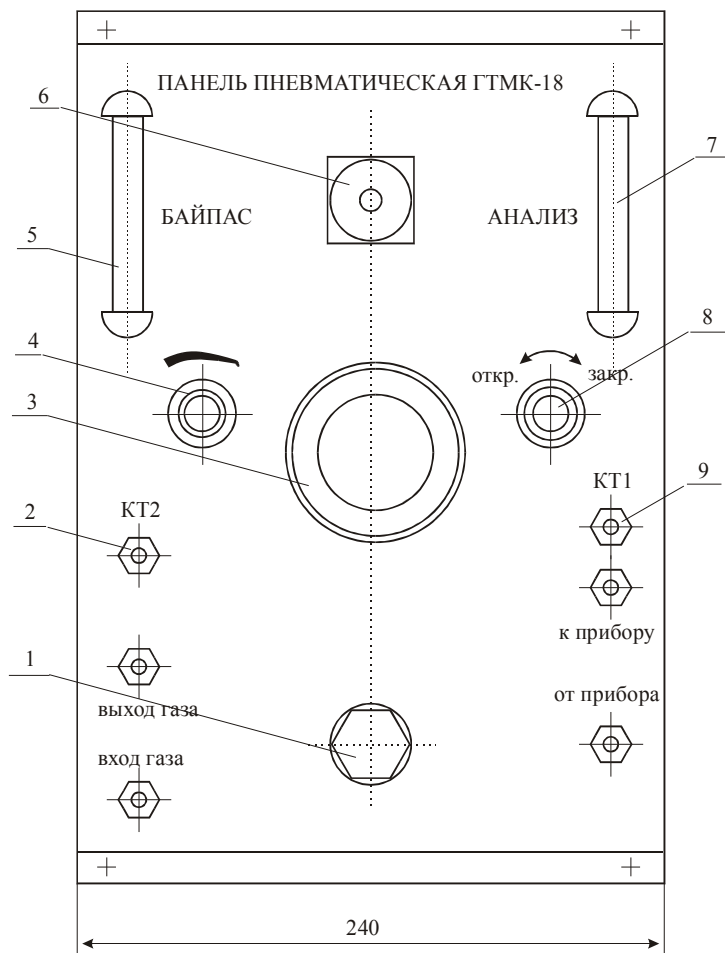


Рис. 2.78. Загальний вигляд і габаритні розміри пневматичної панелі (довжина 175 мм).

Принцип дії оснований на парамагнітних властивостях кисню, згідно якого молекули кисню у неоднорідному магнітному полі рухаються у напрямку ділянки з більш високою напруженістю. За на-

явності порівнювального (еталонного) газу і змішувані його з аналізуємим газом, що вміщує кисень, в області магнітного поля утворюється перепад тиску поміж цими двома газами. Перепад тиску вимірюється за допомогою чутливого елемента потоку газу, значення якого є мірою величини концентрації кисню в аналізуємому газі. При цьому здійснюється цифрова індикація вмісту кисню. Невимірювані компоненти не впливають на результати вимірювання. Прилад ОКСИД111 має вибухозахищене виконання.

Таблиця 2.10.

Основні технічні характеристики  
газоаналізаторів типу ОКСИД.

Найменування показника	ОКСИД-103	ОКСИД-111
Діапазон вимірювання, %об.	0÷1; 0÷2; 0÷5; 0÷10; 0÷25; 0÷50; 0÷100; 20÷22; 16÷26; 95÷100; 90÷100; 80÷100; 98÷100; 50÷100	0÷1, 0÷2, 0÷5, 0÷10, 0÷21
Основна похибка припустима: -абсолютна, %об.	$\pm(0,06+0,03a)$ – для діапазонів 0÷1, 0÷2, 0÷5, 0÷10, 0÷25, 0÷50, 0÷100; $\pm 0,12$ -для діа- пазонів 20÷22 ; $\pm 0,4$ - для діапазонів 16÷26; $\pm(0,06+0,03(100-a))$ – для інших діапазонів	-
-наведена, %об.	-	$\pm 6$ -для діапазонів 0÷1, 0÷2; $\pm 4$ -для інших діа- пазонів
Вихідні сигнали	Гальванічно розділений будь-який із наступних: 0÷100 мВ, 0÷1В, 0÷5В, 0÷10В, 0÷5 мА, 0(4)÷20 мА	
Примітка: а – вимірюване значення об'ємної долі (%)кисню		

**Термокондуктометричні газоаналізатори** застосовуються в основному для вимірювання концентрації  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $Cl_2$ ,  $Ar$  і  $NH_3$ . Термокондуктометричний метод аналізу газів передбачає використання залежності теплопровідності аналізуємої газової суміші

від вмісту у ній алізуємого газового компонента, теплопровідність якого повинна значно перевищувати теплопровідність будь-якого іншого компонента суміші. При цьому теплопровідність газової суміші  $\lambda_{см}$  [ $Вт/(м \cdot К)$ ] визначається рівнянням:

$$\lambda_{см} = a_B \lambda_B + (1 - a_B) \lambda_{HK}, \quad (2.57)$$

де  $a_B$  – концентрація визначаємого компонента;  $\lambda_{HK}$  – теплопровідність суміші не вимірюваних компонентів;  $\lambda_B$  – теплопровідність вимірюваного компонента.

У якості чутливих елементів у термокондуктометричних газоаналізаторах використовуються найчастіше платинові чи мідні терморезистори, які поміщують у камеру з аналізуємою газовою сумішшю і нагрівають електричним струмом. Зміна концентрації вимірюваного компонента у суміші змінює теплопровідність суміші, що призводить до зміни умов тепловіддачі від терморезистора, а отже, і до зміни його температури і опору. Таким чином, опір чутливого елемента (терморезистора) буде однозначно визначати зміну концентрації вимірюваного компонента в аналізуємії газовій суміші. Закономірності, що зв'язують теплопровідність газової суміші з її складом, виявляються за умов зведення до мінімуму або підтримкою на постійному рівні долі теплоти від терморезистора, передаваних конвекцією і випромінюванням. Цього досягають визначеним режимом роботи терморезистора, вибором його конструктивних характеристик і камери, обмеженням робочої температури терморезистора. У термокондуктометричних приладах застосовується спосіб відносного вимірювання шляхом порівняння теплопровідності аналізуємої газової суміші з теплопровідністю еталонної суміші постійного складу чи повітря. У табл. 2.11 наведені абсолютні і відносні значення коефіцієнта теплопровідності деяких газів при температурі  $0^\circ\text{C}$  і тиску  $0,1 \text{ МПа}$ .

Для багатоконпонентних газових сумішей залежність сумарної теплопровідності від концентрації компонентів визначається неоднозначно, тому використати метод вимірювання теплопровідності для аналізу таких сумішей можливо лише за умов постійності співвідношення концентрацій компонентів суміші.

Різноманітність вище наведених умов вимірювання обумовлює застосування різних вимірювальних схем. Найчастіше використову-

ються у газоаналізаторах прямі і диференційні мостові схеми (див. рис. 2.79).

Таблиця 2.11.

Коефіцієнти теплопровідності деяких газів,  $\kappa\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ 

Газ	$\lambda_B$	$\lambda_B/\lambda_{\Pi}$	Газ	$\lambda_B$	$\lambda_B/\lambda_{\Pi}$
Азот	23,72	0,996	Оксид вуглецю	22,94	0,965
Аміак	21,33	0,879	Сірчистий ангідрид	8,17	0,344
Водень	169,6	7,13	Сірководень	12,79	0,538
Повітря	23,78	1	Диоксид вуглецю	14,59	0,614
Диоксид азоту	42,71	1,796	Хлор	7,65	0,322
Кисень	24,16	1,016			
Метан	31,38	1,32			
Примітка: $\lambda_{\Pi}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря			Водяна пара (при 100 °С)		
			23,15		
			0,973		

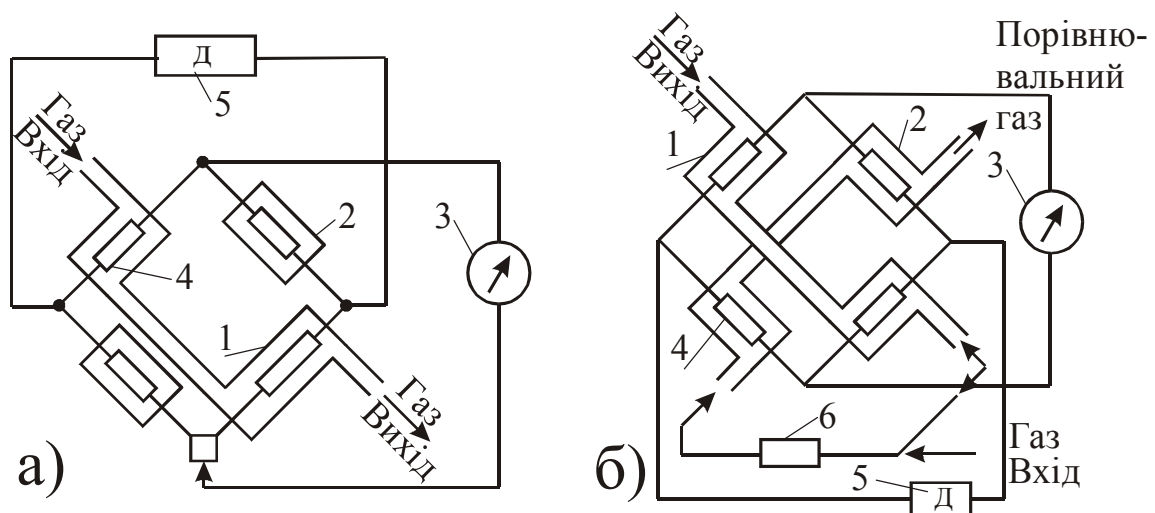


Рис. 2.79. Вимірювальні мостові схеми термокондуктометричних газоаналізаторів: а – прямого вимірювання; б – диференціальна; 1 – вимірювальна камера; 2 – порівнювальна камера; 3 – вторинний прилад; 4 – чутливий елемент; 5 – джерело живлення; 6 – піч дожигання чи поглинач.

За схемою прямого вимірювання відносної теплопровідності аналізуєма газова суміш проходить крізь дві вимірювальні камери з терморезисторами. У двох порівнювальних камерах резистори герметично закриті і заповнені газом постійного складу. Іноді порівнювальні резистори мостової схеми виконують з термоне залежних магнітних обмоток. За схемою диференційного вимірювання аналізуєма газова суміш проходить крізь вимірювальні камери, а також, після попереднього усунення з неї контролюємого компонента у печі до-

жигання або поглиначі за межами газоаналізатора, у порівнювальній камері і виконує функції порівнювального газу. Із зміною вмісту контролюємого компонента у вимірювальній діагоналі моста виникає напруга розбалансу, пропорційна його вмісту.

*Перетворювачі типу ДИСК* призначені для безперервного вимірювання одного чи двох компонентів у газових сумішах і застосовуються у системах автоматичного контролю та керування технологічними процесами виробництва мінеральних добрив, сірчаної кислоти, зв'язаного азоту, кріогенних холодильних установках отримання аргону і т. ін. У табл. 2.12 наведені основні характеристики цих перетворювачів.

Таблиця 2.12.  
Технічні характеристики перетворювачів типу ДИСК.

Тип приладу	Визначас- мий компо- нент	Газова суміш у якій визна- чається компонент	Діапазон вимірюван- ня, %об.	Основна похиб- ка, % від діапа- зону вимірю- вання
1	2	3	4	5
ДИСК 101	Водень	Суміш водню з аміаком	0 ÷ 1	±10
ДИСК 102	Аміак	Суміш аміаку і азотоводне- вої суміші із співвідношен- ням 1:3	30 ÷ 90	±4
ДИСК 103	Аргон	Суміш аргону з азотом (по- вітрям, киснем)	0 ÷ 20	±4
ДИСК 104			0 ÷ 40	
ДИСК 106			60 ÷ 100	
ДИСК 107	Сірчистий ангідрид	Суміш сірчистого ангідриду з азотом (повітрям). Припу- стимий вміст диоксиду вуг- лецю від 0 до 1%об, оксиду вуглецю від 0 до 10%об.	0 ÷ 10	±2,5
ДИСК 108		Суміш сірчистого ангідриду з азотом (повітрям). Припу- стимий вміст диоксиду вуг- лецю від 0 до 3%об.	0 ÷ 20	±4
ДИСК 201	Водень (1-й діапазон)	Суміш водню (0 ÷ 5%об), азоту (0 ÷ 15%об) і аргону (залишок)	0 ÷ 5	±4
	Аргон (2-й діапазон)		80 ÷ 100	±5

Продовження табл. 2.12

1	2	3	4	5
ДИСК 301	Аміак (1-й діапазон)	Суміш аміаку (0 ÷ 15%об), водню (50 ÷ 80%об) і азоту (залишок)	0 ÷ 15	±4
	Водень (2-й діапазон)		50 ÷ 80	
ДИСК 302	Аміак (1-й діапазон)	Суміш аміаку (0 ÷ 25%об), водню (50 ÷ 80%об) і азоту (залишок)	0 ÷ 25	±4
	Водень (2-й діапазон)		50 ÷ 80	

Конструктивно перетворювач виконаний у вигляді двоблокового пристрою, що вміщує у собі вимірювальний і електронний блоки. Відстань між блоками не повинна перевищувати 300 м. Вихідний сигнал перетворювача аналоговий постійного струму  $0 \div 5$  мА і  $0 \div 10$  В. Об'ємна витрата аналізованої газової суміші через прилад до 10 л/хвил з тиском  $90 \div 105,3$  кПа.

**Термохімічні газоаналізатори** найчастіше застосовуються у якості сигналізаторів та індикаторів до вибухових концентрацій горючих газів і парів у повітрі. Термохімічний метод вимірювання концентрації газів ґрунтується на вимірюванні корисного теплового ефекту хімічних реакцій, що протікають у присутності каталізатора. Найбільше розповсюдження отримали схеми, у яких використовується реакція окислення (горіння). При цьому, схеми побудови термохімічних газоаналізаторів розподіляють на два типи. До першого типу відносяться схеми, у яких реакція горіння з виділенням тепла протікає на каталізаторі у вигляді платинової ниті. Остання служить одночасно і чутливим елементом вимірювальної схеми. Вимірювальна схема цього типу газоаналізаторів становить собою невірноважений міст постійного чи змінного струму. Проточна вимірювальна ячейка (робоча ячейка) утворює одне з плеч моста. Порівнювальна камера, що утворює друге (суміжне) плече моста, еквівалентне за параметрами і конструкцією робочій і заповнена повітрям. Інші плечі моста є постійними резисторами і виконані з манганіну. При зміні електричного опору платинової ниті у робочій камері з підвищенням температури внаслідок згоряння аналізованого компонента порушується рівновага мостової схеми. Сила струму розбалансу буде пропорційна вмісту аналізованого компонента у газовій суміші. До другого типу відносяться схеми, у яких реакція протікає на насипному каталізаторі, а корисний тепловий ефект реакції вимірюється термо-

чутливими елементами (термоелектричні батареї і термопари). У якості каталізатора звичайно використовують металеву пластину, що нанесена на поверхні пористого носія, або гапколіт (60 %  $\text{MnO}_2$  + 40%  $\text{CuO}$ ). Електрична схема цього типу газоаналізаторів наведена на рис. 2.80.

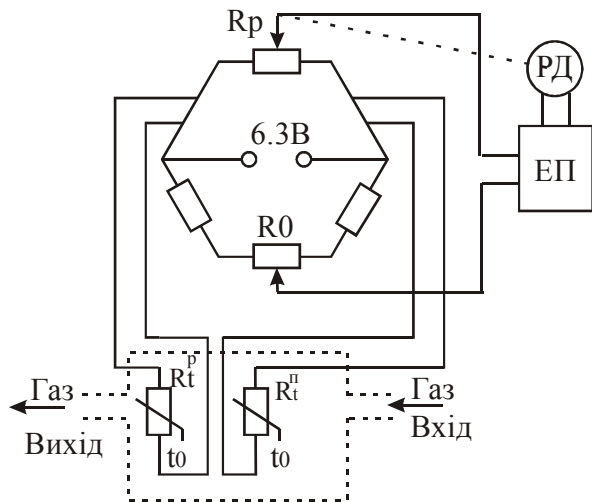


Рис. 2.80. Принципова електрична схема термохімічного газоаналізатора з насипним каталізатором.

Схема представляє собою врівноважений міст змінного струму, два плеча якого утворені робочим  $R_t^p$  і порівнювальним  $R_t^n$  термометрами опору. Інші плечі утворені постійним резисторами  $R_1$  і  $R_2$ . Резистор  $R_0$  служить для установки нуля. Робочий термоперетворювач  $R_t^p$  знаходиться у каталізаторі, порівнювальний  $R_t^n$  – у неактивній його масі. За відсутності у газовій суміші визначаемого компонента опір  $R_t^p$  і  $R_t^n$  знаходяться у зонах з однаковою температурою і моста схема врівноважена. При наявності у газовій суміші визначаемого компонента на каталізаторі протікає реакція з виділенням тепла, внаслідок чого температура каталізатора і термоопору  $R_t^p$  підвищується. Це призводить до підвищення величини опору  $R_t^p$ . У діагоналі моста виникає сигнал розбалансу, який викличе обертання реверсивного двигуна РД і зв'язаного з ним рухливого контакту регулювального резистора  $R_p$ . Переміщення рухливого контакту резистора  $R_p$  і зв'язаного з ним показчика вторинного приладу буде пропорційно вмісту компонента у суміші. Аналізуєий газ повинен бути очищеним від пилу, вологи, мастила, а також агресивних газів і парів ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , пари лугу та ін.) з метою запобігання отруєння каталізатора.

Термохімічний метод є універсальним і використовують його для визначення довибухових концентрацій понад 100 речовин. Газоаналізатори термохімічні промислові мають виконання як стаціонарне, так і переносне.

*Сигналізатори горючих газів і парів термохімічні безперервної дії одноканальні та багатоканальні ЩИТ-2 стаціонарні* призначені для видачі сигналів про перевищення установлених значень довибу-



хових концентрацій поодиноких горючих газів, парів горючих рідин і їх сукупності у повітрі виробничих приміщень у діапазоні сигнальних концентрацій  $5 \div 50$  % НКПР (нижня концентраційна межа розповсюдження полум'я) понад 100 горючих речовин. Окремі модифікації поставляються з уніфікованим вихідним сигналом  $4 \div 20$  мА. Спосіб подачі контрольованого середовища у датчик (ДТХ) сигналізатора може бути конвекційним (ДТХ-127) і примусовим (ДТХ-128).

Сигналізатори ЩИТ-2-1 і ЩИТ-2-2 складаються з блоку живлення та сигналізації БПС-127 і п'яти датчиків ДТХ-127 чи ДТХ-128. Сигналізатори ЩИТ-2-7 і ЩИТ-2-8 складаються з блоку живлення і сигналізації У-1 і одного датчика ДТХ-127 чи ДТХ-128. Датчики ДТХ-127 і ДТХ-128 мають вибухозахищене виконання з маркуванням 1ExdibIICT6 і нормальну ступінь механічної міцності. Повинні встановлюватись у місцях, де виключена можливість пошкодження вибухозахисного пористого ковпачка блоку чутливого елемента зверху. Кожний з блоків живлення і сигналізації виконаний з іскробезпечними входними каналами рівня "ів", мають маркування виду вибухозахисту ExibIICT6 і повинні встановлюватись зовні вибухонебезпечних зон. Сигналізатор, що укомплектований датчиком ДТХ-128, вимагає наявності у місці встановлення датчика лінії стислого повітря тиском  $0,25 \div 0,6$  МПа.

Загальний вигляд датчика ДТХ-127 з конвекційною подачею контрольованого середовища наведено на рис. 2.81.

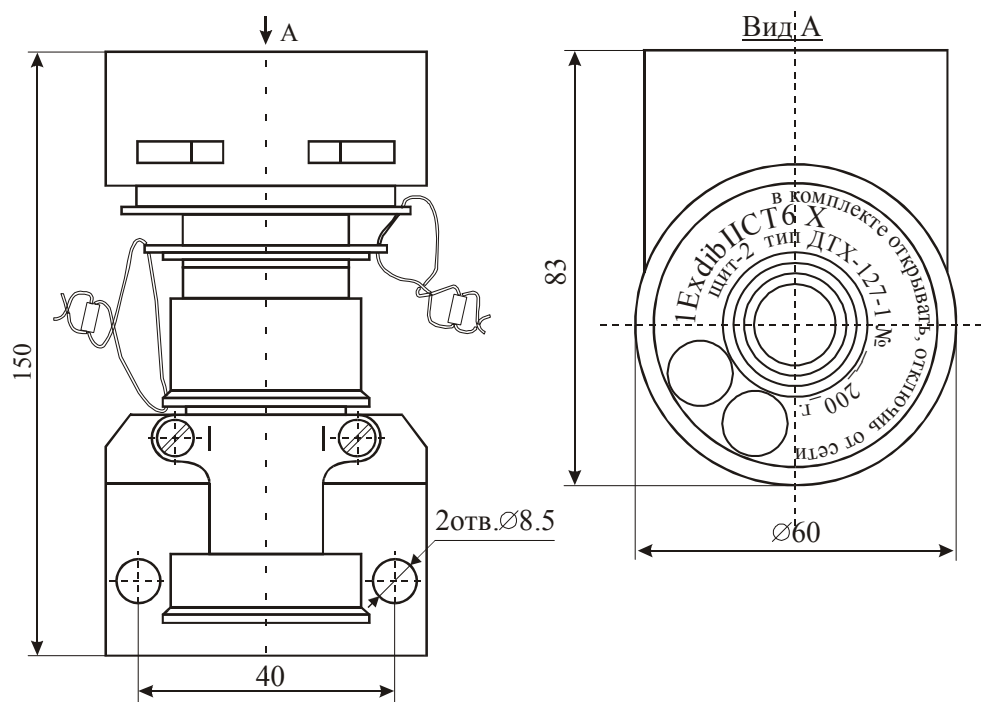


Рис. 2.81. Загальний вигляд і габаритні розміри датчика ДТХ-127.

Корпус датчика конструктивно виконаний у вигляді циліндру і складається з двох частин, з'єднаних різьбою. У верхній частині корпусу вклеєний металево – керамічний ковпачок. У корпусі також знаходиться обойма, в якій з одного боку розташовані гнізда для приєднання чутливих елементів, а з іншого боку – пелюстки для кріплення з'єднувальних проводів датчика з блоком БПС. У нижній частині корпусу розташований кронштейн для кріплення датчика з отворами кабельного вводу.

Потужність, що комутується по колам зовнішньої сигналізації ПОРІГ і ВІДМОВА, складає 88 ВА напруги 220 В частоти 50 Гц і 100 ВА при постійному струмі з напругою 30 В.

Межа припустимої основної абсолютної похибки сигналізатора  $\pm 5\%$  НПКР. Об'ємна витрата контрольованого середовища крізь датчик ДТХ-128 складає 25 л/год. Сигналізатор розрахований для роботи у наступних умовах: температура навколишнього контрольованого середовища від (-45) до 50 °С для ДТХ-127 і від 1 до 50 °С для блоків У, БПС-127, ДТХ-128; склад шкідливих речовин (фтор, хлор, сірка, фосфор, сурма, миш'як, тетраетилсвинець та їх з'єднання, пара мастила) у контрольованій газовій суміші не повинен перевищувати гранично припустимих концентрацій (ПДК).

*Сигналізатори типу СТХ-7М стаціонарні* призначені для безперервного автоматичного контролю довибухонебезпечних концентрацій поодиноких парів горючих рідин та їх сукупності у повітрі навколо технологічного обладнання при температурі не вище 200 °С. Сигналізатори випускаються у 8-ми модифікаціях і забезпечують сигналізацію про перевищення встановлених значень концентрацій, комутацію зовнішніх електричних кіл змінного та постійного струму, мають уніфікований вихід  $4 \div 20$  мА. Діапазон сигнальних концентрацій складає  $15 \div 50\%$  НПКР. Межа припустимої основної абсолютної похибки сигналізатора не більше  $\pm 7,5\%$  НПКР. Обидва стаціонарні прилади (ЩИТ-2 і СТХ-7М) мають два пороги спрацювання: попереджувальна і аварійна сигналізація.

*Сигналізатор типу ФОН-1 переносний* індивідуального користування є засобом автоматичного вимірювання і призначений для епізодичного контролю довибухонебезпечних концентрацій сукупності горючих газів і парів горючих рідин у повітрі виробничих приміщень і зовнішніх установок. Перелік контрольованих речовин: водень, бензин Б-70, ацетон, ацетилен, бензол, ефір етиловий, метан, метанол, пентан, пропан, пропілен, спирт етиловий, етилацетат, ети-

лен, ізопропіловий спирт, нефрас (А63/75, А65/75, А65/70). За побажанням замовника перелік контрольованих речовин може бути доповнений. Сигналізатор конструктивно представляє собою моноблок і має виконання із вмонтованим у корпус датчиком та з виносним датчиком. У приладі використовується епізодичний конвекційний відбір проби, здійснюється світлова сигналізація “ПОРІГ 1” при спрацьовуванні обмеження на рівні 20 % НКПР, та світлова і звукова сигналізація “ПОРІГ 2” при спрацьовуванні обмеження у настрюваному діапазоні 25 ÷ 45 % НКПР. Перевірка роботоздатності приладу проводиться натисканням контрольної кнопки. Живлення сигналізатора забезпечується від акумуляторів чи сухих батарей. При недостатній напрузі живлення вимикається світловий індикатор розряду. Межа припустимої основної абсолютної похибки складає  $\pm 5\%$  НКПР.

*Сигналізатор (експлозиметр) довибухонебезпечних концентрацій типу СТХ-17* – це портативний переносний автоматичний прилад вибухобезпечного виконання призначений для вимірювання вмісту у відсотках НКПР водню і метану, а також для контролю сукупності решти речовин у повітрі виробничих приміщень і зовнішніх установок. Цей прилад є експлозиметром і сигналізатором для водню і метану та сигналізатором для інших продуктів. СТХ-17 має дванадцять виконань у залежності від контрольованих компонентів, конструктивного оформлення і виду поставки.

Конструктивно СТХ-17 виконаний у вигляді моноблоку з чутливими елементами вмонтованими у корпусі або з виносним датчиком на мотузці. Живлення від акумуляторів чи сухих елементів. Спосіб подачі контрольованого середовища – конвекційний. Прилад оснащений рідкокристалічним цифровим індикатором рівня концентрації метану і водню у повітрі, має звукову і світлову сигналізацію, що спрацьовують при досягненні у контрольованій точці концентрації встановленого порогового значення. При розряді джерела живлення спрацьовує світлова сигналізація. Порогові значення мають два рівня: “ПОРІГ1” має постійне фіксоване значення 20 % НКПР; “ПОРІГ2” змінний і настрюється у діапазоні 25 ÷ 45 % НКПР. Діапазон вимірювання 0 ÷ 50% НКПР, а діапазон показань 0 ÷ 99 % НКПР. Межа припустимої абсолютної основної похибки повітряної речовини  $\pm 5\%$  НКПР.

**Електрохімічні газоаналізатори** найбільш широко застосовують для вимірювання мікро концентрацій токсичних речовин та ви-

бухонебезпечних газів у повітрі виробничих приміщень і зовнішніх технологічних установках різних галузей промисловості (газовій, нафтохімічній, хімічній, харчовій медичній та ін.).

Дія електрохімічних газоаналізаторів основана на зміні електричних властивостей чутливих елементів (провідники, напівпровідники, електроліти (при їх взаємодії з електрохімічно активними компонентами аналізованої суміші. Серед електрохімічних газоаналізаторів найбільше розповсюдження отримали кондуктометричні і полярографічні.

*Кондуктометричні газоаналізатори* основані на вимірюванні електричної провідності поглинальних розчинів, що селективно абсорбують вимірюваний компонент газової суміші. Кондуктометричні методи характеризуються безпосереднім контактом чутливого елемента з електродами вимірювальної ячейки. Кондуктометричні прилади не вимагають складних пристроїв, забезпечують безпосередній відлік показань, прості у виготовленні і експлуатації. На рис. 2.82 наведена типова схема кондуктометричного газоаналізатора.

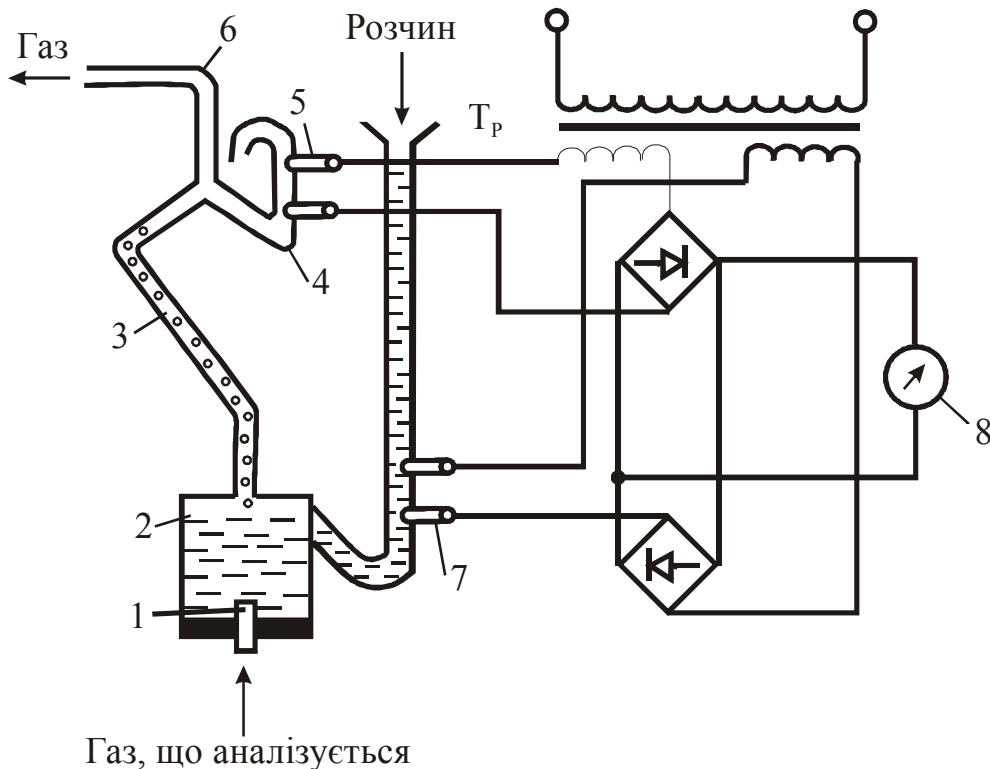


Рис. 2.82. Схема кондуктометричного газоаналізатора.

У відповідності зі схемою аналізований газ проходить крізь капілярну трубку 1 і прямує далі у реакційну ємність 2 та змійовик 3,

де визначаємий компонент абсорбується розчином електроліту, швидкість якого підтримується постійною. Потім розчин електроліту проходить крізь вимірювальну ячейку 4 з електродами 5, а газова фаза виводиться з газоаналізатора крізь трубку 6. Порівнювальні електроди 7 занурені у трубку, крізь яку надходить свіжий розчин електроліту до реакційної ємності 3. Отже, у газоаналізаторі вимірюється електрична провідність розчину електроліту до і після абсорбції компонента, що підлягає аналізу. Різниця значень електропровідностей перетворюється у напругу, яка вимірюється вторинним приладом 8 (потенціометром).

Останнім часом знайшли розповсюдження прилади, зокрема, автоматичний стаціонарний вимірювальний перетворювач “Рутіл 4М”, де у якості чутливого елемента застосовують напівпровідники. Цей прилад призначений для вимірювання вмісту продуктів неповного згоряння газоподібного і рідкого палива з метою підтримування оптимального процесу спалення палива у складі системи регулювання.

Зміна електричних властивостей напівпровідникового чутливого елемента (диоксида титану) здійснюється внаслідок взаємодії продуктів неповного згоряння при температурі  $750 \div 950$  °C за реакціями:



Згідно реакцій (2.58, 2.59) відбувається відновлення диоксида титану у титан. При цьому зміна електричних властивостей пропорційна концентрації продуктів неповного згоряння палива. За відсутності газів – відновлювачів під впливом температури і надлишку кисню у димових газах відбувається зворотній процес окислення титану у диоксид титану. Час реагування продуктів неповного згорання протікає майже миттєво і складає  $1 \div 1,5$  с. Чутливий елемент виконаний у вигляді циліндру діаметром 2 мм і довжиною 8 мм, усередині якого знаходиться нагрівальна спіраль. Разом вони утворюють первинний перетворювач (ПП). Останній включений у схему стабілізатора температури і масштабних підсилювачів, що забезпечують стабільність робочої температури нагріву, підсилення сигналу електрорушійної сили ПП і доведення його до нормованого значення постійного струму на виході  $0 \div 5$  мА.

Газова суміш, що надходить до приладу, повинна бути очищена від пилу і вологи. Витрата аналізуємої суміші установлюється ротаметром на передній панелі приладу на рівні  $20 \div 60$  л/год, а температура повинна бути у межах  $5 \div 50$  °С. Вимірювальний перетворювач встановлюють на спеціальному щиті. Чутливість до продуктів неповного згорання складає  $0,0003 \div 0,0005$  %об. Діапазон вимірювання встановлюється за допомогою повітряльних газових сумішей (ПГС) або хроматографів.

Електрохімічні кондуктометричні газоаналізатори застосовуються для вимірювання таких газів як диоксид вуглецю, кисень, сірководень, метан, оксид вуглецю, водень та ін.

*Полярографічні газоаналізатори* основані на електролізі електродитів, що знаходяться під впливом електрохімічно активних речовин. При цьому, кількість цих речовин пропорційна їх парціальному тиску у аналізуемій газовій суміші, яка безперервно проходить (дифундує) крізь електродит. Сила струму електролізу визначається за формулою:

$$I = nFsDc / \delta, \quad (2.60)$$

де  $n$  – заряд іону;  $F$  – число Фарадея;  $s$  – площа поверхні індикаторного електроду;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $c$  – концентрація визначаємої електрохімічно активної речовини;  $\delta$  – загальна товщина дифузійного шару.

За постійності  $\delta$  концентрація визначаємого компонента  $c$  буде однозначно визначатися силою струму, тобто  $c = I / k$  ( $k$  – постійна електрохімічної ячейки). Нижче розглянуті деякі основні сучасні полярографічні газоаналізатори.

*Сигналізатор – аналізатор типу ДОЗОР-СВ-ТЦ* призначений для безперервного вимірювання гранично-припустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі, видачі світло-звукової сигналізації і комутації зовнішніх кіл змінного струму номінальною напругою  $220$  В і силою струму  $2$  А при перевищенні наступних установлених порогових значень концентрації (% НПКР): перший поріг (ПОРІГ1) –  $10$  ( $20$ ); другий поріг (ПОРІГ2) –  $20$  ( $40$ ). Додатково здійснює перетворення поточного значення концентрації в уніфікований сигнал постійного струму  $0 \div 5$  чи  $0(4) \div 20$  мА. Кількість вимірювальних каналів від 1 до 5. Сигналізатори мають інтерфейсні виходи (RS232 чи RS485) і комплектуються електрохімічними датчиками конвек-

ційного типу SENS. Датчик SENS є двохелектродною електрохімічною ячейкою, що перетворює вміст компоненту, що аналізується, у повітрі у безперервний електричний сигнал. Датчик припускає експлуатацію при подачі аналізованої газової суміші як у дифузійному так і у примусовому режимі за допомогою спонукача витрати газу. На рис. 2.83 наведена конструкція електрохімічного датчика SENS типу “SensorE”.

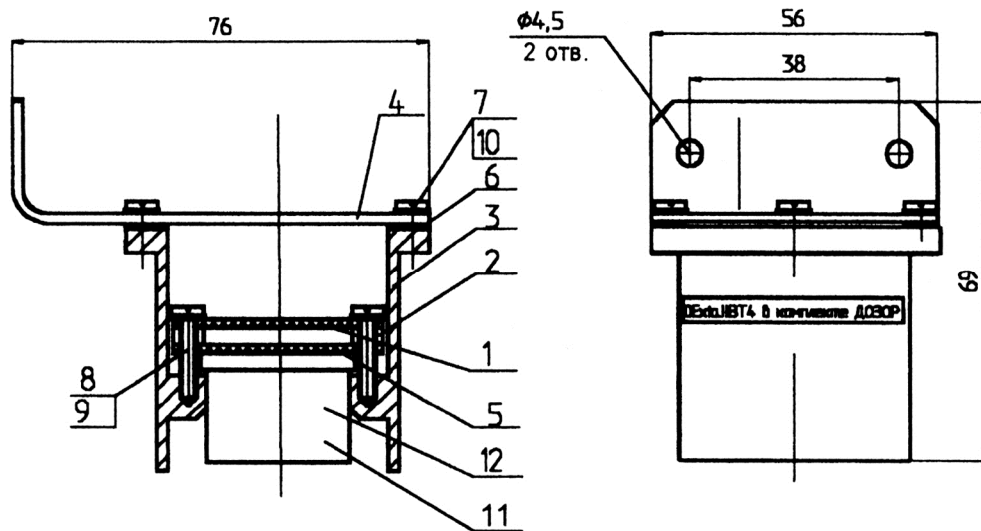


Рис. 2.83. Конструкція та габаритні розміри електрохімічного датчика SENS: 1 – плата датчика; 2 – стійка; 3 – корпус; 4 – кронштейн; 5 – прокладка; 6 – шайба; 7, 8 – гвинт; 9, 10 – шайба; 11 – розетка ОНЦ-РГ-09-4/14-Р1; 12 – чутливий елемент “SensorE” з дифузійним вікном.

Чутливий елемент датчика виконано на підґрунті твердого неорганічного електроліту. Установка датчиків повинна здійснюватись у місцях найбільш ймовірного скопища аналізованого компонента на висоті  $0,4 \div 0,7$  м від рівня підлоги, дифузійним вікном донизу. З’єднувальні кабелі датчиків необхідно прокладати на відстані не менше  $0,5$  м від силових струмоведучих кабелів. Не рекомендується встановлювати датчики поблизу джерел виділення пилу, кислих і лужних газів, парів аерозолів і органічних розчинників.

Датчик SENS підключається до блоку живлення і сигналізації БПС, функціональна структура якого наведена на рис. 2.84.

У блоці БПС встановлено дві плати: П1 – плата вузлів іскрозахисту; П2 – плата вимірювань і індикації. На платі П1 розташовані: І/У – перетворювачі “струм-напруга”; УІЗ – вузол іскрозахисту сигнальних кіл датчиків SENS; АК – комутатор аналогових сигналів; ЗС – звуковий п’єзоелектричний перетворювач сигналізації; ИП +22 В –

джерело живлення напругою +22 В; БУ – балансний підсилювач. На платі П2 знаходяться: МК – мікроконтролер; ККБ – ключі зовнішніх комутацій і блокувань; ДД – дисплейний драйвер керування індицією; ИНД – індикатори номера вимірювального каналу, концентрації газу, стану порогових пристроїв, службових функцій і параметрів настройки; КУ – кнопки керування; СН + 5В і СН + 3,3В – стабілізовані джерела живлення напругою + 5 В і + 3,3 В.

Згідно схеми (рис. 2.84) електричні сигнали, пропорційні концентрації газу, від датчиків SENS1 – SENS8 крізь перетворювач I/U, УИЗ надходять до комутатора АК. Комутатор АК по чергово підключає до входу аналогово – цифрового перетворювача МК сигнали від датчиків. У залежності від величини вхідного сигналу мікроконтролер через драйвер керує індикатором ИНД, силовими ключами ККБ і звуковим перетворювачем ЗС. Керування режимами роботи контролера МК здійснюється кнопками КУ.

Діапазони вимірювання компонентів зведені до табл. 2.13.

Таблиця 2.13

Діапазони вимірювання компонентів та пороги спрацьовування сигналізації газоаналізаторів типу ДОЗОР-СВ-ТЦ

Компонент, що визначається	Діапазон вимірювання, мг/м <sup>3</sup> (% об.)	Пороги вмикання сигналізації, мг/м <sup>3</sup> (% об.)
1	2	3
Аміак	0 ÷ 120	20; 60; 100
	0 ÷ 1500 0 ÷ 50	500; 1500
Двооксид азоту	0 ÷ 15	2; 10
Двооксид вуглецю	(0,035 ÷ 0,5)	(0,2; 0,4)
Кисень	(0 ÷ 30)	(17; 19)
Оксид вуглецю	0 ÷ 120	20; 100
Сірководень	0 ÷ 50	10; 30
Хлор	0 ÷ 5	1; 5
Двооксид сірки	0 ÷ 300 0 ÷ 2500	на замовлення
Природний газ	0 ÷ 50 % НПКР	20; 40 % НПКР
Скраплені вуглеводневі гази		
Пара нафтопродуктів		
Спирти, розчинники		





вхідними іскробезпечними колами рівня “іа” мають маркування вибухозахисту “ЕхіаІВ” і призначені для установки зовні вибухонебезпечних зон. Межа припустимої основної відносної похибки спрацьовування порогових пристроїв складає  $\pm 2,5 \%$ .

*Стационарний багатоканальний газоаналізатор типу АНКАТ-7621* призначений для безперервного контролю концентрації токсичних газів ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ) на рівні ПДК робочої зони. Складається з довільного набору вимірювальних датчиків (модулів) з цифровою індикацією або без неї, які встановлюються безпосередньо у місцях замірів, і одного керуючого блоку (блоку живлення і сигналізації БПіС або блоку обробки і реєстрації БОіР), розташованого на визначеному віддаленні від датчиків. За принципом дії ідентичні газоаналізаторам ДОЗОР. Основні виконання газоаналізаторів представлені у табл. 2.14. Час прогрівання приладу – 30 хвил, а встановлення показань до 90 с. Час спрацьовування сигналізації не перевищує 10 с. Строк придатності датчиків – 1,5 роки.

Таблиця 2.14.

Виконання і технічні характеристики газоаналізаторів  
АНКАТ-7621

Умовне позначення	Складова частина приладу	Аналізуємий компонент	Виконання за вибухозахистом	Температура навколишнього повітря, °С	Габаритні розміри, мм	Маса, кг	Діапазон, мг/м <sup>3</sup>		
							вимірювання	показань	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
АНКАТ-7621-01В	Модуль з цифровою індикацією	$\text{CO}$	Вибухобезпечне	$(-5) \div 45$	$190 \times 115 \times 80$	0,7	0 ÷ 50		
АНКАТ-7621-02В		$\text{SO}_2$					0 ÷ 20		0 ÷ 100
АНКАТ-7621-03В		$\text{H}_2\text{S}$					0 ÷ 20		
АНКАТ-7621-04Н1		$\text{Cl}_2$	Звичайне	$(-30) \div 45$			0 ÷ 5		0 ÷ 10
АНКАТ-7621-04Н2							0 ÷ 50		0 ÷ 100

Продовження табл. 2.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
АНКАТ-7621-01ВН	Модуль без індикації	CO	Вибухобезпечне	(-30)÷45	Діаметр 102; висота 81	0,5	0 ÷ 50	0 ÷ 100
АНКАТ-7621-02ВН		SO <sub>2</sub>					0 ÷ 20	
АНКАТ-7621-03ВН		H <sub>2</sub> S					0 ÷ 20	
АНКАТ-7621-ПВ (БПіС)	Блок живлення і сигналізації	CO	Іскробезпечне КОЛО	4 ÷ 45	215×265×305	5,5	0 ÷ 50	0 ÷ 100
		SO <sub>2</sub>					0 ÷ 20	
		H <sub>2</sub> S					0 ÷ 20	
АНКАТ-7621-ПВ (БОіР)	Блок обробки і ресстрації	CO	Звичайне	4 ÷ 45	215×415×310	9	0 ÷ 50	0 ÷ 100
		SO <sub>2</sub>					0 ÷ 20	
		H <sub>2</sub> S					0 ÷ 20	

Примітка: межа припустимої основної похибки  $\Delta$  ( $мг/м^3$ ) при вимірюванні:

для CO –  $\Delta = (1 + 0,08 \cdot C_{вх})$ ;

для SO<sub>2</sub> –  $\Delta = (1 + 0,15 \cdot C_{вх})$ ;

для H<sub>2</sub>S у діапазоні  $0 \div 3$   $мг/м^3$  –  $\Delta = 0,75$ , а у діапазоні  $3 \div 20$   $мг/м^3$  –  $\Delta = (0,2 + 0,19 \cdot C_{вх})$ ;

для Cl<sub>2</sub> у діапазоні  $0 \div 5$   $мг/м^3$  –  $\Delta = (0,1 + 0,15 \cdot C_{вх})$ , а у діапазоні  $0 \div 50$   $мг/м^3$  –  $\Delta = (0,5 + 0,15 \cdot C_{вх})$ .

$C_{вх}$  – концентрація вимірюваного компонента. Маркування вибухозахисту: ЕхібdsIICT2 чи 1ЕхібIICT6 у комплекті з БПіС

**Абсорбційно-спектральні аналізатори** застосовуються для визначення концентрації окремого компонента як у газових, так і рідинних сумішах. Прилади для вимірювання концентрації рідин прийнято називати абсорбційно-оптичними аналізаторами, а прилади для вимірювання концентрації газів – оптично-абсорбційними газоаналізаторами. Абсорбційний метод спектрального аналізу складу

рідинних і газових сумішей ґрунтується на властивості різноманітних речовин вибірково поглинати (абсорбувати) частину електромагнітного випромінювання в оптичному діапазоні, що проходить крізь них. Кількісні співвідношення цього явища відбиваються законом Бугера - Ламберта – Бера:

$$\Phi_{\lambda} = \Phi_{0\lambda} e^{-\varepsilon_{\lambda} cl} ; \quad (2.61)$$

$$T_{\lambda} = e^{-\varepsilon_{\lambda} cl} ; \quad (2.62)$$

$$D_{\lambda} = \ln \Phi_{0\lambda} / \Phi_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} cl , \quad (2.63)$$

де  $\Phi_{\lambda}$  – монохроматичний потік випромінювання, що виходить з поглинаючого шару товщиною  $l$ ;  $T_{\lambda}$  і  $D_{\lambda}$  – коефіцієнт пропускання і оптична густина поглинаючого шару товщиною  $l$  на довжині хвилі випромінювання  $\lambda$ ;  $\Phi_{0\lambda}$  – монохроматичний потік випромінювання, що входить у поглинаючий шар;  $\varepsilon_{\lambda}$  – коефіцієнт поглинання випромінювання, характерний для окремої речовини і залежний від довжини хвилі;  $c$  – концентрація речовини, що поглинає випромінювання.

Коефіцієнти  $\varepsilon_{\lambda}$  і  $T_{\lambda}$  окремого компонента залежать від довжини хвилі випромінювання і лише для дуже вузьких спектральних границь (шириною у декілька сотих ангстрем) виявляють різкі екстремуми. Якщо у суміші речовин міститься  $n$  – компонентів, то його оптична густина залежить від коефіцієнтів поглинання і концентрації цих компонентів:

$$D_{cm} = l \sum_{i=1}^n C_i \varepsilon_{\lambda i} . \quad (2.64)$$

Згідно рівняння (2.64) виборче вимірювання одного компонента можливе лише за умов, якщо коефіцієнт поглинання неконтрольованих компонентів  $\varepsilon_{\lambda i}$  значно менше коефіцієнта  $\varepsilon_{\lambda k}$  контролюемого компонента, тобто  $\varepsilon_{\lambda k} \gg \varepsilon_{\lambda i}$ . Таким чином, довжину хвилі випромінювання для вимірювання концентрації методом абсорбційно-спектрального аналізу обирають з урахуванням двох умов: коефіцієнт  $\varepsilon_{\lambda k}$  повинен мати якомога більшу абсолютну величину; коефіцієнти  $\varepsilon_{\lambda i}$  повинні бути відносно менше коефіцієнта  $\varepsilon_{\lambda k}$ .

Молекулам різних речовин (компонентів) притаманні характерні тільки для них спектри і смуги поглинання випромінювання. Це

обумовлює універсальність і широке застосування методу для аналізу складу різних сумішей. У залежності від того, у якій спектральній області діють абсорбційно-спектральні прилади, їх поділяють на інфрачервоні аналізатори ( $\lambda \approx 1 \text{ мм} \div 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ), аналізатори ультрафіолетового поглинання ( $\lambda \approx 4 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ) і фотоколориметри, у яких поглинання відбувається у видимій частині спектру ( $\lambda \approx 8 \cdot 10^{-7} \div 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ). Будь-який абсорбційно-спектральний прилад містить три основні елементи: джерело випромінювання; кювета, у якій знаходиться шар речовини, що підлягає аналізу, визначеної товщини; пристрій для вимірювання потоку випромінювання  $\Phi_\lambda$  на виході з кювети і перетворення його у вихідний сигнал приладу.

*Абсорбційно-оптичні аналізатори складу рідини* мають різноманітні вимірювальні схеми у залежності від діапазону спектра дії аналізатора, природного складу аналізованої рідини і метрологічних вимог. Схеми відрізняються поміж собою кількістю довжин хвиль (каналів) і кювет (променів), що застосовуються при вимірюванні, а також способом порівнювання (обчислювальної обробки) сигналів, отриманих у проміжних перетворювачах. Найбільш розповсюджені одноканальні двопробні і двоканальні (диференційні) однопробні вимірювальні схеми. Останні у порівнянні з першими забезпечують мінімальні похибки, що можуть бути пов'язані із забрудненням вікон кювет, але мають більші похибки від зміни спектральних характеристик елементів схеми. Тому у сучасних аналізаторах цього типу використовують комбіновані вимірювальні схеми (рис. 2.85), поєднуючи переваги вище перелічених схем.

Особливість дії аналізатора згідно рис. 2.85 полягає в обертанні диску обтюратора 11, завдяки чому світлофільтри 4 і 10 по чергову вводяться у потоки вимірювання від випромінювача 1, що прямують далі на робочу 5 і порівняльну 9 кювети. Після відбиття від дзеркал 2 приймач випромінювання 6 розподільно у часі перетворює монохроматичні потоки випромінювання у електричні сигнали. При цьому сигнали  $U_{P\lambda 1}$ ,  $U_{C\lambda 1}$  пропорційні монохроматичному потоку з довжиною хвилі  $\lambda 1$  після проходження робочої і порівняльної кювет, а сигнали  $U_{P\lambda 2}$ ,  $U_{C\lambda 2}$  пропорційні монохроматичному потоку з довжиною хвилі випромінювача  $\lambda 2$ . Пристрій 7 виконує операцію обчислення показання аналізатора за формулою

$$\alpha = k \frac{U_{P\lambda 1} U_{C\lambda 2}}{U_{P\lambda 2} U_{C\lambda 1}}, \quad (2.65)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

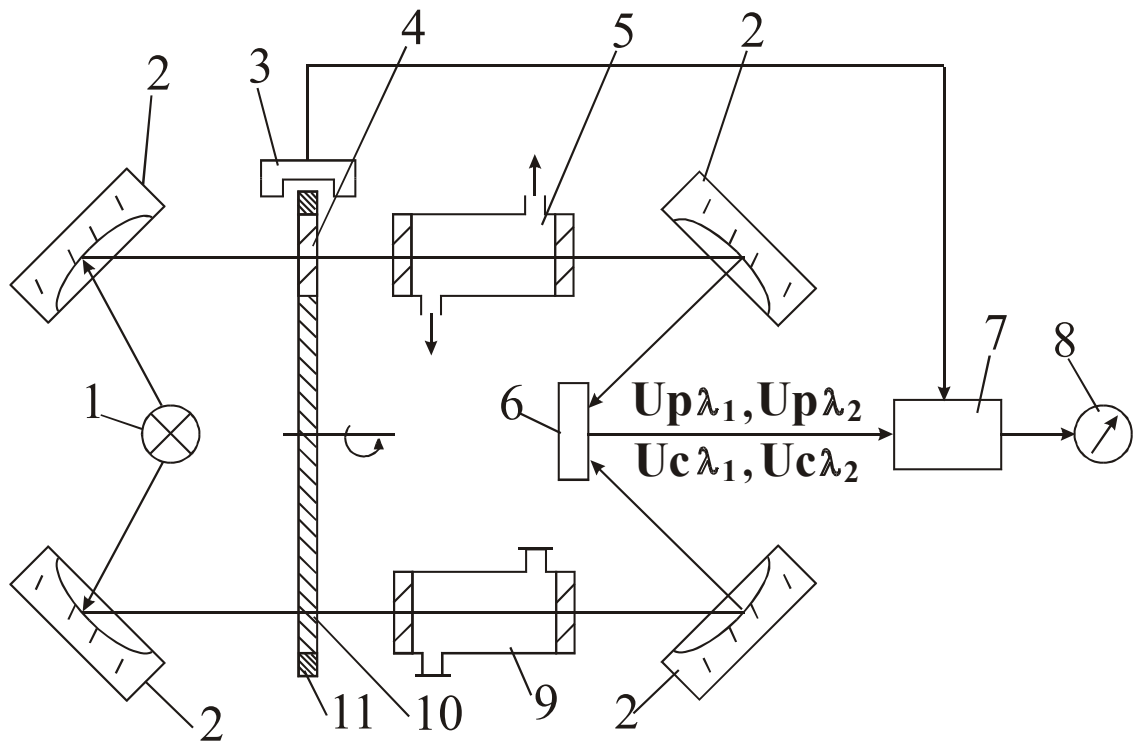


Рис. 2.85. Функціональна схема комбінованого (подвійна одноканальна двопробенева) інфрачервоного аналізатора рідини.

Виконавши перетворення формули (2.65) через коефіцієнти перетворення відповідних елементів схеми, отримаємо рівняння для показань аналізатора  $\alpha$ , яке буде залежати лише від коефіцієнтів поглинання, складу і товщин шару рідин у кюветах, тобто

$$\alpha = k \exp[-C_P l_P (\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})] / \exp[-C_C l_C (\varepsilon_{\lambda} - \varepsilon_{\lambda})], \quad (2.66)$$

Уніфікований вихідний сигнал з пристрою 7 вимірюється вторинним приладом 8. Регулювання положення світлофільтрів з метою зміни спектральної характеристики здійснюється датчиком 3. Застосування у аналізаторах мікроЕОМ дає можливість створювати багатоканальні прилади для аналізу складу багатокомпонентних розчинів, тобто здійснювати вимірювання оптичної густини розчинів при різних довжинах хвиль випромінювання. Найбільш відомим абсорбційно-оптичним інфрачервоним приладом є аналізатор рідини типу “Аналіз-3”, призначений для безперервного автоматичного вимірювання і реєстрації концентрації одного з компонентів у рідких розчинах. Технічні характеристики різних модифікацій аналізатора наведені у табл. 2.15.

Принцип дії аналізатора оснований на властивості рідких розчинів вибірково поглинати інфрачервоне випромінювання в області

спектра хвиль довжиною від 0,75 до 4 мкм. Виділення необхідної ділянки спектра випромінювання здійснюється за допомогою інтерференційних світлофільтрів.

Таблиця 2.15.

## Технічні характеристики аналізатора типу "Аналіз-3".

Модифікація	Склад аналізованого середовища	Аналізований компонент	Діапазон вимірювання. % мас	Основна наведена похибка, %	
0101	Ацетон, вода	Вода	0 ÷ 1	± 4	
0102			0,1 ÷ 0,6		
0103	Метанол, вода, ефіри		0 ÷ 0,5		
0104			0 ÷ 10		
0105			0 ÷ 100		
0106			0 ÷ 20		
0107	Етиловий спирт, во-		4 ÷ 10		
0108	Метанол, вода		0 ÷ 0,2		
0109	Дихлоретан, вода		0 ÷ 0,1		
0110	Етилацетат, вода		0 ÷ 0,2		
0111	Чотирихлористий		0 ÷ 0,01		
0112	Бензол, вода		0 ÷ 0,05		± 10
0113	Трихлоретилен, вода		0 ÷ 0,02		
0116	Диетиленгліколь, вода		0 ÷ 3		± 4
0117		0 ÷ 20			
0118	Анілін, вода, оцто-	0 ÷ 1			
0201	Оцтовий ангідрид, оцтова кислота	Оцтовий ангідрид	90 ÷ 100		
0202			50 ÷ 100		
0203		Оцтова кислота	20 ÷ 50		
0301	Оцтова кислота, во-	Оцтова кислота	20 ÷ 30		
0401	Азотна кислота, вода	Азотна кислота	10 ÷ 20		
0402			20 ÷ 30		
0403			30 ÷ 40		
0404			40 ÷ 56		
0405			50 ÷ 63		
0406			56 ÷ 71		
0407			90 ÷ 100		
0408			95 ÷ 100		
0601	Аміак, вода	Аміак	15 ÷ 30		

Комплект аналізатора містить вимірювальний перетворювач ИП та блок цифрової індикації і керування БИУ-7 з стандартним електричним вихідним сигналом. Перетворювач ИП має вибухоза-

хищене виконання з маркуванням 1ЕхашВТ4, а блок БИУ- 7 – звичайне. Обробка виміральної інформації здійснюється за допомогою мікро-ЕОМ. Конструкція проточної кювети у перетворювачі ИП дозволяє встановлювати будь-яку товщину шару аналізуємого розчину у межах від 1 до 60 мм. Прилад має високу чутливість до вмісту вологи в органічних продуктах – до  $10^{-5}\%$  об, а стабільність роботи – 20 діб.

Аналізуєме середовище повинно мати наступні значення параметрів: температуру від 5 до 150 °С; тиск до 2,3 МПа; витрату до 300 м<sup>3</sup>/год; вміст механічних сумішей не більше 0,3% об. Експлуатація аналізатора здійснюється в умовах температур навколишнього повітря від 5 до 50 °С з відносною вологістю до 80 %.

Однопроменева вимірвальна схема найчастіше застосовується у фотоколориметрах. Колориметр фотоелектричний концентраційний типу КФК-2 призначений для вимірювання в окремих дільницях діапазону довжин хвиль 315 ÷ 980 нм, що виділяються світлофільтрами, коефіцієнтів пропускання і оптичної густини рідинних розчинів та твердих тіл, а також визначення концентрації речовин у розчинах методом побудови градуєвальних графіків. Колориметр також дозволяє здійснювати вимірювання коефіцієнтів пропускання розсіюваних суспензій, емульсій і колоїдних розчинів у прохідному світлі. Діапазон вимірювання коефіцієнтів пропускання  $T_\lambda$  від 100 до 1 %, а оптичної густини  $D_\lambda$  від 0 до 2 Б.

Принцип вимірювання коефіцієнта пропускання полягає у тому, що на фотоприймач направляється по черзі світлові потоки повний  $\Phi_{0\lambda}$  і той, що пройшов крізь аналізуєме середовище  $\Phi_\lambda$  з визначенням відношення цих потоків. Відношення цих потоків  $T_\lambda$  (коефіцієнту пропускання розчину) визначається рівнянням:

$$T_\lambda = (\Phi_\lambda/\Phi_{0\lambda})100\% \quad (2.67)$$

При цьому коефіцієнт пропускання аналізуємого розчину ураховує зменшення інтенсивності світлового потоку пов'язаного з поглинанням та з розсіюванням цього потоку.

На колориметрі  $T_\lambda$  визначається таким чином. Спочатку у світловий пучок поміщують кювету з розчинником чи контрольним розчином. Зміною чутливості колориметра досягають, щоб відлік по шкалі коефіцієнтів пропускання  $nI$  дорівнював 100 поділок. Отже, повний світловий потік  $\Phi_{0\lambda}$  приймається умовно за 100 %. Далі, у



світловий потік поміщують кювету з аналізуємим розчином. Отриманий відлік  $n_2$  по шкалі коефіцієнтів пропускання колориметра буде відповідати  $\Phi_\lambda$ . У підсумку коефіцієнт пропускання аналізуємого розчину у відсотках буде дорівнювати  $n_2$ , тобто  $T_\lambda\% = n_2$ . При цьому оптична густина визначається за формулою:

$$D_\lambda = -\lg(\Phi_\lambda/\Phi_{0\lambda}) = -\lg(T_\lambda/100) = 2 - \lg T_\lambda \quad (2.68)$$

Джерелом світлового випромінювання служить малогабаритна галогенна лампа КГМ6,3-15 (див. рис. 2.86), нитка 1 якої конденсатором 2 зображується у площині діафрагми 3 (діаметр 2 мм).

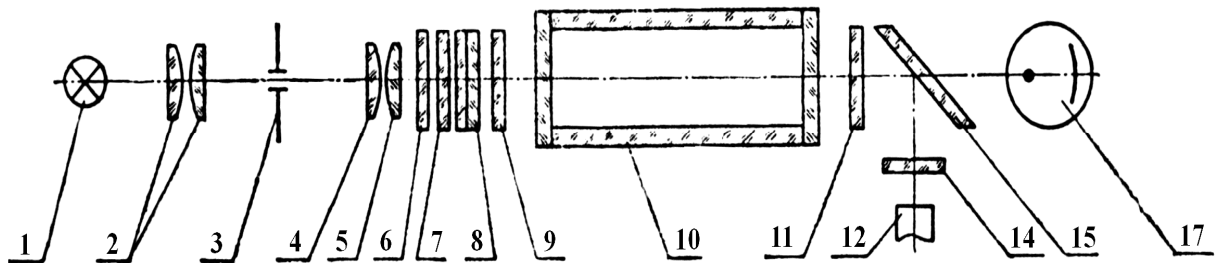


Рис. 2.86. Оптична принципова схема фотоколориметра.

Це зображення об'єктивом 4 та 5 переноситься у площину на відстань від нього до 300 мм із збільшенням  $10^x$ . Кювета 10 з аналізуємим розчином уводиться у світловий пучок між захисними стеклами 9 та 11. Для виділення вузьких ділянок спектра з суцільного спектра випромінювання лампи у колориметрі передбачені кольорові світлофільтри 8. Теплозахисний світлофільтр 6 уведений у світловий пучок при роботі у видимій області спектра ( $400 \div 490$  нм). З метою послаблення світлового потоку при роботі у спектральному діапазоні  $400 \div 540$  нм встановлені нейтральні світлофільтри 7. Фотоприймачі діють у різних областях спектру: фотоелемент 17 типу Ф-26 – в області спектру  $315 \div 540$  нм; фотодіод 12 типу ФД-24К – в області спектру  $590 \div 980$  нм. Пластина 15 ділить світловий потік на два. Біля 10 % світлового потоку прямує на фотодіод, а біля 90 % - на фотоелемент. Для зрівнювання фотострумів, що утворені у фотоприймачі ФД-24К при роботі з різними кольоровими світлофільтрами, встановлюється перед ним світлофільтр 14 з кольорового скла СЗС-16. Електрична схема колориметра (рис. 2.87)

складається з перетворювачів світлового випромінювання у електричні сигнали (фотоприймачів), вимірювального підсилювача постійного струму (УПГ), стабілізаторів (1, 2, 3) напруги  $6,3\text{ В}$  для живлення джерела світлового випромінювання і  $45\text{ В}$  для живлення фотоелемента, а також  $\pm 18\text{ В}$  для живлення УПГ. Фотоприймачі і підсилювач УПГ з усіма регулюючими і комутуючими елементами розміщені в оптичному блоці, а стабілізатори напруги з мережевим трансформатором – у блоці живлення.

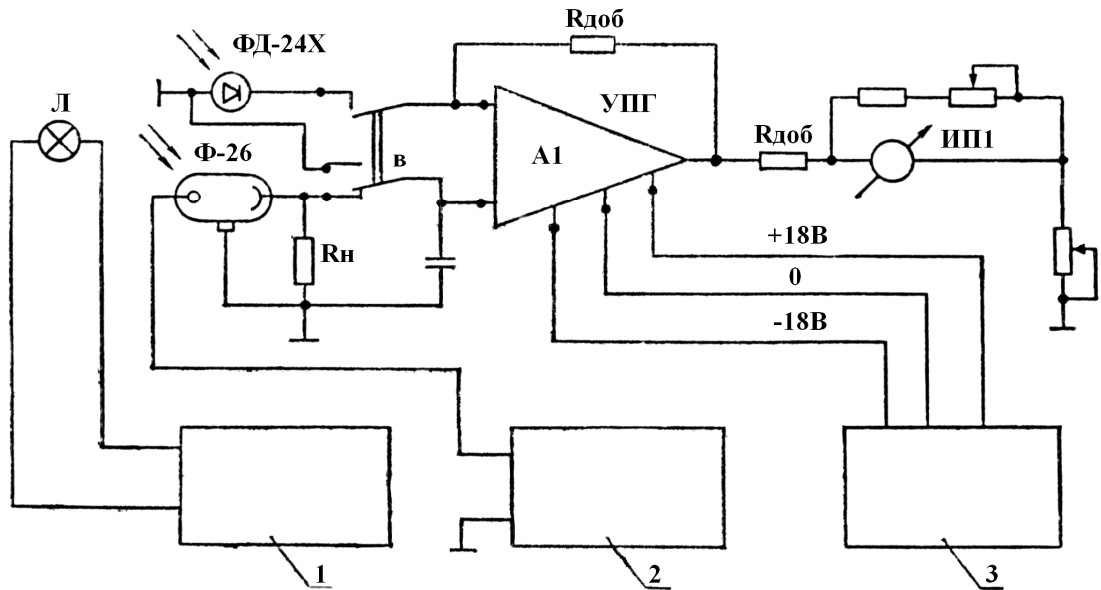


Рис. 2.87. Блок-схема електрична фотоколориметра.

Згідно з рис. 2.87 світловий потік від лампи  $L$ , проходячи крізь аналізуємий розчин, одночасно впливає на фотоприймач  $\Phi\text{Д-}24\text{К}$  і  $\Phi\text{-}26$ . Вхід УПГ за допомогою перемикача  $B$  підключається до одного з фотоприймачів. Струм підключеного фотоприймача, пропорційний світловому потоку  $\Phi_\lambda$ , проходить крізь опір навантаження  $R_n$ , на якому утворюється падіння напруги. Це падіння напруги надходить на неінвертований вхід операційного підсилювача УПГ. Далі поданий сигнал посилюється за струмом (потужністю) і прямує на вимірювальний прилад ИП1 (мікроамперметр). Зміна чутливості електричної схеми при роботі з фотоелементом здійснюється ступінчасто за допомогою перемикача опору навантаження  $R_n$  (три положення 1:9, 1:3; 1:1 на схемі відсутні), а при роботі з фотодіодом – ступінчасто за рахунок зміни величини опору у колі негативного зворотного зв'язку  $R_{оос}$  (також три положення).

Кольорові світлофільтри вмонтовані у диск і уводяться у світловий пучок ручкою, біля якої нанесено маркування відповідної максимальної довжини хвилі пропускання світлофільтра. Аналізатор на задній стінці має гнізда для підключення цифрового вольтметра з межею вимірювання  $0,1\text{ В}$ .

Слід відзначати, що вимірювання невідомої концентрації речовини у розчині передбачає попередню побудову градуовальної характеристики – “концентрація – оптична густина”. При цьому подальше вимірювання необхідно здійснювати з тією ж кюветою, для якої побудована градуовальна характеристика, та з тим самим світлофільтром. Межа припустимої основної абсолютної похибки колориметра при вимірюванні коефіцієнтів пропускання не перевищує  $\pm 1\%$ .

*Оптико-абсорбційні газоаналізатори* для визначення концентрації газів використовують в основному смуги поглинання в інфрачервоній частині спектру випромінювання. Здатність поглинати випромінювання в інфрачервоній частині спектра мають гази, молекули яких складаються з двох чи більшого числа атомів або іонів, за виключенням кисню, азоту, водню. Одноатомні гази взагалі не поглинають інфрачервоного випромінювання. Ступінь поглинання випромінювання кожним з поглинаючих газів змінюється із зміною довжини хвилі променя, що проходить крізь газ. Наприклад, при пропусканні випромінювання інфрачервоного спектру крізь шар газу ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  і  $\text{CH}_4$ ) товщиною  $100\text{ мм}$  максимальне поглинання буде спостерігатись у притаманній для кожного з газів області спектру. Відповідно для  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  і  $\text{CH}_4$  ці області спектру будуть мати значення:  $4,7\text{ мкм}$ ;  $2,7$  і  $4,3\text{ мкм}$ ;  $3,3$  і  $7,64\text{ мкм}$ .

Вимірювання потоку інфрачервоного випромінювання, що проходить крізь газ, здатний поглинати інфрачервоні промені, оснований на вимірюванні чи зміни температури газу за рахунок нагрівання за визначений час під впливом цих променів, або зміни тиску газу за рахунок його нагріву. При перериванні з деякою частотою потоку інфрачервоного випромінювання за допомогою обтюратора (пристрою з заслінкою, що перериває потік світла) газ, що знаходиться у замкненому об'ємі, буде періодично нагріватися і охолоджуватися у відповідності з цим виникають коливання як температури, так і тиску, які можуть бути сприйняті відповідними чутливими елементами газоаналізатора. Зареєстрований таким чином змінний сигнал, буде нести інформацію про кількість інфрачервоної енергії, що поглина-

ється аналізуємим газом з частотою обтюрації, а, отже, і про концентрацію аналізуемого компонента. У газоаналізаторах цього типу застосовуються двохканальні (диференційні) і компенсаційні схеми вимірювання ступеня поглинання інфрачервоного випромінювання. Компенсаційні схеми більш досконалі і будуються на принципах електричної, оптичної чи газової компенсації. Серед компенсаційних, схеми з газовою компенсацією характеризуються меншою похибкою вимірювання внаслідок стабільності спектрального складу інфрачервоного випромінювання. На рис. 2.88 наведена диференційна схема оптико – абсорбційного газоаналізатора з безпосереднім відліком і застосуванням у якості чутливого елемента перетворювача температури.

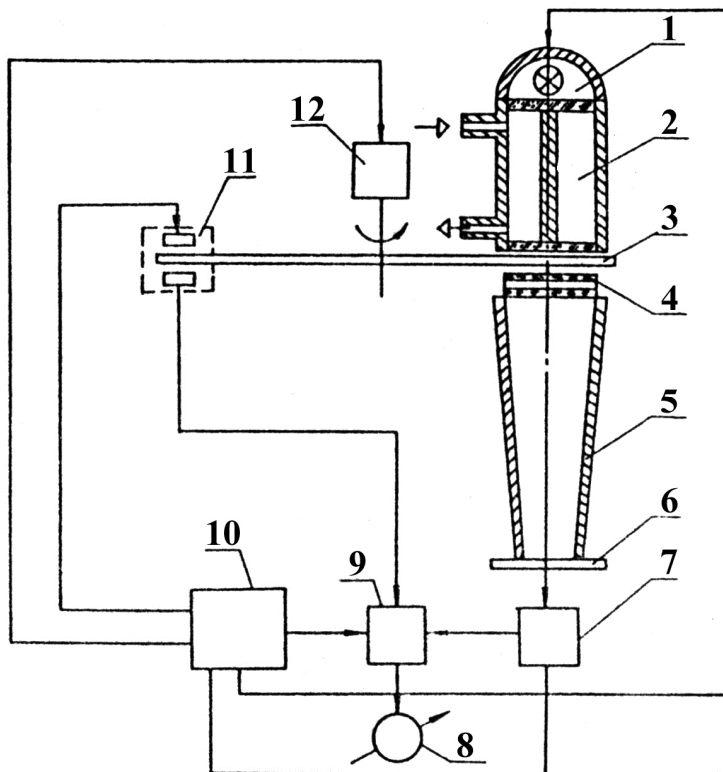


Рис. 2.88. Диференційна блок – схема оптико – абсорбційного газоаналізатора.

Газоаналізатор складається з випромінювача 1, що утворює потік інфрачервоної енергії, який далі попадає у кювету 2 з двома каналами – вимірним і порівнювальним. В одному з положень обтюратора 3, яке змінюється електродвигуном 12, потік випромінювання від випромінювача 1, проходячи вимірний канал кювети 2, інтерференційний фільтр 4, фланець 5, попадає на приймач інфрачервоного випромінювання 6, де перетворюється

величина температури у електричний сигнал, який далі надходить на попередній підсилювач 7. Потім сигнал прямує до блоку вторинної інформації 9. В іншому положенні обтюратора 3 потік інфрачервоного випромінювання проробляє той самий шлях, тільки проходить крізь порівнювальний канал кювети 2. Положення обтюратора 3 фіксується з визначеною синхронністю оптоелектронними парами

11. Електричні сигнали з виходу приймача 6, який становить собою піроелектричний приймач типу МГ-30, підсилюється у попередньому підсилювачі і перетворюється блоком 9 у сигнал, що надходить до вторинного показуючого приладу 8. З метою виключення впливу дестабілізуючих факторів, які можуть змінювати чутливість газоаналізатора, застосовано пристрій стабілізації цього сигналу шляхом впливу на коефіцієнт підсилення вимірювального тракту. Живлення електричних схем і вузлів газоаналізатора здійснюється за допомогою блоку живлення 10 з перетворювачем напруги. У деяких схемах замість інтерференційних фільтрів 4 встановлюються фільтрові камери, які заповнюються очищеним азотом або повітрям. Вони призначені для зменшення впливу на показання газоаналізатора не вимірюваних компонентів, присутніх в аналізуємій суміші. При цьому фільтрові камери заповнюються газовими сумішами, що містять тільки невимірювані компоненти. Проходження потоку випромінювання через інтерференційні фільтри чи фільтрові камери викличе поглинання з цього пототку променів відповідної спектральної області поглинання не аналізуєними компонентами.

Оптичні схеми компенсаційних газоаналізаторів майже не відрізняються від схем з безпосереднім відліком. Особливість схеми газоаналізатора з газовою компенсацією полягає у наявності компенсаційної камери (рис. 2.89).

Компенсаційна камера 8 заповнена визначаємим компонентом. Усередині камери знаходиться рухливий шток, скошений кінець якого є поверхнею відбиття. Шток механічно зв'язаний з реверсивним двигуном 14 і при переміщенні змінює товщину газового шару в компенсаційній камері.

За умов рівності потоків випромінювання, що надходять від пластини відбиття 10 і поверхні відбиття кінця штока компенсаційної камери 8, схема буде збалансована і реверсивний двигун нерухливий. Підвищення чи зменшення потоку випромінювання у правому каналі за рахунок зміни концентрації аналізуємого компонента призведе до розбалансу вимірювальної схеми. Двигун почне обертатися і отже, підвищуючи чи зменшуючи товщину газового шару у компенсаційній камері, знову збалансує схему. Таким чином, кожному значенню концентрації вимірюваного компонента у газовій суміші буде відповідати визначена товщина шару цього ж компонента у компенсаційній камері, внаслідок чого поглинання в обох камерах носить однаковий спектрально-виборчий характер. Зміна

поток інфрачервоної енергії на відміну від попередньої схеми сприймається конденсаторним мікрофоном 12, який перетворює коливання тиску у змінну напругу. Змінний тиск випрямляється і підсилюється електронним підсилювачем 15 і надходить до вторинного приладу 1.

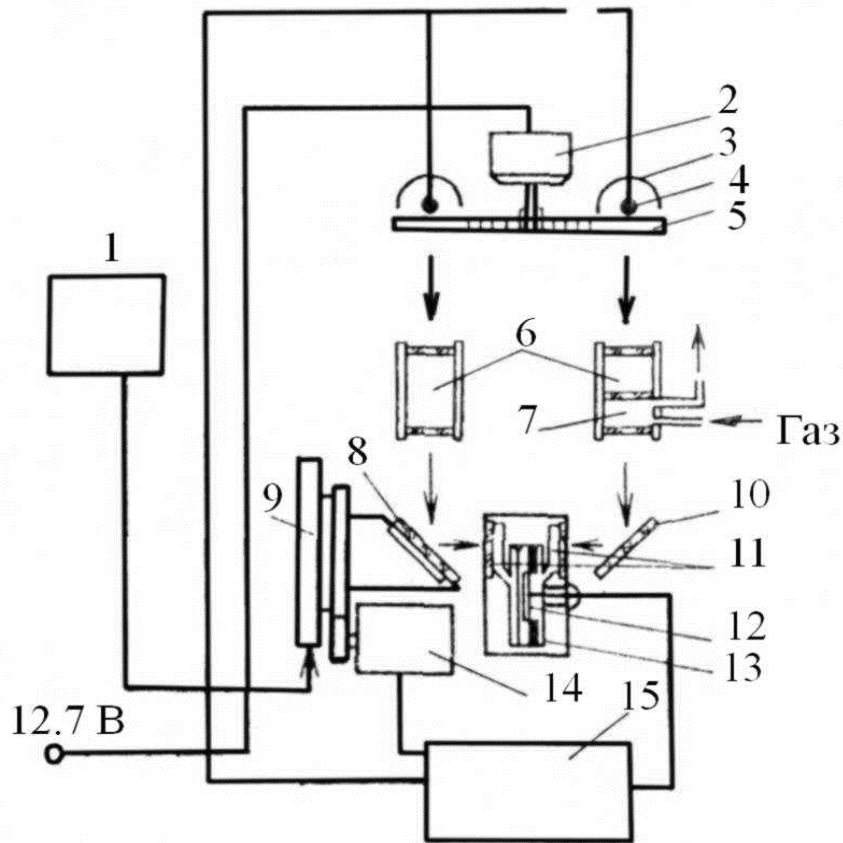


Рис. 2.89. Функціональна диференційна схема оптико-абсорбційного газоаналізатора з газовою компенсацією: 1 – вторинний самопишучий прилад; 2 – синхронний двигун; 3 – відбивач; 4 – випромінювач; 5 – об'єктив; 6 – фільтрові камери; 7 – робоча камера; 8 – компенсаційна камера; 9 – регулюємий резистор; 10 – пластина відбиття; 11 – променеприймальні циліндри; 12 – конденсаторний мікрофон; 13 – променеприймач; 14 – реверсивний двигун; 15 – блок живлення з підсилювачем.

Диференційна вимірювальна схема з газовою компенсацією суттєво знижує похибку газоаналізатора, пов'язану із змінами температури і тиску навколишнього середовища, а також забезпечує практично рівномірну шкалу приладу.

Газоаналізатор типу 121ФА-01 призначений для відбору, транспортування, підготовки газів викидів карбюраторних двигунів і вимірювання об'ємної долі оксиду вуглецю у газовій пробі. Діапазони вимірювань об'ємної долі оксиду вуглецю у підготовленій газовій пробі складають  $0 \div 5$  і  $0 \div 10$  % об. Дія газоаналізатора основана на вимірюванні ступені поглинання аналізуємим газом інфрачервоного випромінювання, яка залежить від концентрації визначеного компонента в аналізуємій суміші. У приладі застосована диференційна вимірювальна схема з безпосереднім відліком (рис. 2.88). Ціна поді-

лки нерівномірної шкали газоаналізатора становить  $0,2\%$  об. Склад аналізуємої газової суміші на вході у газоаналізатор ( $\%$  об), не більше: диоксид вуглецю –  $12$ ; оксид азоту –  $1,6$ ; оксид вуглецю –  $10$ ; оцтовий альдегід –  $0,02$ ; метан –  $0,8$ ; азот –  $70$ ; кисень –  $20$ ; водень –  $5$ ; пари води –  $(0,1 \div 0,15)$  кг/м<sup>3</sup>; сажі –  $0,2$  мг/м<sup>3</sup>. Температура газової суміші на аналіз не повинна перевищувати  $200\text{ }^\circ\text{C}$ .

Газоаналізатор складається з трубопроводу, фільтру і вимірювального перетворювача. Аналізуємий газ спонукачем витрати при номінальному значенні до  $0,06$  м<sup>3</sup>/год втягується у трубопровід, де попередньо охолоджується, а далі разом з конденсатом прямує у фільтр. Фільтр включає відстійник, фільтр грубої і фільтр тонкої очистки. Увесь конденсат накопичується у відстійнику і періодично зливається. У фільтрі грубої очистки відбувається затримання частинок сажі і бруду, а також залишків конденсату. Фільтр тонкої очистки здійснює остаточне очищення від механічних домішок, після чого суміш газова надходить у вимірювальний перетворювач.

Вимірювальний перетворювач містить первинний перетворювач, блок вторинної обробки інформації, перетворювач напруги, блок живлення, спонукач витрати з генератором спонукача витрати і показуючий прилад. Межа припустимої основної абсолютної похибки газоаналізатора для діапазону  $0 \div 5\%$  об складає  $\pm 0,2\%$  об, а для діапазону  $0 \div 10\%$  об –  $\pm 0,4\%$  об.

Газоаналізатори оптико- акустичні типу ОА2109М, ОА2209М, ОА2309М є стаціонарними, автоматичними самопишучими приладами. Вони призначені для безперервного вимірювання концентрації оксиду вуглецю (ОА2109М), диоксиду вуглецю (ОА2209М) чи метану (ОА2309М) у газових сумішах, які містять оксид вуглецю, диоксид вуглецю, метан, азот, кисень, водень у будь-яких кількостях. При визначенні концентрації диоксиду вуглецю зміна вмісту водню не повинна перевищувати  $\pm 10\%$  об середніх значень концентрації, наведених в опитувальному листі замовника.

Газоаналізатори можуть використовуватись для технологічного контролю і регулювання процесів в металургійній, хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній і газовій промисловості, а також у різних областях наукових досліджень. Межі вимірювань газоаналізаторів концентрацій CO, CO<sub>2</sub> і CH<sub>4</sub>:  $0 \div 1$ ;  $0 \div 2$ ;  $0 \div 5$ ;  $0 \div 10$ ;  $0 \div 20$ ;  $0 \div 30$ ;  $0 \div 50$ ;  $0 \div 70$  і  $0 \div 100\%$  об. Основна похибка приладів складає  $\pm 1\%$  від верхньої межі вимірювань.

Дія цих газоаналізаторів основана на вимірюванні ступеня поглинання аналізуємим газом інфрачервоного випромінювання, яке залежить від концентрації визначаємого компонента в аналізуємій суміші. У приладах застосована диференційна схема з газовою компенсацією (див. рис. 2.89). Газоаналізатор складається з блоку приймача, вимірювального приладу КСУ-2-015 і допоміжних пристроїв (холодильник, фільтри, спонукач витрати і т.ін). Допоміжні пристрої обираються у залежності від умов експлуатації за даними опитувального листа замовника. Монтаж і установка усіх блоків газоаналізатора повинні здійснюватись у вибухобезпечному приміщенні з вентиляцією.

Газоаналізатор типу ГИАМ-15М призначений для безперервного вимірювання одного з компонентів – CO чи CO<sub>2</sub> чи CH<sub>4</sub> чи NO чи SO<sub>2</sub> у підготовленій пробі аналізуємої газової суміші з температурою від 5 до 45 °С, вмістом води до 1 г/м<sup>3</sup>, вмістом пилу до 0,001 г/м<sup>3</sup> і витратою 1 л/хвил. Застосовується у системах контролю технологічних процесів, навколишнього середовища і газових викидів промислових підприємств.

Принцип дії оснований на оптико-абсорбційному методі вимірювання поглинання інфрачервоної енергії випромінювання аналізуємим компонентом газової суміші. Газоаналізатор має вихідний сигнал 0 ÷ 5 чи 4 ÷ 20 мА, пропорційний концентрації вимірюваного компонента. Верхня межа вимірювань концентрацій газоаналізаторів: для компонентів CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> складає 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 %об. При вимірюванні концентрацій CO<sub>2</sub> можливі також верхні межі вимірювання 50; 100 і 200 ppm, а для CO – 100 і 200 ppm, та 5 і 15 г/м<sup>3</sup>. При вимірюванні концентрацій SO<sub>2</sub> верхня межа вимірювання приладів може складати 1, 2, 5, 10, 20, 30 і 60 г/м<sup>3</sup>, а приладів для вимірювання концентрації NO – 1 і 2 г/м<sup>3</sup>. Нижня межа вимірювань газоаналізаторів має нульове значення концентрації. Основна наведена похибка газоаналізаторів при вимірюванні вмісту CO і CH<sub>4</sub> не перевищує 5 %, при вимірюванні вмісту CO<sub>2</sub> і NO – 10 %, а при вимірюванні складу SO<sub>2</sub> у діапазоні 0 ÷ 1 і 0 ÷ 2 г/м<sup>3</sup> – 10 % та до 7 % – у інших діапазонах.

Якщо параметри газової суміші на вході до газоаналізатора не відповідають вище наведеним, то необхідно застосовувати блок пробопідготовки БП-1. Для почергового відбору газової суміші від двох, трьох чи чотирьох точок може бути поставлений блок розподілу газу типу РГ-4.



**Атомно-абсорбційні спектрометри** є лабораторними стаціонарними приладами для елементного аналізу рідких і твердих проб.

Дія аналізаторів основана на атомно-абсорбційному методі аналізу, згідно якого аналізуєма проба (рідина або тверда речовина) переводиться в атомарний стан, а потім здійснюється вимірювання оптичної густини атомних парів визначаємого компонента у відповідному спектральному діапазоні. Специфічність лінійчастого спектра поглинання дозволяє якісно визначати склад аналізуємої речовини, а інтенсивність окремих ліній спектра аналізуємого елемента у порівнянні з інтенсивністю ліній іншого елемента, вміст якого відомий, - кількісний вміст елемента. Кількісне співвідношення між концентрацією визначаємого компонента і зміною інтенсивності поглинання цим компонентом випромінювання також встановлюється законом Бугера – Ламберта – Бера. Для переводу речовини у атомарний стан застосовуються як електротермічні, так і полум'яні атомізатори. Прилади мають різне конструктивне виконання і призначені для роботи при температурах навколишнього повітря від 10 до 35 °С з відносною вологістю до 80 % і атмосферному тиску від 86,6 до 106,6 кПа. Живлення здійснюється змінним електричним струмом напругою 220 В і частотою 50 Гц.

*Комплекс атомно-абсорбційний САТУРН-4* це сучасний лабораторний автоматизований набір технічних засобів для атомно-абсорбційного аналізу рідких і твердих проб призначений для застосування в металургії, геології, мікроелектроніці, біохімії, клінічній хімії, агрохімії, токсикології, установах охорони довкілля та інших галузях діяльності.

Комплекс складається з блоку спектрального, електротермічного атомізатора з автоматичним дозуючим пристроєм і персональною ЕОМ.

Комплекс САТУРН-4 забезпечує наступні можливості: визначення як мікродомішок, так і повного складу без заміни атомізатора; проведення аналізу без завад проб із складним вмістом; застосування електротермічних атомізаторів двох видів – з охолодженням водою і обдувом аргоном та з відсутністю охолодження для роботи в атмосфері повітря; автоматичний відбір, дозування, розбавлення аналізуємої проби; використання полум'яного атомізатора речовин ПЛАМЯ-2, що вміщує пальник, насадки, розпилювачі (стійкі до агресивного середовища), блок газової автоматики, механізм відбору проби, проточно-інжекційну приставку.

Діапазон установки довжин хвиль від 190 до 855 нм. Межа вимірювання оптичної густини від 0 до 2 Б. Температура у ячійці атомізатора може змінюватись від 40 до 3070 °С. Кількість кроків нагріву необмежена.

Тривалість кожного кроку нагріву у діапазоні 0 ÷ 999 с. Номінальний об'єм дози, що може бути уведена у ячійку складає від 1 до 100 мкл з дискретністю 1 мкл. Нижня границя визначення концентрації елементів не менше  $10^{-2}$  мкг/л, а верхня границя лежить у діапазоні  $10^3 \div 10^5$  мкг/л.

**Кондуктометричні аналізатори рідини** широко використовуються у лабораторній і виробничій сферах для хімічного аналізу, фізико-хімічних досліджень і автоматичного контролю цілої низки технологічних параметрів. У більшості випадків кондуктометричний метод застосовують для контролю однокомпонентних розчинів. Дія кондуктометричних концентратомірів (солемірів) побудована на вимірюванні питомої електричної провідності (УЭП) розчинів.

Електрична провідність водних розчинів кислот, лугів і солей згідно теорії Ареніуса обумовлюється наявністю у них дисоційованих молекул розчинної речовини і залежить від її концентрації, ступеня дисоціації, хімічної природи речовини та температури розчину. У залежності від ступеня дисоціації  $\alpha$  відрізняють неелектроліти ( $\alpha \approx 0$ ); сильні електроліти ( $\alpha \approx 1$ ) і слабкі електроліти ( $0 < \alpha \leq 1$ ). При цьому  $\alpha$  визначається відношенням числа молекул, що розпалися на іони, до загального числа іонізованих і неіонізованих розчинених молекул.

Електрична провідність  $G$  ( $\text{Ом}^{-1}$ ) розчину, як і електрична провідність провідників, є величина зворотна електричному опору  $R$  і визначається за рівнями:

$$G = S / \rho l \quad (2.69)$$

де  $S$  – переріз рідкого провідника,  $\text{см}^2$ ;  $l$  – довжина провідника,  $\text{см}$ ;  $\rho$  – питомий електричний опір,  $\text{Ом}\cdot\text{см}$ .

Величина  $\sigma$  ( $\text{См}/\text{см}$ ), зворотна питомому електричному опору, називається питомою електричною провідністю (УЭП). З урахуванням цього і формули (2.69) величину  $\sigma$  можна представити у вигляді рівняння:

$$\sigma = Gl / S \quad (2.70)$$

Для багатьох неорганічних речовин питома електрична провідність  $\sigma$  є нелінійною функцією їх концентрацій. Звичайно з підвищенням концентрації електроліту у воді величина  $\sigma$  спочатку зростає (див. рис. 2.90), що пояснюється підвищенням ступеня дисоціації  $\alpha$ , а потім починає спадати у зв'язку з тим, що з нормальним зростанням концентрації скорочуються відстані між іонами, зростають сили електричної взаємодії поміж ними і зменшується ступінь дисоціації молекул.

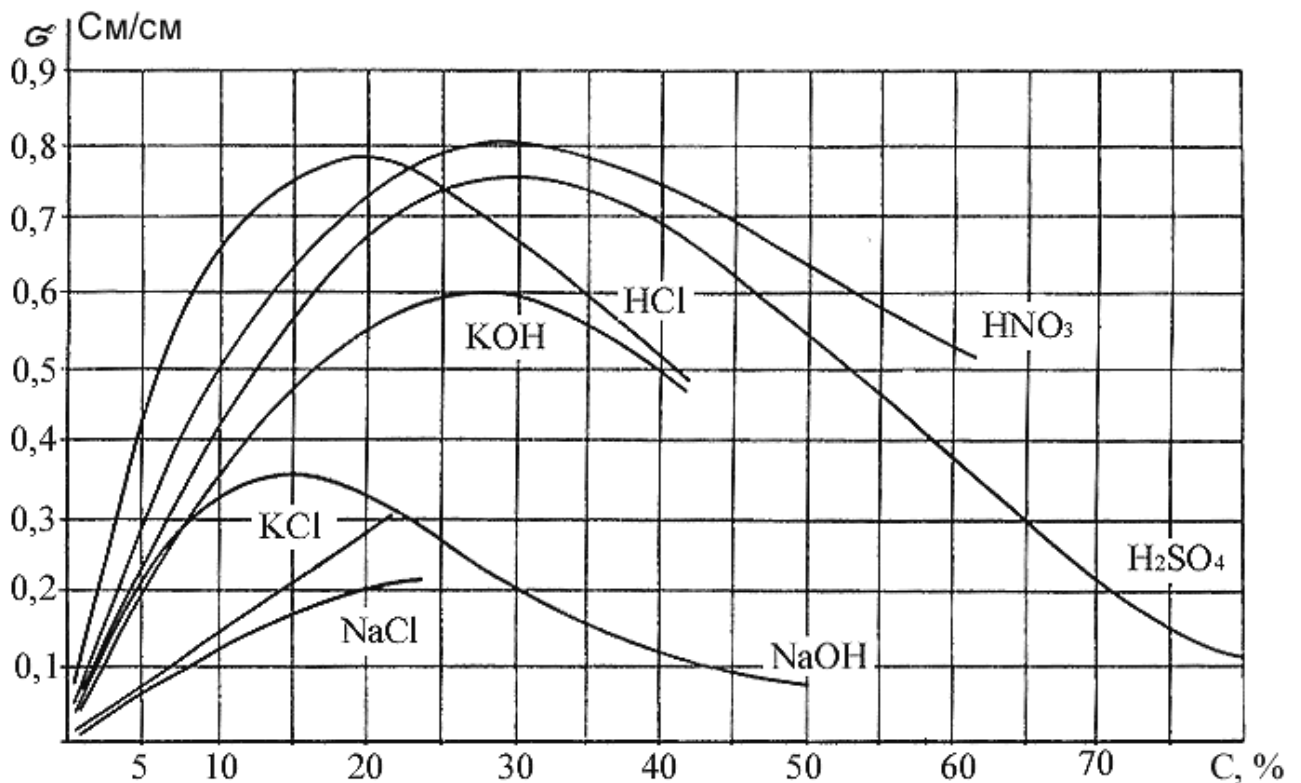


Рис. 2.90. Залежність питомої електричної провідності  $\sigma$  деяких розчинів від їх концентрацій  $C$  при  $20^\circ\text{C}$ .

Згідно з рис. 2.90 для отримання однозначної залежності між концентрацією і електропровідністю необхідно здійснювати вимірювання у межах концентрацій, розташованих з одного боку від максимуму. До того ж криві зліва від максимуму мають більшу крутизну. Отже, у цій області концентрацій кондуктометричний метод має найбільшу чутливість. При цьому, у значних межах вимірювання концентрацій як зліва так і справа від максимуму залежності близькі до лінійних.

Кожна речовина, що присутня у розчині, впливає на його загальну електропровідність у відповідності із значенням своєї особистої

провідності. У слабо концентрованих розчинів електропровідності окремих речовин можна підсумовувати.

Таким чином, прилади, засновані на вимірюванні електропровідності розчинів, будуть визначати повну провідність, утворену різними іонами, що містяться у розчині. Концентрацію однієї речовини у розчині можна визначити лише у тому випадку, якщо електропровідність інших речовин значно нижче або їх концентрація залишається незмінною.

Електрична провідність рідини з підвищенням температури зростає по експоненціальному закону. У невеликому температурному інтервалі залежність питомої електропровідності від температури визначається за формулою:

$$\sigma_t = \sigma_{18} [1 + \alpha_\sigma (t - t_0) + \beta_\sigma (t - t_0)^2] \quad (2.71)$$

де  $\sigma_t$ ,  $\sigma_{18}$  – питома електропровідність електроліту відповідно при температурі  $t$  і  $18$  °C;  $\alpha_\sigma$  і  $\beta_\sigma$  – температурні коефіцієнти.

Значення коефіцієнтів  $\alpha_\sigma$  залежить від концентрації розчинів і хімічної природи речовини. Для слабких розчинів солей у середньому  $\alpha_\sigma \approx 0,024$  град<sup>-1</sup>, для лугів  $\alpha_\sigma \approx 0,019$  град<sup>-1</sup>, а для слабких розчинів кислот  $\alpha_\sigma \approx 0,017$  град<sup>-1</sup>. Отже, електрична провідність слабких розчинів при нагріванні їх на  $1$  °C підвищується на  $1,5 \div 2,5$  %. Для середніх і сильних розчинів величина  $\alpha_\sigma$  значно вище. Тому у всіх вимірювальних приладах передбачений блок автоматичної компенсації температурної похибки або стабілізації температури розчину у процесі вимірювання.

Промислові кондуктометричні концентратоміри і солеміри розподіляються на контактні і безконтактні. У перших електроди, утворюючі вимірювальну ячейку, безпосередньо стикаються з середовищем, що аналізується. У других – чутливі елементи (електроди) ізольовані від середовища, що аналізується, шаром стійкого до цього середовища матеріалу. До того ж, безконтактні кондуктометричні концентратоміри можуть використовувати для живлення вимірювальної ячейки змінний струм як промислової (низькочастотні), так і підвищеної частоти, а вимірювальні ячейки – ємкісного та індуктивного типів.

*Контактні кондуктометри* у якості чутливого елемента вміщують найчастіше двоелектродну вимірювальну ячейку, константа якої  $K = l / S$  ( $l$  – відстань між електродами;  $S$  – площа поперечно-

го перерізу електродів) визначається експериментальним шляхом, і при вимірюваннях повинна залишатися постійною. За призначенням можуть бути концентратомірами сигналізаторами та солемірами. Живлення вимірювальної ячейки звичайно здійснюється змінним струмом промислової частоти з метою запобігання виникнення поляризації електродів, що призводить до зменшення похибки вимірювань. На рис. 2.91 наведені найбільш розповсюджені схеми автоматичних контактних кондуктометрів з температурним компенсатором.

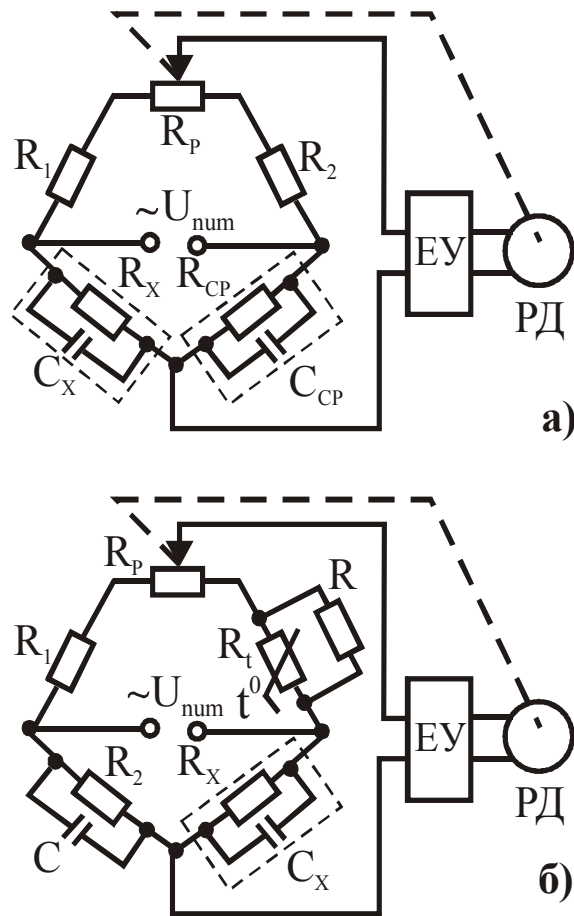


Рис. 2.91. Вимірювальні схеми автоматичних контактних кондуктометрів: а - з рідинною температурною компенсацією; б - з терморезистором;  $R_1$  і  $R_2$  - постійні манганінові опори; ЕУ - електронний підсилювач; РД - реверсивний двигун, механічно зв'язаний із змінним резистором (реохордом)  $R_p$ .

вимірювальної ячейки. При цьому додаткову електродну ячейку ( $C_{CP}$  і  $R_{CP}$ ) прийнято називати порівнювальною. Вона заповнюється ета-

Представлені схеми автоматичних кондуктометрів становлять собою врівноважений міст, живлення якого здійснюється змінним струмом. Тому для врівноваження мостової схеми внаслідок утворення комплексного опору вимірювальної двохелектродної ячейки в неї уведено додаткові елементи, використання яких забезпечує врівноваження моста не тільки за модулем, але й по фазі струмів у його плечах. Для цього у суміжне плече з  $R_x$  включено паралельно постійному опору  $R_{CP}$  (рис. 2.91а) чи  $R_2$  (рис. 2.11б) відповідно конденсатор  $C_{CP}$  чи  $C$ , ємність якого залежить від ємності вимірювальної ячейки.

У схемі з рідинною температурною компенсацією (рис. 2.91а) компенсатор становить собою електродну ячейку з опором  $R_{CP}$  і ємністю  $C_{CP}$ , параметри яких ідентичні опору  $R_x$  і ємності  $C_x$  основної

лонною рідиною і має температурний коефіцієнт, що дорівнює температурному коефіцієнту рідини, що аналізується. Порівнювальну ячейку поміщують у датчик разом з вимірювальною ячейкою. Завдяки рівності температурних коефіцієнтів еталонної і контрольованої рідин, а також їх температур, зміна опору вимірювальної ячейки від коливань температури буде скомпенсована зміною опору порівнювальної ячейки.

Найчастіше використовується схема температурної компенсації за рахунок включення в одне із пліч моста терморезистора  $R_t$  (рис. 2.91б). У цій схемі з метою узгодження температурних коефіцієнтів терморезистора і контрольованого розчину паралельно  $R_t$  включають резистор  $R_{III}$  з постійним опором. Типовим приладом, що діє за такою схемою компенсації, є кондуктометр загальнопромислового призначення КВА 4, призначений для автоматичного безперервного вимірювання питомої електричної провідності (УЭП) наведеній до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  особливо чистої (деіонізованої) води та дистильованої води і видачі сигналу про досягнення УЭП води наперед встановленого значення. Широко застосовується у виробництві чистих реактивів, електронній, фармацевтичній та інших галузях промисловості.

Кондуктометри вимірюють УЭП води у діапазоні  $0 \div 1000\text{ мкСм/м}$  з відбиттям значень на цифровому індикаторі, а також здійснюють перетворення показань в пропорційні уніфіковані вихідні сигнали постійного струму  $0 \div 5\text{ мА}$  (з навантаженням не більше  $2\text{ кОм}$ ) чи  $4 \div 20\text{ мА}$  (з навантаженням до  $0,5\text{ кОм}$ ). В першому випадку виконання кондуктометра КВА 4 – 1, а у другому – КВА 4 – 2. при застосуванні резистора С2-14-0,25-2 Ом паралельно навантаженню (воринний прилад) вихідний сигнал змінюється у діапазоні  $0 \div 10\text{ мВ}$ . До складу кондуктометра входять: передавальний U2 і первинний U1 перетворювачі, з'єднані поміж собою кабелем. Функціональна схема кондуктометра наведена на рис. 2.92.

У первинному U1 перетворювачі сигнал генератора прямокутних імпульсів 1 надходять на атенсатор 2, керований комутатором 8 блоку U2, і далі на електродну ячейку 3, крізь яку протікає аналізуєма рідина. Напруга з електродної ячейки 3 і вузла термокомпенсації 5 подається на вхід підсилювача – суматора 4. Підсилений сигнал проходить на вхід амплітудного детектора 6. Продетектований сигнал прямує далі на активний фільтр 7, з виходу якого по лінії зв'язку на передавальний перетворювач U2. У перетворювачі U2 сигнал з

лінії зв'язку надходить на масштабуючий підсилювач 9. Сигнал після масштабування прямує на перетворювач “напруга – струм” 11, аналого-цифровий перетворювач 12 і блок сигналізації 13. Перетворювач 11 формує на виході уніфікований струмовий сигнал  $0 \div 5$  чи  $4 \div 20$  мА. З перетворювача 12 сигнал надходить на цифровий рідиннокристалічний індикатор 14.

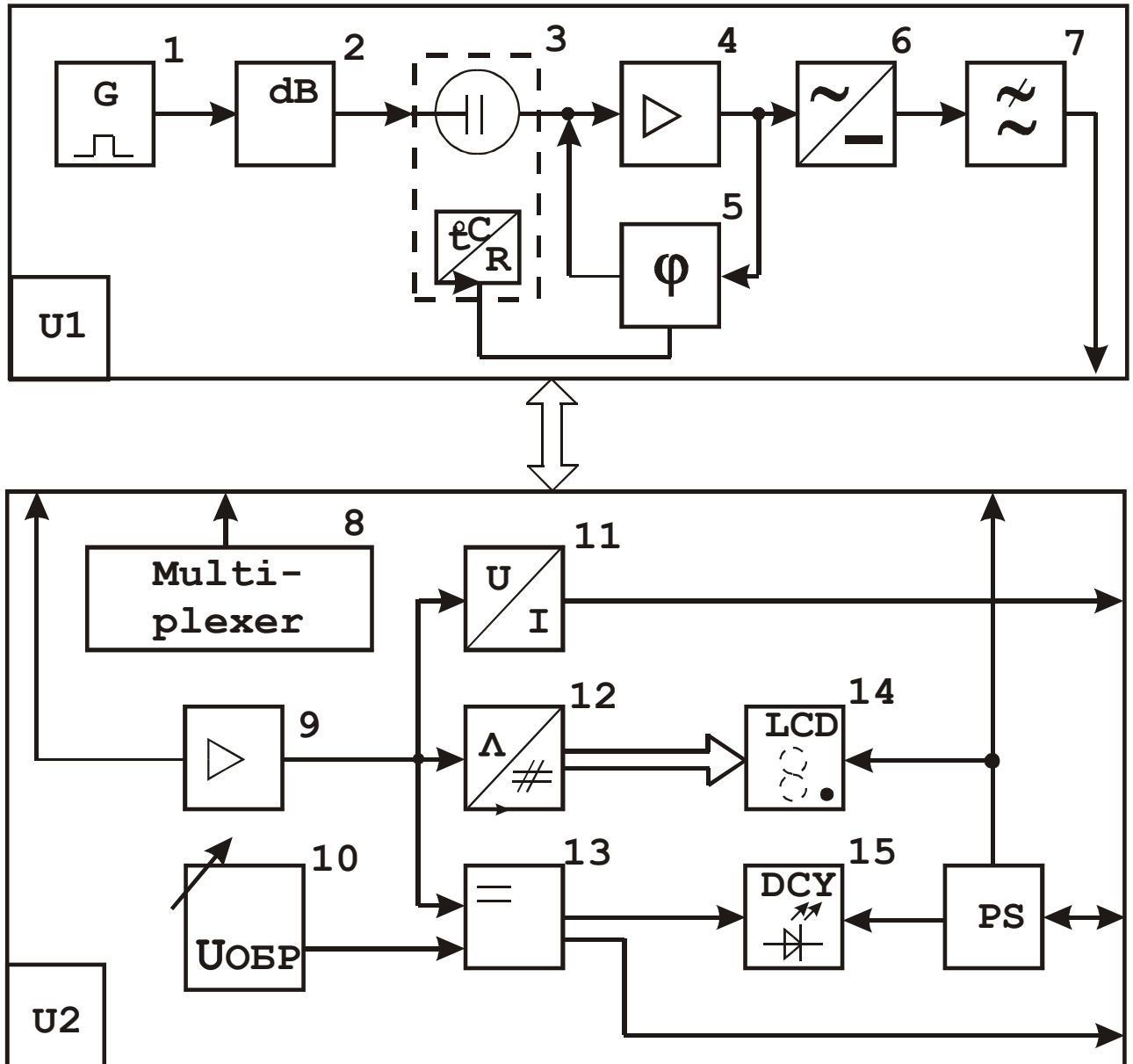


Рис. 2.92. Функціональна схема кондуктометра КВА 4.

У блоці сигналізації 13 сигнал порівнюється із зразковою напругою, що формується регульованим джерелом зразкової напруги 10. При досягненні поточним значенням концентрації зразкової напруги висвітлюється світлодіодний індикатор 15. Блок 13 містить

реле, що здійснює комутацію виходу приладу, для керування зовнішніх виконавчих пристроїв. Блок живлення 16 формує напругу для живлення приладу і світлодіодного індикатора 15.

Корпус первинного перетворювача 1 (рис. 2.93), виготовлений з оргскла, представляє собою товстостінний стакан з двома штуцерами 2 для входу і виходу води.

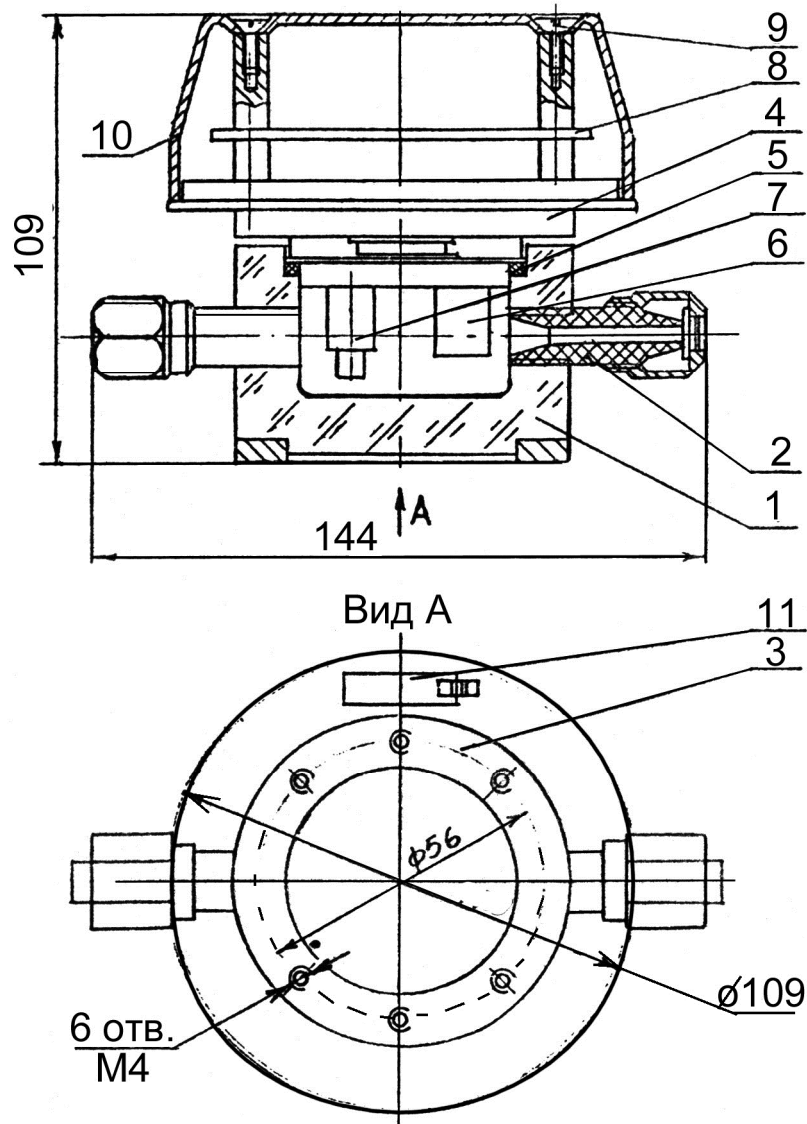


Рис. 2.93. Конструкція первинного перетворювача кондуктометра КВА4.

До корпусу кріпиться гвинтами підґрунтя 4, виготовлене також з оргскла. Гвинти проходять крізь корпус і закручуються у кільце 3. Для герметичності поміж корпусом і підґрунтям заходиться прокладка 5. На виступаючій частині підґрунтя у електронній ячeyці 6 встановлені електроди, виводи від яких виходять на верхню частину підґрунтя. На підґрунті первинного перетворювача закріплений за



допомогою різьбової втулки терморезистор температурної корекції, установлений в стакані 7 з фторопласта. Вільний об'єм у стакані заповнений теплопровідною пастою для покращення теплопередачі. До підґрунтя первинного перетворювача також за допомогою двох стійок закріплена плита 8, на якій установлені елементи електричної схеми з розніманням 11. На стійках гвинтами 8 прикріплений ковпак 10.

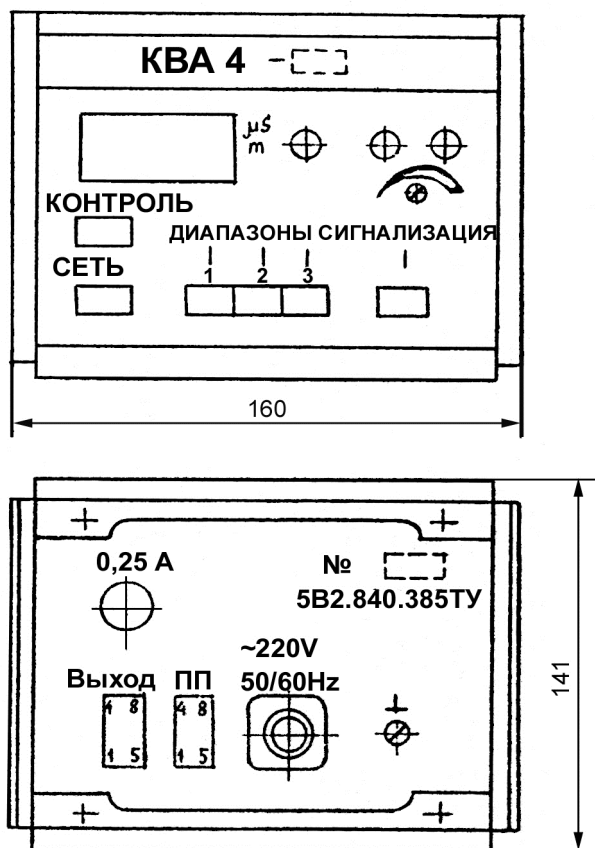


Рис. 2.94. Загальний вигляд передавального перетворювача кондуктометра КВА 4.

Загальний вигляд передавального перетворювача наведено на рис. 2.94. На лицьовій його панелі розташовані: вимикач “мережа”; цифрове табло для індикації величини УЭП; перемикач діапазонів вимірювання; індикатор “відмова БП”; потенціометр для встановлення рівня сигналізації; кнопка і індикатори (червоний, зелений) “сигналізація”. Діапазон вимірювання розподілений на три під діапазони:  $0 \div 10$ ,  $0 \div 100$  і  $0 \div 1000$  мкСм/м. На задній панелі розташовані: запобіжник плавкий; рознімання підключення мережі; рознімання підключення первинного перетворювача ПП; рознімання вихідних сигналів і сигналізації “вихід”.

Відстань поміж первинним і передавальним перетворювачами не повинна перевищувати 100 м.

У тому випадку, коли установка очистки води забезпечує продуктивність більше 3 л/хвил, первинний перетворювач необхідно встановлювати на байпасі з регулювальним вентилем. Передавальний перетворювач призначений для щитового монтажу. Кондуктометр може встановлюватись тільки у вибухо- і пожегобезпечних приміщеннях.

Межа припустимого значення основної наведеної похибки приладу не перевищує  $\pm 2\%$ , а зони нечутливості сигналізації не перевищує  $\pm 3\%$ .

Безконтактні кондуктометри забезпечують можливість вимірювання концентрації сильно забруднених агресивних рідин, суспензій і колоїдних розчинів. При безконтактному методі виключається похибка від забруднення електродів. Безконтактні кондуктометри у залежності від метода вимірювання провідності розподіляються на низькочастотні (індуктивні) до  $1000 \text{ Гц}$  і високочастотні (індуктивні, ємкісні) до  $10^8 \text{ Гц}$ . За конструктивним виконанням вимірювальні ячейки можуть бути як проточні, так і занурені.

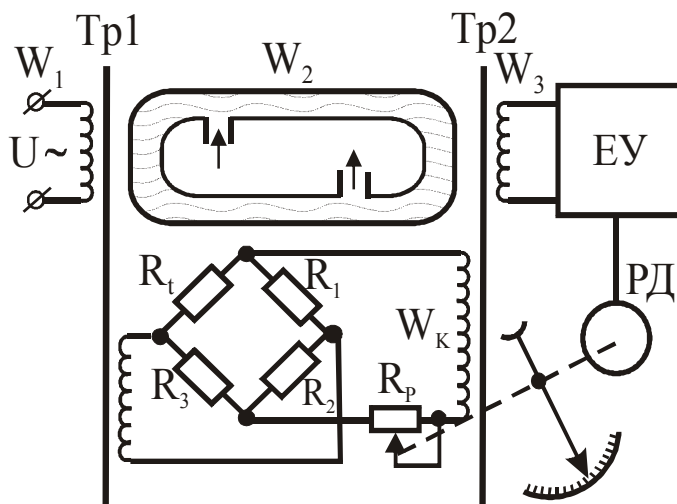


Рис. 2.95. Принципова схема кондуктометра з рідинним контуром зв'язку.

У відповідності зі схемою труба з діелектрика утворює замкнений виток  $W_2$ , що заповнений розчином електроліту, що аналізується. Зовні на трубу намотані обмотки  $W_1$  і  $W_3$  двох трансформаторів – збуджуючого  $Tr_1$  і вимірювального  $Tr_2$ . Первинна обмотка трансформатора  $Tr_1$  живиться від джерела змінного струму  $U$ . Замкнений рідинний виток, утворений розчином електроліту у трубці, виконує функцію вторинної обмотки трансформатора  $Tr_1$ . Внаслідок електромагнітної взаємодії у рідинному витку  $W_2$  індукується електрорушійна сила, величина якої визначається рівнянням:

$$E_{W_2} = \omega_1 U / \omega_2, \quad (2.72)$$

де  $\omega_1$  – кількість витків первинної обмотки трансформатора  $Tr_1$ ;  $\omega_2 = l$  – кількість витків рідини;  $U$  – напруга, що живить первинну обмотку  $Tr_1$ .

Сила струму, що виникає у рідині під впливом  $E_{W_2}$  складе:

$$I_{W_2} = E_{W_2} / R_{W_2} = E_{W_2} \sigma / K = \omega_1 U \sigma / \omega_2 K, \quad (2.73)$$

Датчик приладу становить собою основну частину схеми. Принцип дії низькочастотних безконтактних кондуктометрів може бути проілюстрованим схемою, наведеною на рис. 2.95.

У відповідності зі схемою труба з діелектрика утворює замкнений виток  $W_2$ , що заповнений розчином електроліту, що аналізується.

де  $R_{W2}$  – опір рідинного витка;  $K$  – константа низькочастотної кондуктометричної ячейки, що дорівнює відношенню довжини рідинного витка до площі його перерізу (визначається експериментально).

Усі величини правої частини рівняння (2.73) постійні, окрім  $\sigma$ . Тому сила струму буде пропорційною концентрації розчину, що підлягає контролю.

Вимірювання сили струму  $I_{W2}$  здійснюється трансформатором Тр2, для якого рідинний виток є первинною обмоткою. Електрорушійна сила  $E_{W3}$ , що наводиться у вторинній обмотці Тр2, буде пропорційною концентрації розчину. Вимірювання  $E_{W3}$  здійснюється компенсаційним методом, що вимагає уводу додаткової обмотки  $W_K$  трансформатора Тр2. Умова компенсації має вигляд  $I_K \omega_K = I_{W2} \omega_2$ , а з урахуванням  $\omega_2 = 1$  величина  $I_K$  складе:  $I_K = I_{W2} / \omega_K$ . Для вимірювання сили струму крізь компенсаційну обмотку застосовують реверсивний двигун РД, який пересуває за допомогою механічного зв'язку реохорд  $R_P$ . Положення  $R_P$  і зв'язаної з ним стрілки приладу пропорційно концентрації розчину. Компенсація температурної похибки вимірювань виконується із застосуванням металевого термоопору  $R_t$ , що включений у мостове коло корегування ( $R_t - R1 - R2 - R3$ ) і знаходиться у розчині, що контролюється.

За такою схемою побудовані концентратоміри типу КК-8 (ДКБ-1, ДКБ-2), КК-9 (ДКБ-3), що призначені для вимірювання, реєстрації і сигналізації УЭП чистих і забруднених водних розчинів кислот, лугів і солей, наведеній до  $20^\circ\text{C}$ , у межах від  $10^{-2}$  до  $1 \text{ См/см}$  в інтервалі температур середовища, що аналізується, від  $1$  до  $110^\circ\text{C}$  при наявності температурної компенсації на  $\pm 15^\circ\text{C}$  від середньої точки робочої температури. Концентратоміри КК-8 і КК-9 складаються з датчика Э1 вимірювального блоку Э2 і електронного автоматичного моста Э3 типу КСМ-3П (мод. 1300), у якому відключена вимірювальна схема. При цьому діапазон вимірювання розподілений на два піддіапазони:  $0,01 \div 0,1$  і  $0,1 \div 1 \text{ См/см}$ . Припустимий тиск середовища, що аналізується складає  $0,5 \text{ МПа}$ . Прилад КК-8 має датчик зануреного типу, а КК-9 – проточний. В усьому устрій ідентичний.

Датчик приладу становить собою основну частину схеми. Загальна конструкція індуктивних датчиків наведена на рис. 2.96 і 2.97. Чутлива частина 1 датчика (рис. 2.96) складається з двох тороїдальних трансформаторів: силового 14 і вимірювального 15, розподілених електростатичним екраном 16, і термістора 17. Після зборки уся чутлива частина датчика покривається шаром епоксидного компаун-

да, поміщується у корпус 3 з поліпропілену і закривається заглушкою 6, яка приварюється до корпусу 3.

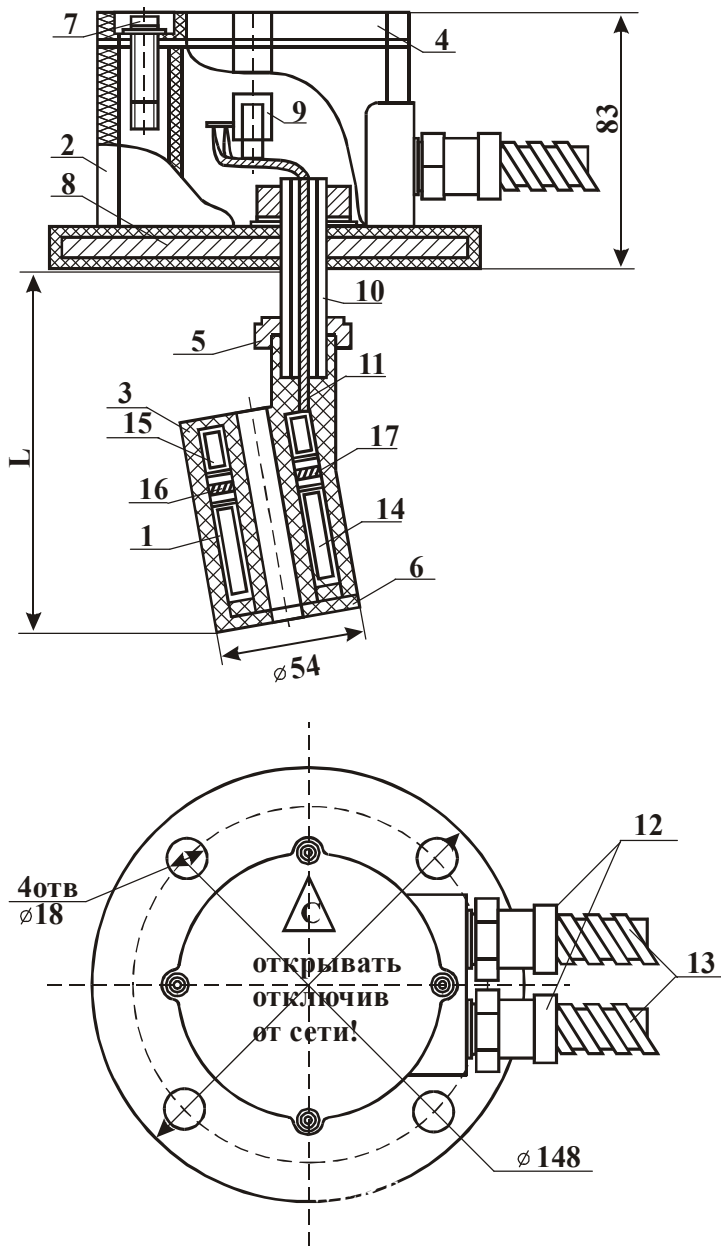


Рис. 2.96. Конструкція індуктивного датчика зануреного типу концентратоміра КК-9.

Витрата вимірюваного розчину крізь проточний датчик повинна бути у межах  $30 \div 100$  л/год. Концентрація розчину, що вимірюється, визначається за графіком (рис. 2.90). Клас точності концентратомірів цього типу – 2,5.

Метод високочастотної безконтактної кондуктометрії оснований на взаємодії електромагнітного поля високої частоти з підлягаючим аналізу електролітом, що міститься у вимірювальній ячійці ємнісного чи індуктивного типу (див. рис. 2.98). Внаслідок взаємодії

У паросток корпусу встановлюється металева штанга 10, верхній кінець якої угвинчується у фланець 2. Кінці обмоток трансформаторів виводяться на клемну плату 9 коробки, відлітої разом з фланцем. У клемній коробці розташовані два штуцери 12 із сальниковими ущільненнями для виводу з'єднувальних кабелів у гнучких рукавах 13. Коробка закрита кришкою 4. Установкою штанги тієї чи іншої довжини  $L$  (500, 1000, 1500 мм) забезпечується необхідна глибина занурення.

Проточний варіант датчика (рис. 2.97.) має мінімальну довжину датчика зануреного типу, але поміщується у спеціальний литий корпус 1, прикріплений до нього бовтами 2. Ущільнення між фланцем датчика і корпусом здійснюється за допомогою ущільнюючої

буде змінюватись імпеданс ячейки, який функціонально зв'язаний з електропровідністю  $G$  і діелектричною проникністю  $\varepsilon$  розчину, що контролюється.

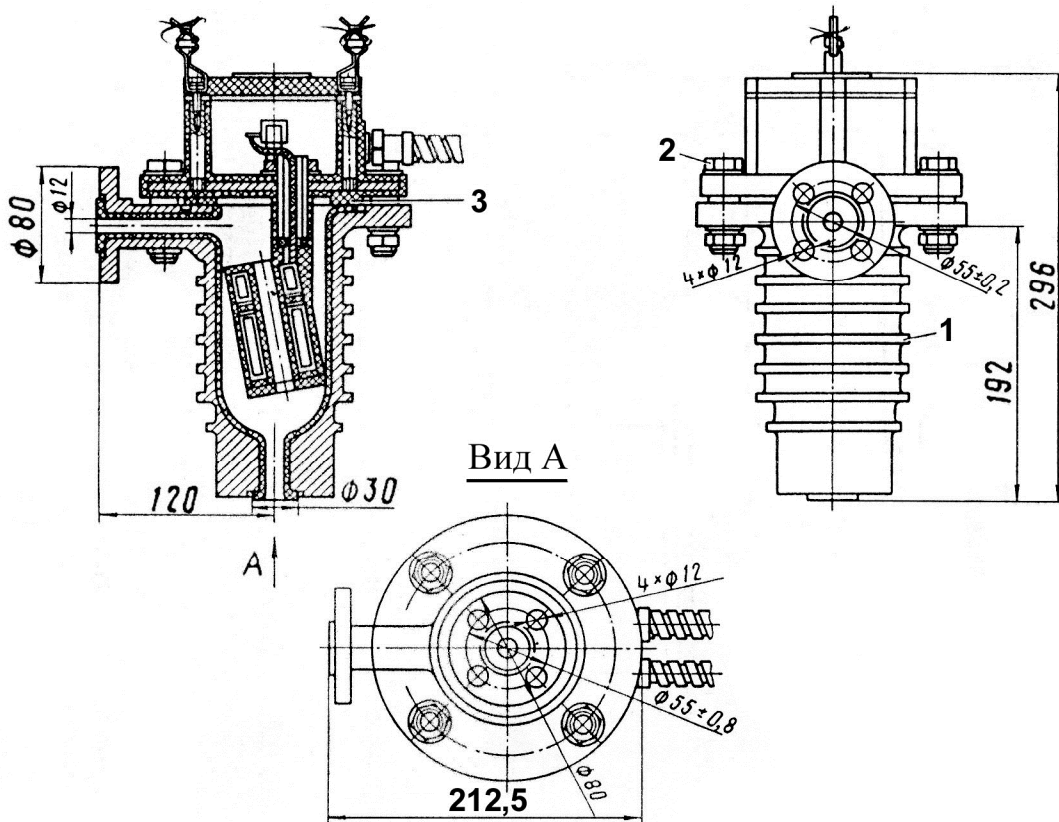


Рис. 2.97. Конструкція індуктивного датчика проточного типу концентратоміра КК-8.

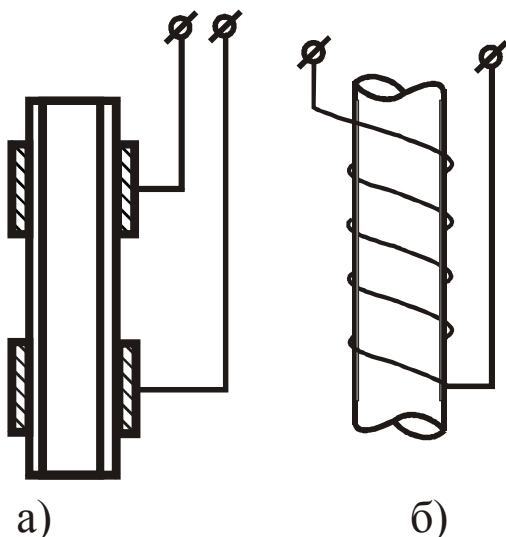


Рис. 2.98. Високочастотні кондуктометричні ячейки: а - ємнісна з двома електродами; б - індуктивна.

Високочастотні кондуктометри забезпечують відносне вимірювання електропровідності, тобто за допомогою цих приладів вимірюють не електропровідність, а один з електричних параметрів ячейки, що функціонально залежить від електропровідності контролюваного розчину. Тому застосуванню високочастотних кондуктометрів передують експериментальна побудова статичних характеристик приладу. Статична характеристика високочастотного кондуктометра залежить від багатьох показників: геометричних

параметрів ячейки, електропровідності розчину, частоти генератора  $f$ , що живить схему, типу вимірювальної ячейки. Внаслідок цього кожний прилад має індивідуальне градуювання.

Серед високочастотних кондуктометрів найбільш широкое застосування отримали прилади з ячейками конденсаторного типу (див. рис. 2.99), вихідний сигнал яких визначається дійсною складовою імпедансу контура, тобто:

$$U_{\text{ВИХ}} = I / f(G), \quad (2.74)$$

де  $I = \text{Const}$  – амплітуда струму у коливальному контурі, настроєному у резонанс.

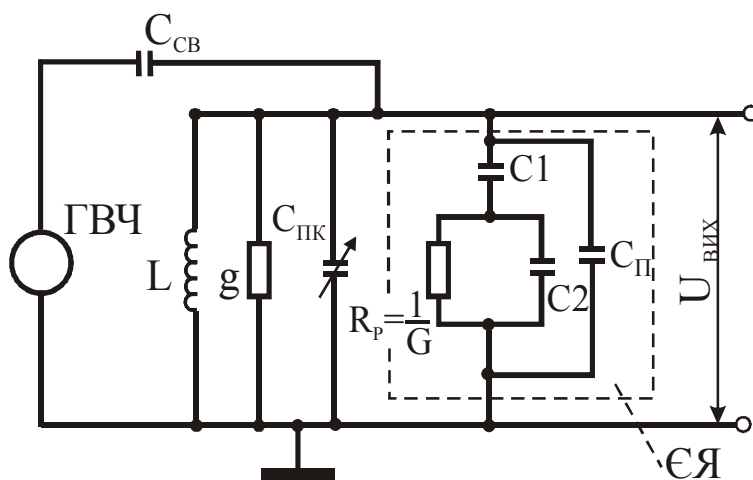


Рис. 2.99. Контурна вимірювальна схема з паралельною ємнісною ячейкою (ЄЯ): ГВЧ – генератор високої частоти;  $C_{CB}$  – ємність зв'язку;  $g$  – еквівалентна активна провідність коливального контуру;  $L$  – індуктивність коливального контуру;  $C_{ПК}$  – конденсатор змінної ємності;  $C_{П}$  – ємність розсіювання (паразитна ємність);  $C1$  і  $C2$  – ємності, що обумовлені діелектричними властивостями відповідно матеріалу стінок ячейки і розчину;  $R_p = 1/G$  – активний опір контуру, що визначається на резонансній частоті;  $U_{\text{ВИХ}}$  – вихідна напруга.

У відповідності зі схемою ЄЯ включена у паралельний коливальний контур і є складовою частиною його ємності і активної провідності. З метою забезпечення постійності струму  $I$  конденсатор  $C_{CB}$  обирають таким чином, щоб виконувалась умова  $Z_{CB} \gg R_p$  ( $Z_{CB}$  – повний опір).

Серед цих приладів, що характеризуються високою надійністю і широкими функціональними можливостями, найбільше розповсюдження у хімічній і молочній промисловості, теплоенергетиці отримали аналізатори типу КВЧ-5М. Вони застосовуються для автоматич-

ного безперервного вимірювання УЕП наведеній до значення УЕП при робочій температурі чи масової долі аналізованого компонента у водному розчині, для якого нормований однозначний зв'язок між УЕП і аналізованим компонентом, з видачею вихідних уніфікованих



електричних сигналів постійного струму  $0 \div 5 \text{ мА}$  чи  $4 \div 20 \text{ мА}$ , пропорційних вимірюваному параметру.

Конструктивно аналізатор складається з вимірювального перетворювача ПИ, з'єднаного кабелем із з'єднувальною коробкою, і передавального перетворювача ПП. Відстань між ПИ і ПП по лінії зв'язку не повинна перевищувати  $200 \text{ м}$ . У залежності від характеристик аналізованого середовища, діапазонів і параметрів вимірювання (УЭП чи концентрація), способу розміщення вимірювального перетворювача (проточний, занурений) в аналізованому середовищі, виконання (понад 100) приладу найрізноманітніші.

Принцип дії аналізатора оснований на вимірюванні еквівалентного опору контуру (робочого) високочастотного генератора, який у режимі “Робота” залежить від УЭП аналізованого середовища, а у режимі “контроль” до генератора підключається інший контур (порівняльний) із завчасно виставленим значенням опору (провідності).

Електрична схема аналізатора конструктивно розміщена у двох перетворювачах ПИ і ПП. Перетворювач ПИ складається з чутливого елемента, блоку вимірювання провідності і блоку температурної компенсації. На рис. 2.100 наведені схеми устрою перетворювачів ПИ проточного і зануреного виконань.

Перетворювачі ПИ у відповідності з рис. 2.100 містять елемент чутливий 1, корпус 2, підґрунтя 3 і кришку 5. Підґрунтя, у залежності від агресивності аналізованого середовища може мати захисне корозійно - стійке покриття. Кришка кріпиться до підґрунтя шістьма гайками і ущільнюється за допомогою ущільнюючої прокладки 4. Під кришкою розміщені дві печатні плати – блоку вимірювання провідності 7 і блоку температурної компенсації 6. З'єднувальна коробка (відсутня на кресленнях) призначена для зручності монтажу та обслуговування аналізатора і приєднується до підґрунтя 3 кабелем за допомогою штуцера, що забезпечує герметизацію з'єднання. Герметичність з'єднання “чутливий елемент – корпус” утворюється за рахунок постійного утиску ущільнення 10 пружиною 9. Чутливий елемент 1 представляє собою набір альсиферових кілець 12, на якому намотано дві обмотки L1 (робоча) і L2 (компенсуюча). Цей набір кілець поміщений разом з терморезистором 13 (RK) у захисний стакан, хімічно стійкий до середовища, що аналізується. Конструктивне оформлення деяких ПИ може відрізнятись у залежності від агресивності середовища, що аналізується.

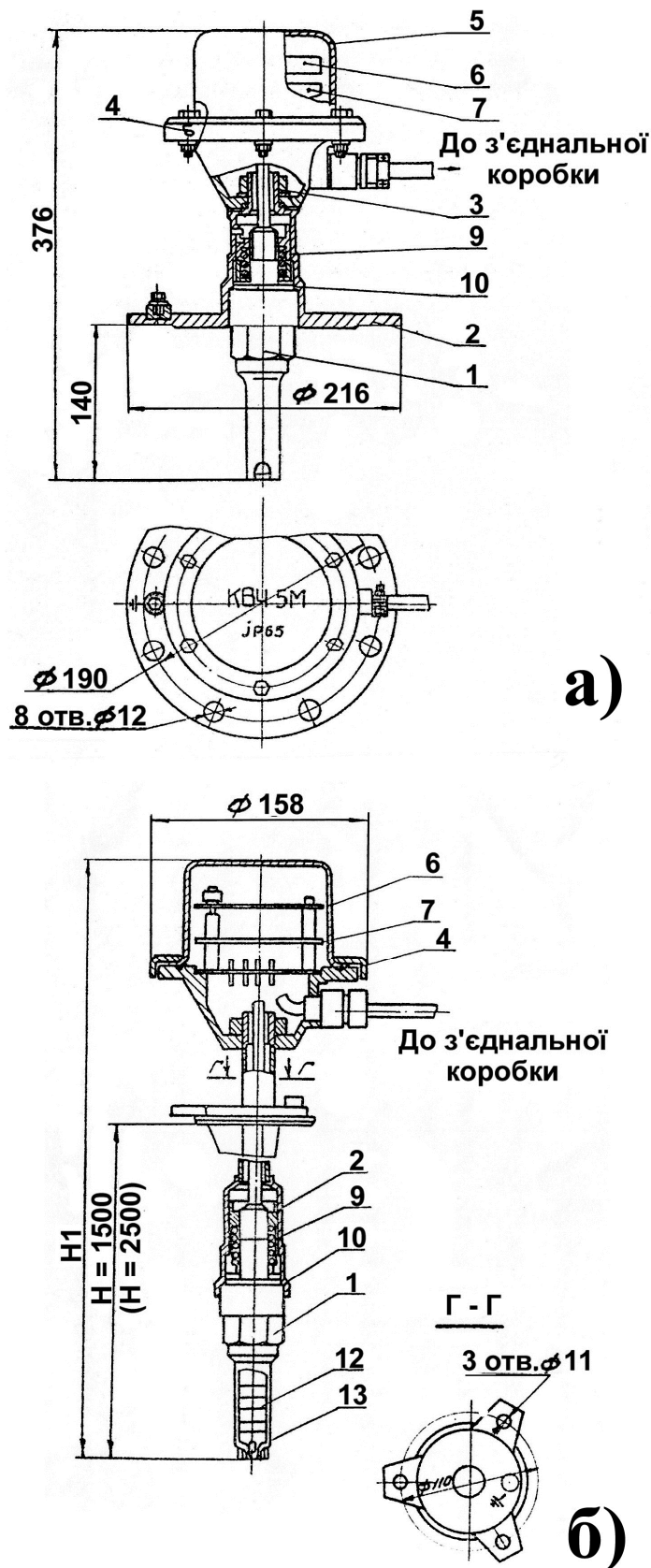


Рис. 2.100. Конструкція перетворювача вимірювального ПИ проточного (а) і зануреного (б) виконань: Н1, дорівнює 1720 і 2720 мм.

Робочий контур (L1, C2) чутливого елемента визначає амплітуду напруги, що генерується високочастотним генератором. При цьому, чим менше значення УЭП, тим більше амплітуда високочастотної напруги і навпаки, з підвищенням УЭП амплітуда високочастотної напруги зменшується. Амплітуда високочастотної напруги перетворюється у блоці вимірювання провідності в постійну напругу пропорційну УЭП і подається на блок температурної компенсації. На вхід блоку температурної компенсації підключений терморезистор РК. У підсумку обробки інформації, що надходить з терморезистора і блоку вимірювання провідності на виході ПИ з'являється сигнал постійного струму, в який уведена температурна поправка. З виходу ПИ сигнал прямує на вхід ПП.

Перетворювач ПП вміщує блок живлення, блок вихідних сигналів і блок лінеаризації (тільки у концентратомірах). Отриманий таким чином вхідний сигнал з ПИ надходить на блок вихідних сигналів, у якому він нормується і далі прямує на вихід. У випадку концентра-



томіру цей сигнал прямує на блок лінеаризації для додаткового перетворення у пропорційний сигнал концентрації аналізованого компонента і далі подається на блок вихідних сигналів, де підсилюється за потужністю. Аналізатор живиться від мережі змінного струму напругою  $220\text{ В}$  з частотою  $50\text{ Гц}$  через понижуючий трансформатор і блок живлення (стабілізатора постійної напруги).

Перетворювач ПИ встановлюється на байпасній трубопроводній лінії і повинен бути захищеним від попадання на нього прямих сонячних променів. Тиск середовища, що аналізується, повинен складати до  $1,2\text{ МПа}$ , а витрата крізь датчик проточного виконання не повинна перевищувати  $0,16 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{с}$  з в'язкістю до  $0,2\text{ Па}\cdot\text{с}$ . Клас точності  $0,4 \div 4\%$  у залежності від середовища і діапазону вимірювання ( $5 \div 100\text{ См/м}$ ).

**Потенціометричні іономірні аналізатори рідини** застосовують для визначення активності іонів водню натрію, хрому та інших речовин у розчинах, яка характеризує фізико – хімічні, біохімічні і хімічні процеси у різних галузях промисловості. При вимірюванні складу і якості речовини найбільш широко використовується властивість іонів водню у водних розчинах речовини, яка визначає міру кислотності чи лужності розчинів. Поява водневих іонів у розчині викликана дисоціацією частини молекул води, що розпадаються на катіони водню  $\text{H}^+$  і аніони гідроксиду  $\text{OH}^-$ . Дисоціація молекул води призводить до утворення іонів водню і гідроксиду у рівних кількостях, тобто їх концентрації  $[\text{H}^+]$  і  $[\text{OH}^-]$  однакові. Добуток концентрацій іонів  $[\text{H}^+]$  і  $[\text{OH}^-]$  ( $\text{г}\cdot\text{іон/л}$ ), що утворюються у процесі дисоціації води, називається іонним добутком води.

$$K_{\text{H}_2\text{O}} = [\text{H}^+] [\text{OH}^-] \quad (2.75)$$

Коефіцієнт  $K_{\text{H}_2\text{O}}$  залежить від температури, але у інтервалі температур  $20 \div 25\text{ }^\circ\text{C}$  значення іонного добутку дорівнює  $10^{-14}$  і постійне. Тому у чистій воді і будь-якому нейтральному розчині концентрації  $[\text{H}^+]$  і  $[\text{OH}^-]$  однакові –  $10^{-7}\text{ г}\cdot\text{іон/літр}$ . Якщо  $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-] > 10^{-7}$ , то розчин має кислу реакцію, а у випадку  $[\text{H}^+] < [\text{OH}^-] < 10^{-7}$  – розчин має лужну реакцію.

У реальних умовах доводиться мати справу з достатньо концентрованими, найчастіше багатоконпонентними, розчинами кислот, лугів і солей, у яких крім катіонів водню і аніонів гідроксиду може бути велика кількість інших негативних і позитивних іонів, отрима-

них при дисоціації розчиненої речовини. Внаслідок електростатичної взаємодії іонів частина їх з'єднується у іонні пари і вони стають неактивними, що призводить до зміни активної концентрації іонів  $[H^+]$  і  $[OH^-]$ . У таких розчинах, що містять велику кількість різних іонів, активна концентрація іонів водню може значно відрізнятись від їх загальної концентрації. Тому дійсне значення іонного добутку для водних розчинів залежить не тільки від концентрації, але і від температури, природи та розчинника і визначається рівнянням:

$$K_{H_2O} = [H^+][OH^-] f_{H^+} f_{OH^-} \quad (2.76)$$

де  $f_{H^+}$  і  $f_{OH^-}$  - коефіцієнти активності іонів.

У практиці вимірювань концентрацію водневих іонів чисельно характеризують негативним логарифмом активності іонів водню

$\alpha_H = [H^+] f_{H^+}$ , яка позначається символом рН, тобто:

$$pH = -\lg \alpha_H \quad (2.77)$$

З урахуванням цього при температурі  $22^\circ C$  для нейтральних водних розчинів  $pH = 7$ , для кислотних  $pH < 7$ , для лужних  $pH > 7$ , а увесь діапазон зміни значення рН розчинів від самого кислого до самого лужного характеризується рядом чисел від 0 до 14.

Таким чином, при вимірюванні рН вимірюють не концентрацію кислоти чи лугу у розчині, а активність іонів водню. Цією обставиною, зокрема пояснюється значне зменшення значення рН лужних розчинів з підвищенням температури, хоча кількість лугу залишається незмінною.

Вимірювання активності іонів водню потенціометричним методом можливо з використанням "водневого" вимірювального електроду. Він становить собою пластинку з пористою поверхнею (найчастіше це губчаста пластинка), що поміщується у підлягаючий контролю розчин, який безперервно продувається газоподібним воднем при атмосферному тиску. Водень абсорбується поверхнею електрода, який завдяки цьому набуває властивостей водневого, тобто його потенціал визначається активністю іонів водню у розчині згідно з рівнянням Нернста:

$$E_H = E_{OH} \cdot 0,058165 \lg \alpha_H, \quad (2.78)$$

де  $E_{OH}$  – нормальний потенціал водневого електроду, тобто його потенціал у розчині з активністю іонів водню, що дорівнює одиниці (прийнято вважати  $E_{OH} \equiv 0$  за всіх значень температур);  $RT/F = 0,058165$  – постійний коефіцієнт при температурі  $20^\circ C$  після підстановки значень універсальної газової постійної  $R$  і числа Фарадея  $F$ .

Застосування розглянутого водневого електроду у виробничих умовах незручно. Тому у сучасних автоматичних рН-метрах у якості вимірювальних електродів використовують скляні електроди.

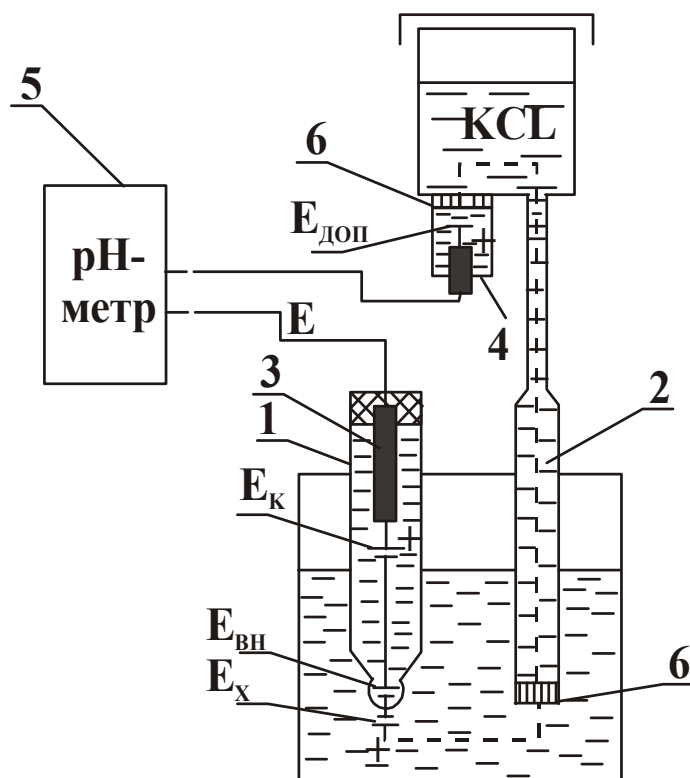


Рис. 2.101. Схема електродної вимірювальної системи.

При цьому, потенціал вимірювального електроду змінюється у залежності від зміни вимірюваної величини, а потенціал порівняльного електроду залишається постійним.

Звичайна схема електродної системи для вимірювання потенціалу, лінійно залежного від активності іонів в розчині і температури наведена на рис. 2.101.

При зануренні в аналізуємий розчин вимірювального електроду 1 на його зовнішній поверхні з'являється потенціал  $E_x$ , який є мірою активності іонів у розчині. Вимірювати значення  $E_x$  безпосередньо

Для вимірювання активності іонів водню застосовують у промисловості потенціометричний (гальванометричний) метод, оснований на вимірюванні різниці потенціалів електродних систем вибіркової дії. Найчастіше застосовують електродні системи, що складаються із скляного вимірювального електроду і хлорсрібного чи каломельного порівнювального електроду. Слід відзначати, що якщо здійснюється вимірювання активності інших видів іонів рХ, у якості вимірювального електроду використовується електрод іонселективний, тобто чутливий до цього виду іона. При

неможливо, тому застосовується ще один допоміжний електрод 4. Електрорушійна сила такої системи

$$E = E_K + E_{BH} + E_{доп} + E_X, \quad (2.79)$$

де  $E_K$  – потенціал додаткового (контактного) електрода 3 у стандартному розчині, що знаходиться усередині кульки;  $E_{BH}$  – потенціал внутрішньої поверхні скла у стандартному розчині;  $E_{доп}$  – потенціал додаткового виводу допоміжного електрода у розчині, що знаходиться усередині допоміжного електрода;  $E_X$  – електродний потенціал зовнішньої поверхні скляного електрода 1 в розчині, що аналізується.

При цьому значення дифузійного потенціалу поміж аналізуючим розчином і розчином усередині допоміжного електрода повинно бути досить малим (припустимим), щоб не викривляти точність електродної системи при вимірюванні. Крізь пористу перегородку 6 на кінці допоміжного електроду 4 здійснюється електролітичний контакт додаткового виводу допоміжного електрода з аналізуючим розчином, який носить назву електролітичного ключа 2. Ключ 2 дозволяє отримати електрод, що не поляризується. Пориста перегородка може бути з азбестового волокна, пористої кераміки та пористого ебоніту. Всі ці матеріали утворюють порівняно невеликі дифузійні потенціали. Крім того перегородка дозволяє розчину допоміжного електроду безперервно з визначеною швидкістю витікати, що забезпечує постійність фізичного стану границі розподілу. При цьому зворотній напрямок потоку неприпустимий, бо це призводить до викривлення результату виміру і може виникнути “отруєння” додаткового виводу допоміжного електрода. Отже забезпечення з достатньою мірою точності постійності значень  $E_K$ ,  $E_{BH}$ ,  $E_{доп}$  призводить до пропорційності зв’язку між  $E$  і  $E_X$ , тобто ЕДС електродної системи  $E$  визначає активність вимірюваних іонів. Вимірювання величини  $E$  здійснюється за допомогою високоомних мілівольтметрів чи перетворювачів з подальшою передачею нормованого значення постійного струму на вторинний прилад (міліамперметр).

Таким чином, потенціометричний іономірний прилад складається з чутливого елементу (електродної системи), вимірювального перетворювача і вторинного приладу.

*Чутливі елементи ДПг-4М, ДМ-5М* призначені для перетворення значень рН у водних розчинах, що не містять фтороводневу кислоту, її солі і речовини, які б утворювали осадки чи плівки і не чи-

нили руйнуючої дії на матеріали елементів, у пропорційну їм електричну напругу разом з високоомним перетворювачем.

Чутливі елементи ДПг-4М мають занурене виконання, а ДМ-5М – магістральне. Призначені для застосування в умовах температур контрольованого середовища від  $0$  до  $100$   $^{\circ}\text{C}$ , з тиском у діапазоні від  $0,025$  до  $0,6$  МПа. Якщо тиск контрольованого середовища змінюється у процесі експлуатації на величину понад  $\pm 0,02$  МПа, необхідна комплектація чутливого елемента регулятором тиску РДС-1. Діапазон вимірювання, робочий інтервал температур і тиску визначається головним чином типом встановлених електродів. Вимірювальними електродами чутливих елементів є скляні, характеристики яких наведені у таблиці 2.16.

Основними характеристиками скляного електроду є наступні: воднева – ізотерма залежності потенціалу від значення рН; стандартний потенціал – потенціал електроду відносно нормального водневого електроду у розчині із значенням рН, що дорівнює нулю при температурі  $20$   $^{\circ}\text{C}$ .

Крутизна водневої характеристики скляного електроду  $S_t$  (мВ/рН) визначається за формулою:

$$S_t = -(54,197 + 0,1984t), \quad (2.80)$$

де  $t$  – температура розчину,  $^{\circ}\text{C}$ .

Стандартний потенціал скляного електроду  $E_0$  (мВ) розраховується за формулою:

$$E_0 = E_{II} \cdot S_{20} \cdot \text{pH}_{II} + E_{\text{доп}}, \quad (2.81)$$

де  $E_{\text{доп}}$  – номінальне значення потенціалу допоміжного електроду відносно нормального водневого електроду при  $20$   $^{\circ}\text{C}$ , мВ (для насиченого хлор срібного електроду  $E_{\text{доп}} = 201$  мВ при  $20$   $^{\circ}\text{C}$ );  $S_{20} = -58,165$  мВ/рН - значення крутизни водневої характеристики при  $20$   $^{\circ}\text{C}$ ;  $E_{II}$  і  $\text{pH}_{II}$  – номінальні значення координат ізопотенціальної точки електродної системи, що складається із скляного і допоміжного електроду, мВ і рН.

Координати ізопотенціальної точки є найважливішими характеристиками електродної системи. Ізопотенціальна точка відповідає величині рН розчину, за якої ЕДС електродної системи не залежить від температури, тобто це точка перетинання усіх статичних характеристик  $E = f(\text{pH})$  електродної системи при різних температурах.

Величина ЕДС електродної системи у відповідності із залежністю її від  $pH$  і температури розчину, визначається рівнянням:

$$E = E_{II} + S_i(pH - pH_{II}). \quad (2.82)$$

У якості допоміжних електродів застосовуються хлорсрібні електроди як виносні проточні типу ЭХСВ-1, так і занурені не проточні типу ЭВП-08. Проточні допоміжні електроди слід застосовувати у випадках, коли необхідна точність контролю понад 0,2рН чи при контролі рН розчинів з невеликою електропровідністю.

Таблиця 2.16.

Технічні характеристики скляних електродів  
чутливих елементів

Позначення електродів	Марка електродного скла	Межі вимірюваної величини рН при 25°C	Робочий інтервал температур, °C	Опір при 20 °C, МОм	Координати ізопотенціальних точок		Шифр ізопотенціальних точок
					рН <sub>и</sub>	Е <sub>и</sub> , мВ	
ЭСП-01-14	УСТ (№111)	0 ÷ 14	25 ÷ 100	700 ± 400	3,3	-33	3
					4,25	-25	4
					5	-40	5
					7	-50	7
					8,2	-33	8
					10	-25	10
ЭСП-04-114	УСТ (№20)	0 ÷ 12	0 ÷ 40	50 ± 40	3,5	-45	3
					4,25	-25	4
					5	-40	5
					7,2	-20	7
					8,2	-33	8
					10	-25	10
ЭСП-06-14	УСТ (N123)	0 ÷ 14	25 ÷ 100	1000 ± 400	3,3	-33	3
					4,25	-25	4
					5	-40	5
					7	-50	7
					8,2	-33	8
					10	-25	10

Примітка: шифр координат ізопотенціальних точок позначається на верхній частині ковпака електроду.



тактуючих з аналізованим розчином, глибиною занурення і типом допоміжного (порівняльного) електроду. Основні модифікації чутливих елементів наведені у табл. 2.17. Конструкції деяких чутливих елементів наведені на рис. 2.102 і 2.103.

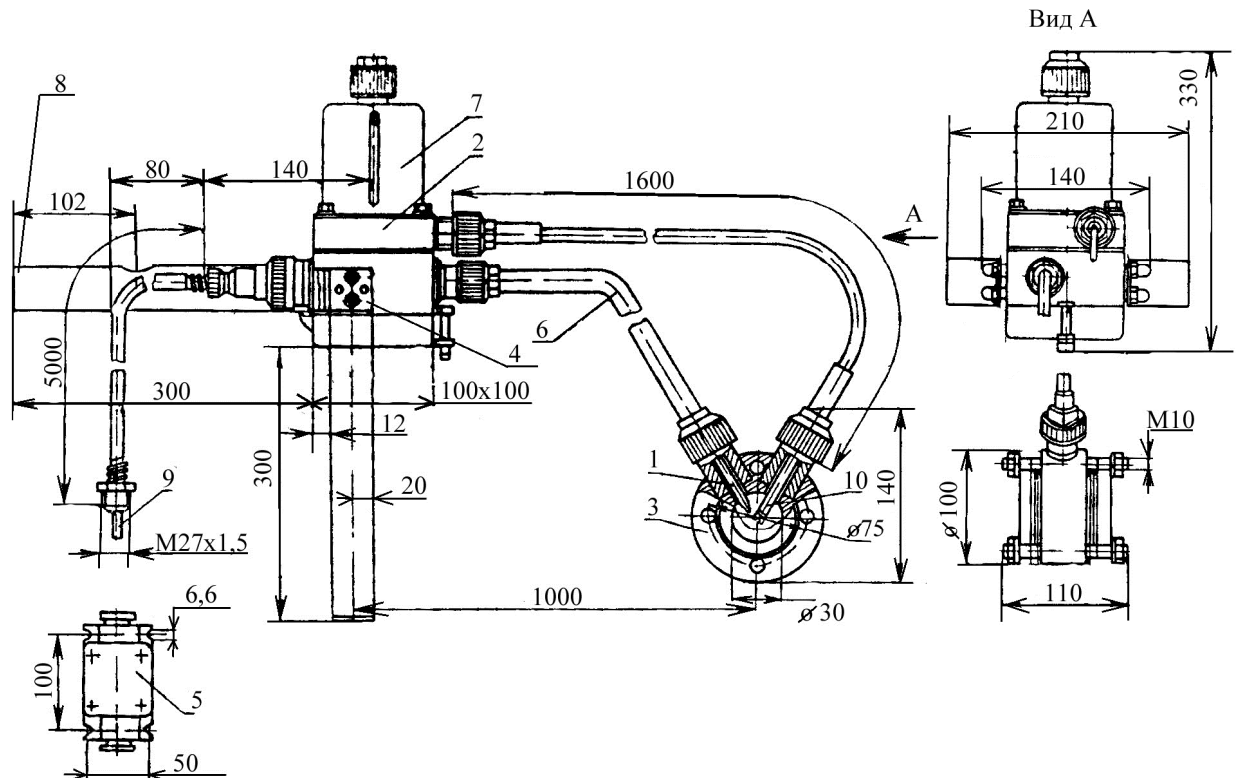


Рис. 2.103. Габаритно – монтажне креслення чутливого елемента магістрального виконання типу ДМ-5М (модифікації 1 – 4); 1 – електрод скляний; 2 – електрод допоміжний; 3 – корпус; 4 – коробка затискачів; 5 – коробка з'єднувальна; 6 – рукав; 7 – кожух; 8 – кронштейн; 9 – кабель; 10 – електролітичний ключ.

Корпус магістрального виконання типу ДМ-5М (рис. 2.103) становить собою диск з центральним отвором ( $D_y = 300$  мм) і з чотирма отворами для приєднання до фланців трубопроводу. Зверху на циліндричній частині диску розташовані під кутом  $60^\circ$  один відносно другого два штуцери під сальникове з'єднання для кріплення скляного електроду і ключа.

Корпус зануреного виконання типу ДПг-4М (рис. 2.102) має дві труби, які закріплені на фланці, призначеному для кріплення корпусу до горловини технологічної ємності. Унизу труби з'єднуються за допомогою двох скоб, на яких закріплюється кожух для захисту електродної пари від механічних пошкоджень. У чутливих елементах ДПг-4М для систем з надмірним тиском до  $0,025$  МПа передбачена



можливість регулювання довжини занурюваної частини. Для передачі сигналу від електродної системи до високоомного перетворювача застосовується коробка затискачів із з'єднувальною коробкою, які з'єднуються поміж собою коаксіальним кабелем типу РК довжиною до 5 м з високоомним роз'ємом.

Відстань від місця установки чутливого елемента до високоомного промислового перетворювача повинна бути не більше 150 м. Кабель слід прокладати у заземлених трубах.

Таблиця 2.17.

Технічні дані по основних типах чутливих елементів.

Тип елемента	Модифікація	Довжина занурення, мм	Деталі контактуючі з вимірвальним середовищем		Допоміжний електрод
			Корпус	Ключ електrolітичний	
1	2	3	4	5	6
I, III, IV, VI	ДМ-5М-1 ДМ-5М-2 ДМ-5М-3 ДМ-5М-4	-	Сталь 12Х18Н10Т Титан ВТ1-0 Титан ВТ1-0 Сталь 12Х18Н10Т	Поліпроплен Фторопласт Поліпроплен Фторопласт	Проточний
II, V	ДМ-5М-5 ДМ-5М-6	-	Пресматеріал ДСВ-4-Р-2М-0 і сталь 12Х18Н10Т Пресматеріал ДСВ-4-Р-2М-0 і титан ВТ1-0	-	непроточний
I, III, IV, VI	ДПГ-4М-1	1200	Сталь 12Х18Н10Т	Фторпласт	Проточний
	ДПГ-4М-2	1600			
	ДПГ-4М-1	2000			
	ДПГ-4М-4	1200	Титан ВТ1-0		
	ДПГ-4М-5	1600			
	ДПГ-4М-6	2000			
	ДПГ-4М-7	1200	Сталь 12Х18Н10Т	Поліпропілен	
	ДПГ-4М-8	1600			
	ДПГ-4М-9	2000			
	ДПГ-4М-10	1200	Титан ВТ1-0		
	ДПГ-4М-11	1600			
	ДПГ-4М-12	2000			

Продовження табл. 2.17

1	2	3	4	5	6
Ц, V	ДПг-4М-13	1200*	Сталь 12Х18Н10Т	-	Непрото- чний
	ДПг-4М-14	1600*			
	ДПг-4М-15	2000*			
	ДПг-4М-16	1200*	Титан ВТ1-0		
	ДПг-4М-17	1600*			
	ДПг-4М-18	2000*			
Примітка: * – у таблиці вказана максимальна глибина занурення, яка може змінюватись від 300 мм до максимальної.					

*Перетворювач високоомний П-201 (П-201И)* призначений для перетворення ЕДС чутливих елементів, що застосовуються для вимірювання активності одно- і двохвалентних аніонів та катіонів (рХ), у тому числі і іонів водню (рН), в уніфікований вихідний сигнал постійного струму  $0 \div 5$  мА (для навантаження до 2,5 кОм) чи регульований від 10 до 100 мВ (для навантаження понад 200 Ом), та додатковий сигнал  $0 \div 10$  В (для навантаження понад 2 кОм). Така різноманітність вихідних сигналів дозволяє здійснювати підключення до нього будь-яких вторинних приладів. Перетворювачі моделей П-201.1 комплектуються вторинним приладом М1730А(С). Перетворювач П-201И має вхідне іскробезпечне коло рівня “0”, маркування по вибухозахисту “Вхід И/4Т5” і повинен встановлюватись тільки зовні вибухобезпечних зон приміщень і установок. Межі вимірювань і нормовані значення перетворювача наведені у табл. 2.18.

Струм у колі чутливого елемента з метою виключення поляризації електродів, а також зменшення похибки при вимірюванні  $E$ , джерело якої має великий внутрішній опір, складає біля  $10^{-12}$  А. Тому вхідний опір перетворювача повинен бути достатньо великим, не менше  $10^{12}$  Ом.

Схема, що пояснює принцип дії перетворювача, наведена на рис. 2.104. Перетворювач становить собою підсилювач постійного струму, охоплений глибоким негативним зворотним зв'язком по вихідному струму, чим і забезпечується високий вхідний опір. Підсилювач побудовано за схемою перетворення постійною напруги у змінну з подальшою демодуляцією. Установка початкового значення діапазону вимірювання здійснюється за рахунок напруги, що виділяється струмом від джерела  $E_{CM}$  на резисторі  $R_{CM}$ . При цьому забезпечується часткова компенсація вхідного сигналу перетворювача  $E$ .

Таблиця 2.18.

Нижні межі вимірювань  
і нормовані значення перетворювача П-201.

Нормоване значення $X_N$				Нижня межа ви- мірювання $X_H$ (почат- кове зна- чення шкали), рХ (рН)	Межі припустимих осно- вних абсолютних похи- бок (наведених до входу) по вихідному сигналу постійного струму	
Для одновален- тних іонів		Для двовален- тних іонів			При вимі- рюванні рХ одновален- тних іонів, мВ	При вимі- рюванні рХ двовалент- них іонів, мВ
рХ(рН)	мВ	рХ	мВ			
1	58,164	-	-	$(-1) \div 13$	$\pm 0,58$	-
1,5	87,246	-	-	$(-1) \div 12,5$	$\pm 0,87$	-
2,5	145,41	-	-	$(-1) \div 11,5$	$\pm 1,45$	-
5	290,82	5	145,41	$(-1) \div 9$	$\pm 2,9$	$\pm 1,45$
10	581,64	10	290,82	$(-1) \div 4$	$\pm 5,8$	$\pm 2,9$
15	872,46	-	-	$(-1)$	$\pm 8,7$	-
-	-	20	581,64	$(-1)$	-	$\pm 5,8$

Примітка: верхня межа вимірювання  $X_B$  визначається за формулою –  
 $X_B = X_N + X_H$ .

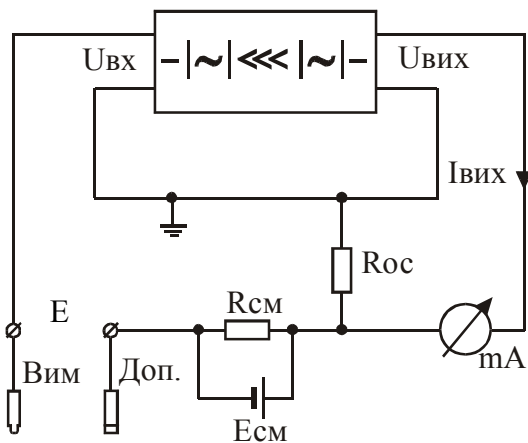


Рис. 2.104. Спрощена схема вимірювального перетворювача.

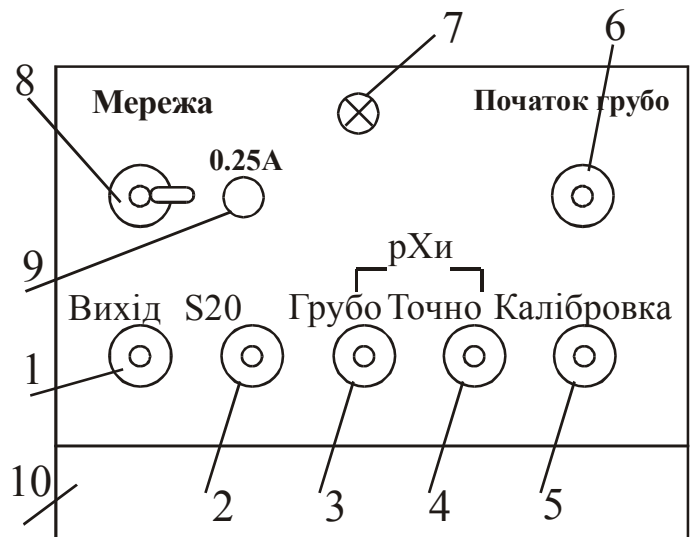


Рис. 2.105. Розміщення органів настроювання на передній панелі перетворювача П-201.

Вимірювана ЕДС  $E$  порівнюється з напругою  $U_{ВІХ}$ , що утворюється від протікання вихідного струму  $I_{ВІХ}$  підсилювача по резистору  $R_{OC}$ . На вхід підсилювача надходить різниця напруг:

$$U_{ВІХ} = E - U_{ВІХ} \quad (2.83)$$

Якщо повний коефіцієнт підсилювача  $K = U_{ВІХ} / U_{ВХ}$ , то рівняння (2.83) з урахуванням цього прийме вигляд:

$$E = U_{ВІХ}(1 + 1/K) \quad (2.84)$$

За достатньо великого значення  $K$  справедливою буде рівність:  $E \approx U_{ВІХ} = I_{ВІХ}R_{OC}$ . Отже, сила струму, що протікає через кінцевий каскад підсилювача, пропорційна вхідному сигналу від вимірювальної електродної ячейки. Шкала міліамперметра проградуєрована у одиницях  $pH$ .

Застосування метода часткової компенсації дозволяє у декілька разів зменшити силу струму, що споживається від ячейки в процесі вимірювання. У той же час еквівалентний вхідний опір приладу зростає у  $(K + 1)$  раз, тобто  $R_{ЕК} = R_{ВХ}(K + 1)$ , де  $R_{ВХ}$  – вхідний опір підсилювача. При цьому зменшення зміщення і дрейфу нуля підсилювача постійного струму досягається перетворенням вхідного сигналу у змінну напругу (модуляція), підсиленням цієї змінної напруги і зворотнім перетворенням (демодуляція) її на виході.

На передню панель перетворювача виведені осі змінних резисторів (1 – 6), необхідних для настроювання, а також тумблер 8 вимикання мережі, індикаторна лампочка 7 живлення перетворювача (рис. 2.105) і запобіжник 9. Резистори призначені для встановлення: 1 – вихідної напруги; 2 – необхідної крутизни характеристики  $S_{20}$ ; 3, 4 – значення  $pX_{и}$  ( $pH_{и}$ ); 5, 6 – нижньої межі вимірювання (значення координати  $E_{и}$  у межах від  $-250$  до  $250$  мВ). Під кришкою 10 розташована колодка з контактами для встановлення за рахунок їх відповідного перемикавання роду роботи (вимірювання активності катіонів чи аніонів), діапазону вимірювання та підключення температурного компенсатора ТКР-3.

Підключення до перетворювача зовнішніх пристроїв (чутливий елемент, вторинний прилад, живлення, термокомпенсатор) здійснюється до відповідних клем розподільної коробки, що знаходиться із зворотного боку перетворювача. Клас точності перетворювача по основних вихідних сигналах дорівнює 1, для додаткового (10В) – 6.

**Хроматографічні аналізатори** є універсальними приладами, що призначені для визначення якісного і кількісного складу сумішей газоподібних і рідких речовин. Принцип дії цих приладів оснований на розділенні аналізованої суміші на складові компоненти за рахунок різної сорбованості компонентів в процесі руху суміші по шару сорбенту. Рух компонентів газової суміші відбувається під дією потoku рухливої фази (носія). При цьому різна швидкість сорбції окремих компонентів обумовлює і різну швидкість переміщення компонентів по шару сорбенту. У залежності від агрегатного стану рухливої фази (газ чи рідина) хроматографи розподіляються на газові і рідинні. Принципова схема хроматографічної установки наведена на рис. 2.106.

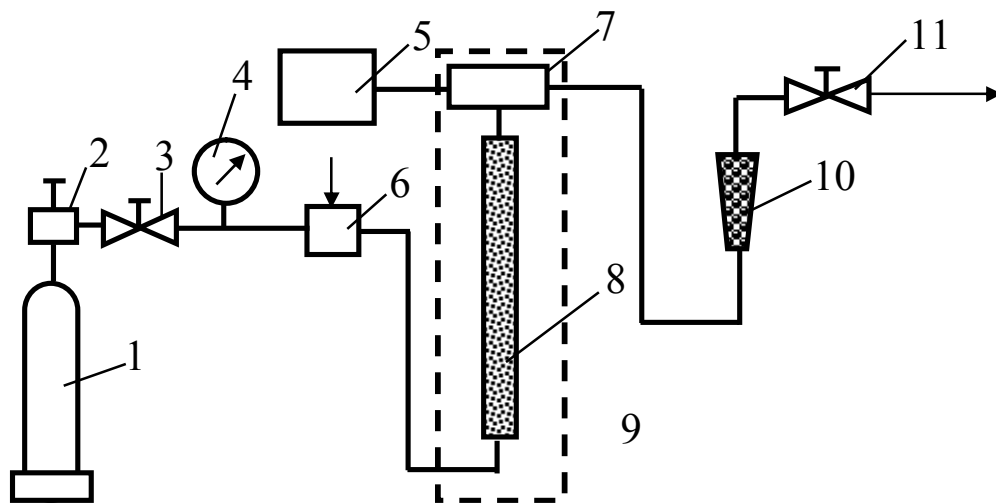


Рис. 2.106. Принципова газова схема хроматографічного аналізатора: 1 – балон з газом-носієм; 2 – редуктор тиску; 3, 11 – регулюючі вентилі; 4 – манометр; 5 – реєстратор; 6 – пристрій для уводу аналізованої проби (дозатор); 7 – детектор; 8 – колонка; 9 – термостат; 10 – ротаметр.

У відповідності з рис. 2.106 дозатор 6 періодично здійснює подачу аналізованої газової суміші у потік газу - носія (гелій, азот, в окремих випадках водень). Газ – носій транспортує пробу у хроматографічну колонку 8, де відбувається розподіл проби на складові компоненти. На виході з хроматографічної колонки встановлено детектор 7, який виявляє ці компоненти по черзі їх виходу з колонки. Реєстратор 5 забезпечує запис сигналу детектора на діаграмі.

Принцип хроматографічного розподілу в достатній мірі ілюструється рис. 2.107.

Порція газу, що підлягає аналізу і складається з трьох компонентів А, Б і В уводиться в колонку (стан  $t_1$ ) і переміщується газом –

носієм крізь шар сорбенту колонки. Під час руху суміші відбуваються не однократні процеси сорбції (поглинання компонента наповнювачем) і десорбції (виділення компонента з наповнювача) компонентів. Якщо компонентам А, Б і В притаманна різна ступінь сорбування (поглинання) по відношенню до наповнювача колонки, то швидкості пересування цих компонентів будуть різними. З найменшою швидкістю буде рухатись компонент, що має найбільшу ступінь сорбування. На початковій ділянці колонки зони компонентів А, Б і В майже не відокремлені (стан  $t_2$  і  $t_3$ ). Проте при подальшому їх пересуванні процес завершується остаточним розподілом цих зон (стан  $t_4$ ) і з хроматографічної колонки будуть виходити компоненти газової суміші послідовно, тобто роздільно у часі один від одного.

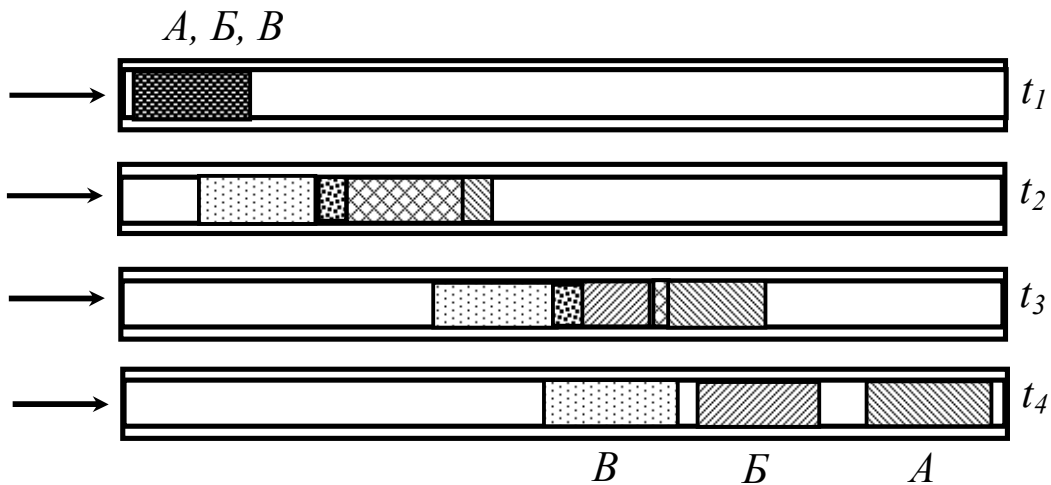


Рис. 2.107. Схема хроматографічного розділення суміші.

Розподіл суміші, що підлягає аналізу, може відбуватись як у газовій, так і у паровій фазі. При аналізі рідинних сумішей порція проби для аналізу перед входом у хроматографічну колонку випаровується і підтримується у такому стані протягом всього часу аналізу. Основними методами газової хроматографії є газоадсорбційна і газорідинна хроматографія, а також хроматографія на модифікованому сорбенті.

*Газоадсорбційна хроматографія* оснований на поглинанні будь-якого компонента з газової суміші чи розчину поверхневим шаром іншої речовини (адсорбенту). Твердий адсорбент виконує роль нерухливої фази. Розділення відбувається внаслідок різної здатності поглинання адсорбентом компонентів суміші. Серед твердих адсорбентів слід відзначити наступні: активоване вугілля, силікагель, цеоліти (молекулярні сита) і оксид алюмінію. Газоадсорбційна хромато-

графія застосовується в основному для аналізу легких газів (водень, кисень, метан, оксид вуглецю, азот, етан, етилен та ін.).

*Газорідинна хроматографія* використовує у якості нерухокої фази рідину, що нанесена тонким шаром на твердий носій. Розділення здійснюється внаслідок різної розчинності компонентів у рідині, а твердий носій виконує роль локалізатора рідинної фази. Нерухома фаза має бути хімічно інертною, мати малу летючість і зберігати тривалий час свої властивості незмінними за умов аналізу. Кількість рідкої фази складає від 0,1 до 40 % маси носія. Найбільш розповсюдженими рідинними розчинниками є наступні: вазелінове мастило, високо кипляче авіаційне мастило, фталати (дибутіл, диоктил, диізоаміл та ін.) дифенілформалід, дигліцерін, розчини азотнокислого срібла в етиленгліколі, силіконове мастило та ін. Газорідинна хроматографія застосовується для аналізу гомологічних рядів вуглеводів, рідких органічних сполучень, сіркоорганічних сполучень, сумішей спиртів, амінів і кетонів, а також різних наркотичних і лікарських препаратів. У порівнянні з газоадсорбційною газорідинна хроматографія має деякі переваги: компоненти суміші після розділення виходять з колонки у вигляді вузьких смуг, а за рахунок широкого вибору нерухомих фаз забезпечується можливість розділу суміші з близькими температурами кипіння.

*Газова хроматографія на модифікованому сорбенті* використовує у якості нерухокої фази твердий адсорбент, що модифікований невеликою кількістю рідини. Методи, що використовують модифіковані сорбенти, становлять собою своєрідний перехід поміж двома попередніми методами хроматографії, тобто має місце адсорбція на поверхні твердої речовини і розчинення у модифікованій рідині. Найбільш загальновідомими модифікованими сорбентами є: оксид алюмінію, оброблений 2 % - вим лугом із додаванням від 3 до 7 % три етиленгліколю; силікагель, оброблений 2 % - ою содою із додаванням до 3 % гліцерину чи до 2 % вазелінового мастила; трепел Зікеєвського кар'єру, оброблений 2 % - ою содою із додаванням 5 – 7 % вазелінового мастила та ін.

*Хроматограф* – це складний пристрій, до якого входять як основні (колонка, детектор), так і допоміжні елементи, що забезпечують необхідні умови роботи (див. рис. 2.106).

*Хроматографічна колонка* становить собою трубку, що заповнюється певним сорбентом. Найчастіше трубка виконана з міді, нержавіючої сталі чи латуні діаметром 4 – 8 мм. Необхідна довжина

колонки утворюється з окремих U-подібних чи спіральних секцій. Спіральні колонки найбільш компактні, тому їх застосовують частіше. Хроматографічні колонки встановлюють у спеціальному термостаті. Термостат колонок, як найбільш великий блок хроматографу, визначає композиційні особливості хроматографу конкретного типу і його зовнішній вигляд. Цей блок є основним, оскільки в ньому розміщені хроматографічні колонки (дві чи більше), а на його площинах детектори, дозатори і випарники, тобто усі інші елементи хроматографу. Увід газоподібних проб у промислових хроматографах здійснюють за допомогою мембранних дозаторів, а рідинних – із застосуванням золотникових дозаторів.

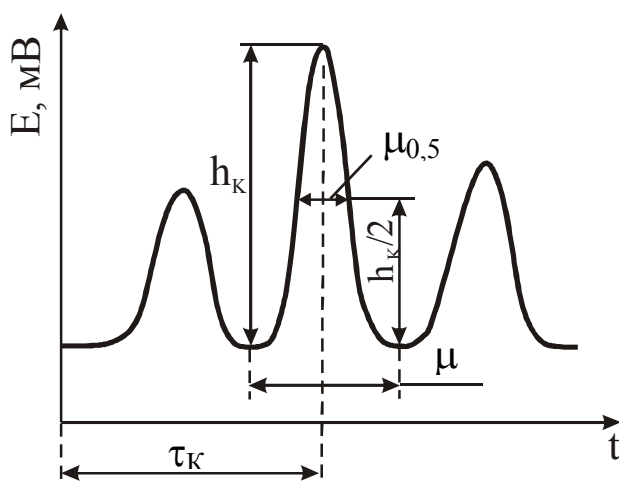


Рис. 2.108. Хроматограма диференційного детектора.

*Детектор* – це найбільш важливий елемент будь-якого хроматографу, що перетворює зміну складу газу на виході колонки у електричний сигнал. Від детекторів залежить в значній мірі чутливість і точність хроматографу. Вихід вимірюваного компонента з колонки триває деякий час, і він не миттєво увесь входить у ячейку детектора. На початку і наприкінці

виходу суміш газу – носія з виділеним компонентом має концентрацію менше ніж у середині, тому і вихідна крива має вигляд піку. На рис. 1.108 показана типова хроматограма, тобто залежність вихідного електричного сигналу  $E$  хроматографу у часі  $t$ , що отримана за допомогою детектора. Окремі піки на графіку відповідають виділенню різних компонентів суміші, а проміжки між ними відповідають виходу з колонки чистого газу-носія. Концентрація окремих компонентів в аналізованій суміші визначається шляхом спеціальної обробки (розкодування) хроматограм, яка у сучасних приладах здійснюється автоматично за допомогою мікро-ЕОМ (контролерів).

Концентрацію компонентів характеризують наступні параметри хроматографічного піку: площа, висота, добуток висоти на відрізок часу від моменту уводу проби до виходу максимуму.

У хроматографах переважно використовуються диференційні детектори, серед яких слід виділити у першу чергу такі як термокон-



дуктометричні, полум'яно – іонізаційні, термохімічні, термоіонні, полум'яно – фотометричні і детектори - густиноміри. Нижче розглянуті деякі з них.

*Термокондуктометричні детектори* (катарометри) за принципом дії ідентичні термокондуктометричним газоаналізаторам і відрізняються лише конструкцією робочої камери чутливого елемента, яка з метою зменшення постійної часу детектора має менші розміри. Термокондуктометричний детектор зручний в експлуатації і не вимагає термостатування з високою точністю. Межа виявлення  $S_K$  хроматографів з цим детектором в одиницях об'ємної концентрації речовини, що підлягає аналізу, коливається у діапазоні  $5 \div 50 \cdot 10^{-5} \%об.$

*Полум'яно – іонізаційні детектори* застосовуються для визначення органічних мікро домішок на рівні токсичних концентрацій. Дія цих детекторів оснований на явищі іонізації органічних речовин у водневому полум'ї. При цьому, з появою у полум'ї органічних речовин внаслідок їх іонізації зростає електрична провідність полум'я. Принципова схема полум'яно – іонізаційного детектора наведена на рис. 2.109.

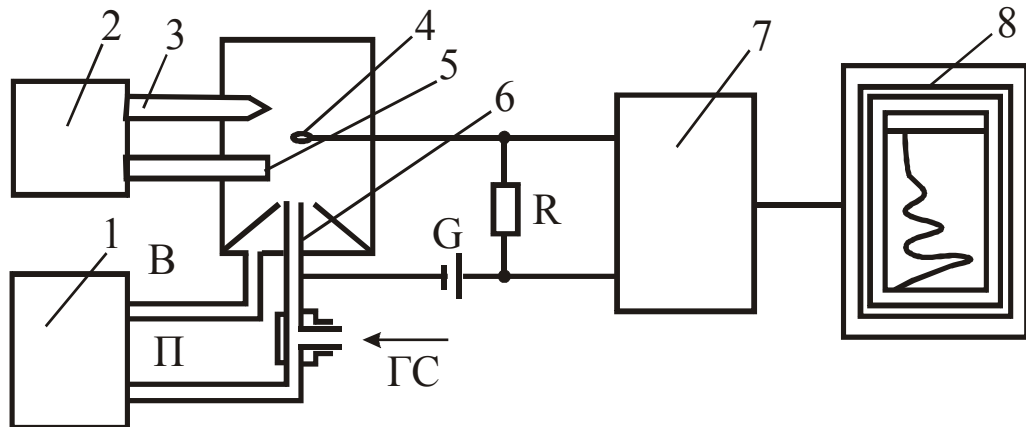


Рис. 2.109. Принципова схема полум'яно-іонізаційного детектора.

Водень В і повітря П, очищені у блоці 1 від органічних домішок, безперервно надходять до пальника 6. Згоряючи у повітрі, водень майже не утворює іонів. Електрична провідність чистого водневого полум'я складає  $10^{-14} Ом^{-1}$ . Для вимірювання іонного струму застосовуються два електроди, одним з яких є безпосередньо металевий пальник 6, а другим – колектор 4. На електроди подається напруга постійного струму  $90 - 300 В$  від джерела G. Під цією напру-

гою виникає іонний струм  $10^{-7} \div 10^{-13}$  А, який створює падіння напруги на вхідному високоомному опорі R ( $10^8 \div 10^{11}$  Ом) підсилювача постійного струму 7. Вихідний сигнал з підсилювача реєструється автоматичним потенціометром 8 у вигляді “нульової лінії”. Газова суміш ГС, що аналізується, після розподільної колонки надходить крізь трійник у потік водню і разом з ним прямує у полум’я. Молекули органічних сполук у водневому полум’ї згорають, утворюючи іонізовані продукти згорання, внаслідок чого іонний струм у полум’ї зростає і потенціометр фіксує вихід компонента у вигляді піку. Для запалювання водневого полум’я застосовують ніхромовий нагрівач 5. Контроль наявності полум’я здійснюється за допомогою термоелектричного термометра 3 і блоку керування 2. Межа виявлення  $S_K$  хроматографів з таким детектором при аналізі в  $100 \div 1000$  разів більше у порівнянні з термокондуктометричними.

*Детектори – густиноміри* газів фіксують зміну густини газу, що виходить з колонки. Порівнювальний потік газу-носія  $V_A$  (див. рис. 2.110) надходить до трійника 1 детектора і розділяється на два рівних потоки, один з яких прямує до верхнього 6, а інший до нижнього 7 чутливого елемента. Потік газу  $V_B$  з колонки надходить до трійника 2 і розділяється на два потоки, які переміщуються по каналах догори і донизу до трійників 3 і 4. В останніх розподілені потоки  $V_B / 2$  об’єднуються з потоками  $V_A / 2$  газу порівнювання. Загальний потік цих газів  $V_B = V_A + V_B$  виходить з детектора крізь трійник 5. Співвідношення витрат  $V_A / V_B = 2 \div 3$ . Якщо у потоці газу-носія  $V_B$  з колонки компонент, що підлягає аналізу, у суміші присутній, то відбувається зміна маси стовпа газу в каналі поміж трійниками 3 – 4. При цьому порушується рівність газових потоків у каналах поміж трійниками 1 – 3 і 1 – 4. Внаслідок цього змінюється тепловіддача та опір термоанемометрів 6 і 7, що включені до мостової вимірювальної схеми і відбувається розбаланс мостової схеми. Величина різниці потенціалів у вимірювальній діагоналі мостової схеми буде пропорційна концентрації  $S_K$  компонента, яка фіксується автоматичним реєстраційним приладом. З метою підвищення чутливості детектора встановлюють по два термочутливих елементи в кожному каналі.

*Комплекс агрегатно-програмний “Хроматек-Кристал 5000”* для медичних досліджень виконаний на базі газового хроматографу. Застосовується для контролю лікарських засобів в процесі їх виробництва, тканин людини і біологічних рідин (що містять наркотичні, психотропні та інші токсичні речовини), алкоголю, води, харчових

продуктів, вуглеводневих і скраплених газів та ін.. Комплекс містить: хроматограф “Хроматек-Кристал 5000” з комплектом детекторів і пристроями уводу проби; персональний комп’ютер; програмне забезпечення; методики аналізів; хроматографічні колонки з великим термостатом для багатоканального детектування і сервісні пристрої. Визначення концентрації здійснюється із застосуванням декількох типів детекторів: полум’яно-іонізаційного з межею  $3 \cdot 10^{-12}$  г/с по н-вуглеводням; термокондуктометричного з межею  $3 \cdot 10^{-9}$  г/с по н-вуглеводням; полум’яно-фотометричний з межею  $2 \cdot 10^{-12}$  г/с по сірці у метамофосі і  $1 \cdot 10^{-12}$  г/с по фосфору у метамофосі; фотоіонізаційний з межею  $5 \cdot 10^{-13}$  г/с по бензолу; термоіонізаційний з межею  $3 \cdot 10^{-12}$  г/с по азоту і  $3 \cdot 10^{-14}$  г/с по метафосу; електроннозахоплюючий з межею  $3,5 \cdot 10^{-14}$  г/с по ліндану. Витрата газу-носія  $5 \div 100$  л/хвил, витрата водню  $5 \div 200$  л/хвил, витрата повітря  $5 \div 800$  л/хвил. Робоча температура у термостаті може змінюватись у межах від 5 до  $400$  °C з дискретністю завдання  $0,1$  °C. Видача результатів аналізу відбувається на передній панелі чотирьох строкового дисплею чи на діаграмній стрічці самописця.

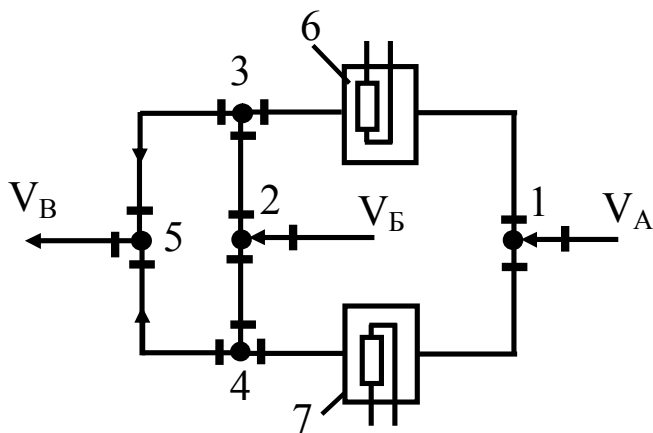


Рис. 2.110. Узагальнена схема детектора-густоміра.

*Аналітичний рідинний хроматограф “Цвет-Яуза” (модель 02) призначений для контролю води, технологічних водних середовищ, водних екстрактів харчових продуктів, рослин та напоїв і застосовується в енергетиці, у фармацевтичній та харчовій промисловості. До складу хроматографа входять: аналітичний блок з термостатом*

колонок, термостатом детектора; іонізаційний і іонізаційно-ексклюзивний детектори; кран-дозатор; електронний блок, що містить блок керування амперметричним і кондуктометричним детекторами, терморегулятором термостатів колонок і детектора; підставка для ємності з елюентом; насос високого тиску з демпфером, датчиком тиску і системою промивки плунжера; програмне забезпечення для ПЕОМ. Діапазон вимірювання органічних і неорганічних іонів  $1 \div 10^{-4}$  % об з основною похибкою  $3 \div 5$  % об. Результати аналізу представляються у вигляді повного протоколу з ПЕОМ.

## 2.7. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СИГНАЛІВ

У сучасних системах автоматизації найбільше розповсюдження отримали пневматичні, струмові і цифрові (кодові) інформаційно-керуючі сигнали. Отримання таких сигналів здійснюється за допомогою перетворювачів, серед яких можна виділити первинні вимірювальні, нормуючі ( проміжні), узгоджуючі і цифрові (інтерфейсні) перетворювачі.

*Первинний вимірювальний перетворювач* сприймає контролюємий параметр і перетворює його у вихідну фізичну величину (переміщення, зусилля, опір, напруга, струм, частота і т.ін.). Отримана фізична величина шляхом природного перетворення може бути як уніфікованою, так і не уніфікованою. Цей тип перетворювачів розглянуто у попередніх розділах.

*Нормуючий перетворювач* призначений для перетворення не уніфікованого вихідного сигналу первинного перетворювача в уніфікований сигнал постійного струму і найчастіше виготовляється у вигляді самостійного пристрою. Якщо первинний перетворювач має вихідний сигнал, що відрізняється за своєю природою від електричного чи пневматичного, то вимірювальний і нормуючий перетворювачі об'єднуються конструктивно в єдиний пристрій.

*Узгоджуючі перетворювачі* призначені для узгодження сигналів поміж приладами електричної і пневматичної гілок ДСП. При цьому, електропневматичні і пневмоелектричні перетворювачі можуть бути як аналогової, так і дискретної дії.

*Інтерфейсні перетворювачі* призначені для здійснення обміну інформацією між цифровими пристроями і застосовуються у сучасних АСКТП для зв'язку з інформаційно-керуючими обчислювальними комплексами чи ПЕОМ.

**Нормуючі вимірювальні перетворювачі** призначені для перетворення сигналів терморепетворювачів електричних і датчиків напруги постійного струму в уніфікований сигнал постійного струму  $0 \div 5$ ,  $0(4) \div 20$  мА,  $0 \div 10$  В.

Принцип дії нормуючих перетворювачів ґрунтується на статичній авто компенсації. Сигнал від вимірювального первинного перетворювача надходить до вимірювальної мостової схеми, з якої вихідний сигнал постійної напруги надходить до підсилювача, виконаного за схемою “модуляція-демодуляція”. Демодульований сигнал підсилюється вихідним підсилювачем постійного струму, вихідний

струм якого прямує на навантаження і пристрій зворотного зв'язку. Вхідні і вихідні кола гальванічно розподіленні поміж собою і з колами живлення. По вхідним колам перетворювачі містять бар'єри іскрозахисту рівня "іа".

З метою зменшення впливу завад з'єднувальні проводи вхідних і вихідних кіл необхідно розміщувати у трубах чи гнучких сталевих шлангах, ізольованих від землі. Сполучення вхідних і вихідних кіл в одному кабелі не припустимо. Монтаж приладів може здійснюватись як на щиті так і на стіні за допомогою кронштейнів. Перетворювачі встановлюють зовні вибухонебезпечних зон, а термоперетворювачі первинні завдяки відсутності власних джерел живлення можуть встановлюватись у вибухонебезпечних зонах приміщень і зовнішніх установок. Усі типи нормуючих перетворювачів забезпечують автоматичну компенсацію ТЕДС "холодного" спаю. Нижче розглянуті окремі моделі цих перетворювачів.

*Блоки перетворення взаємної індуктивності типу БПВІ-1, МТМ403* призначені для постійного пропорційного перетворення сигналу взаємної індуктивності диференційно-трансформаторного первинного перетворювача у стандартний вихідний сигнал постійного струму  $0 \div 5$  чи  $0(4) \div 20$  мА. Схема підключення первинного перетворювача до блоку – чотирьохпровідна. Діапазон зміни вхідного сигналу складає від 0 до 10 мГн чи від (-10) до 10 мГн. Через клемно-блоковий з'єднувач подається напруга живлення 24 В постійного струму, що забезпечує живлення диференційно-трансформаторного датчика і підключення навантаження. Клас точності перетворювачів – 0,25.

*Перетворювачі термометра опору ПТС-301М, ПТС-301П* призначені для перетворення вихідних сигналів від термометрів типу ТСМ, ТСП в уніфікований струмовий сигнал  $4 \div 20$  мА. Виконані з видом вибухознахисту 0ЕхіаІСТ6. Перетворювачі ПТС-301М застосовуються у комплекті з термоопорами, що мають НСХ 50М, 100М і діапазоном температур від (-50) до 180 °С, а перетворювачі ПТС-301П – з НСХ 100П і діапазоном температур від (-200) до 500 °С. Клас точності перетворення 1. Корпус перетворювача приєднується до головки термометра опору безпосередньо за допомогою різьбового штуцера (див. рис. 2.111.).

*Перетворювачі вимірювальні двопровідні МТМ201* призначені для перетворення сигналів первинних перетворювачів (термоелектричних чи термоопорів) в уніфікований сигнал постійного струму

4 ÷ 20 мА. У залежності від конструкції і специфічних особливостей перетворювачі мають 8 виконань. Перетворювачі МТМ201, МТМ201-02, МТМ201Д, МТМ201Ц призначені для роботи у комплекті з термоопорами, а МТМ201-01, МТМ201-03, МТМ201Д-01, МТМ201Ц-01 – з термopарами. Клас точності перетворення залежить від типу первинного перетворювача, діапазону виміру і складає: 0,25; 0,4; 0,5; 1. Виготовляється як з лінеаризацією, так і без лінеаризації характеристик перетворення. Усі перетворювачі мають вибухозахищене виконання з позначенням маркування “ОЕх-ІаІСТ6Х” і можуть встановлюватись у вибухонебезпечних зонах.

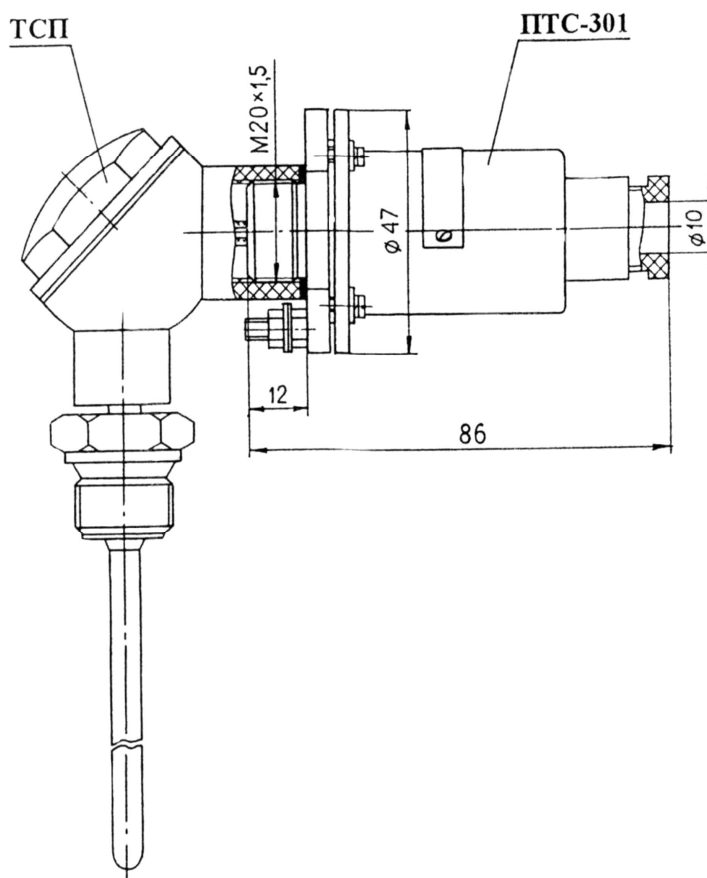


Рис. 2.111. Габаритно-монтажні розміри перетворювачів типу ПТС-301П і ПТС-301М.

Живлення перетворювачів здійснюється від джерела живлення постійного струму з напругою від 15 до 36 В. Струм, що протікає у колі живлення і є інформаційною величиною.

Перетворювачі МТМ201Ц, МТМ201Ц-01 мають додатково пристрій для цифрової індикації температури і виконані у вигляді прямокутного корпусу з габаритними розмірами 110×150×80 мм, а МТМ201Д, МТМ201Д-01 призначені для встановлення без посередньо у головці датчиків ТХА2088, ТХК2088, ТСМ1088, ТСП1088 та аналогічних.

Усі інші виконання виготовлені у вигляді циліндричного корпусу діаметром 60 мм і довжиною 100 мм.

**Узгоджуючи перетворювачі** забезпечують як пряме перетворення пневматичних сигналів в електричні, так і зворотне.

Пневмоелектричні перетворювачі призначені для перетворення тиску стислого повітря від пневматичних датчиків різних фізичних величин в безперервний сигнал постійного струму або дискретний сигнал комутації електричних кіл постійного чи змінного струму.

Схема найпростішого перетворювача типу ППЕ, що забезпечує перетворення уніфікованого пневматичного сигналу в уніфікований сигнал постійного струму наведена на рис. 2.112.

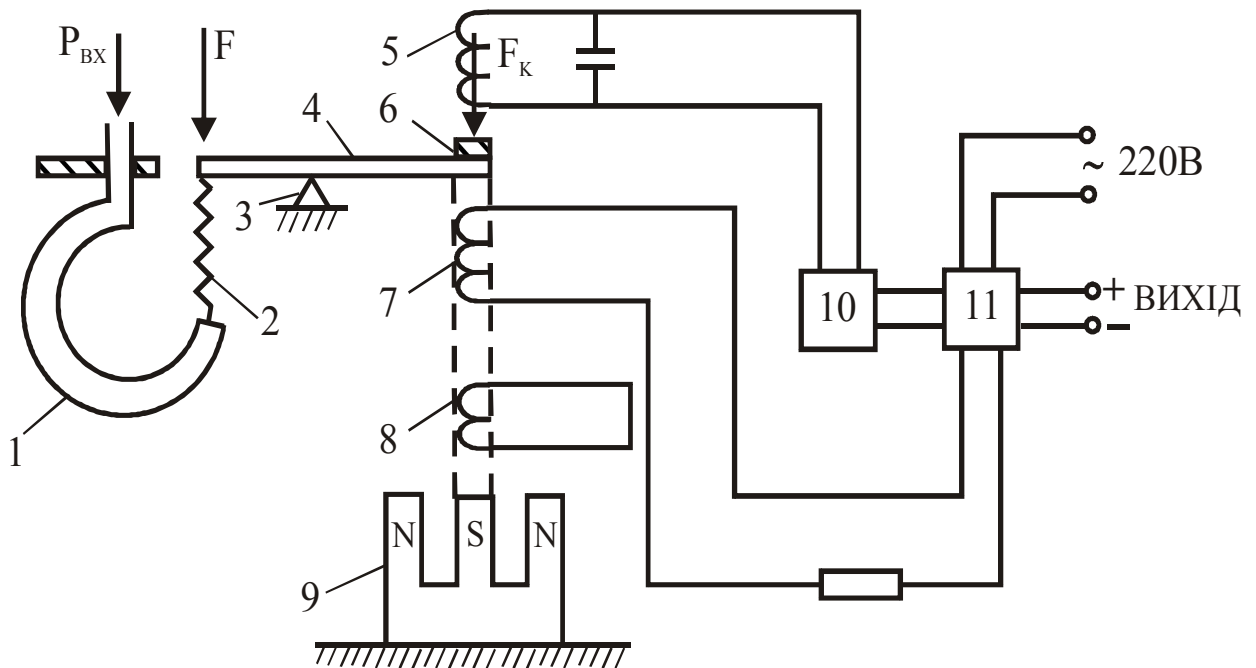


Рис. 2.112. Схема пневмоелектричного компенсаційного перетворювача.

Пневматичний сигнал  $P_{ВХ}$  надходить у манометричну трубку 1, вільний кінець якої при зміні тиску переміщується. За допомогою калібрувальної пружини 2 це переміщення перетворюється у зусилля  $F$ , яке передається на силовий важіль 4, що обертається навколо осі 3. Перетворення зусилля  $F$  в електричний сигнал відбувається на протилежному кінці силового важеля, де до нього прикріплена металеві пластина 6 з прапорцем, що переміщується біля котушки 5 і тягової котушки 7 силового елемента негативного зворотного зв'язку. Тягова котушка 7 розташована у кільцевому повітряному зазорі постійного магніту 9, а металеві пластина з прапорцем 3 – у високочастотному полі котушки 5. Остання включена у коливальний контур високочастотного генератора 10. Частота коливань генератора 10 перетворюється у перетворювачі 11 у постійний струм, що живить котушки 7 електродинамічного перетворювача. При зміні зазору між металевію пластинію з прапорцем 6 і котушкою 5 змінюється

індуктивність останньої. Внаслідок цього змінюється частота коливань генератора 10 і струм на виході перетворювача 11. При цьому змінюється і вихідний струм крізь котушку 7, що утворює момент зворотного зв'язку, а отже і викличе переміщення важеля 4 у протилежний бік. Важіль 4 буде переміщуватись до тих пір, доки моменти зворотного зв'язку і момент, що утворюється пружиною 2 за рахунок дії тиску  $P_{BX}$  не будуть врівноважені поміж собою. Цим буде досягнута однозначна залежність між величиною пружної деформації пружини 1 і силою вихідного струму.

Перетворення пневматичного дискретного сигналу у дискретний електричний сигнал найчастіше здійснюється із застосуванням герконів. На рис. 2.113 наведена схема пневмоелектричного перетворювача дискретної дії типу ПЕВ, призначеного для перетворення сигналу у межах від 0 до 6 МПа у дискретний електричний сигнал для забезпечення комутації кіл постійного і змінного струму від 0,05 до 125 В з діапазоном змінного струму від  $5 \cdot 10^{-6}$  до 0,25 А і постійного струму від  $5 \cdot 10^{-6}$  до 1 А.

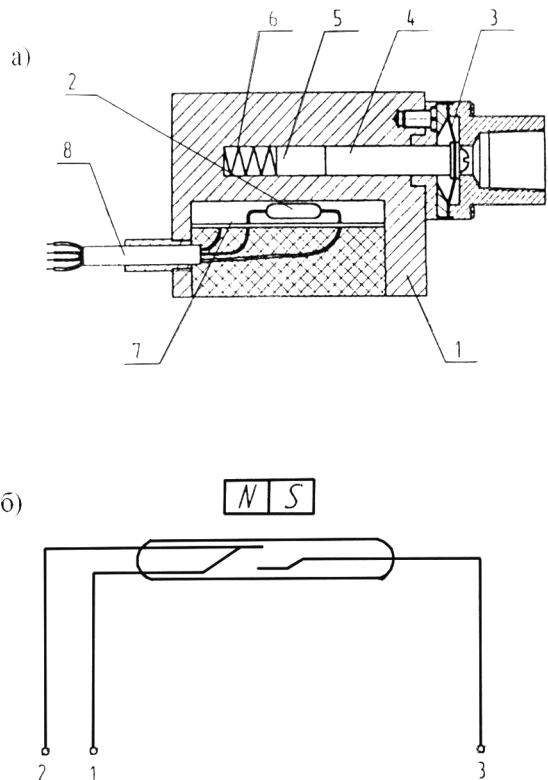


Рис. 2.113 Конструктивне оформлення (а) і схема принципова електрична (б) перетворювача типу ПЕВ-1.

Перетворювач складається (рис. 2.113) з комутуючого елементу 2 і приводного пристрою, що містить мембрану 3, штовхач 4 постійного магніту 5, пружину 6, умонтованого у корпус. Комутуючий елемент виконаний у вигляді перемикаючого геркона (магнітнокеремі герметизовані контакти) типу КЭМ-3.

Принцип дії полягає у наступному. За відсутності тиску повітря на вході геркон знаходиться зовні магнітного поля, що створюється постійним магнітом. За таких умов контакти 1 і 2 замкнені, а контакти 1 і 3 розімкнені. При надходженні тиску повітря на вхід перетворювача штовхач 4 під впливом зусилля, що утворюється на мембрані 3, пе-



реміщується і приводить до руху постійний магніт 5, магнітне поле якого діє на геркон 2. При спрацьовуванні геркона контакти 1 і 2 розімкнуться, а контакти 1 і 3 замкнуться. Із зняттям тиску повітря на вході штовхач і постійний магніт під впливом пружини 6 займуть початковий стан, контакти 1 і 2 замкнуться, а контакти 1 і 3 – розімкнуться. Тиск спрацьовування з підвищенням вхідного сигналу складає не більше  $0,01$  МПа.

Перетворювачі електропневматичні типу ЕПП-М, МТМ-810 призначені для перетворення уніфікованого сигналу постійного струму  $0 \div 5$  чи  $0(4) \div 20$  мА у пропорційний пневматичний аналоговий сигнал  $20 \div 100$  кПа.

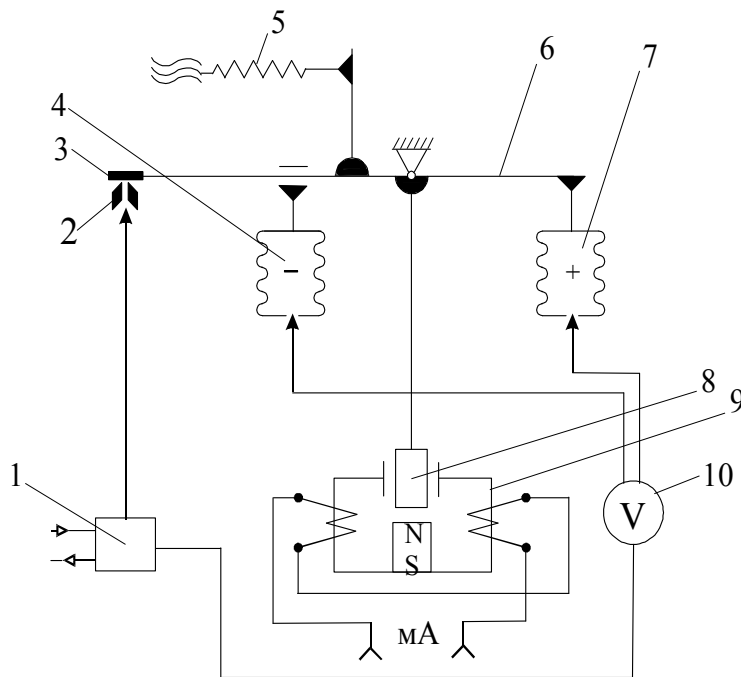


Рис. 2.114. Принципова схема електропневмоперетворювача ЕПП-М.

Дія перетворювача ґрунтується на принципі силової компенсації. Вхідний струм що проходить по котушкам електромагніта поляризованого типу утворює у магнітопроводі 9 магнітний потік (див. рис. 2.114), внаслідок чого виникає на якорі 8 зусилля, яке прямо пропорційне силі вхідного струму. Із зміною вхідного струму буде змінюватись відстань між соплом 2 і заслінкою 3, що закріплена на важелі 6. При цьому буде змінюватись тиск у лінії сопла, який далі сприймається пневматичним реле 1. У реле 1 сигнал тиску підсилюється за потужністю і подається на вихід перетворювача. Одночасно буде змінюватись тиск у сильфонах позитивного 7 і негативного 4 зворотних зв'язків. Ця зміна буде тривати до тих пір, доки зусилля, що виникає у сильфонах від дії вихідного тиску, врівноважить зусилля на важелі від вхідного сигналу. Пневматична ємність 10 виконує роль демпфера для гасіння пневмоколивань, а пружина 5 служить для настройки початкового значення вихідного сигналу при відповідному значенні вхідного електричного струмового сигналу. У приладі передбачена температурна компенсація похибки електромагніта. Перетворювач має ви-

Дія перетворювача ґрунтується на принципі силової компенсації. Вхідний струм що проходить по котушкам електромагніта поляризованого типу утворює у магнітопроводі 9 магнітний потік (див. рис. 2.114), внаслідок чого виникає на якорі 8 зусилля, яке прямо пропорційне силі вхідного струму. Із зміною вхідного струму буде змінюватись відстань між соплом 2 і заслінкою 3, що закріплена на важелі 6. При цьому буде зміню-

бухознахищенне виконання. Клас точності  $-1,5$  (1). Витрата повітря живлення складає до  $5$  л/хвил, тиск живлення –  $140$  кПа.

**Інтерфейсні перетворювачі** знайшли широке розповсюдження мікропроцесорних і цифрових пристроїв у сучасних автоматизованих системах керування технологічними процесами. Робота цих систем пов'язана з обробкою значних інформаційних потоків, що вимагає створення надійних цифрових каналів передачі інформації – інтерфейсних ліній зв'язку. У промислових умовах найбільше застосування знайшов інтерфейс RS-232C (вітчизняний аналог “Стик 2”). Цей інтерфейс забезпечує зв'язок між двома цифровими пристроями по двом провідникам при однобічній передачі або по чотирьом – при двобічній передачі інформації. До переваг цієї системи зв'язку можна також віднести простоту апаратної реалізації і технічного обслуговування. Недоліками інтерфейсу RS-232C є порівняно невелика швидкість передачі інформації і жорстка прив'язаність до протоколу обміну, який строго регламентує порядок прямування даних у потоці інформації. На цей час велика кількість підприємств – виготовників мікропроцесорних контролерів і цифрових приладів застосовують різні стандарти, тому проектуючи систему керування необхідно приділяти особливу увагу сумісності протоколів обміну пристроїв, складаючих систему контролю чи керування.

У сучасних умовах стандарт інтерфейсу RS-232C отримав подальший розвиток у вигляді таких модифікацій як RS-422A, RS-423A, RS-485. При цьому, апаратна реалізація не вплинула на протоколи обміну. Загальні схеми інтерфейсів наведені на рис. 2.115, а їх параметри представлені у табл. 2.19.

Аналіз характеристик інтерфейсів свідчить, що оптимальним рішенням може бути інтерфейс RS-422A., за допомогою якого можливо з'єднувати пристрої на досить великих відстанях. Більш надійним безумовно є інтерфейс RS-485, але складність апаратної реалізації обмежує його всебічне застосування.

Інформація по цим інтерфейсам розповсюджується у вигляді двополярного сигналу, високій рівень напруги якого відповідає логічному нулю, а низький – логічній одиниці. Для нормального функціонування інтерфейсу необхідно, щоб рівень напруг на виході передавача знаходився у межах  $5 \div 15$  В для високого рівня і  $(-5) \div (-15)$  В - для низького. Приймач має більший гістерезис сигналу відповідно  $3 \div 25$ В і  $(-3) \div (-25)$  В. Це забезпечує достатньо надійний зв'язок поміж пристроями. Підключення пристроїв за допомогою

роз'ємів на 9 і 25 контактів може бути виконано у відповідності з даними табл. 2.20. Призначення контактів послідовного інтерфейсу наведено у табл. 2.21.

Таблиця 2.19.

Технічні характеристики інтерфейсних каналів зв'язку.

Тип інтерфейсу	Довжина лінії зв'язку, м	Швидкість передачі даних
RS-232C	15	20 Кбіт/с
RS-422A	12	10 Мбіт/с
RS-485	1200	1 Мбіт/с
	1200	100 Кбіт/с
RS-423A	9	100 Кбіт/с
	91	10 Кбіт/с
	1200	1 Кбіт/с

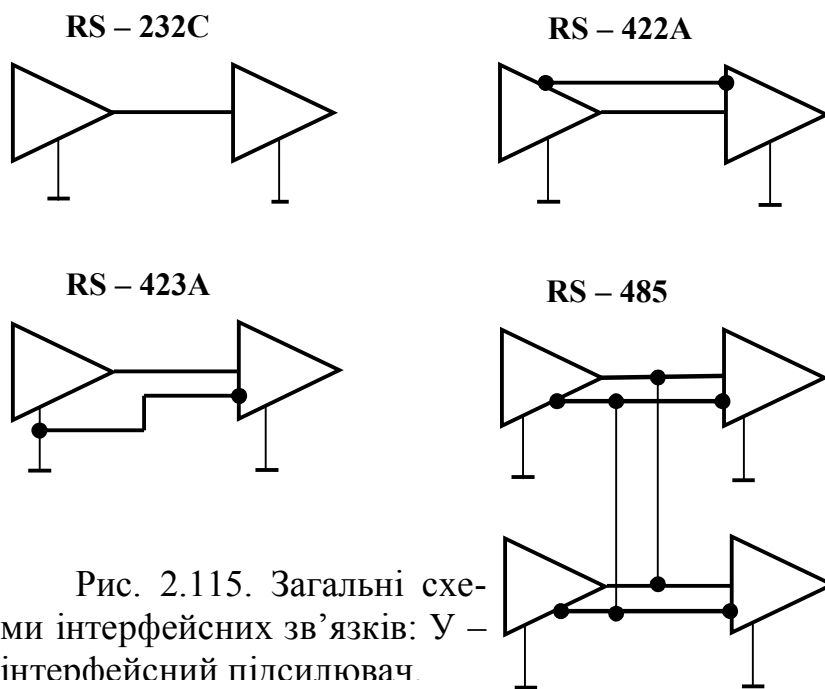


Рис. 2.115. Загальні схеми інтерфейсних зв'язків: У – інтерфейсний пісилювач.

Поряд з вищевказаними інтерфейсами у вітчизняних мікропроцесорних контролерах, зокрема серії P130 використовується інтерфейс типу "ІРПС". Цей інтерфейс забезпечує єдині засоби обміну інформацією для різних пристроїв з мікропроцесорною організацією при приєднанні датчиків

чи приймачів сигналу до мікроконтролера (ПЕОМ) та при з'єднанні мікроконтролерів (ПЕОМ) поміж собою.

З'єднання відбувається за допомогою коаксіального кабелю чи пари провідників. Інтерфейс забезпечує асинхронну передачу інформації постійним струмом (струмова петля) по 4-провідному дуплексному зв'язку. В технічно обґрунтованих випадках допускається також лінія взаємозв'язку, що показує стан пристроїв. При цьому взаємозв'язок обумовлює з'єднання двох пристроїв для передачі послідовних двоїчних сигналів з регулярною швидкістю, що регламен-

тується стандартом чи домовленістю. У табл. 2.22 наведено призначення ліній зв'язку.

Таблиця 2.20.

З'єднання двох пристроїв  
за допомогою послідовного інтерфейсу RS-232.

Позначення кола	DB9S	DB25S	Напрямок сигналу	DB25S	DB9S	Позначення кола
TD	3	2	→	2	3	TD
RD	2	3	←	3	2	RD
DTR	4	20	→	20	4	DTR
DSR	6	6	←	6	6	DSR
RTS	7	4	→	4	7	RTS
CTS	8	5	←	5	8	CTS
DCD	1	8	←	8	1	DCD
RI	9	22	←	22	9	RI
SG	5	7	-----	7	5	SG

Таблиця 2.21.

Призначення контактів послідовних інтерфейсів “Стык 2” та RS232.

Позначення кола		Контакт роз'єму		Напрямок (Увід/вивід)	Назва кола
RS232	Стык 2	DB25S	DB9S		
PG	101	1	-	-	Protekt ground – захисна земля
TD	103	2	3	вивід	Transmit data – дані, що передаються
RD	104	3	2	увід	Receiv data – дані, що приймаються
RTS	105	4	7	вивід	Request to send – запит передачі
CTS	106	5	8	увід	Clear to send – готовність модема прийняти дані для передачі
DSR	107	6	6	увід	Data set ready – готовність модема до роботи
SG	102	7	5	-	Signal ground – схемна земля
DCD	109	8	1	увід	Data carrier detected – несуча частота виявлена
DTR	108/2	20	4	вивід	Data terminal Ready – готовність передавача до роботи
RI	125	22	9	увід	Ring indicator – індикатор виклику

Таблиця 2.22

## Призначення контактів (ліній) послідовного інтерфейсу ІРПС.

Номер лінії	Назва сигналу	Позначення	Напрямок передачі
1	Данні, що передаються	ПД+ / ПД-	Від Д до П / від П до Д
2	Данні, що приймаються	Пр + / ПрД-	Від П до Д / від Д до П
3	Готовність приймача (необов'язковий)	ГП+ / ГП	Від П до Д / від Д до П

Примітка: П – приймач сигналу, Д – передавач сигналу (джерело).

За відсутності обміну між пристроями лінії зв'язку утримуються в стані "1". Формат передачі інформації: 1 "старт-біт"; 5, 7 чи 8 біт інформації; 1 біт паритету (необов'язковий); 1,5 або 2 біт – "стоп-біт". В активному режимі лінії взаємозв'язку живляться зі сторони передавача, а в пасивному – зі сторони приймача. Стану логічної "1" відповідає струм  $30 \div 50$  мА (для струмової петлі  $40$  мА), а логічного "0" – струм  $5 \div 10$  мА. Для струмової петлі "20 мА" логічна "1" –  $15 \div 25$  мА, логічний "0" –  $0 \div 3$  мА. Швидкість передачі інформації  $9600$  біт/с на відстані до  $500$  м.

Сучасні вимірювальні прилади отримання інформації про стан роботи технологічного об'єкту мають різноманітні інтерфейсні виходи, що обумовило розробку спеціальних перетворювачів інтерфейсів. Такі перетворювачі поширюють можливість передачі інформації до центральної частини АСКТП від вимірювальних перетворювачів з різними характеристиками інтерфейсного зв'язку. Блоки перетворення інтерфейсів БПІ не призначені для роботи у вибухонебезпечних зонах приміщень.

## 2.8. ВТОРИННІ ПРИЛАДИ

*Вторинні прилади* призначені для забезпечення дистанційного контролю різних технологічних параметрів, а у залежності від наявності умонтованих функціональних пристроїв додатково дозволяють здійснювати: перетворення сигналу з одного виду у інший уніфікований; сигналізацію межових значень відхилень параметрів від номінального значення; позиційне, пропорційне, пропорційно-інтегральне, пропорційно-інтегрально-диференційне регулювання. За кількістю контролюємих точок прилади розподіляються на одно- і багатоточечні. Багатоточечні прилади оснащені перемикачами, що автоматично здійснюють підключення до вимірювальної схеми кола

первинних перетворювачів і комутацію вихідних кіл. За способом відліку показань вторинні прилади можуть бути показуючими (цифровими), самопишучими, комбінованими, підсумовуючими та інтегруючими.

У залежності від умов експлуатації прилади виготовляються у наступних виконаннях: звичайному, звичайному з іскробезпечною вимірювальною схемою, тропічному, тропічному з іскробезпечною вимірювальною схемою, для застосування на об'єктах ядерної енергетики. Звичайне виконання відповідає температурі навколишнього повітря у діапазоні  $5 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$  з відносною вологістю до 80 %, а тропічне – у діапазоні  $5 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$  з відносною вологістю до 98 %.

За принципом дії вимірювальної схеми у промисловості найчастіше застосовуються мілівольтметри, логометри, автоматичні мости, потенціометри, прилади с диференціально-трансформаторною схемою, з струмовим вхідним уніфікованим сигналом, а також пневматичні вимірювальні прилади. Усі ці прилади у залежності від умонтованих функціональних пристроїв можуть мати різні модифікації.

**Мілівольтметри** призначені для вимірювання температури у комплекті з термоелектричними термометрами та радіаційними пірометрами і відносяться до приладів магнітоелектричної системи, принцип дії яких оснований на взаємодії провідника зі струмом, що визначається електрорушійною силою термопари, і магнітного поля постійного магніту. Вимірювальний механізм складається (див. рис. 2.116) з рамки, що обертається у рівномірному полі постійного магніту навколо залізного сердечника.

Рамка виконана з мідного дроту. Жорстко з рамкою зв'язаний покажчик, на протилежному кінці якого розташовані два вантажка – противаги для балансування рухливої системи. Рамка підключається до електричного вимірювального кола за допомогою протидіючих (повертання на нуль з відключенням приладу) спіральних пружин, або за допомогою розтягувача чи підчеплювача при кріпленні на них рамки.

Приєднання термоелектричного термометра ТП до приладу здійснюється за допомогою термоелектродного дроту (див. розд. 2.5.), а з метою усунення похибки у вимірах, що виникає внаслідок відхилення температури вільних кінців від  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , застосовують найчастіше компенсаційні коробки. Найбільш розповсюджені мілівольтметри типу Ш, моделі яких відрізняються функціональними мож-

ливостями: одноканальне (Ш69003) і дванадцяти канальне (Ш69004) вимірювання, одноканальне вимірювання з двопозиційним регулятором (Ш4501) та ін.

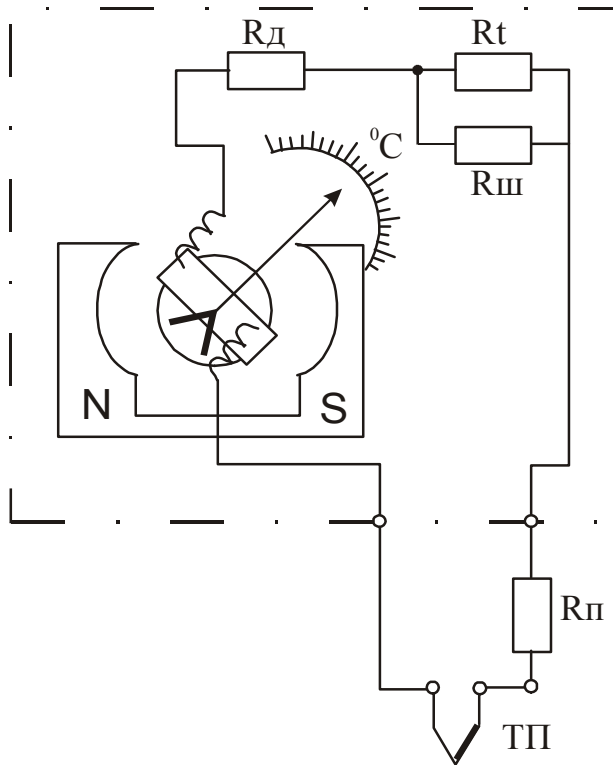


Рис. 2.116. Принципова схема мілівольметра:  $R_d$  – опір, що визначає діапазон вимірювання приладу;  $R_t$  – термокомпенсатор (напівпровідниковий термоопір з негативним температурним коефіцієнтом), що запобігає впливу температури навколишнього середовища на параметри схеми приладу;  $R_{ш}$  – шунт термокомпенсатора для підгонки його опору;  $R_p$  – підгоночний опір (котушка) для доводки опірності зовнішнього кола мілівольметра до значення, вказанного на шкалі приладу.

**Потенціометри** (див. рис. 2.117) призначені для вимірювання і реєстрації температури (у комплекті з термоелектричними перетворювачами та радіаційними пірометрами) і інших технологічних параметрів, які можуть бути перетворені у сигнали напруги постійного струму.

Принцип потенціометричного метода вимірювання оснований на врівноважуванні (компенсації) термоЕДС, що вимірюється, відомою різницею потенціалів, утвореною допоміжним джерелом струму. Вимірювання напруги постійного струму, що надходить на вхід потенціометра, здійснюється методом порівнювання з відомою напругою постійного струму, що знімається з движка реохорда.

При зміні сигналу  $E_x$ , що надходить від первинного перетворювача, на вході ЕП виникає напруга розбалансу, що призводить до руху РД, вал якого буде обертатися у той чи інший бік у залежності від знаку розузгодження (більше чи менше попереднього нового значення ЕДС) до тих пір, доки існує напруга розбалансу. У момент рівноваги вимірювальної схеми сигнал на вході ЕП становить рівним нулю і РД зупиниться. При цьому положення покажчика П ви-

значить значення параметра. Усі опірності вимірювальної схеми (крім  $R_m$ ) виготовляють з манганінового стабілізованого дроту. Опір  $R_m$  розташовується звичайно безпосередньо біля затискачів приладу вільних кінців термоелектродних дротів, живлення ЕП здійснюється напругою змінного струму, а струм розбалансу, що надходить з вимірювальної схеми потенціометра, – постійний. У зв'язку з цим для узгодження напруг в автоматичних потенціометрах ЕП мають вхідний пристрій, що складається з віброперетворювача чи модулятора і вхідного трансформатора.

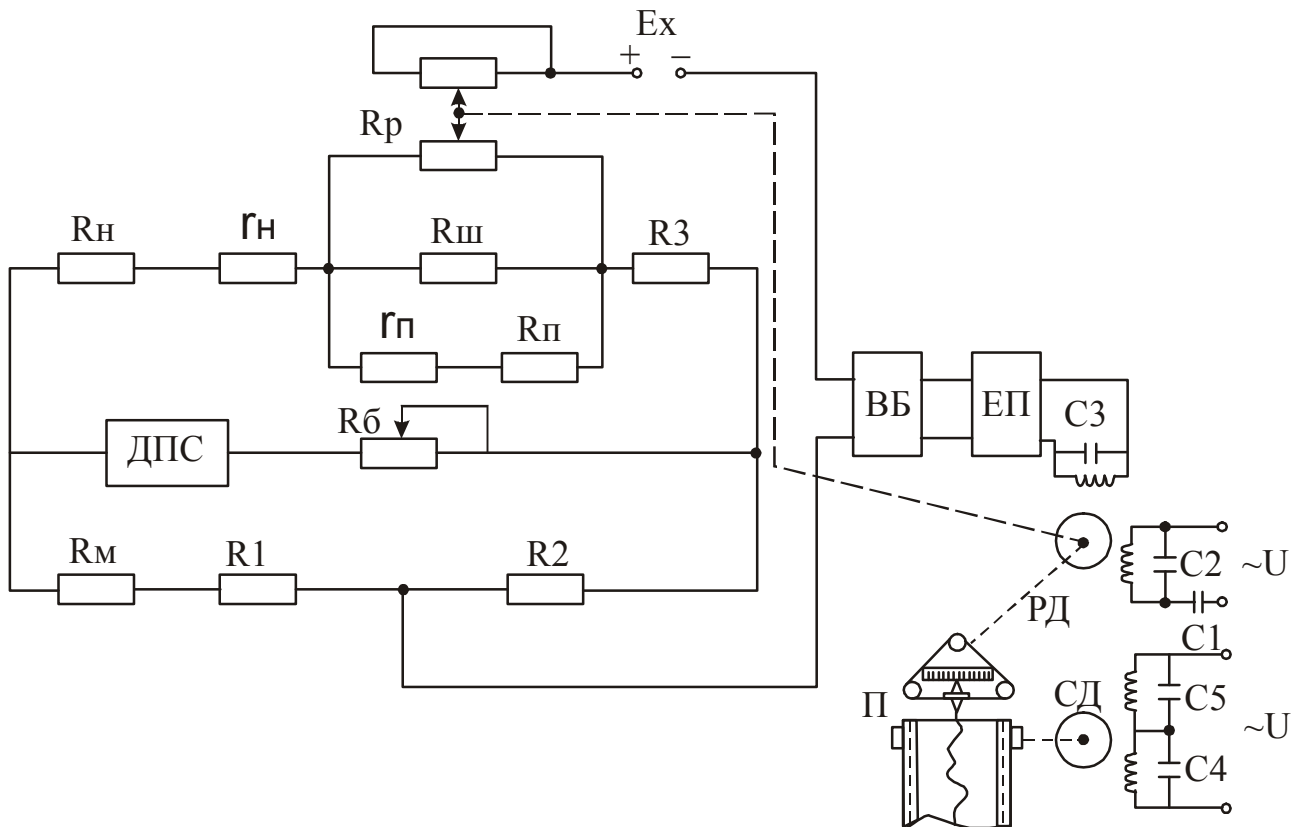


Рис. 1.2 Принципова схема автоматичного електронного потенціометра:  $R_p$  – еквівалентний опір реохорда;  $R_n$  – опір для завдання початку шкали приладу;  $r_n$  – опір для точної підгонки початку шкали;  $R_p$  – опір для завдання меж вимірювання потенціометра;  $r_p$  – опір для точної підгонки меж вимірювання;  $R_1, R_2, R_3$  – опірності постійного значення для певної НСХ термопари і меж вимірювання приладу;  $R_m$  – мідний опір (термокомпенсатор) для усунення впливу відхилення температури вільних кінців термопари від градуювального значення;  $R_b$  – опір для обмеження і регулювання робочого струму у колі джерела стабілізованого живлення (ДПС); ЕП – електронний підсилювач; РД, СД – реверсивний і синхронний двигуни; ВБ – віброперетворювач чи модулятор.

**Врівноважені мости** призначені для вимірювання і реєстрації



температури у комплекті з термоперетворювачами опору та інших технологічних параметрів, які можуть бути перетворені у сигнали зміни активного опору. Принципова схема автоматичного електронного моста представлена на рис. 2.118.

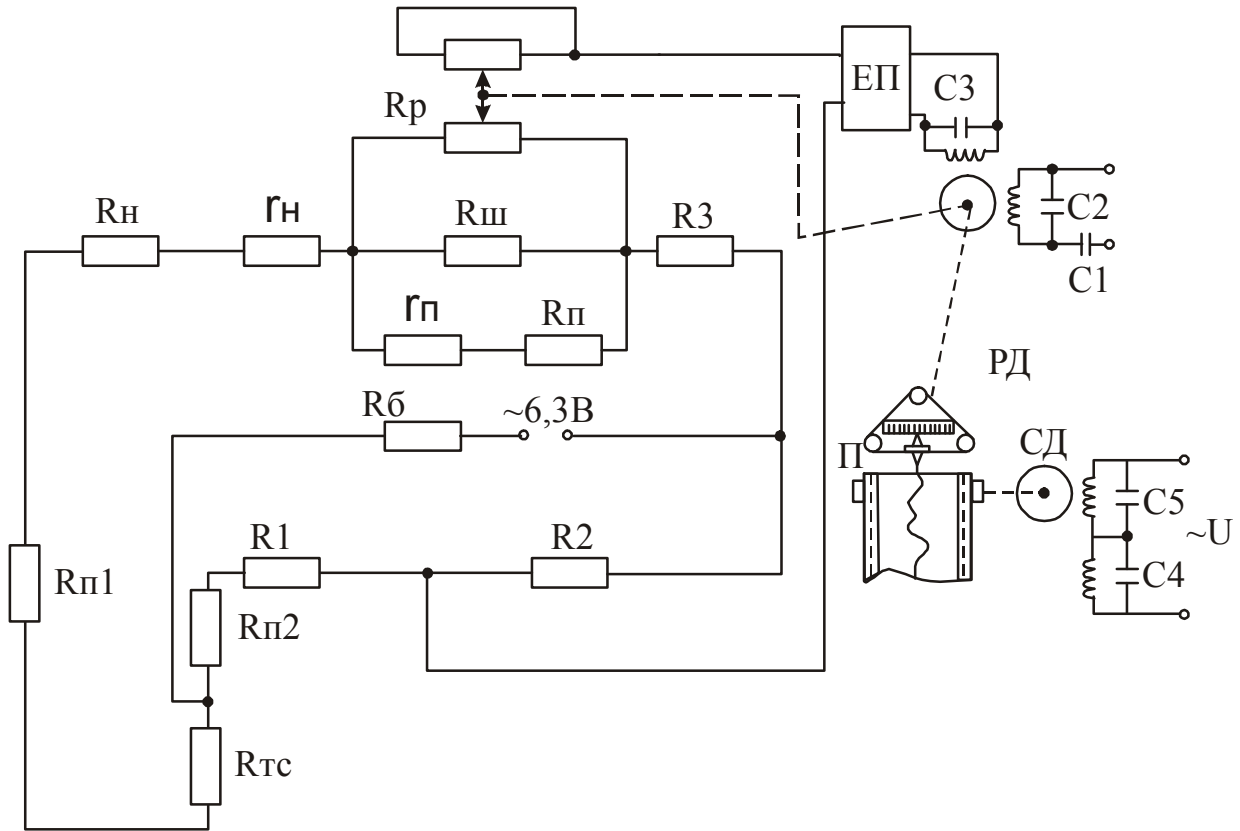


Рис. 2.118. Принципова схема автоматичного електронного моста:  $R_{тс}$  – термоопір;  $\Pi$ ,  $R_p$ ,  $R_n$ ,  $r_n$ ,  $R_p$ ,  $r_p$ ,  $R_b$ ,  $E\Pi$ ,  $PД$ ,  $CД$  (див. рис. 2.117.);  $R_{п1}$ ,  $R_{п2}$  – додаткові (підгоночні) опори, що доводять опір лінії зв'язку до стандартного значення  $R_{вн}$ , зазначеного на шкалі приладу.

При зміні сигналу  $R_{тс}$ , що надходить від первинного перетворювача, мостова схема виходить з рівноваги і на вході  $E\Pi$  з'являється сигнал розбалансу.  $E\Pi$  приводить у дію  $PД$ , вал якого переміщує покажчик  $\Pi$  і повзунок реохорда  $R_p$  до настання нового стану рівноваги мостової схеми. Усі опірності за виконанням ідентичні попередньому приладу. Термоперетворювач  $R_{тс}$  підключається звичайно за трипровідною схемою, перевагою якої є виключення впливу температури навколишнього середовища на результати виміру. Термоперетворювачі з'єднують з мостом за допомогою мідного дроту чи кабелем перерізом  $1,5 \text{ мм}^2$ , що прокладається у надійно заземлених трубах чи метало рукавах для захисту від впливу електромагнітних полів.

Номенклатура потенціометрів і мостів досить різноманітна. Проте найчастіше використовуються прилади серії КС (КСП, КСМ), А (А100, А501, А542, А543), Диск-250 і РП-160 різних модифікацій, що відрізняються функціональними можливостями (кількість каналів, наявність регуляторів і сигнальних пристроїв).

**Логометри** за призначенням ідентичні мостам, але за принципом дії відносяться до приладів магнітоелектричної системи. Рухлива частина логометрів на відміну від мілівольтметрів складається з двох жорстко скріплених поміж собою рамок, розташованих під деяким кутом. Принципова схема логометра наведена на рис. 2.119.

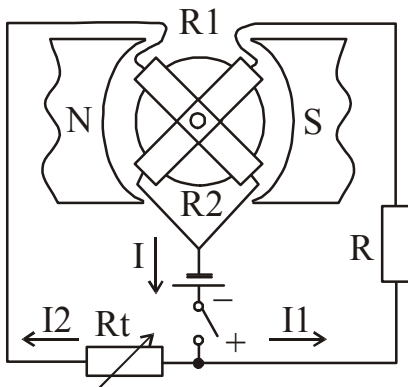


Рис. 2.119. Принципова схема логометра.

Постійний магніт містить циліндричні виточки, центри яких зміщені відносно центра сердечника. Поміж полюсним наконечниками розташований циліндричний сердечник із сталі, навколо якого обертається рухлива система з двох рамок R1 і R2. До рамок прикріплена стрілка, що переміщується вздовж шкали. Шкали проградуєвана у градусах. Повітряний зазор між полюсними наконечниками і сердечником нерівномірний, завдяки чому магнітна індукція змінюється. Найбільша її величина у середині наконечників і найменша – по краях. До рамок підведений струм від загального джерела живлення (батарея). В рамку R1 струм надходить через постійний резистор R, а у рамку R2 – через термометр опору  $R_t = f(t)$ . Напрямок сил струму  $I_1$  і  $I_2$  такий, що обертальні моменти рамок направлені назустріч один одному.

За умови  $R = R_t$ , буде і  $I_1 = I_2$ , тобто обертальні моменти рамок однакові, а отже рухлива система буде знаходитись у середньому положенні. При зміні опору  $R_t$  внаслідок зміни температури через одну з рамок потече струм більшої величини, рівність обертальних моментів порушиться, і рухлива система почне повертатись у бік дії більшого моменту. При обертанні рухливої системи рамка, по якій тече струм більшої сили, попаде у зазор з меншою магнітною індукцією, внаслідок чого діючий на цю рамку момент зменшиться. Інша рамка у цей же час входить у зазор з більшою магнітною індукцією, і її момент збільшиться. Обертання рамок буде відбуватись

до тих пір, доки їх обертальні моменти не стануть рівними. Рухлива система зупиниться, а стрілка приладу вкаже по шкалі значення температури. Для збільшення чутливості рамки логометра включають у мостову схему, що дозволяє здійснити і температурну компенсацію за три провідною схемою ідентично розглянутій вище.

Логометри виготовляють найчастіше одноканальними (Л-64И, Ш69000, Ш69001) з можливістю двопозиційного регулювання (Ш69006).

**Прилади із струмовим входним уніфікованим сигналом** призначені для вимірювання різних технологічних параметрів, перетворених у сигнал постійного струму з уніфікованим діапазоном зміни. Принципова схема приладу (див. рис. 2.120 а) несуттєво відрізняється від схеми автоматичного потенціометра.

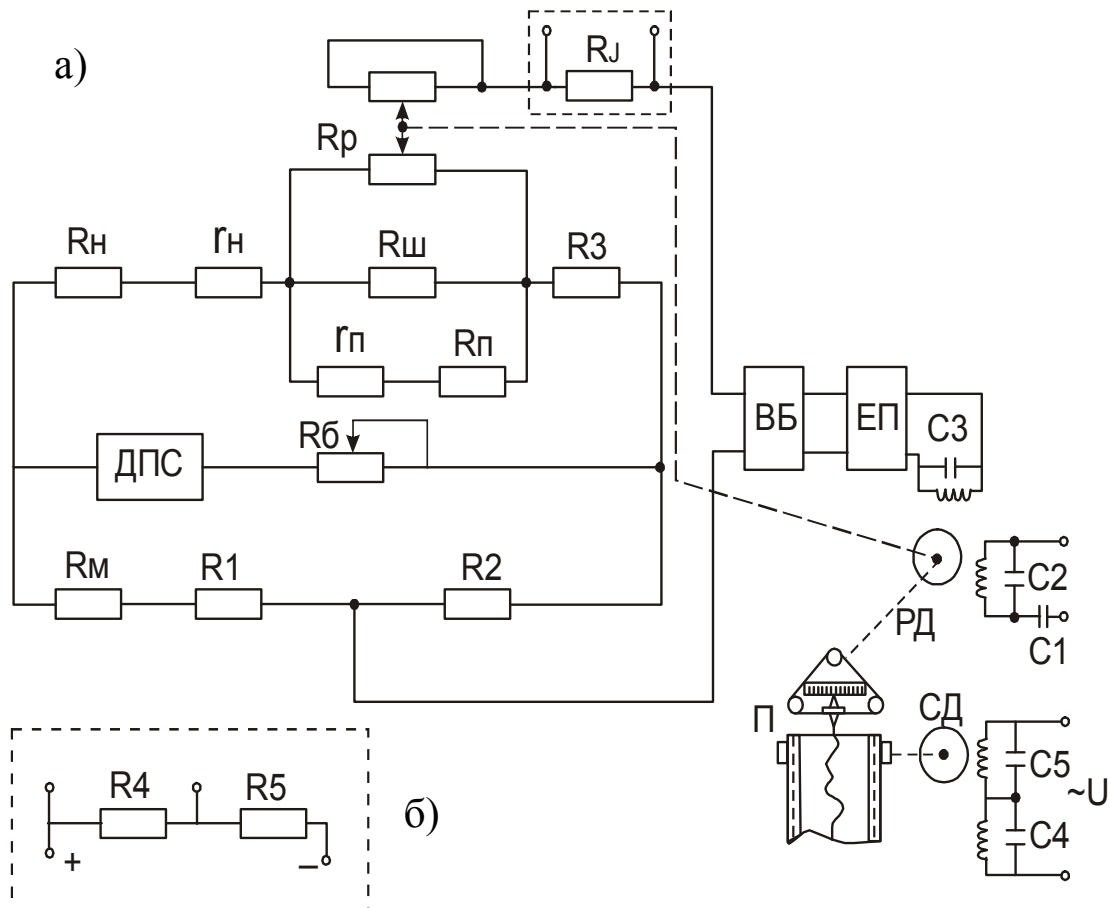


Рис. 2.120. Принципова схема автоматичного приладу з струмовим входним сигналом (а) та дільник для приладів з входним сигналом у формі напруги постійного струму (б).

Струмовий уніфікований сигнал перетворюється за допомогою шунта  $R_i$  у падіння напруги, яка змінюється у діапазоні  $0 \div 10$  мВ.

Це падіння напруги порівнюється з напругою, що утворюється у діагоналі мостової схеми. Отриманий сигнал розузгодження надходить далі на вхід ЕП. Для вимірювання уніфікованого сигналу у вигляді напруги  $0 \div 10 \text{ В}$  постійного струму на вході приладів встановлюють звичайно дільники напруги R4 і R5 (рис. 2.120 б) з метою подачі напруги  $100 \text{ мВ}$  чи  $20 \text{ мВ}$  чи  $50 \text{ мВ}$  у залежності від серії вторинних приладів, що знімається з резистора R4. Серед цих приладів найбільш розповсюджені вторинні прилади серії КСУ, Диск-250, РП-160 і А100 відповідних модифікацій, що відрізняються також функціональними можливостями.

**Прилади з диференціально трансформаторною схемою** призначені для вимірювання і реєстрації різних технологічних параметрів, перетворених у зміну величини взаємодуктивності.

Робота приладу основана на принципі слідкувального врівноваження. Переміщення плунжера диференціально-трансформаторного первинного перетворювача ДТП1 (див. рис 2.121.), яке здійснюється його чутливим елементом, буде пропорційним величині вимірюваного параметра.

В автоматичний прилад також умонтований ідентичний ДТП2, плунжер якого переміщується за допомогою профільованого лекала реверсивним двигуном РД. Первинні обмотки 1 обох перетворювачів з'єднані послідовно і підключені на напругу змінного струму  $24 \text{ В}$  від електронного підсилювача ЕП, а вторинні обмотки 2 з'єднані назустріч одна одній з виходом на ЕП. Значення і фаза напруги, що індукуються у вторинних обмотках, залежить від положення плунжерів у котушках ДТП1 і ДТП2. При розузгодженні положення плунжерів на вхід ЕП надходить напруга розбалансу. ЕП приводить до дії РД, який переміщує покажчик П і за допомогою лекала плунжер у котушці вторинного приладу до тих пір, доки напруга розбалансу не стане нижче порога чутливості ЕП. Для контролю справності приладу передбачена кнопка КВ. При натисканні цієї кнопки вторинна обмотка ДТП1 закорочується і на вхід ЕП надходить незначна визначена напруга, що призводить до встановлення покажчика П на контрольну позначку.

У котушці ДТП2 вторинного приладу передбачена також третя додаткова обмотка 3 з середньою точкою, яка шунтується змінним опором R1 і вмикається послідовно з вторинними обмотками котушок ДТП1 і ДТП2. Опір R1 призначений для корегування нуля приладу. Діапазон шкали приладу корегується дільником, що складається

ся із змінного R3 і постійного R4 опорів. Останні шунтують вторинну обмотку ДТТ2 приладу. З метою усунення впливу температури навколишнього середовища на показання приладу встановлюється мідний термокомпенсатор R2. Прилади звичайно можуть мати два рівня входних сигналів 0-10 і (-10) - 0- 10 мГн та два види профільованих лекал – з лінійною чи квадратною характеристикою. За цим принципом дії виготовляють прилади серії КСД, модифікації яких відрізняються функціональними можливостями.

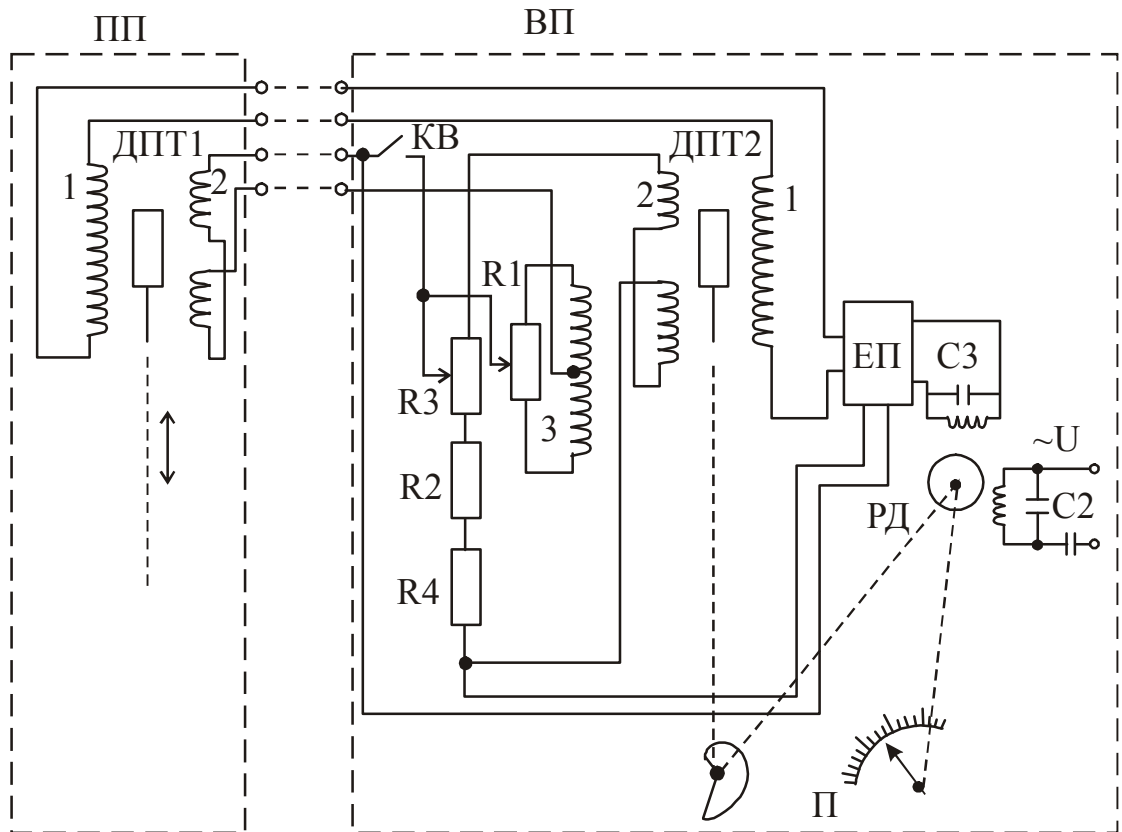


Рис. 2.121. Принципова схема автоматичного приладу з диференціально-трансформаторним входом (ВП) у комплекті з первинним перетворювачем (ПП).

**Пневматичні вимірювальні прилади** призначені для контролю і реєстрації різних технологічних параметрів, величини яких перетворені в уніфікований пневматичний сигнал  $0,02 \div 0,1$  МПа. Живлення приладів здійснюється стислим очищеним і осушеним повітрям тиском  $0,14$  МПа. Прилади системи СТАРТ виконані на базі уніфікованої системи елементів промислової пневмоавтоматики УСЕППА.

Дія вимірювальних систем вторинних пневматичних приладів оснований на компенсаційному принципі вимірювання, за якого зу-

силля у вхідному чутливому елементі, що виникає від вхідного тиску  $P_{вх}$ , врівноважується зусиллям, яке розвивається елементом зворотного зв'язку. Самописні прилади містять електричний (чи пневматичний привід діаграмної стрічки.

У приладах типу ФК (рис. 2.122.) тиск  $P_{вх}$  від первинного перетворювача надходить у внутрішню порожнину сильфона 5, а тиск живлення  $P_{ж}$  крізь постійний дросель 3 прямує у лінію, що з'єднує сопло 7 з силовим елементом 11. Із зміною  $P_{вх}$  сильфон переміщує важіль 4, що призводить до зміни зазору поміж соплом 7 і заслінкою 8, яка знаходиться на кінці важеля 4. Це викличе зміну тиску у лінії сопла, а отже, і в силовому елементі 11. При цьому почне переміщення сферична пружиста мембрана силового елемента і натискаючий на неї важіль 10.

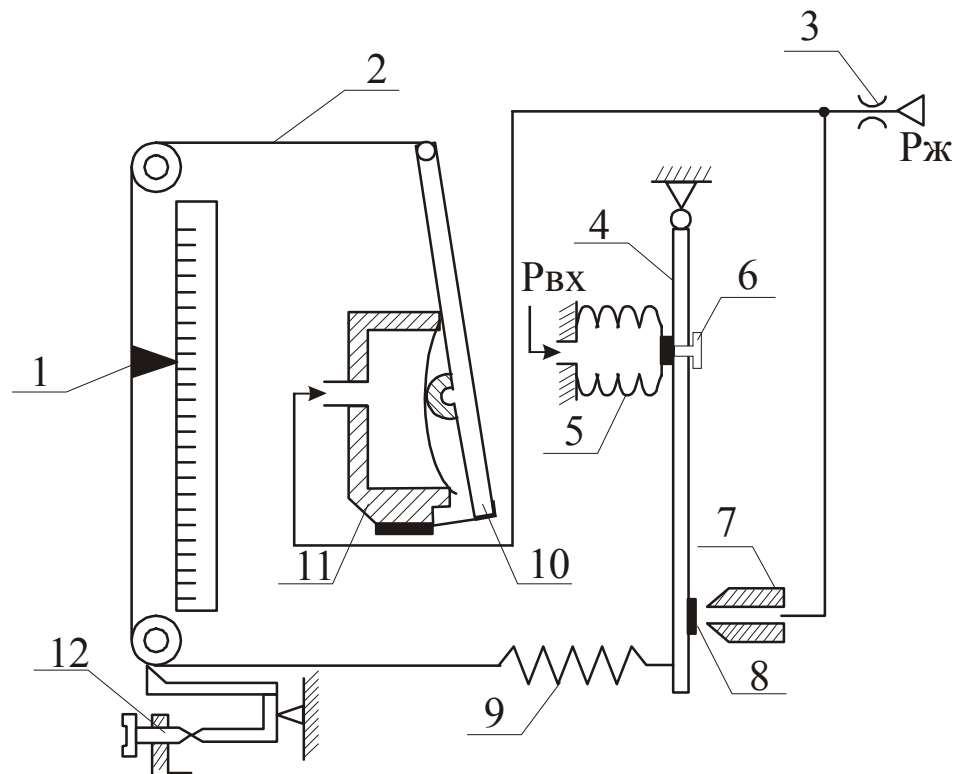


Рис. 2.122. Принципова вимірювальна схема пневматичних приладів типу ФК.

Останній за допомогою лавсанової ниті 2 і пружини зворотного зв'язку 9 зв'язаний з важелем 4. Пружина 9 розтягується і утворює зусилля, що діє зворотно зусиллю, утвореному на силовому елементі 11. Отже зусилля від тиску  $P_{вх}$  на сильфоні 5 врівноважується зусиллям в лінії зворотного зв'язку. Переміщення важеля 10 силового елемента передається покажчику 1 і перу для запису на діаграмі.

Початкове положення стрілки при  $P_{вх} = 0,02$  МПа встановлюється обертанням гвинта 12 коректора нуля. Настроювання діапазону вимірювання приладу при  $P_{вх} = 0,1$  МПа здійснюється зміною кількості робочих витків пружини 9, а грубе встановлення нуля приладу – за допомогою гвинта 6 сильфона 5.

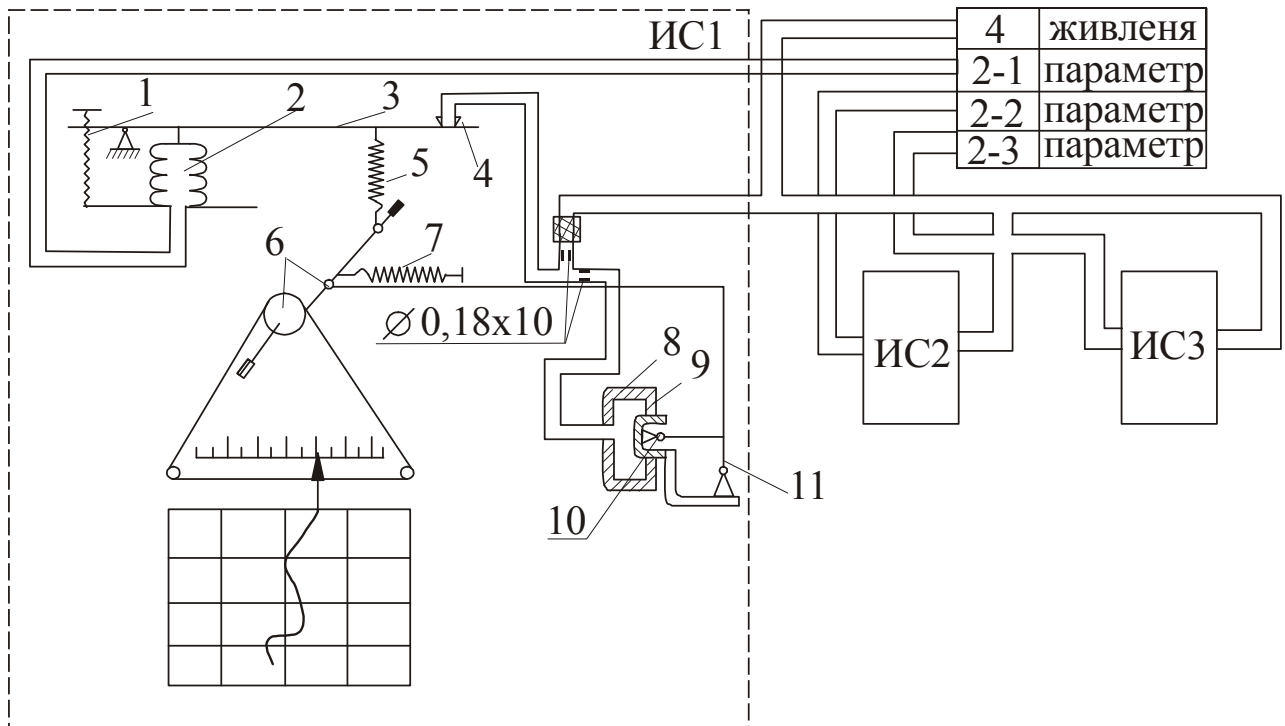


Рис. 2.123 Принципова вимірювальна схема (ИС) пневматичних приладів типу ПК.

У приладах типу ПК (рис. 2.123.) зміна  $P_{вх}$  призводить до зміни зазору поміж важелем 3 сильфона 2 і соплом 4, що викликає зміну тиску повітря у лінії сопла, а отже, в пневмоприводі 8. При цьому переміщується мембрана 9 пневмопривода 8. Поршень 10, що тисне на мембрану 9, прикріплений до важеля 11. Останній повертає ролик 6 на кут необхідний для досягнення рівноваги на важелі між зусиллями від тиску у сильфоні 2 і пружини зворотного зв'язку 5. У відповідності з кутом повороту ролика здійсниться пропорційне переміщення покажчика відносно шкали. Важіль 11 повернеться у початковий стан за допомогою пружини 7 при  $P_{вх} = 0,02$  МПа. Для настроювання положення покажчика на нуль служить гвинт коректора нуля 1.

## 3. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

### 3.1. КЛАСИФІКАЦІЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ

Для забезпечення нормальної роботи різних за призначенням і конструкцією апаратів й установок хімічної та фармацевтичної промисловості необхідно регулювати технологічні параметри, що впливають на якість чи ефективність технологічного процесу. Автоматична система регулювання (АСР), дія якої спрямована на виконання такої цілі, повинна забезпечувати потрібну якість регулювання в перехідному (динамічному) режимі при зміні керуючих і, що збурюють, діянь. В значній мірі ефективність і якість такої АСР визначається її структурою, тобто способом формування керуючого діяння (з використанням якого регулюючого діяння слід керувати тим чи іншим параметром). Такий вибір структури АСР визначається насамперед принципом регулювання.

**За принципом регулювання** сучасні АСР розділяють на діючі за відхиленням, за збуренням і за комбінованим принципом.

*Регулювання за відхиленням* полягає у тому, що з відхиленням параметра регулювання у від заданого значення (див. рис. 3.1а) збурення  $v$  викликає відхилення поточного значення параметра у від його заданого значення  $u$ . Автоматичний регулятор (мікро контролер) АР порівнює значення  $u$  з  $u$  і за наявності розбіжності  $\varepsilon$  між ними відпрацьовує регулююче діяння  $\mu$  відповідного знаку, яке за допомогою виконавчого пристрою ВП змінює вхідний параметр  $x$  (керуюче діяння) з метою усунення розбіжності  $\varepsilon$ . За такого принципу регулювання формування регулюючого діяння вимагає наявності розбіжності, що є недоліком, бо саме цю розбіжність необхідно усувати за допомогою регулятора. Проте в практичній діяльності такі системи отримали найбільше розповсюдження завдяки тому, що за такого принципу регулююче діяння здійснюється незалежно від кількості, виду і місця прикладання діянь, що збурюють, тобто за допомогою одного регулюючого діяння у багатьох випадках досягається задовільна компенсація декількох збурень.

*Регулювання за збуренням* полягає у тому, що діяння, яке збурює, може бути усунено ще до того, як виникне розбіжність. У від-



повідності з цим принципом регулятор  $AP_1$  (див. рис. 3.1б) отримує інформацію про поточне значення основного чинника  $v_1$ , що збурює. При зміні його і розбіжності з номінальним значенням  $u_1$  регулятор відпрацьовує регулююче діяння  $\mu_1$ , яке за допомогою виконавчого ВП змінює керуюче діяння  $x$  з метою усунення розбіжності поміж  $v_1$  і  $u_1$ . Однак реалізувати регулювання за збуренням для більшості об'єктів практично не завжди можливо у зв'язку з неможливістю чисельної оцінки збурень  $v_i$  та урахування їх кількості. Наприклад, вимірювання таких збурень як зміна активності каталізатора, гідродинамічних умов обладнання чи умов теплообміну крізь стінку теплообмінника та інших умов наштотується на значні труднощі, а у деяких випадках взагалі нездійсненні. Найчастіше ураховують лише основне збурення – навантаження (витрату) на об'єкт регулювання. АСР за такого принципу є розімкненою на відміну від попередньої, яка є замкненою.

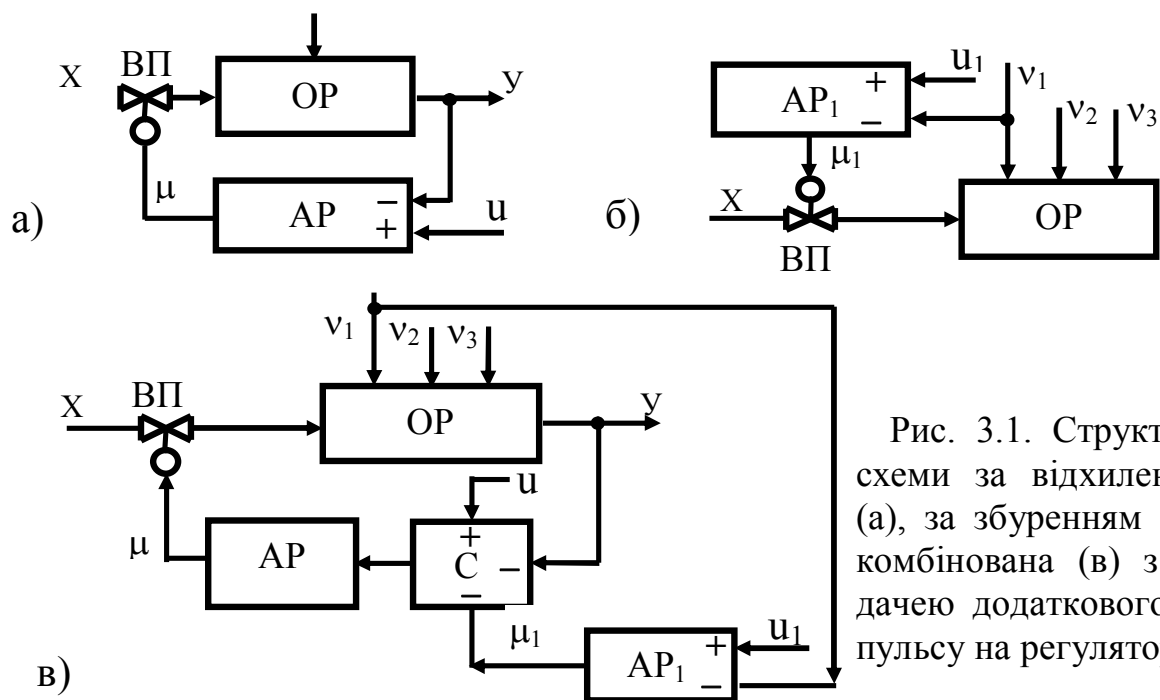


Рис. 3.1. Структурні схеми за відхиленням (а), за збуренням (б) і комбінована (в) з подачею додаткового імпульсу на регулятор.

*Комбінований принцип* дозволяє поєднати переваги обох попередніх принципів регулювання. Структурна схема такої АСР, що враховує одне збурення  $v_1$ , наведена на рис. 3.1в. Поточне значення збурення  $v_1$  надходить до автоматичного регулятора  $AP_1$ , вихідний сигнал якого  $\mu_1$  алгебраїчно сумується у суматорі С з вхідним сигналом  $(y, u)$  регулятора АР. Останній відпрацьовує регулююче діяння  $\mu$  у випадку зміни значення збурення  $v_1$ , яке прямує на ВП і компенсує вплив збурення ще до появи відхилення параметра  $y$  від заданого  $u$ .

Якщо розбіжність поміж ними все ж має місце, то регулятор АР відпрацює регулюючий сигнал  $\mu$  по відхиленню і ліквідує її.

**За кількістю параметрів, що регулюються,** АСР розділяють на одномірні і багатомірні. *Одномірні системи* мають по одному параметру регулювання, а *багатомірні* – декілька параметрів регулювання. При цьому багатомірні системи можуть бути системами *незв'язаного і зв'язаного регулювання*. Для перших характерним є те, що регулятори в них безпосереднього зв'язку поміж собою не мають і взаємодіють лише тільки через об'єкт регулювання. У системах зв'язаного регулювання регулятори різних параметрів одного і того ж об'єкту мають безпосередні зв'язки крім зв'язків через об'єкт регулювання.

Системи незв'язаного регулювання найчастіше використовуються, коли взаємний вплив параметрів об'єкта, що регулюються, малий або практично відсутній. У протилежному випадку застосовують системи зв'язаного регулювання, у яких регулятори різних параметрів одного технологічного об'єкта зв'язані між собою зовнішніми зв'язками (зовні об'єкта) з метою послаблення взаємного впливу параметрів, що регулюються. Багатомірні системи зв'язаного регулювання, у яких в процесі регулювання одного параметра інші параметри регулювання не змінюються, називаються *автономними АСР*. Такі системи забезпечують високу якість регулювання об'єктів з декількома взаємозв'язаними параметрами, що регулюються.

**За кількістю контурів регулювання** АСР можуть бути *одноконтурні* і *багатоконтурні*. *Одноконтурні* – це системи, що містять один замкнений контур, а *багатоконтурні* мають у складі, як мінімум, два контури регулювання – основний і коректуючий. До таких АСР належать і *каскадні* системи, що становлять собою системи регулювання за збуренням з корекцією по відхиленню величини параметра регулювання від заданого значення.

**За призначенням алгоритму зміни діянн завданням** розрізняють наступні типи АСР: автоматичної стабілізації, програмного керування, слідкуючи і з керуванням від персональної обчислювальної машини (ПЕОМ).

*Системи автоматичної стабілізації* призначені для підтримки параметра регулювання на заданому постійному рівні і є найбільш широко розповсюдженими АСР.

*Системи програмного керування* забезпечують зміну параметра регулювання у відповідності з функцією завдання у часі  $u = f(t)$ . Для

реалізації цієї функції застосовують програмні задавачі. Такі системи використовуються при автоматизації періодичних процесів чи процесів, що діють за визначеним циклом.

*Слідкуючи системи* забезпечують відповідність значення параметра регулювання деякому іншому параметру, величина якого може змінюватись у часі за будь-яким законом. У цих системах параметр регулювання (ведений) знаходиться у відповідній залежності від іншого (ведучого) технологічного параметра. Найчастіше такі системи використовують в процесі регулювання співвідношення двох параметрів, наприклад, витрата двох матеріальних потоків. Ці системи намагаються усунути розбіжність поміж значенням ведучого параметра, помноженому на постійний коефіцієнт, і значенням веденого параметра.

*Системи з керуванням від ПЕОМ* здійснюють зміну параметра регулювання у залежності від завчасно невідомої величини завдання. Це завдання регулятора формується в процесі обчислень за деяким алгоритмом з встановленням його значення на оптимальному (екстремальному) рівні, що забезпечує для конкретних умов максимальну ефективність технологічного процесу. Значення завдання від ПЕОМ до регулятора передається по інтерфейсному каналу зв'язку. Такі системи найчастіше називають системами *екстремального* регулювання. Системи, що встановлюють декілька параметрів завдання за алгоритмом обчислень з метою забезпечення екстремального значення ефективності технологічного процесу, називаються *оптимальними*.

**За характером сигналів регулювання** розрізняють безперервні і дискретні АСР. *Безперервні* АСР складаються тільки з пристроїв безперервної дії (аналогової) і безперервній зміні вхідній величині відповідає неперервна зміна величини на виході кожного пристрою. В окремих випадках ці системи мають дискретний вихід уразі застосування на виході регулятора блоку широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Такі системи найчастіше використовуються для регулювання температурного режиму електронагрівальних печей. У *дискретних* АСР (релейні, імпульсні, цифрові) вихідна величина становить собою послідовність імпульсів, амплітуда, частота і тривалість повторення яких залежить від значення вхідної величини у відповідні моменти часу. Найпростішою системою дискретної дії є релейні (позиційні) АСР, які за допомогою релейного пристрою (ланки) перетворюють безперервну вхідну величину у дискретну релейну. У за-

лежності від кількості фіксованих значень (позицій) вихідної величини релейного пристрою розрізняють двопозиційні і багатопозиційні АСР. Застосування релейних пристроїв може призводити до значних автоколивань параметра регулювання з деяким періодом і амплітудою, що знижує якість роботи АСР.

Імпульсні АСР мають у своєму складі імпульсний пристрій, який перетворює безперервну вхідну величину у дискретну імпульсну. Період появи імпульсів задається примусово, а амплітуда і тривалість імпульсів на виході пропорційні вхідній величині. Застосування імпульсного пристрою звільняє вимірювальний пристрій системи від навантаження і дозволяє використовувати на виході малопотужний, але більш чутливий вимірювальний пристрій, що реагує на достатньо малі відхилення параметра регулювання. Останнє сприяє підвищенню якості системи.

Цифрові системи з обчислювальним пристроєм також працюють в імпульсному режимі у замкненому контурі регулювання, оскільки цифровий пристрій формує результат обчислення у вигляді імпульсів з періодом, необхідним для проведення обчислень. Цей пристрій застосовують у випадку, коли відхилення параметра регулювання від заданого значення повинно обчислюватись по показаннях декількох вимірювальних приладів або коли у відповідності з критеріями найкращої якості роботи системи необхідно обчислювати програму зміни параметра регулювання.

**За принципом дії** АСР можуть бути прямої і непрямой дії. У системах *прямої дії* для реалізації регулюючого діяння (переміщення рухливого елемента виконавчого пристрою) використовується енергія самого технологічного об'єкта керування, а у системах *непрямої дії* необхідне застосування зовнішньої енергії. При цьому кількість пристроїв в останніх значно більше. Однак системи *непрямої дії* мають можливість побудови АСР будь-якої складності для забезпечення більш високої якості регулювання. На відміну від регуляторів систем *прямої дії*, які встановлюються за місцем (біля об'єкта), регулятори систем *непрямої дії*, як правило, виносяться на оперативний щит (пульт) керування.

За видом енергії системи *непрямої дії* розділяють на пневматичні, електричні (електронні), гідравлічні і комбіновані. У пневматичних системах у якості носія енергії використовується стисле повітря, в електричних – електроенергія, а у гідравлічних – рідина під тиском. У залежності від особливостей технологічного об'єкта (вибу-

хонебезпечність, занадто високий тиск інерційність та ін.) іноді виникає необхідність створення комбінованих систем, у яких використовуються два види допоміжної енергії: електропневматичні і електрогідравлічні системи.

**За характером математичних співвідношень** АСР можуть бути лінійними і нелінійними. Приналежність до відповідної АСР визначається в основному формою статичної і динамічної характеристик складових елементів (ланок) АСР. Статична характеристика ланки визначає залежність вихідної величини  $y$  від вхідної  $x$  у сталому (рівноважному) стані.

$$y = f(x), \quad (3.1)$$

а динамічна характеристика ланки з вхідною  $x$  та вихідною  $y$  величинами становить собою залежність  $y$  у часі  $t$  і може бути представлена у вигляді:

$$y = f(x, t) \quad (3.2)$$

*Лінійні* АСР у статиці характеризуються лінійними алгебраїчними рівняннями, а у динаміці – лінійними диференціальними рівняннями. Однією з характерних ознак лінійності ланки чи АСР у цілому – це підпорядкованість принципу суперпозиції, згідно якого реакція системи на суму декілька вхідних діянь дорівнює сумі реакцій на кожне діяння окремо, тобто

$$f(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_n) \quad (3.3)$$

*Нелінійні* АСР характеризуються нелінійними рівняннями. Реальні системи належать до нелінійних, проте теорія лінійних систем в значній мірі сприяє за певних умов застосуванню основних її положень і для нелінійних.

### **3.2. ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ І СИНТЕЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

Високу ефективність технологічного процесу шляхом підтримки параметрів, що характеризують його, на постійному рівні у більшості випадків забезпечують системи автоматичної стабілізації. У системах стабілізації величина завдання залишається постійною протягом тривалого часу роботи. Іншою, не менш важливою зада-

чею є задача програмного регулювання технологічним процесом, яка обумовлена переходом на нові режими роботи під час пускових робіт або необхідністю зміни технологічних режимів на окремих етапах виробництва. Вирішення цієї проблеми також здійснюється за допомогою тієї ж системи автоматичної стабілізації, зміна завдання якої відбувається від програмного задавача. Структурна схема такої одно контурної АСР наведена на рис. 3.2.

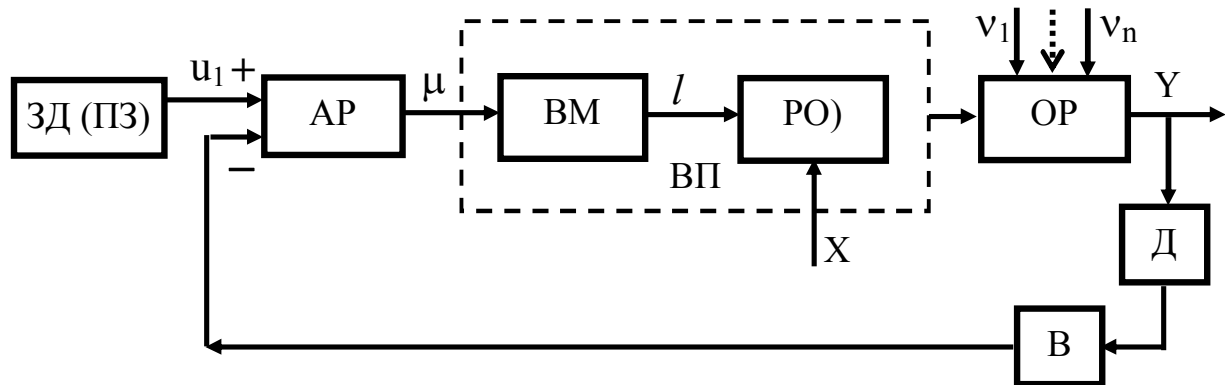


Рис. 3.2. Схема одноконтурної АСР об'єктом регулювання: ЗД (ПЗ) – задавач (програмний задавач); ВМ – виконавчий механізм; РО – регулюючий орган; ОР – об'єкт регулювання; Д – датчик параметра регулювання (вимірвальний перетворювач); В - вторинний реєструючий прилад;  $l$  – переміщення РО, що забезпечує зміну регулюючої вхідної величини  $x$ .

У системах за такого принципу регулювання (за відхиленням) діяння регулятора АР на об'єкт забезпечує за допомогою виконавчого пристрою ВП зміну регулюючого діяння  $x$  (витрати речовини чи енергії) у випадку, коли під впливом збурюючих чинників  $v$  виникає відхилення параметра регулювання  $y$  від заданого значення  $u$ . При цьому система переходить у динамічний режим роботи і намагається повернути параметр  $y$  до заданого значення. Зміна  $y$  у часі параметра  $y$  в процесі регулювання називається перехідним процесом.

**Перехідні процеси** в АСР можуть бути викликані під впливом як регулюючих ( $x$ ), так і діянь ( $v$ ), що збурюють. Регулюючі діяння за допомогою задавача подаються на вхід системи з метою переведення її з одного заданого стану в інший, а збурюючі діяння обумовлені робочими процесами і чинниками, що відбуваються зовні системи. Якість перехідних процесів оцінюється низкою показників, що мають забезпечити необхідне функціонування системи. Ці показники визначають закони зміни параметра регулювання (закони регулю-

вання) під впливом типових регулюючих діянь, що прикладаються до входу системи. Серед цих типових діянь найчастіше використовуються діяння у формі одиничного стрибка  $v(t) = I(t)$  на вході системи, а викликана цим зміна параметра регулювання ( $y$ ) у часі називається *перехідною характеристикою* чи *кривою розгону*.

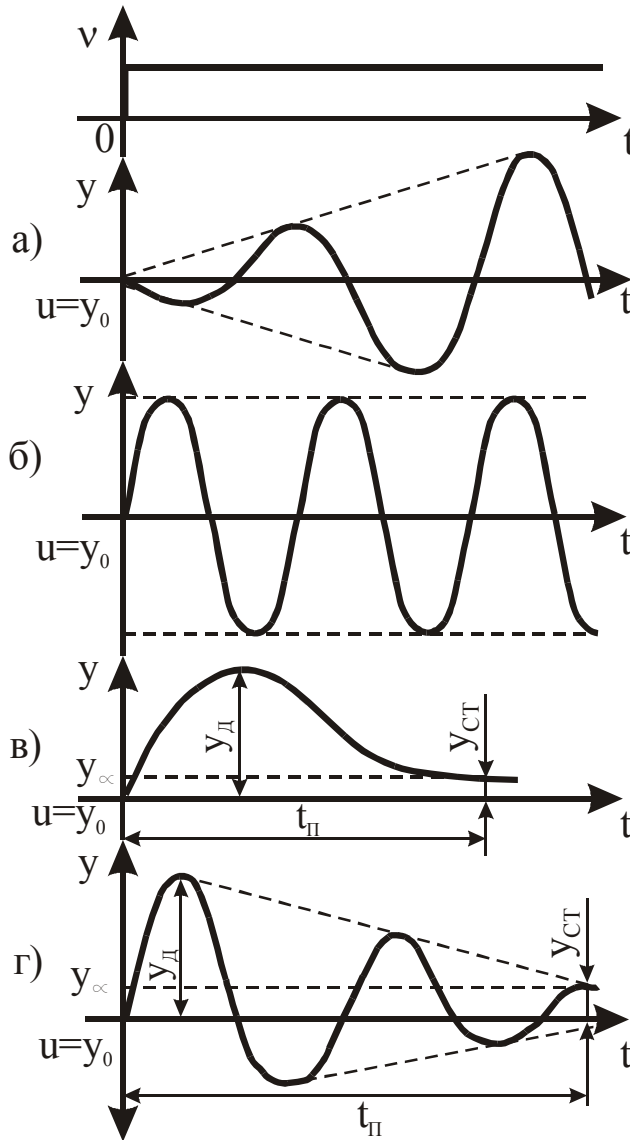


Рис. 3.3. Деякі можливі види перехідних процесів регулювання: а – коливальний, що розходиться; б – коливальний незатухаючий; в – аперіодичний затухаючий; г – коливальний затухаючий.

заданого не більш як на припустиму величину похибки. Система, що не відповідає вимогам сталості, непридатна до експлуатації і повинна бути стабілізованою. Методи дослідження систем на сталість складають найважливіший розділ теорії автоматичного регулюван-

Дослідження АСР за умов дії одиничного стрибка на вході дозволяє сформулювати основні показники динамічних режимів для широкого класу систем, незалежно від фізичної природи її складових, конструктивних особливостей і конкретного призначення системи. Перехідні характеристики представляють як правило у вигляді графіків, можливий типовий характер яких на діяння у формі одиничного стрибка на вході АСР наведені на рис. 3.3.

Криві, що представлені на рис. 3.3а і 3.3б, характеризують несталі, що не сходяться, перехідний процес. АСР, що мають такі перехідні характеристики, не відповідають вимозі до основного показника динамічного режиму – вимозі сталості.

*Сталість АСР* характеризується здатністю системи, що виведена з рівноважного стану, протягом деякого часу знову прийти у рівноважний стан, тобто у стан, за якого вихідний параметр буде відрізнятися від

ня, деякі з яких будуть розглянуті нижче. Перехідні характеристики, що наведені на рис. 3.3в і 3.3г, характерні для сталих АСР, дія яких забезпечує повернення параметра регулювання до рівноважного стану.

**Якість перехідного процесу** у сталих АСР визначається за показниками, що характеризують відхилення реального процесу від бажаного, тобто вони оцінюють наскільки точно і як швидко після нанесення одиничного ступінчастого діяння (за нульових вихідних умов) у системі встановлюється рівноважний стан. Серед цих кількісних показників прямої оцінки якості слід відзначити наступні: статична помилка регулювання  $y_{ст}$ , динамічна помилка регулювання  $y_{д}$ , час перехідного процесу  $t_n$ , максимальне перерегулювання  $\sigma_{max}$  (див. рис.3.3в і 3.3г).

*Статична помилка регулювання  $y_{ст}$*  становить собою розбіжність між сталим значенням параметра регулювання  $y_{\infty}$  після перехідного процесу і його заданим значенням.

$$y_{ст} = y_{\infty} - u \quad (3.4)$$

*Динамічна помилка регулювання  $y_{д}$*  визначає максимальне відхилення параметра регулювання у перехідному процесі від його заданого значення.

*Час перехідного процесу (регулювання)  $t_n$*  – це відрізок часу від початку дії типового діяння, що збурює,  $v$ , протягом якого встановлюється таке значення вихідного параметра  $y$ , яке буде відрізнятися від заданого не більше як на величину припустимої помилки. Найчастіше величина цієї помилки приймається на рівні величини  $y_{ст}$ .

*Максимальне перерегулювання  $\sigma_{max}$*  визначає величину максимального відхилення параметра регулювання від сталого значення  $u$  відсотках від  $y_{\infty}$ :

$$\sigma_{max} = [(y_{д} - y_{\infty}) / y_{\infty}] \cdot 100 \quad (3.5)$$

Значення показників якості АСР визначаються вимогами, що ставляться до конкретної системи. Вони задаються при проектуванні і повинні бути забезпечені в процесі розробки системи. Проектування систем на задану якість регулювання здійснюється як правило у наступній послідовності:



а) визначаються властивості об'єкта регулювання (вихідні дані, що необхідні для визначення структури АСР) та інших завчасно відомих елементів майбутньої АСР (датчиків, виконавчого пристрою) у розімкненому стані;

б) здійснюється синтез АСР з урахуванням отриманих властивостей елементів системи, тобто обирається алгоритм (закон) регулятора для забезпечення сталості і заданих показників якості системи;

в) проводиться аналіз дії замкненої АСР на роботу здатність і якість регулювання.

Завершує процес проектування підбір необхідних технічних засобів регулювання (регулювальних блоків, мікроконтролерів та ін.), що серійно випускаються промисловістю. При цьому, слід зауважити, що чим вище вимоги до якості регулювання, тим більш складною буде система, а отже, і мати більшу вартість. Тому при створенні АСР необхідно знаходити компроміс поміж якістю регулювання і витратами на автоматизацію технологічного процесу.

### **3.3. ОБ'ЄКТИ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЇХ ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ**

Об'єкти регулювання, що підлягають автоматизації, досить різноманітні. Це можуть бути як окреме технологічне обладнання (теплообмінник, будь-яка ємність, абсорбер, хімічний реактор і т. ін.), так і технологічний процес в комплексі, що містить цілу низку технологічного обладнання у виробництві того чи іншого продукту. Об'єкти регулювання, при цьому, відрізняються фізико-хімічною природою технологічних процесів, конструкцією, розмірами обладнання, режимами роботи, продуктивністю та іншими чинниками. Незважаючи на таке різноманіття, для багатьох об'єктів, як елементів АСР, характерна ідентичність деяких властивостей. Детальне вивчення цих властивостей дозволяє встановити загальні властивості, за якими можна класифікувати об'єкти, тобто встановити приналежність його до того чи іншого типу. За такої умови задача аналізу об'єкта може бути зведеною до визначення його типу, властивості якого тотожні властивостям відповідного типового об'єкта. Вирішення цієї задачі в теорії автоматичного регулювання здійснюється із застосуванням методу математичного моделювання.

**Метод математичного моделювання** полягає в тому, що об'єкт формально представляється як перетворювач його вхідних сигналів у вихідні. Математична залежність, що зв'язує вихідний сигнал об'єкта з вхідним, становить собою *математичну модель* або *характеристику об'єкта регулювання*.

Перехід від фізичного прототипу до математичної моделі має цілу низку переваг: проведення аналізу властивостей об'єкту не експериментальним шляхом, а по математичній моделі із застосуванням сучасних засобів обчислювальної техніки; можливість побудови математичної моделі ще до створення реального об'єкту, що дозволяє вже на стадії проектування використовувати результати аналізу для коректування режиму технологічного процесу чи конструкції обладнання з метою підвищення якості системи регулювання; аналіз математичних моделей дозволяє виділити найбільш суттєві властивості об'єктів, що впливають на процес регулювання, та поєднати їх за цими властивостями незалежно від фізичної природи.

Такий підхід дає можливість повністю абстрагуватися від фізичної природи сигналів (параметрів) і самого процесу в об'єкті, а однакові рівняння дозволяє зв'язати вхідні і вихідні параметри різних об'єктів, за умови, що вони мають однакові характеристики зв'язку. Характеристики зв'язку в об'єкті та в АСР в цілому можуть бути як статичними, так і динамічними.

Динамічну характеристику у вигляді графічної залежності зміни параметра регулювання у часі за результатом однократної ступінчастої зміни вхідної величини (діяння, що збурює) прийнято називати *часовою характеристикою*. Вона найчастіше позначається символом  $h(t)$ , де  $t$  – поточний час. Динамічні властивості об'єкта можна оцінювати безпосередньо по часовій характеристиці. Однак, при цьому, необхідно враховувати, що відхилення параметра регулювання залежить не тільки від суто динамічних властивостей, але і від характеру дії, що збурює. Тому на практиці застосовують типові діяння – одиничне ступінчасте (розглянуто вище) і одиничне імпульсне  $v(t) = \delta(t) = dl(t)/dt$ , серед яких в практичній діяльності частіше використовується перше. Поряд з часовими характеристиками для оцінки динамічних властивостей і дослідження процесів регулювання велике застосування отримали частотні характеристики. *Частотні характеристики* становлять собою залежність вихідної величини від періодичного синусоїдального вхідного діяння та визначають відношення амплітуди вихідних коливань до амплітуди вхідних ко-

ливань, а також фазовий зсув між вихідними і вхідними коливаннями. Частотні характеристики позначаються як правило символами:  $A(\omega)$  – амплітудно-частотна,  $\varphi(\omega)$  – фазочастотна і  $W(i\omega)$  – амплітудно-фазова характеристики, де  $\omega$  – частота коливань, а  $i = \sqrt{-1}$  – уявне число.

Поміж часовими і частотними характеристиками існує визначена залежність, тобто маючи часову характеристику, можна побудувати частотні, і навпаки. Визначення цих характеристик дозволяє встановлювати приналежність об'єктів до того чи іншого типу.

**Класифікація об'єктів регулювання** передбачає їх узагальнення за різними показниками.

*За кількістю вхідних і вихідних величин* (параметрів) та їх взаємозв'язку об'єкти можуть бути одномірними і багатомірними. *Одномірні* об'єкти мають одну вихідну величину і характеризуються одним рівнянням статички і динаміки. Прикладом одномірного об'єкта може служити резервуар з рідиною, вхідним параметром якого є витрата рідини на вході  $M_{\Pi}$  і виході  $M_P$ , а вихідним, що регулюється, параметром – рівень рідини  $H$ . Рівняння статички для цього об'єкта  $H = f(M_{\Pi}, M_P)$ , а рівняння динаміки  $H = f(M_{\Pi}, M_P, t)$ .

*Багатомірні* об'єкти містять по дві та більше вихідних величин і кількість рівнянь для статички і динаміки повинно відповідати кількості вихідних величин. При цьому, вихідні величини можуть впливати чи не впливати одна на іншу, тобто бути *багатомірними багатозв'язними* і *багатомірними незв'язними*. У багатомірних незв'язних зміна будь-якої з вхідних величин викликає зміну тільки однієї вихідної величини. Такий об'єкт можна розділити на декілька одномірних об'єктів і розглядати їх незалежно один від одного. Наприклад, випарник, у якому відбувається випаровування однокомпонентної рідини з безперервним відбором парової фази, можна за деяким спрощенням віднести до двомірного об'єкта з незалежними величинами  $M_P$  (витрата пари) і  $\Theta$  (температура випаровування). При цьому, тепловий потік, що надходить у випарник, дорівнює різниці поміж припливами теплоти  $q_1$  та його втратами у навколишнє середовище  $q_2$ , і визначає витрату пари  $M_P$ . Тиск же у випарнику  $P$  визначає температуру  $\Theta$  процесу випаровування, тобто об'єкт характеризується двома рівняннями статички  $M_P = f(q_1, q_2)$  і  $\Theta = f(P)$  та двома рівняннями динаміки  $M_P = f(q_1, q_2, t)$  і  $\Theta = f(P, t)$ .

У багатомірних багатозв'язних об'єктах зміна вхідних величин призводить до одночасної зміни декількох вихідних величин за ра-

хунок наявності каналів перехресних зв'язків. На рис. 3.4 наведено двомірний об'єкт з перехресними зв'язками.

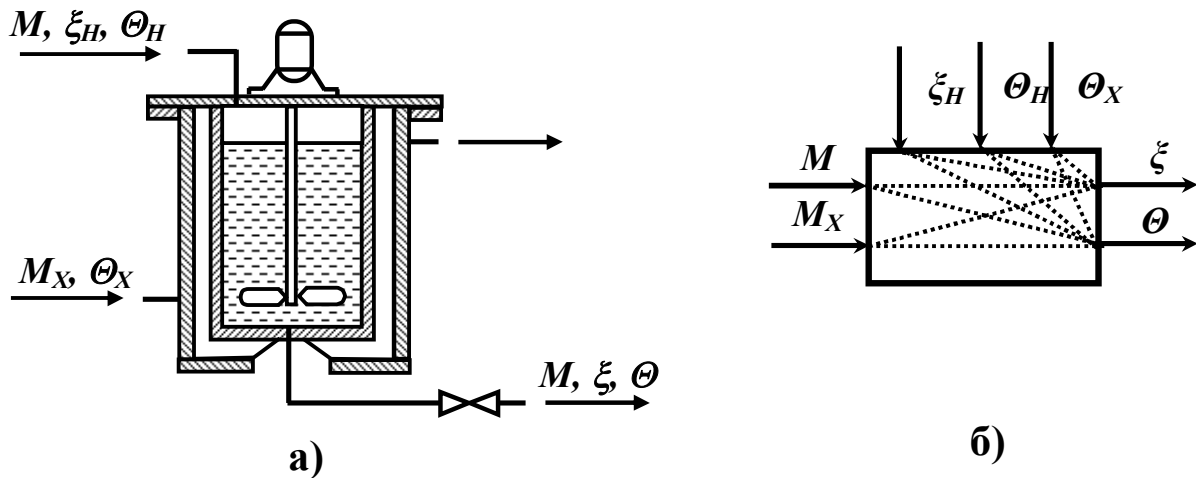


Рис. 3.4. Схеми хімічного реактора ідеального змішування (а) і його динамічних каналів зв'язку (б).

Реактор має п'ять вхідних величин (концентрація  $\xi_H$  і температура  $\Theta_H$  реагентів на вході у реактор, витрата реагентів у реактор  $M$ , а також теплота, що відбирається з реактора системою охолодження і визначається витратою холодоагента  $M_X$  та його температурою  $\Theta_X$ ). Вихідними величинами є концентрація продуктів реакції  $\xi$  і температура у реакторі  $\Theta$ . Для стабілізації температури  $\Theta$  у реакторі необхідно змінювати витрату холодоагенту  $M_X$ , а для забезпечення постійності складу продуктів реакції  $\xi$  - витрату  $M$  реагентів, що надходять у реактор. При цьому зміна витрати  $M_X$  призводить також до зміни складу продуктів реакції  $\xi$ , а коливання витрати  $M$  викликає зміну температури  $\Theta$  реакційної маси у реакторі. Крім того, вихідні параметри  $\xi$  і  $\Theta$  залежать від концентрації  $\xi_H$  і температури  $\Theta_H$  вхідного продукту, а також температури  $\Theta_X$ . Окрім прямих цей об'єкт має і перехресні канали проходження сигналів. Вихідні параметри такого об'єкта слід визначати з наступних рівнянь динаміки:

$$\xi = f_1(M, M_X, \xi_H, \Theta_H, \Theta_X, t), \quad T = f_2(M, M_X, \xi_H, \Theta_H, \Theta_X, t) \quad (3.6)$$

Отже, обидві вихідні величини об'єкта зазнають вплив від усіх його вхідних величин, а взаємозв'язок поміж ними згідно залежностей (3.6) визначається різними рівняннями динаміки.

За динамічними властивостями розрізняють об'єкти з зосередженими і розподіленими параметрами. В об'єктах з зосередженими

*параметрами* значення параметрів регулювання однакові у будь-який момент часу в усіх його точках (рівень рідини у ємності, тиск газу у ресивері та ін.). Прикладом таких типових об'єктів є резервуар для рідини, випарник, хімічний реактор з інтенсивним перемішуванням, у якому відсутні градієнти температур і концентрацій як по висоті, так і по перерізу. Динамічні властивості об'єктів з зосередженими параметрами визначаються звичайними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами.

Якщо параметр регулювання у рівноважному і перехідному режимі має неоднакові значення у різних точках об'єкту, то такий об'єкт називається об'єктом з *розподіленими параметрами*. Прикладами таких об'єктів можуть служити трубопроводи, по яких перекачується рідина чи подаються різні сипучі матеріали за допомогою повітря, теплообмінники, де температура по довжині його змінюється, масообмінне обладнання (ректифікаційні колони, абсорбери, екстрактори), трубчасті реактори та ін. Динамічні властивості таких об'єктів визначаються диференціальними рівняннями у часткових похідних. Розв'язання рівнянь у часткових похідних досить складне. Тому при складанні математичного опису об'єктів з розподіленими параметрами найчастіше застосовують метод кінцевих різниць, згідно якого об'єкт розбивають на низку послідовно з'єднаних елементів (ланок) з зосередженими параметрами. При цьому кожний з цих елементів буде характеризуватись звичайними диференціальними рівняннями. Точність такого математичного опису буде тим вище, чим більша кількість елементів розбиття. Тому в подальшому будуть розглянуті об'єкти з зосередженими параметрами.

*За характером сталого значення вихідної величини* об'єкти можуть бути із самовирівнюванням і без самовирівнювання. Самовирівнювання об'єкта характеризує його сталість. *Самовирівнювання* – це властивість сталого об'єкта самостійно встановлюватися у рівноважний стан без регулятора після зміни своєї вхідної величини. В об'єктах із самовирівнюванням ступінчаста зміна вхідної величини призводить до зміни вихідної величини із швидкістю, що постійно зменшується до нуля і пов'язано з наявністю внутрішнього негативного зворотного зв'язку. Кількісно самовирівнювання об'єкта характеризують *ступенем самовирівнювання*  $\rho$ , що визначається відношенням зміни вхідної величини об'єкту ( $x$ ,  $v$ ) до зміни вихідної величини після досягнення об'єктом рівноважного стану  $u_\infty$ .

$$\rho = 1/K = X/Y \text{ чи } \rho = 1/K = N/Y \quad (3.7)$$

де  $X = (x - x_0)/x_0$  – відносне значення вхідної (регулюючої) величини ( $x_0$  – значення вхідної величини у початковому стані об'єкта);  $Y = (y - y_0)/y_0$  – відносне значення вихідної величини ( $y_0$  – значення вихідної величини у початковому стані об'єкта);  $N = (v - v_0)/v_0$  – відносне значення дії, що збуджує, на об'єкт ( $v_0$  – значення величини збудження у початковому стані);  $K$  – коефіцієнт передачі (підсилення) об'єкта.

Чим більше ступінь самовирівнювання (менше коефіцієнт передачі), тим менше відхилення вихідної величини від початкового стану. Самовирівнювання сприяє більш швидкій стабілізації параметра регулювання, а отже, полегшує роботу регулятора.

Об'єкти з самовирівнюванням іноді в літературі називають сталими чи *статичними* об'єктами, а ті, що не володіють цією властивістю – об'єктами нейтральними чи *астатичними*. Для статичних об'єктів характерна однозначна залежність поміж вхідними і вихідними величинами. Найпростішим прикладом статичного об'єкта може служити напірний резервуар (рис. 3.5а), до якого рідина надходить по трубопроводу з витратою  $M_{\Pi}$  крізь регулюючий орган (клапан) і вільно витікає по зливному трубопроводу з витратою  $M_B$ .

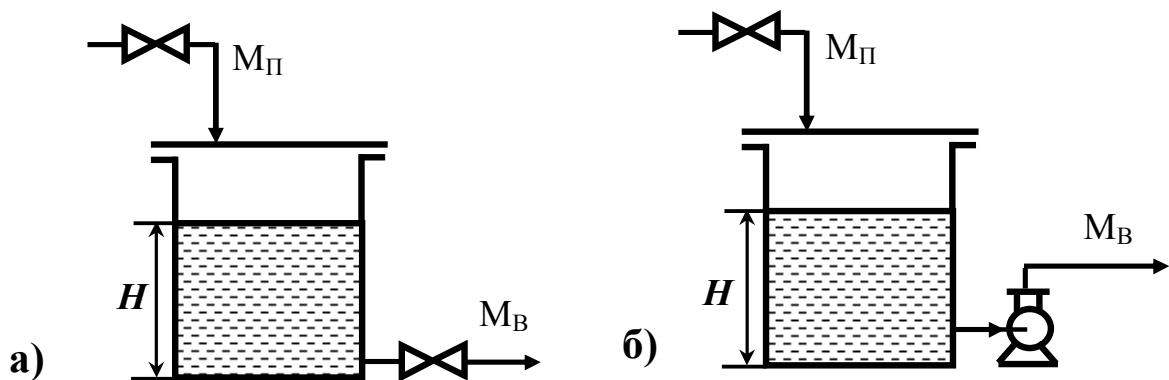


Рис. 3.5. Напірний резервуар як об'єкт керування: а – статичний; б – астатичний.

Цей об'єкт володіє властивістю самовирівнювання. З підвищенням подачі рідини  $M_{\Pi}$  рівень  $H$ , що є параметром регулювання (вихідна величина), також підвищиться. Гідростатичний тиск стовпа рідини зросте, що викличе збільшення витрати  $M_B$ . По закінченні перехідного режиму встановлюється новий стан рівноваги, за якого витрата  $M_B$  буде дорівнювати подачі  $M_{\Pi}$  і підвищення рівня у резер-

вуарі припиниться, тобто новому рівноважному стану витрат  $M_{\Pi}$  і  $M_B$  буде відповідати інший рівень рідини у резервуарі.

Прикладом об'єкта без самовирівнювання може служити той самий резервуар, з якого рідина відкачується за допомогою насосу з постійною продуктивністю. У такому об'єкті з порушенням рівноваги внаслідок ступінчастого збільшення вхідної величини  $M_{\Pi}$  почне накопичуватись кількість рідини у резервуарі, що викличе безперервне зростання рівня  $H$ , тобто для такого об'єкта рівноважний стан можливий лише в одному випадку – коли витрата рідини на вході  $M_{\Pi}$  дорівнює продуктивності насосу. Цей стан рівноваги може спостерігатись за будь якого значення вихідної величини (рівня), тобто однозначної залежності між  $H$  і  $M_{\Pi}$  не існує.

*За типом стаціонарності* об'єкти ділять на стаціонарні і не-стаціонарні. У *стаціонарних* об'єктах параметри, що характеризують їх роботу, протягом тривалого часу залишаються постійними, тоді як у *нестабілізованих* вони змінюються у часі. Наприклад, у хімічному реакторі з каталізатором значення вихідних параметрів (концентрація, температура) змінюються у часі завдяки падінню активності каталізатора або у кожухотрубному теплообміннику вихідна температура з часом може змінюватись внаслідок зростання термічного опору забруднень стінок труб.

*За здатністю накопичувати речовину чи енергію* об'єкти розділяють на одноємнісні і багатоемнісні. Ємність об'єкта є властивістю, що притаманна усім динамічним об'єктам. Вона характеризує інерційність – ступінь впливу вхідної величини на швидкість зміни вихідної. Мірою інерційності статичного об'єкта служить його постійна часу  $T$ , що становить собою час, протягом якого параметр регулювання досяг би свого нового сталого значення, якби він змінювався з постійною початковою швидкістю після нанесення одиничного збурення. Чим більше ємність об'єкта, тим менше швидкість зміни вихідної величини об'єкта, і навпаки. Фізично ємність має прояв у вигляді теплоємності, геометричної ємності резервуару, інерційності мас, що рухаються і т. п. Наприклад, ємність резервуару з водою залежить від його розмірів. Чим більше резервуар, тим повільніше буде змінюватись рівень з порушенням відповідності між витратою на вході і виході. Ємність об'єкта характеризується порядком диференційного рівняння, що зв'язує вхідну і вихідну величину. В одноємнісних об'єктах цей зв'язок у вигляді диференційного рівняння першого порядку. Особливість більшості об'єктів керування –

це багатоемність, тобто наявність каскадів чи ланцюжків технологічних об'єктів. Це характерно і для об'єктів з розподіленими параметрами. Багатоемність призводить до підвищення порядку диференційного рівняння об'єкта.

*За структурою* об'єкти можуть бути без запізнення та із запізненням. Запізнення об'єкта обумовлюється тим, що його вихідна величина після зміни вхідної починає змінюватись не одразу, а тільки через деякий проміжок часу  $\tau$ . Відрізок часу  $\tau$  називають запізненням. Усі реальні об'єкти характеризуються запізненням, бо зміна потоків речовини чи енергії (теплоти) розповсюджується в об'єктах з кінцевою швидкістю і має бути час для проходження сигналу зміни від місця нанесення збурення до місця, де фіксується зміна вихідної величини. Зростання числа ємностей призводить до збільшення величини запізнення.

У реальних умовах експлуатації, коли на об'єкт управління весь час діють різні збурення, динамічний режим є характерним режимом роботи об'єкта. Тому вивчення динамічних властивостей, тобто визначення його динамічної характеристики, становить головну задачу при аналізі і синтезі АСР. Вивчення цих властивостей може здійснюватись як аналітичним шляхом, так і експериментально. Іноді застосовують експериментально-аналітичний метод.

### **3.4. АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ РЕГУЛЮВАННЯ.**

Аналітичне вивчення об'єкта ґрунтується на дослідженні фізичних і хімічних процесів, що відбуваються в об'єкті з урахуванням конструкції обладнання і характеристик матеріальних потоків, та передбачає складання рівнянь динаміки і статички. При виводі цих рівнянь використовують фундаментальні закони зберігання речовини і енергії (рівняння матеріального і енергетичного балансу), а також кінетичні закономірності процесів хімічних перетворень, переносу теплоти і маси.

Аналітичний метод застосовують при проектуванні нових технологічних об'єктів, фізико-хімічні процеси яких достатньо добре вивчені. Він дозволяє прогнозувати роботу об'єктів у статичному і динамічному режимах, проте пов'язаний з труднощами розв'язання та аналізу отриманих рівнянь і вимагає проведення спеціальних досліджень для визначення чисельних значень коефіцієнтів цих рівнянь.



Крім того, точність математичного опису реальних об'єктів у більшості випадків залежить від прийнятих в процесі складання рівнянь припущень.

В реальних системах математичний опис складається з нелінійних алгебраїчних і диференціальних рівнянь. Аналіз і розв'язання таких рівнянь з метою отримання зв'язку між вхідними і вихідними параметрами надзвичайно трудомісткий, а у деяких випадках він взагалі неможливий. Тому завжди, коли це можливо, намагаються замінити нелінійні математичні залежності лінійними, яка може і менш точна, але піддається аналізу стандартними і відносно простими методами. Така заміна найчастіше здійснюється шляхом лінеаризації моделі, а розв'язання системи динамічних рівнянь – із застосуванням операційного методу (перетворень Лапласу).

**Метод лінеаризації** полягає у розкладанні безперервних нелінійних функцій, що відображають співвідношення різних змінних в АСР чи об'єкті зокрема, у ряди Тейлора навколо точок характерного (заданого) режиму роботи. Наприклад, якщо це точка  $A$  з координатами  $x_0$  і  $y_0$  (див. рис. 3.6), то

$$\Delta y = \frac{1}{1!} \left( \frac{dy}{dx} \right)_{x_0} \Delta x + \frac{1}{2!} \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{x_0} \Delta x^2 + \dots \quad (3.8)$$

де  $\Delta x = (x - x_0)$  – відхилення вхідної величини;  $\Delta y = (y - y_0)$  – відхилення вихідної величини.

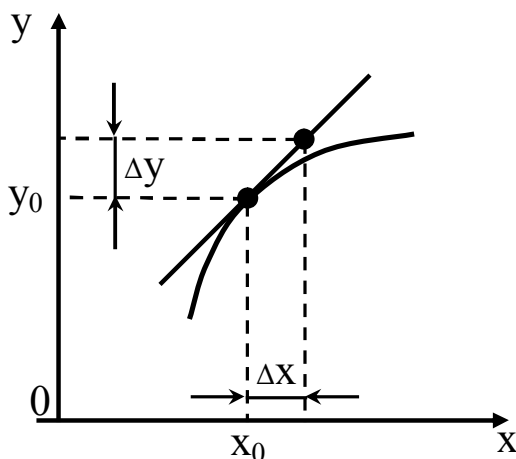


Рис. 3.6. Лінеаризація статичної характеристики  $y = f(x)$ .

При цьому нелінійні частини ряду, що мають безкінечно малі відхилення величин від їх значень у точці розкладу другого і більш високого порядку, відкидаються, тобто

$$\Delta y = \left( \frac{dy}{dx} \right)_{x_0} \Delta x = k \Delta x \quad (3.9)$$

Таке нехтування нелінійними залишками ряду Тейлора дозволяє замінити нелінійне рівняння об'єкту чи будь-якого елемента АСР лінеаризованим. Цей спосіб виявляється достатньо ефективним з точки зору можливих похибок за умови, що відхилення змінних для відповідних режимів малі, а ліне-

ризуємі функції навколо точок розкладу мають кінцеві похідні усіх порядків.

В подальшому, враховуючі призначення цієї книги, будуть розглядатися в основному реальні ланки (об'єкти) і системи, які можуть бути відображені лінійними моделями, отриманих на підставі лінійних рівнянь.

**Операційний метод розв'язання** рівнянь динаміки об'єкта чи системи регулювання в цілому передбачає їх представлення в операторній формі, застосовуючи перетворення Лапласу та з урахуванням заданих початкових умов. При цьому вихідна змінна як функція часу називається оригіналом  $x(t)$ , а її перетворення за Лапласом – зображенням  $x(p)$ , де  $p$  – комплексна змінна, що відповідає відомим умовам перетворення за Лапласом. Далі здійснюється розв'язування отриманих алгебраїчних рівнянь відносно пошукової величини, що записана в операторній формі. Після цього, застосовуючи операцію зворотного перетворення Лапласу, знаходиться рішення вихідного рівняння динаміки у звичайній формі.

Пряме перетворення функцій-оригіналів у функції-зображення, тобто часових змінних у функції комплексних змінних, здійснюється у відповідності з перетворенням Лапласу:

$$L[x(t)] = x(p) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-pt} dt, \quad (3.10)$$

де  $L$  – символ операції прямого перетворення Лапласу.

Наприклад, при  $x(t) = 1$  маємо

$$x(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} dt = -\frac{1}{p} \left[ e^{-pt} \right]_{t=0}^{t=\infty} = \frac{1}{p}.$$

В практиці досліджень АСР і об'єктів зокрема перетворення формули (3.10) здійснюється за нульових початкових умов, тобто за умов, коли функція, що перетворюються, і всі її похідні обертаються у нуль при  $t = 0$ . Ця обставина суттєво спрощує перехід від оригіналів до їх зображень. Нижче наведені перетворення по Лапласу за нульових початкових умов, що найчастіше використовуються при аналізі лінійних АСР.

Нехай  $Y(t) = dX/dt$ , тоді, застосовуючи формулу (3.10), отримаємо

$$Y(p) = pX(p). \quad (3.11)$$

Нехай  $Y(t) = d^2X/dt^2$ , тоді на підставі (3.10) будемо мати

$$Y(p) = p^2X(p). \quad (3.12)$$

У загальному випадку, коли  $Y(t) = d^nX/dt^n$ , будемо мати

$$Y(p) = p^nX(p) \quad (3.13)$$

Таким чином, перехід за нульових початкових умов від лінійних диференціальних рівнянь, що містять оригінали, до рівнянь у зображеннях може бути зведеним до заміни змінної  $t$  на змінну  $p$ , а символ  $d/dt$  на співмножник  $p$ , тобто  $d/dt = p$ .

При переході від зображення  $x(p)$  до оригіналу необхідно провести операцію зворотного перетворення Лапласа, яка позначається символом  $L^{-1}$ :

$$x(t) = L^{-1}[x(p)] \quad (3.14)$$

Зображення деяких розповсюджених функцій і відповідні їм оригінали представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Оригінали і зображення деяких функцій за Лапласом.

№ функції	Оригінал	Зображення
1	2	3
1	$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{для } t < 0 \\ 1 & \text{для } t \geq 0 \end{cases}$	$\frac{1}{p}$
2	$A$	$A/p$
3	$t$	$1/p^2$
4	$t^n$	$n!/p^{(n+1)}$
5	$e^{-at}$	$1/(p+a)$
6	$\sin at$	$a/(p^2+a^2)$
7	$\cos at$	$p/(p^2+a^2)$
8	$e^{Tt}$	$\frac{1}{p-T}$
9	$e^{-at}t^n$	$n!/(p+a)^{(n+1)}$
10	$1-e^{-(t/T)}/T$	$1/p(1+Tp)$
11	$e^{-(t/T)}/T$	$1/(1+Tp)$
12	$X_1(t) \pm X_2(t)$	$X_1(p) \pm X_2(p)$

## Продовження табл. 3.1.

1	2	3
13	$\int_0^t X(t)dt$	$X(p)/p$
14	$X(t-\tau)$	$X(p)e^{-p\tau}$
15	$\frac{1}{\sqrt{T_2 - \frac{T_1^2}{4}}} e^{-\frac{T_1}{2}t} \sin \sqrt{T_2 - \frac{T_1^2}{4}} t$ при $T_2 > \frac{T_1^2}{4}$	$\frac{1}{p^2 + T_1 p + T_2}$

Слід відзначити, що перетворення Лапласу завжди може бути реалізованим у тих задачах, де процеси характеризуються диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами. За таких умов з оператором  $p$  можна здійснювати будь-які алгебраїчні дії. Припустимо, що залежність поміж вихідною і вхідною величинами в об'єкті чи АСР представлена у вигляді лінійного диференціального рівняння:

$$a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) =$$
(3.15)

$$= b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dX(t)}{dt} + b_0 X(t).$$

Запишемо рівняння (3.15) в операторній формі і винесемо за скобки зображення функцій  $Y(p)$  і  $X(p)$ :

$$Y(p) \cdot (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) =$$

$$= X(p) \cdot (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0)$$
(3.16)

Як правило у рівняннях (3.16) записаних в операторній формі знак  $p$  для  $X(p)$  і  $Y(p)$  опускають і пишуть  $X$  і  $Y$ . Визначимо відношення зображення вихідної величини  $Y(p)$  до зображення вхідної величини  $X(p)$ :

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}$$
(3.17)

Отримане відношення зображення вихідної величини об'єкта (елемента чи АСР) до зображення його вхідної величини за нульових початкових умов називається *передаточною функцією* об'єкта (елемента чи АСР) і позначається  $W(p)$ .

**Передаточні функції** описують в операторній формі залежність вихідної величини об'єкта, ланки чи АСР від вхідної, а, отже, повністю характеризують їх динамічні властивості. Тому, поряд з диференціальним рівнянням, передаточна функція є однією з форм динамічної характеристики будь-якого елемента АСР. Поняття передаточної функції значно спрощує аналіз структурних (алгоритмічних) схем. Передаточні функції ланок чи окремих ділянок схеми дозволяють легко отримати загальне рівняння для всієї системи. При цьому, систему будь-якої складності можна розглядати як сукупність трьох видів з'єднання ланок: послідовного, паралельного і типу зворотного зв'язку.

*Послідовне з'єднання* – це з'єднання, за якого вихідна величина попередньої ланки є вхідною величиною для наступної. Наприклад, для двох послідовно з'єднаних ланок (див. рис. 3.7) з передаточними функціями  $W_1(p) = Y_1/X_1$  і  $W_2(p) = Y_2/X_2$  загальна передаточна функція може бути представлена у вигляді:

$$W(p) = Y_2/X_1 = W_2(p) \cdot X_2 \cdot W_1(p)/Y_1 = W_1(p) \cdot W_2(p). \quad (3.18)$$

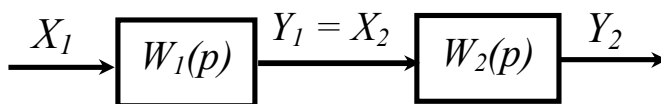


Рис. 3.7. Послідовне з'єднання ланок (елементів).

Отже, передаточна функція послідовно з'єднаних елементів (ланок) дорівнює добутку передаточних функцій елементів (ланок).

*Паралельне з'єднання* – це з'єднання, за якого на вхід ланок надходить одна й та ж величина, а вихідні величини ланок підсумовуються. На рис. 3.8 представлена система, що складається з трьох паралельно з'єднаних ланок. При цьому,  $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$  а передаточні функції цих трьох ланок дорівнюють:  $W_1(p) = Y_1/X_1$ ;  $W_2(p) = Y_2/X_2$ ;  $W_3(p) = Y_3/X_3$ . Виходячи із загального визначення передаточної функції такого ланцюжка та враховуючи, що  $X_1 = X_2 = X_3$ , будемо мати:

$$\begin{aligned} W(p) &= Y/X = (Y_1 + Y_2 + Y_3)/X = Y_1/X + Y_2/X + Y_3/X = \\ &= W_1(p) + W_2(p) + W_3(p) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Таким чином, передаточна функція паралельно з'єднаних ланок дорівнює сумі передаточних функцій окремих ланок.

З'єднання із зворотним зв'язком передбачає, що на вхід ланки одночасно з вхідною величиною системи надходить її вихідна величина, яка пройшла крізь ланку зворотного зв'язку. На рис. 3.9 представлена ланка, що охоплена зворотним зв'язком, де  $W_1(p)$  – передаточна функція ланки, а  $W_{oc}(p)$  – передаточна функція ланки зворотного зв'язку.

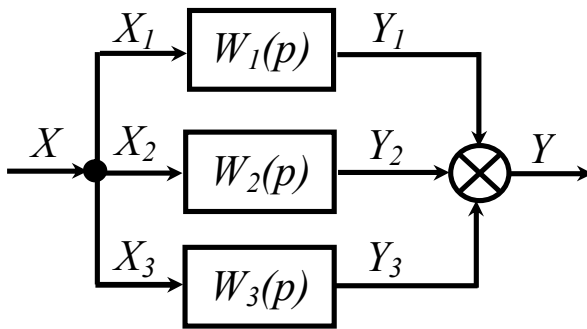


Рис. 3.8. Паралельне з'єднання ланок.

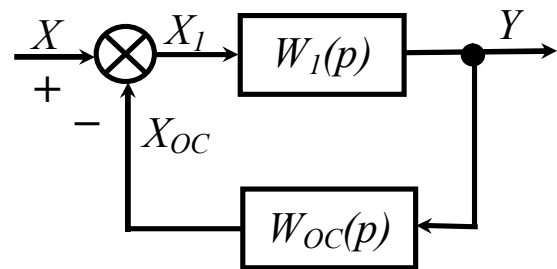


Рис. 3.9. Система із зворотним зв'язком.

Згідно рис. 3.9 виходить, що  $X_1 = X - X_{oc}$ , а передаточні функції визначаються рівняннями:

$$W_1(p) = Y/X_1 = Y/(X - X_{oc}), \quad (3.20)$$

$$W_2(p) = X_{oc}/Y \quad (3.21)$$

Враховуючи рівняння (3.20) і підставляючи у нього значення для  $X_{oc}$  з рівняння (3.21), отримаємо наступну формулу для передаточної функції системи:

$$W(p) = \frac{Y}{X} = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p)} \quad (3.22)$$

Формула (3.22) отримана у передбаченні, що ланка охоплена негативним зворотним зв'язком. У протилежному випадку (позитивний зворотний зв'язок) формула (3.22) прийме такий вигляд:

$$W(p) = \frac{Y}{X} = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p) \cdot W_2(p)} \quad (3.23)$$

Передаточна функція об'єкту визначає основні динамічні параметри (постійна часу, запізнення, коефіцієнт підсилення), що необхідні для подальшого аналізу і синтезу сталої з необхідною якістю АСР.

**Приклади визначення передаточних функцій** деяких найпростіших типових об'єктів розглянуті нижче.

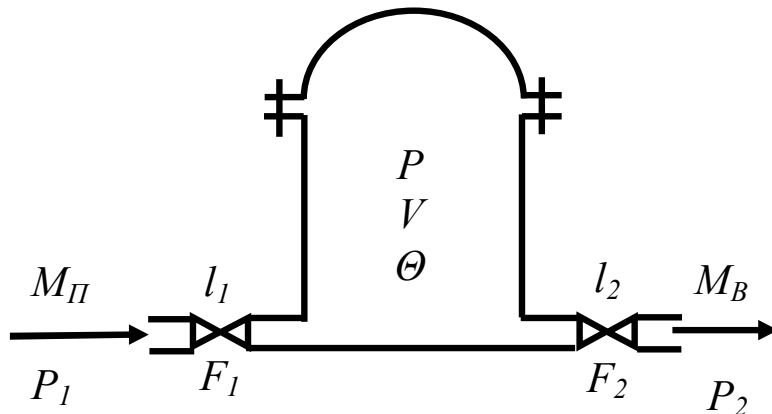


Рис. 3.10. Схема ресивера.

Резервуар із газом (див. рис. 3.10) характеризується одним вихідним параметром – тиском  $P$ , стабілізацію якого можна забезпечити діями на лінії притоку  $M_{\Pi}$  чи витoku  $M_B$  газу. Відносні положення регулюючих органів  $l_1$  і  $l_2$  визначають проходні перерізи  $F_1$  і  $F_2$ . Приток газу у ресивер забезпечується підпором (тиском)  $P_1$ , а виток відбувається у середовище з тиском  $P_2$ .

Відхилення притоку і витoku газу від значень рівноважного режиму обумовлюють виникнення динамічного режиму. Різниця між  $M_{\Pi}$  і  $M_B$  визначає кількість газу, що акумулюється в постійному об'ємі  $V$  ресиверу. Тому рівняння зберігання кількості речовини (матеріального балансу) в динаміці може бути представленим у вигляді:

$$V \frac{d\rho}{dt} = M_{\Pi} - M_B, \quad (3.24)$$

де  $V$  і  $\rho$  - відповідно об'єм ресивера і густина газу у ресивері.

Згідно рівняння Клапейрона маса газу  $m$  у ресивері складе:

$$M = PV/R\Theta \quad (3.25)$$

де  $R$  – газова постійна;  $\Theta$  - температура газу у ресивері.

Враховуючи, що  $\rho = m/V$ , рівняння (3.25) прийме наступний вигляд:

$$\rho = P/R\Theta \quad (3.26)$$

Підставивши формулу (3.26) у рівняння (3.24) та прийнявши, що процес зміни тиску газу у ресивері відбувається без зміни температури, отримаємо:

$$\frac{V}{R\Theta} \cdot \frac{dP}{dt} = M_{II} - M_B \quad (3.27)$$

Витрата газу  $M$  (кг/с) крізь регулюючий орган для докритичного режиму стікання за умови лінійності пропускної характеристики від відносного переміщення  $l$  (ступеня відкриття) затвора регулюючого органу, як відомо, виражається формулою:

$$M = \frac{l \cdot K_{V\text{МАКС}}}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{\rho_H P_2 (P_1 - P_2)}{\Theta \cdot K'}}, \quad (3.28)$$

де  $l = s/s_y$  – відносна хода РО, де  $s$  – поточне переміщення затвору, а  $s_y$  – максимальна хода затвору;  $K_{V\text{МАКС}}$  – пропускна здатність РО за максимальної витрати крізь нього,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  $\rho_H$  – густина газу за нормальних умов,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\Theta$  – температура газу перед РО,  $\text{К}$ ;  $P_1$  і  $P_2$  – відповідно тиск газу до і після РО,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $K'$  – коефіцієнт стисливості, що враховує відхилення газу від ідеального стану.

У нашому випадку витрати на вході і виході ресивера складуть:

$$M_{II} = \frac{l_1 \cdot K_{V1\text{МАКС}}}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{\rho_H P (P_1 - P)}{\Theta \cdot K'}}, \quad (3.29)$$

$$M_B = \frac{l_2 \cdot K_{V2\text{МАКС}}}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{\rho_H P_2 (P - P_2)}{\Theta \cdot K'}}, \quad (3.30)$$

У зв'язку з не лінійністю рівнянь (3.27), (3.29) і (3.30) визначення передаточної функції виконаємо із застосуванням методу лінеаризації. Лінеаризуємо ці рівняння розкладанням у ряд Тейлора за умови постійності тисків  $P_1$  і  $P_2$ .

$$\frac{V}{R\Theta} \cdot \frac{d\Delta P}{dt} = \Delta M_{II} - \Delta M_B; \quad (3.31)$$

$$\Delta M_{II} = \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial l} \right)_0 \Delta l_1 + \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial P} \right)_0 \Delta P; \quad (3.32)$$

$$\Delta M_B = \left( \frac{\partial M_B}{\partial l} \right)_0 \Delta l_2 + \left( \frac{\partial M_B}{\partial P} \right)_0 \Delta P. \quad (3.33)$$

Після підстановки залежностей (3.32) і (3.33) у рівняння (3.31) отримаємо:



$$\frac{V}{R\Theta k_0} \cdot \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = k_{01}\Delta l_1 + k_{02}\Delta l_2, \quad (3.35)$$

$$\text{де } k_0 = \left( \frac{\partial M_B}{\partial P} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial P} \right)_0; \quad k_{01} = \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial l} \right)_0 / k_0; \quad k_{02} = \left( \frac{\partial M_B}{\partial l} \right)_0 / k_0.$$

Позначимо через  $T$  величину  $V/R\Theta k_0$  при першій похідній у рівнянні (3.35). Тоді воно може бути представлено у вигляді:

$$T \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = k_{01}\Delta l_1 + k_{02}\Delta l_2 \quad (3.36)$$

У рівнянні (3.36) коефіцієнт  $T$  має розмірність часу і називається постійною часу об'єкту або часом розгону одноємнісного об'єкта регулювання. Коефіцієнти  $k_{01}$  і  $k_{02}$  є коефіцієнтами передачі об'єкта по каналах незалежних збурень  $\Delta l_1$  чи  $\Delta l_2$ , які визначаються із статичних характеристик об'єкта або з рівнянь (3.29) і (3.30). Диференціювання цих рівнянь по  $l$  дозволяє отримати такі залежності:

$$\left( \frac{\partial M_{II}}{\partial l} \right)_0 = \frac{K_{V1\text{МАКС}}}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{\rho_H P (P_1 - P)}{\Theta \cdot K'}}; \quad (3.37)$$

$$\left( \frac{\partial M_B}{\partial l} \right)_0 = \frac{K_{V2\text{МАКС}}}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{\rho_H P_2 (P - P_2)}{\Theta \cdot K'}}. \quad (3.38)$$

Диференціювання рівнянь (3.29) і (3.30) по  $P$  перетворить їх до наступного вигляду:

$$\left( \frac{\partial M_{II}}{\partial P} \right)_0 = \frac{l_1 K_{V1\text{МАКС}} (P_1 - 2P) \rho_H}{14 \cdot 10^5 \sqrt{\rho_H \Theta K' P (P_1 - P)}}; \quad (3.39)$$

$$\left( \frac{\partial M_B}{\partial P} \right)_0 = \frac{l_2 K_{V2\text{МАКС}}}{14 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{\rho_H P_2}{\Theta K' (P - P_2)}}. \quad (3.40)$$

Уведення відносних величин для вхідних і вихідних параметрів дозволяє отримати рівняння (3.36) у такій формі:

$$T \frac{dY}{dt} + Y = k_1 X_1 - k_2 X_2, \quad (3.41)$$

де  $Y = \Delta P/P_0$ ,  $X_1 = \Delta l_1/l_{01}$ ,  $X_2 = \Delta l_2/l_{02}$  – відносні безрозмірні вихідні і вхідні параметри;  $k_1 = k_{01}l_{01}/P_0$ ,  $k_2 = k_{02}l_{02}/P_0$  – безрозмірні коефіцієнти підсилення при дії одного із збурень відповідно  $X_1$  чи  $X_2$ .

Рівняння (3.41) в операторній формі прийме наступний вигляд:

$$TpY + Y = k_1X_1 - k_2X_2. \quad (3.42)$$

Враховуючи визначення для передаточної функції  $W(p)$  її вираз по каналам збурення  $X_1$  і  $X_2$  може бути представлено у формі:

$$W_1(p) = \frac{Y}{X_1} = \frac{k_1}{Tp + 1}; \quad W_2(p) = \frac{Y}{X_2} = -\frac{k_2}{Tp + 1} \quad (3.43)$$

Для визначення реакції об'єкта на різні вхідні збурення необхідно у рівняння (3.43) підставити перетворене по Лапласу значення типового збурення вхідної величини, вирішити отримане рівняння відносно вихідної величини  $Y$  та виконати зворотне перетворення.

Нехай при  $t = 0$  в об'єкт внесено по каналу  $X_2$  одиничне ступінчасте збурення, тобто  $X_2(t) = 1(t)$ . Користуючись табл. 3.1 для цієї функції зображення буде  $X_2(p) = 1/p$ . Тоді рівняння (3.43) для  $W_2(p)$  може бути представлено у вигляді:

$$Y(p) = -\frac{k_2}{p(Tp + 1)} \quad (3.44)$$

Виконавши зворотне перетворення Лапласу (див. табл. 3.1) для рівняння (3.44) отримаємо часову (перехідну) характеристику ресивера  $Y(t)$ .

$$h(t) = Y(t) = -k_2(1 - e^{-t/T}) \cdot 1(t) \quad (3.45)$$

Знак “мінус” у рівнянні (3.45) вказує на те, що підвищення збурення  $X_2$  викликає зменшення параметра  $Y$ . Ідентично може бути визначена перехідна характеристика і по каналу збурення  $X_1$ . Вигляд рівнянь (3.41), (3.43) і (3.45) свідчить, що ресивер становить собою сталий одноємнісний об'єкт з постійною часу  $T$ , а динамічні властивості характеризуються диференціальним рівнянням першого порядку, яке прийнято називати аперіодичною ланкою першого порядку.

У реальному об'єкті зміна рівня відбувається не одночасно із зміною витрати, а з деяким запізненням  $\tau$ , тобто потрібен деякий час для витоку (притоку) речовини з ресивера до (від) місця встановлення РО, де відбулась зміна ступеня його відкриття. Позначивши цю

відстань через  $S$ , а швидкість потоку речовини у трубопроводі через  $v$ , запізнення складе  $\tau = S/v$ . Рівняння запізнення записується у вигляді  $Y_{3П}(t) = X_{3П}(t - \tau)$ , а передаточна функція згідно формули 14 табл. 3.1 буде дорівнювати  $W(p) = e^{-P\tau}$ . Отже з урахуванням запізнення передаточні функції ресивера при послідовному з'єднанні ланок можна представити формулами:  $W_1(p) = k_1 e^{-P\tau_1} / (Tp + 1)$  і  $W_2(p) = k_2 e^{-P\tau_2} / (Tp + 1)$ .

*Приклад.* Визначити постійну часу  $T$  і коефіцієнт підсилення  $k_2$  по каналу регулювання “тиск повітря у ресивері – відносна хода РО на виході ресивера” (див. рис. 3.10) та побудувати перехідну характеристику. Об'єм ресивера  $V = 50 \text{ м}^3$ , температура повітря  $\Theta = 300 \text{ К}$ , газова постійна  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ , густина повітря  $\rho_H = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$ . У ресивері необхідно підтримувати тиск  $P = 1000 \text{ кН}/\text{м}^2$ . Крізь РО, що встановлений на трубопроводі, повітря виходить з ресиверу у простір з постійним тиском  $P_2 = 800 \text{ кН}/\text{м}^2$ , а надходить під тиском  $P_1 = 1500 \text{ кН}/\text{м}^2$ . Ступінь відкриття РО  $l_1 = l_2 = 0,5$ . Пропускна здатність РО на вході і виході  $K_{V1\text{МАКС}} = K_{V2\text{МАКС}} = 10 \text{ м}^3/\text{год}$ .

За рівняннями (3.40) і (3.39), приймаючи  $K' = 1$ , обчислюються значення лінеаризованих функцій навколо точок розкладу:

$$\left(\frac{\partial M_{II}}{\partial t}\right)_0 = \frac{0,5 \cdot 10 \cdot 1,29(1,5 - 2 \cdot 1)10^6}{14 \cdot 10^5 \sqrt{1,29 \cdot 300 \cdot 1 \cdot 10^6(2 - 1)10^6}} = -0,117 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}/\text{с}}{\text{Н}/\text{м}^2};$$

$$\left(\frac{\partial M_B}{\partial t}\right)_0 = \frac{0,5 \cdot 10}{14 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{1,29 \cdot 0,8 \cdot 10^6}{300 \cdot 1(1 - 0,8)10^6}} = 0,46 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}/\text{с}}{\text{Н}/\text{м}^2}.$$

Визначається коефіцієнт  $k_0$ , що входить до виразів постійної часу і коефіцієнта передачі:

$$k_0 = (0,46 + 0,117)10^6 = 0,577 \cdot 10^6 \text{ (кг/с)/(Н/м}^2\text{)}.$$

За формулою (3.38) обчислюється частина похідна, що входить у вирази для коефіцієнтів  $k_{02}$  і  $k_2$ :

$$\left(\frac{\partial M_B}{\partial l}\right)_0 = \frac{10}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{1,29 \cdot 0,8 \cdot 10^6(1 - 0,8)10^6}{300 \cdot 1}} = 0,37 \text{ кг}/\text{с}$$

Значення коефіцієнта підсилення  $k_2$  і постійної часу  $T$  будуть відповідно складати:

$$k_2 = 0,641 \cdot 10^6 \cdot 0,5/10^6 = 0,32;$$

$$T = 50/300 \cdot 287 \cdot 0,577 \cdot 10^{-6} = 581 \text{ с}$$

де  $k_{02} = 0,37/0,577 \cdot 10^{-6} = 0,641 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ .

За таких значень передаточна функція об'єкта по каналу регулювання буде дорівнювати:

$$W(p) = -\frac{0,32}{581p + 1}.$$

Перехідна характеристика згідно виразу (3.47) визначиться рівнянням:

$$Y(t) = -0,32(1 - e^{-t/581})$$

Графічне зображення перехідної характеристики представлено на рис. 3.11.

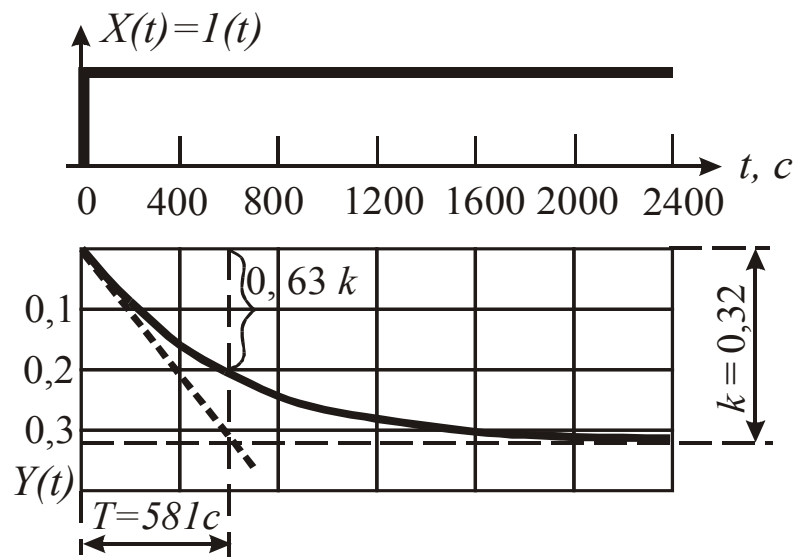


Рис. 3.11. Перехідна функція  $Y(t)$  сталого об'єкта першого порядку по каналу регулювання.

У відповідності з рис. 3.11 постійна часу  $T$  об'єкта визначається як проекція на вісь часу відрізка дотичної до експоненти, що замкнений між точкою дотику і точкою перетинання дотичної з лінією сталого значення вихідної величини. Взагалі довжина цієї проекції однакова для дотичних, проведених до будь-якої точки експоненти. При  $t = T$  вихідна величина складає 63% нового сталого значення. Чим більше постійна часу (у нашому випадку об'єм ресивера), тим повільніше протікає перехідний процес, і навпаки.

Графік перехідної характеристики з безрозмірних одиниць за допомогою формул рівняння (3.41) може бути перебудований в розмірні (див. рис. 3.12).

Так, наприклад, для  $t = 1600 \text{ с}$  величина відхилення  $\Delta P = 0,3P = 300 \text{ кН/м}^2$ , а величина збурення  $\Delta l_2 = 1 \cdot l_2 = 0,5$ . При цьому, величина витрати  $\Delta M_B$ , яка відповідає зміні відносної ходи РО  $\Delta l_2$ , може бути визначена за рівняннями (3.33), (3.38) і (3.40):  $\Delta M_B = 0,37 \cdot 0,5 + 0,46 \cdot 1^{-6} \cdot 320 = 0,185 \text{ кг/с} = 667 \text{ кг/год}$ . У такому разі розмірний коефіцієнт підсилення складе:  $320 / 667 = 0,48 \text{ (кН/м}^2\text{)/(кг/год)}$ .

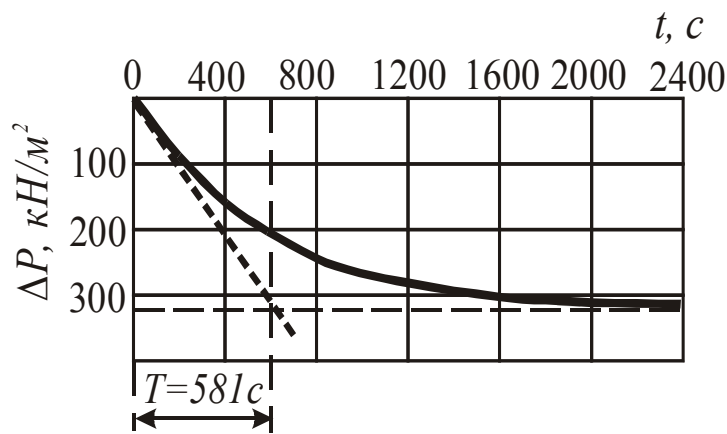


Рис. 3.12. Графік перехідної функції в абсолютних одиницях відхилення тиску  $\Delta P$ .

Резервуар з рідиною (див. рис. 3.5а) становить собою об'єм визначеного розміру, у якому необхідно підтримувати на певному значенні рівень  $H$  рідини. При цьому, приток  $M_{\Pi}$  і виток  $M_B$  рідини здійснюється так, що обидва потоки рідини можна регулювати за допомогою РО, відносні положення яких  $l_1$  і  $l_2$  визначають прохідні перерізи. У загальному випадку приток рідини в об'єм резервуару здійснюється з підпором  $P_1$ , а виток рідини з резервуару відбувається у простір з тиском  $P_2$ . Перехідний режим виникає внаслідок зміни витрат в лінії притоку чи витоку. Різниця цих витрат, що виникає за такої умови призводить до зміни маси рідини в об'ємі резервуару, тобто:

$$\rho F \frac{dH}{dt} = M_{\Pi} - M_B, \quad (3.46)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу резервуару,  $m^2$ ;  $\rho$  – густина рідини,  $kg/m^3$ ;  $H$  – рівень рідини,  $m$ .

Витрата рідини  $M$  ( $kg/s$ ) крізь РО за умови лінійної залежності пропускної характеристики від відносного переміщення його затвору  $l$ , як відомо, визначається за формулою:

$$M = \frac{l \cdot K_{V\text{МАКС}}}{36 \cdot 10^3} \sqrt{\rho(P_1 - P_2)} \quad (3.47)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  відповідно тиск рідини до і після РО,  $H/m^2$ ;  $K_{V\text{МАКС}}$  – пропускна здатність РО за максимальної витрати крізь нього,  $m^3/god$ .

У відповідності з рівнянням (3.47) значення  $M_{\Pi}$  і  $M_B$  будуть складати:

$$M_{\Pi} = \frac{l_1 \cdot K_{V1\text{МАКС}}}{36 \cdot 10^3} \sqrt{\rho(P_1 - P)}; \quad (3.48)$$

$$M_B = \frac{l_2 K_{V2\text{МАКС}}}{36 \cdot 10^3} \sqrt{\rho(P + \rho g H - P_2)}, \quad (3.49)$$

де  $P$  – тиск у резервуарі,  $H/\text{м}^2$ .

Не лінійність рівнянь (3.48) і (3.49) обумовлює застосування методу лінеаризації, після виконання якої вони приймуть вигляд:

$$\rho F \frac{d\Delta H}{dt} = \Delta M_{II} - \Delta M_B; \quad (3.50)$$

$$\Delta M_{II} = \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial l} \right)_0 \Delta l_1 + \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial P} \right)_0 \Delta P; \quad (3.51)$$

$$\Delta M_B = \left( \frac{\partial M_B}{\partial l} \right)_0 \Delta l_2 + \left( \frac{\partial M_B}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left( \frac{\partial M_B}{\partial H} \right)_0 \Delta H \quad (3.52)$$

Після підстановки лінеаризованих залежностей (3.51) і (3.52) у рівняння (3.50) отримаємо:

$$T \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = k_{01} \Delta l_1 - k_{02} \Delta l_2 + k_{03} \Delta P, \quad (3.53)$$

де

$$T = \frac{\rho F}{k_0}; \quad k_0 = \left( \frac{\partial M_B}{\partial H} \right)_0; \quad k_{01} = \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial l} \right)_0 / k_0;$$

$$k_{02} = \left( \frac{\partial M_B}{\partial l} \right)_0 / k_0; \quad k_{03} = \left[ \left( \frac{\partial M_{II}}{\partial P} \right)_0 - \left( \frac{\partial M_B}{\partial P} \right)_0 \right] / k_0.$$

Зміна тиску  $P$  у резервуарі не суттєво впливає на зміну рівня. За постійності тиску  $P$  рівняння (3.53) буде мати вигляд:

$$T \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = k_{01} \Delta l_1 - k_{02} \Delta l_2 \quad (3.54)$$

Для визначення коефіцієнтів  $k_{01}$  і  $k_{02}$  виконаємо диференціювання рівнянь (3.48) і (3.49) по  $l$ , а рівняння (3.50) ще й по  $H$ .

$$\left( \frac{\partial M_{II}}{\partial l} \right)_0 = \frac{K_{V1\text{МАКС}}}{36 \cdot 10^3} \sqrt{\rho(P_1 - P)}; \quad (3.55)$$

$$\left( \frac{\partial M_B}{\partial l} \right)_0 = \frac{K_{V2\text{МАКС}}}{36 \cdot 10^3} \sqrt{\rho(P + \rho g H - P_2)}; \quad (3.56)$$

$$\left(\frac{\partial M_B}{\partial H}\right)_0 = \frac{l_2 K_{V2\text{МАКС}} \rho g}{72 \cdot 10^3 \sqrt{(P + \rho g H - P_2) / \rho}} \quad (3.57)$$

Залежності (3.55) – (3.57) дозволяють визначити числові значення коефіцієнтів  $k_{01}$ ,  $k_0$ ,  $k_{02}$  і постійної часу  $T$ . Представимо рівняння (3.54) у безрозмірній формі:

$$T \frac{dY}{dt} + Y = k_1 X_1 - k_2 X_2, \quad (3.58)$$

де  $Y = \Delta H / H_0$ ,  $X_1 = \Delta l_1 / l_{01}$ ,  $X_2 = \Delta l_2 / l_{02}$  – відносні безрозмірні вихідна і вхідні параметри;  $k_1 = k_{01} l_{01} / H_0$ ,  $k_2 = k_{02} l_{02} / H_0$  – безрозмірні коефіцієнти підсилення по каналу збурення відповідно  $X_1$  і  $X_2$ .

Ідентично попередньому передаточні функції  $W(p)$  об'єкта по каналах збурень будуть мати вигляд у відповідності з формулами (3.43), а перехідна характеристика по каналу збурення, наприклад  $X_1$ , для резервуару з рідиною має вигляд:

$$h(t) = Y(t) = k_1 (1 - e^{-t/T}) \cdot I(t) \quad (3.59)$$

Отже, резервуар за умови вільного витоку рідини також становить собою сталий одноємнісний об'єкт першого порядку.

У випадку, коли рідина з резервуару відкачується насосом (див. рис. 3.5б) постійної продуктивності, витрата  $M_B$  є незалежним параметром від рівня  $H$ , тиску  $P$  у резервуарі і  $l_2$ , тобто  $\Delta M_B = 0$ . Тоді рівняння (3.50) з урахуванням виразу (3.51) за постійності  $P$  прийме вигляд:

$$\rho F \frac{d\Delta H}{dt} = \left(\frac{\partial M_{II}}{\partial l}\right)_0 \Delta l_1 \quad (3.60)$$

Після перетворень рівняння (3.60) у безрозмірній формі для вхідних і вихідних координат предстане у формі:

$$T \frac{dY}{dt} = X_1, \quad (3.61)$$

де  $T = \rho F H_0 / k_{01} l_{01}$  – постійна часу (час розгону) об'єкта ( $c$ ), а коефіцієнт  $k_{01}$  визначається рівнянням (3.55).

Таким чином передаточна функція визначиться рівнянням:

$$W(p) = 1/Tp = k/p, \quad (3.62)$$

де  $k = 1/T$  – коефіцієнт підсилення об'єкта, що характеризує швидкість розгону об'єкта при зміні вхідного параметра на одиницю  $X(t) = 1(t), c^{-1}$ .

Перехідна характеристика у відповідності з формулою (13) табл. 3.1 виразиться рівнянням:

$$h(t) = Y(t) = k \int_0^t 1(t) dt = t/T \quad (3.63)$$

Вигляд рівнянь (3.61) і (3.63) свідчить, що швидкість зміни вихідної величини  $Y$  пропорційна сигналу на вході, тобто збуренню  $X_1$ , і зворотно пропорційна коефіцієнту  $T$ . При дії стрибкоподібного діяння на вході такого об'єкта його вихідний сигнал буде змінюватись з постійною швидкістю, не прагнучи до будь-якого нового сталого значення. Такі об'єкти прийнято називати астатичними об'єктами без самовирівнювання або нейтральними з нульовим самовирівнюванням ( $\rho = 0$ ). У динамічному відношенні такий об'єкт становить собою інтегруючу ланку. Графічне зображення перехідної характеристики становить собою пряму лінію. При  $t = T$  рівняння (3.63) приймає вигляд  $Y(t) = X(t) = 1(t)$ . Це означає, що час розгону  $T$  є часом, протягом якого відносна зміна вихідної величини інтегруючої ланки досягне значення, дорівнююче відносній зміні вхідної величини.

*Приклад.* Визначити постійну часу  $T$  і коефіцієнт підсилення  $k_1$  по каналу регулювання “рівень мазуту у резервуарі – ступінь відкриття РО на вході резервуару” (див. рис. 3.5б) та рівняння перехідної характеристики, якщо  $F = 2 \text{ м}^2$ ,  $\rho = 990 \text{ кг/м}^3$ ,  $l_1 = 0,4$  і  $K_{V\text{ИМАКС}} = 12 \text{ м}^3/\text{год}$ . Мазут у резервуарі знаходиться під тиском  $P = 100 \text{ кН/м}^2$ , а надходить у резервуар з тиском  $P_1 = 250 \text{ кН/м}^2$ . Рівень необхідно підтримувати на позначці  $H = 4 \text{ м}$ .

Визначається коефіцієнт  $k_{01}$  за рівнянням (3.55):

$$k_{01} = \frac{12}{36 \cdot 10^3} \sqrt{990(2,5 - 1)10^5} = 4,06 \text{ кг/с}$$

Значення постійної часу у рівнянні (3.61) буде складати:

$$T = 990 \cdot 2 \cdot 4 / 4,06 \cdot 0,4 = 4876,8 \text{ с} = 81,8 \text{ хвил.}$$

У відповідності з (3.62) передаточна функція може бути представлена у вигляді:



$$W(p) = 1/81,8p$$

Перехідна характеристика визначається рівнянням:

$$h(t) = Y(t) = t / 81,8.$$

Випарник холодильної установки, схема якого представлена на рис. 3.13, призначений для охолодження води за рахунок випаровування фреону (R12) при постійному тиску. Рідкий фреон надходить у поміж трубний простір, а вода проходить усередині трубок.

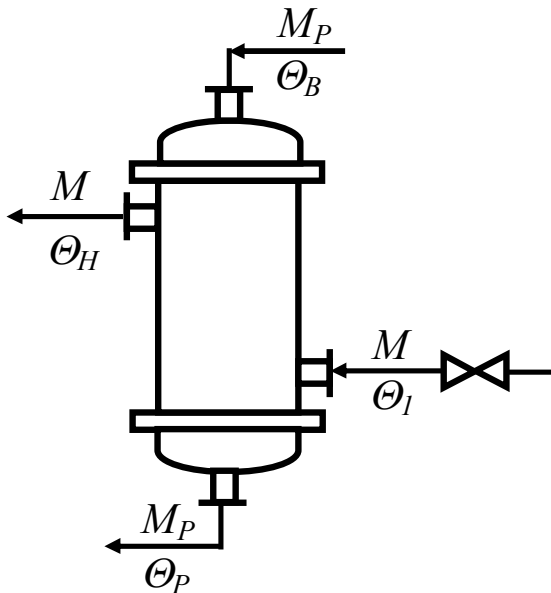


Рис. 3.13. Схема випарника для охолодження розсолу.

При складанні рівнянь динаміки випарника приймаємо наступні припущення: випарник характеризується зосередженими параметрами, тобто температура води  $\Theta_P$  у випарнику постійна в усіх точках об'єму; температура стінок  $\Theta_S$ , що передають тепло, також однакова в усіх точках; термічний опір забруднень і стінок зневажливо малий; за невеликих відхилень коефіцієнти тепловіддачі постійні; насиченість парів фреону в усьому поміж трубному просторі; температура рідини і парів фреону  $\Theta_H$  однакова у всьому поміж трубному просторі; густини та питомі теплоємності рідини, парів і матеріалу стінок труб за невеликих змін температури можна вважати постійними; об'єми рідини  $V_A$  і парів  $V_{II}$  фреону постійні, оскільки рівень рідини у випарнику як правило підтримується на заданому значенні регулятором рівня. З урахуванням припущень рівняння динаміки теплового балансу для стінок труб, що передають тепло від води до холодоагента, буде мати вигляд:

$$V_S \rho_S c_S \frac{d\Theta_S}{dt} = \alpha F (\Theta_P - \Theta_S) - Mr + M(i_1 - i_H), \quad (3.64)$$

де  $V_S$ ,  $\rho_S$ ,  $c_S$  – відповідно об'єм ( $m^3$ ), густина ( $кг/м^3$ ) і питома теплоємність ( $Дж/кг \cdot К$ ) матеріалу стінок теплообмінних труб;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі поміж водою і поверхнею металевих стінок,  $Вт/м^2 \cdot К$ ;  $F$  – поверхня теплопередачі,  $м^2$ ;  $\Theta_S$  - температура стінок труб,  $^0С$ ;  $M$  – витрата холодоагента,  $кг/с$ ;  $i_1$  і  $i_H$  – відповідно питома

ентальпія холодоагенту на вході і його насиченої пари на виході,  $\text{кДж/кг}$ ;  $r$  – теплота пароутворення холодоагенту,  $\text{Дж/кг}$ .

Процес зміни температури в об'ємі води (усереднені трубок) при зміні температури стінок описується рівнянням:

$$V_P \rho_P c_P \frac{d\Theta_P}{dt} = M_P c_P (\Theta_B - \Theta_P) - \alpha F (\Theta_P - \Theta_S), \quad (3.65)$$

де  $V_P$ ,  $\rho_P$ ,  $c_P$  – відповідно об'єм ( $\text{м}^3$ ), густина ( $\text{кг/м}^3$ ) і питома теплоємність ( $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$ ) води у трубках;  $M_P$  – витрата холодоагенту,  $\text{кг/с}$ ;  $\Theta_B$  – температура води на вході випарника,  $^{\circ}\text{C}$ .

Лінеаризуємо рівняння (3.64) і (3.65) за умови постійності тиску, а отже і температури  $\Theta_H$  у помірному просторі випарника.

$$V_S \rho_S c_S \frac{d\Delta\Theta_S}{dt} = \alpha F (\Delta\Theta_P - \Delta\Theta_S) - (r - i_1 + i_H) \Delta M + M \left( \frac{\partial i_1}{\partial \Theta} \right) \Delta\Theta_1; \quad (3.66)$$

$$V_P \rho_P c_P \frac{d\Delta\Theta_P}{dt} = c_P (\Theta_B - \Theta_P) \Delta M_P + M_P c_P \Delta\Theta_B - (\alpha F + M_P c_P) \Delta\Theta_P + \alpha F \Delta\Theta_S. \quad (3.67)$$

Поділивши рівняння (3.66) на  $\alpha F$ , а рівняння (3.67) на  $(\alpha F + M_P c_P)$  і перетворивши їх, отримаємо:

$$T_1 \frac{d\Delta\Theta_S}{dt} + \Delta\Theta_S = \Delta\Theta_P - k_{02} \Delta M + k_{03} \Delta\Theta_1; \quad (3.68)$$

$$T_2 \frac{d\Delta\Theta_P}{dt} + \Delta\Theta_P = k_{04} \Delta M_P + k_{05} \Delta\Theta_B + k_{06} \Delta\Theta_S, \quad (3.69)$$

де  $T_1 = V_S \rho_S c_S / \alpha F$  – постійна часу трубного пучка випарника,  $\text{с}$ ;  $T_2 = V_P \rho_P c_P / (\alpha F + M_P c_P)$  – постійна часу усередненого простору,  $\text{с}$ ;  $k_{02} = (r - i_1 + i_H) / \alpha F$ ,  $k_{03} = M \left( \frac{\partial i}{\partial \Theta} \right) / \alpha F$ ,  $k_{04} = c_P (\Theta_B - \Theta_P) / (\alpha F + M_P c_P)$ ,  $k_{05} = M_P c_P / (\alpha F + M_P c_P)$ ,  $k_{06} = \alpha F / (\alpha F + M_P c_P)$  – коефіцієнти підсилення.

В операторній формі і безрозмірних координатах рівняння (3.68) і (3.69) будуть мати вигляд:

$$(T_1 p + 1)Y_S = k_1 Y_P - k_2 X_M + k_3 X_I; \quad (3.70)$$

$$(T_2 p + 1)Y_P = k_4 X_P + k_5 X_B + k_6 Y_S; \quad (3.71)$$

де  $Y_S = \Delta\Theta_S/\Theta_{0S}$ ;  $Y_P = \Delta\Theta_P/\Theta_{0P}$ ;  $X_M = \Delta M/M_0$ ;  $X_I = \Delta\Theta_I/\Theta_{0I}$ ;  $X_P = \Delta M_P/M_{0P}$ ;  $X_B = \Delta\Theta_B/\Theta_{0B}$ ;  $k_1 = \Theta_{0P}/\Theta_{0S}$ ;  $k_2 = k_{02}M_0/\Theta_{0S}$ ;  $k_3 = k_{03}\Theta_{0I}/\Theta_{0S}$ ;  $k_4 = k_{04}M_{0P}/\Theta_{0P}$ ;  $k_5 = k_{05}\Theta_{0B}/\Theta_{0P}$ ;  $k_6 = k_{06}\Theta_{0S}/\Theta_{0P}$ .

Виключимо з рівнянь (3.70) і (3.71) проміжну змінну  $Y_S$ . З рівняння (3.70) отримаємо:

$$Y_S = (k_1 Y_P - k_2 X_M + k_3 X_I)/(T_1 p + 1) \quad (3.72)$$

Підставивши отримане у рівняння (3.71) будемо мати:

$$[T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + (1 - k_1 k_6)]Y_P = k_4(T_1 p + 1)X_P + k_5(T_1 p + 1)X_B - k_2 k_6 X_M + k_3 k_6 X_I \quad (3.73)$$

Рівняння (3.73) дозволяє отримати передаточні функції по різних каналах збурень  $X$ :

– по каналу “ $Y_P - X_P$ ”

$$W_1(p) = \frac{k_4(T_1 p + 1)}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + (1 - k_1 k_6)}; \quad (3.74)$$

– по каналу “ $Y_P - X_B$ ”

$$W_2(p) = \frac{k_5(T_1 p + 1)}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + (1 - k_1 k_6)}; \quad (3.75)$$

– по каналу “ $Y_P - X_M$ ”

$$W_3(p) = \frac{-k_2 k_6}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + (1 - k_1 k_6)}; \quad (3.76)$$

– по каналу “ $Y_P - X_I$ ”

$$W_4(p) = \frac{k_3 k_6}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + (1 - k_1 k_6)} \quad (3.77)$$

Отримані вирази для передаточних функцій свідчать, що випарник є сталим об'єктом другого порядку (двоємносним об'єктом). Крім того, ці вирази підтверджують, що підвищення витрати води

$X_P$ , температури води  $X_B$  і рідкого фреону  $X_I$  на вході випарника приводить до підвищення температури води  $Y_P$  на виході, а збільшення витрати холодоагента  $X_M$  – до зменшення величини  $Y_P$ .

*Приклад.* Визначити передаточну функцію випарника (див. рис. 3.13) і перехідну характеристику по каналу регулювання “температура води на виході  $Y_P$  – витрата води на вході  $X_P$ ” за таких вихідних даних:  $F = 30 \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 498 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ;  $\rho_P = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_P = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ ;  $V_P = 0,15 \text{ м}^3$ ;  $V_S = 0,085 \text{ м}^3$ ;  $\rho_S = 7500 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_S = 500 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ ;  $M = 0,7 \text{ кг/с}$ ;  $M_P = 2,38 \text{ кг/с}$ ;  $\Theta_B = 25^\circ\text{С}$ ;  $\Theta_P = 15^\circ\text{С}$ ;  $\Theta_H = 10^\circ\text{С}$ ;  $\Theta_S = 16^\circ\text{С}$ .

Для рівняння (3.74) визначаються коефіцієнти підсилення і постійні часу:

$$k_1 = 15/16 = 0,937;$$

$$k_4 = 4190(25 - 15)2,38/15(498 \cdot 30 + 4191 \cdot 2,38) = 0,267;$$

$$k_6 = 498 \cdot 30 \cdot 16/15(498 \cdot 30 + 4191 \cdot 2,38) = 0,639;$$

$$T_1 = 0,085 \cdot 500 \cdot 7500/498 \cdot 30 = 21,3 \text{ с};$$

$$T_2 = 0,15 \cdot 1000 \cdot 4190/(498 \cdot 30 + 4191 \cdot 2,38) = 25,2 \text{ с}.$$

Передаточна функція згідно рівняння (3.74) прийме наступний вигляд:

$$W_1(p) = \frac{0,267(21,3p + 1)}{536,76p^2 + 46,5p + 0,401}.$$

Перехідна характеристика в операторній формі за умови  $X(t) = I(t)$  може бути представлена у такій формі:

$$Y_P(p) = \frac{0,267(21,3p + 1)}{p(536,76p^2 + 46,5p + 0,401)}.$$

Поділимо чисельник і знаменник цієї функції на коефіцієнт при  $p^2$  і винесемо за скобки коефіцієнт при  $p$  у чисельнику.

$$Y_P(p) = \frac{0,0105(p + 0,00049)}{p(p^2 + 0,0866p + 0,00075)}$$

Для того щоб перейти від зображення  $Y_P(p)$  до оригіналу  $Y_P(t)$  необхідно розкласти отримане рівняння на суму простих дробів, оригінал для кожної з яких буде відомим згідно формул (1) і (5) табл. 3.1. Попередньо визначивши корні квадратного рівняння для знаменника ( $p_1 = -0,154$  і  $p_2 = -0,0098$ ), загальний вигляд розкладання функції  $Y_P(p)$  буде наступним:

$$\frac{0,0105(p + 0,00049)}{p(p + 0,154) \cdot (p + 0,0098)} = \frac{A}{p} + \frac{B}{(p + 0,154)} + \frac{C}{(p + 0,0098)}.$$

Визначення коефіцієнтів  $A$ ,  $B$  і  $C$  виконується із застосуванням методу невизначених коефіцієнтів. При цьому помножаються обидві частини цієї рівності на знаменник лівої частини.

$$0,0105(p + 0,00049) = A(p + 0,154) \cdot (p + 0,0098) + Bp(p + 0,0098) + Cp(p + 0,154).$$

Виконавши множення останньої рівності, отримаємо:

$$0,0105p + 0,00049 = A(p^2 + 0,0866p + 0,00075) + B(p^2 + 0,0098p) + C(p^2 + 0,154p).$$

Порівнюючи коефіцієнти при однакових степенях  $p$  у лівій і правій частинах рівності, будемо мати систему трьох рівнянь першої степені з трьома невідомими:

$$\begin{aligned} p^2 \quad & A + B + C = 0; \\ p \quad & 0,086A + 0,0098B + 0,154C = 0,0105; \\ p^0 \quad & 0,00075A = 0,00049. \end{aligned}$$

Розв'язуючи цю систему, отримаємо наступні значення коефіцієнтів:  $A = 0,657$ ;  $B = -0,38$ ;  $C = -0,277$ .

Отже зображення перехідної характеристики буде наступним:

$$Y_p(p) = \frac{0,657}{p} - \frac{0,38}{p + 0,154} - \frac{0,277}{p + 0,0098}.$$

Провівши зворотне перетворення за допомогою формул табл. 3.1, перехідна характеристика виразиться рівнянням:

$$h(t) = Y_p(t) = (0,657 - 0,38e^{-0,154t} - 0,277e^{-0,0098t}) \cdot 1(t).$$

В практиці досліджень як правило використовують збурення не більше 40% від номінального. З урахуванням цього праву частину останнього рівняння слід помножити на коефіцієнт 0,4. Тоді це буде часова характеристика у розмірних координатах. Відхилення температури води на виході для  $t = \infty$  складе  $\Delta\Theta = 0,657 \cdot 0,4 \cdot 15 = 3,94^\circ\text{C}$  при величині збурення по витраті води  $\Delta M = 0,4 \cdot 2,38 = 0,952 \text{ кг/с}$ .

Наведені вище приклади свідчать, що отримання моделі передбачає обґрунтований вибір критерію її наближення до об'єкту. При цьому слід мати на увазі, що одному й тому ж об'єкту може бути поставлена безліч різних за складністю моделей, кожна з яких буде нести лише інформацію про властивості об'єкта з позицій конкретно поставленої задачі.

### 3.5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ РЕГУЛЮВАННЯ

В інженерній практиці властивості промислових об'єктів найчастіше виявляють експериментальним шляхом.

Проведення експерименту здійснюється із застосуванням засобів автоматичного контролю технологічних параметрів, якими оснащується об'єкт регулювання. Найпростіша схема (див. рис. 3.14) для зняття часової характеристики (кривої розгону) в об'єкті регулювання містить наступні засоби: датчики 1 і 2 для контролю відповідно параметрів регулювання і збурення, вторинний прилад 3 для реєстрації цих параметрів і блок керування 4, за допомогою якого

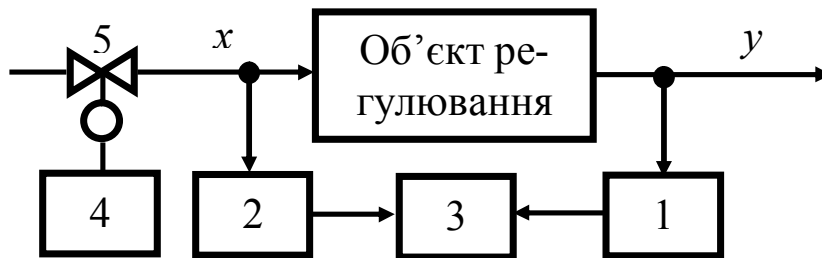


Рис. 3.14. Схема експериментальної установки для зняття часових характеристик об'єкта регулювання.

вноситься величина збурення в об'єкт шляхом зміни степені відкриття виконавчого пристрою 5.

Перед початком досліджень необхідно встановити рівноважний стан, тобто стабілізувати параметр регулювання  $y$  і по можливості забезпечити стабілізацію частини сторонніх діянь, що вносять збурення в об'єкт. Величина основного збурення  $x$ , тобто величина переміщення регулюючого органу виконавчого пристрою, обирається, виходячи з конкретних умов роботи об'єкта. Вона повинна бути достатньо великою, щоб дрібні сторонні збурення, які неминучі в експлуатаційному режимі, не викривляли отриману характеристику. Величина збурення обирається у межах  $20 \div 40 \%$ . Проте дуже великі відхилення регулюючого органу не слід застосовувати, щоб не порушити нормальний технологічний режим.

Для отримання точних даних про динамічні властивості об'єкта необхідно проводити експеримент за різних робочих режимів (навантажень). На кожному режимі слід знімати не менше чотирьох графіків перехідних процесів, щоб забезпечити можливість перевірки стаціонарності динамічних властивостей. Крім того, необхідно застосовувати той самий датчик, вторинний прилад і виконавчий пристрій, які в подальшому будуть використані у схемі автоматичного

регулювання. Якщо з'ясується, що при нанесенні збурення параметр регулювання перевищує припустимі межі технологічного регламенту, збурення миттєво знімають при наближенні параметра регулювання до граничного значення, а потім продовжують реєстрацію параметра до його остаточної стабілізації. За таких умов отримана характеристика буде *імпульсною*, яку досить легко перебудувати у звичайну часову характеристику (див. рис. 3.15).

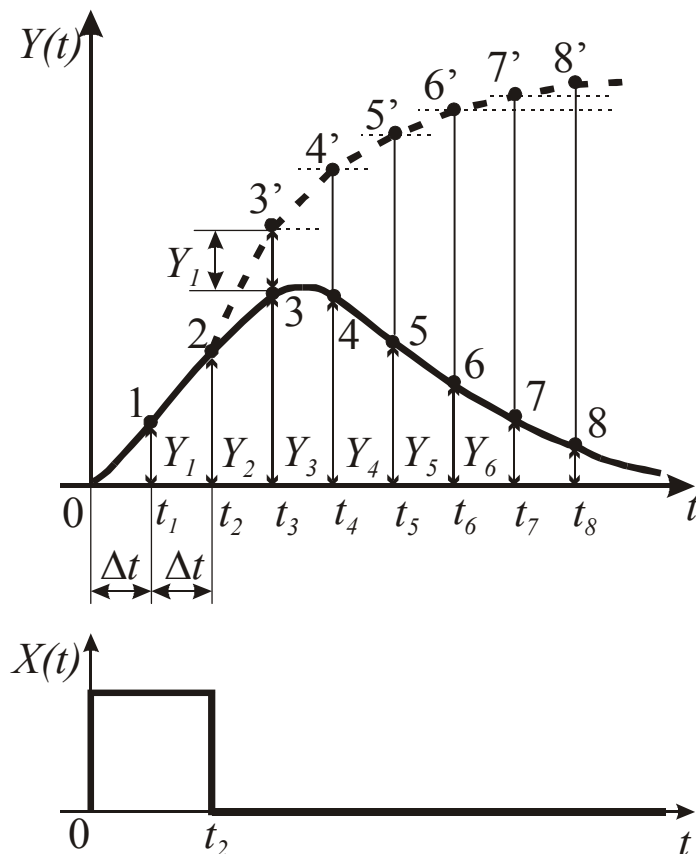


Рис. 3.15. Експериментальна імпульсна характеристика з перебудуванням у часову характеристику.

Для визначення ординати кривої розгону у точці  $t_3$  до ординати  $Y_3$  ( $t_3 = t_2 + \Delta t$ ) додають ординату  $Y_1$  ( $t = t_1$ ) і таким чином отримують точку  $3'$  ординати кривої розгону. Для визначення ординати у момент часу  $t_4$  до ординати кривої розгону  $2$  додають ординату  $4$  імпульсної характеристики і т. д. Наприклад, для визначення ординати у момент часу  $t_7$  до побудованої у момент часу  $t_5$  ординати кривої розгону  $5'$  додають ординату  $7$  імпульсної характеристики і таким чином отримують звичайну криву розгону об'єкта регулювання.

Часова характеристика, що отримана в процесі експерименту має розмірні координати. Тому і коефіцієнт підсилення буде розмірною величиною. Так, якщо збурення нанесено витратою  $\Delta M$  ( $m/god$ ), а зміна вихідної величини при цьому становить  $\Delta \Theta$  ( $^{\circ}C$ ), то коефіцієнт підсилення буде мати розмірність ( $^{\circ}C \cdot god/m$ ). Таке представлен-

На відрізку часу  $0 - t_2$  (де  $t_2$  – тривалість діяння, що збурює) імпульсна характеристика співпадає з розгінною. Добудову кривої розгону після зняття сигналу збурення здійснюють шляхом складання ординати кривої розгону для проміжку  $\Delta t$  з ординатою імпульсної характеристики для проміжку часу  $\Delta t + t_2$ . Вісь часу при цьому розбивають на відрізки  $\Delta t$  ( $\Delta t = t_2/2$  чи  $t_2/3$ ). Для визначення ординати кривої розгону у точці  $t_3$  до ординати  $Y_3$  ( $t_3 = t_2 + \Delta t$ ) додають ординату  $Y_1$  ( $t = t_1$ ) і таким чином отримують точку  $3'$  ординати кривої розгону. Для визначення ординати у момент

ня коефіцієнту підсилення хоча і наочно, але у зв'язку із залежністю його величини від розмірності не дає змоги порівнювати коефіцієнти по різних каналах збурень для однієї і тієї ж вихідної величини. В інженерній практиці прийнято здійснювати операцію нормування часової характеристики і коефіцієнту підсилення за формулами:

$$h(t) = \Delta y(t) / \Delta y(\infty) ; \quad (3.78)$$

$$k = \frac{y(\infty) - y(0)}{y(0)} \cdot \frac{x(0)}{x(\infty) - x(0)} \quad (3.79)$$

де  $h(t)$  – нормована перехідна характеристика;  $\Delta y(t) = [y(t) - y(0)]$  – поточне значення приростів вихідної величини;  $\Delta y(\infty) = [y(\infty) - y(0)]$  – максимальне відхилення вихідної величини;  $\Delta x = [x(\infty) - x(0)]$  – ступінчате збурення по вхідній величині від сталого значення.

*Приклад.* Визначити коефіцієнт передачі теплообмінника, у якому рідина нагрівається водяною парою, по експериментальній часовій характеристиці, що отримана при ступінчатому збуренні по витраті грючої пари на  $10 \text{ м/год}$  відносно номінального значення  $50 \text{ м/год}$ . Стале значення температури рідини по закінченні перехідного процесу склало  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а до збурення температура рідини дорівнювала  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнт передачі у розмірному вигляді:

$$k = (100 - 90) / 10 = 1 \text{ }^\circ\text{C} / (\text{м/год})$$

Коефіцієнт передачі у безрозмірному вигляді:

$$k = \frac{100 - 90}{90} \cdot \frac{50}{60 - 50} = 0,556$$

При цьому для будь якої фізичної величини значення функції  $h(\infty) = 1$ .

Графічне подання часових характеристик повністю відображає динамічні властивості об'єкта регулювання, проте не дає вихідного матеріалу для розрахунку АСР. Часові характеристики дозволяють лише якісно оцінити динамічні властивості об'єкта. Для виконання розрахунку АСР динамічні характеристики необхідно представити у вигляді диференційних рівнянь або передаточних функцій, що здійснюється шляхом апроксимації графічних залежностей математичними функціями. Існує порівняно багато різних методів апроксимації, які відрізняються один від одного способом представлення вихідної інформації, структурою моделей, критеріями наближення, особливостями виконання розрахунків.



**Апроксимуюча модель перехідної характеристики** найчастіше шукається у вигляді передаточної функції  $W_a(p) = [K(p)/D(p)] \cdot e^{-P\tau}$ , тобто у вигляді послідовного з'єднання частини з дрібно-раціональною передаточною функцією  $K(p)/D(p)$  і ланки запізнення із часом запізнення  $\tau$ , де  $K(p)$  і  $D(p)$  – поліноми. При апроксимації приймають певні припущення, основним з яких є припущення про лінійність об'єкта. Нижче розглянуті деякі найбільш розповсюджені методи апроксимації.

*Метод додаткових членів* передбачає визначення постійних часу по двом точкам графіка перехідної функції:

$$h(t_1) = (1 - e^{-t_1/T})^n; \quad (3.80)$$

$$h(t_2) = (1 - e^{-t_2/T})^n \quad (3.81)$$

Зв'язавши ці точки із значенням сумарної постійної часу  $T_\Sigma$  і порядком диференційного рівняння  $n$ , отримуємо достатньо простий і ефективний спосіб визначення усіх постійних часу. Такими двома точками є точки на графіку перехідної функції, за яких значення  $h(t_1) = 0,6321$  і  $t_2 = 0,5t_1$ . Порядок визначення постійних часу статичного об'єкту регулювання наступний.

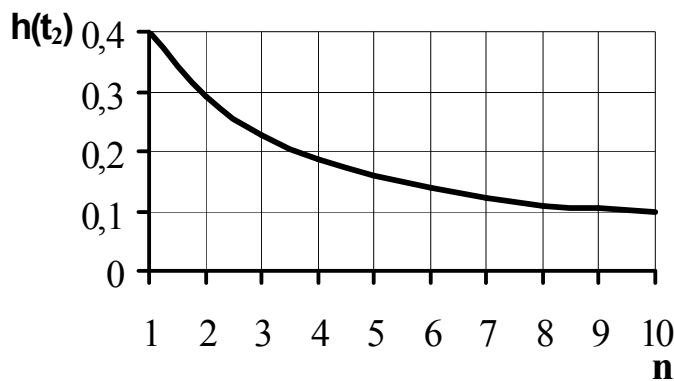


Рис.3.16. Графік для визначення порядку диференційного рівняння.

лена за формулою:

$$h(t) = \left[ 1 - (1 - 0,6321^{1/n})^{0,5} \right]^n \quad (3.82)$$

За табл. 3.2 визначається коефіцієнт  $D_n$ , а потім і постійні часу

$$T_1 = D_n T_\Sigma = D_n t_1, \quad T_2 = T_1/2, \quad T_3 = T_1/3, \quad T_4 = T_1/4, \dots \quad (3.83)$$

Визначаються  $t_1$  і  $t_2 = 0,5t_1$  при  $h(t_1) = 0,6321$  по графіку перехідної функції  $h(t)$ , а для  $t_2$  встановлюється значення  $h(t_2)$ , при цьому  $T_\Sigma = t_1$ .

По допоміжному графіку (див. рис.3.16) для значення  $h(t_2)$ , визначається порядок диференційного рівняння. Крива цього графіка  $h(t_2) = f(n)$  накрес-

Визначається сума постійних часу:

$$\Sigma T = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n \quad (3.84)$$

Виконується оцінка похибки у визначенні постійних часу, яка не повинна перевищувати  $\pm 4\%$  за співвідношенням:

$$\Sigma T / T_\Sigma = \Sigma T / t_1 = 0,96 \div 1,04. \quad (3.85)$$

Таблиця 3.2.

Залежність порядку диференційного рівняння від постійної  $D_n$ .

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_n$	0,962	0,642	0,524	0,462	0,421	0,391	0,371	0,354	0,339	0,321

*Приклад.* Визначити передаточну функцію теплообмінника, у якому рідина нагрівається водяною парою, по експериментальній кривій розгону (див. табл. 3.3), що отримана при ступінчатій зміні витрати пари на  $0,15 \text{ м/год}$  відносно номінального значення  $1 \text{ м/год}$ .

Таблиця 3.3.

Експериментальні дані в процесі отримання кривої розгону.

Час $t$ , с	0	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100
Температура $\theta$ , $^{\circ}\text{C}$	91	91	91,25	91,75	92,25	92,75	93,25	93,75	94,2	94,5	94,75
Перехідна функція $h(t)$	0	0	0,067	0,2	0,34	0,467	0,6	0,734	0,853	0,934	1,0

За формулою (3.78) визначаються значення функції  $h(t)$  і заносяться до табл. 3.3. За отриманими значеннями  $h(t)$  для  $h(t_1) = 0,6321$  обчислюється час  $t_1$  шляхом інтерполяції табличних даних.

$$t_1 = 30 + \frac{(40 - 30) \cdot (0,6321 - 0,6)}{(0,734 - 0,6)} = 32,39 \text{ с.}$$

При цьому  $t_2 = 0,5 \cdot 32,39 = 16,195 \text{ с}$ , а значення  $h(t_2)$  також шляхом інтерполяції складе:

$$h(t_2) = 0,2 + \frac{(0,34 - 0,2) \cdot (16,195 - 15)}{(92,25 - 91,75)} = 0,334.$$

По графіку (рис. 3.16) порядок рівняння  $n \approx 2$  і по табл. 3.2 визначається  $D_n = 0,642$ . Тоді постійні часу  $T_1$  і  $T_2$  за формулами (3.83) будуть дорівнювати:

$$T_1 = 0,642 \cdot 32,39 = 20,79 \text{ с};$$

$$T_2 = 20,79/2 = 10,39 \text{ с}.$$

Перевіряється за рівняннями (3.84) і (3.85) похибка у визначення постійних часу:

$$\Sigma T = 20,79 + 10,39 = 31,18 \text{ с};$$

$$\Sigma T/T_\Sigma = 31,18/32,39 = 0,963.$$

При цьому коефіцієнт передачі у безрозмірному вигляді за рівнянням (3.79) буде становити:

$$k = \frac{94,75 - 91}{91} \cdot \frac{1}{1,15 - 1} = 0,275.$$

За умови, що  $\tau = 5 \text{ с}$  передаточна функція теплообмінника по каналу “температура рідини – витрата пари” прийме вигляд:

$$W(p) = \frac{0,275e^{-5p}}{(20,79p + 1) \cdot (10,39p + 1)}.$$

Слід відзначити, що цей метод може бути досить легко реалізованим при використанні ПЕОМ.

*Графоаналітичний метод Ормана* найчастіше застосовується для апроксимації перехідної функції розв’язанням диференційного рівняння першого чи другого порядку. Визначення постійних часу  $T_1$  і  $T_2$  без додаткового запізнення  $\tau$  виконується у наступній послідовності.

За нормованою перехідною характеристикою  $h(t)$  визначається час  $t_7$  як корінь рівняння  $h(t_7) = 0,7$ . Розраховується час  $t_4$  і загальна постійна часу  $T = T_1 + T_2$  за емпіричним співвідношенням:

$$t_4 = 0,4T = t_7/3 \tag{3.86}$$

По графіку  $h(t)$  визначається ордината  $h(t_4)$ . За номограмою (див. рис. 3.17) визначається параметр  $z$  і обчислюються постійні часу:

$$T_1 = 0,416(1 + z)t_7; \tag{3.87}$$

$$T_2 = 0,416(1 - z)t_7 \tag{3.88}$$

За допомогою цієї ж номограми при  $\tau = 0$  по значенню  $z$  визначаються  $h_p(t_{20})$  і  $h_p(t_8)$ . Порівнюються ці значення з ординатами експериментальної перехідної функції для  $t_{20} = 2T$  і  $t_8 = 0,8T$ . Якщо похибка апроксимації перевищує 3% чи  $h_4 < 0,19$ , то слід вважати  $\tau \neq 0$ .

У випадку  $\tau \neq 0$  необхідно визначити вже три невідомих  $T_1$ ,  $T_2$  і  $\tau$ . Тоді аналогічно попередньому встановлюється час  $t_7$  як корінь рівняння  $h(t_7) = 0,7$  і час  $t''_4$  як корінь рівняння  $h(t''_4) = 0,191$ . Якщо  $t_4 \leq t_7/3$ , то маємо емпіричне співвідношення  $(3t''_4 - t_7) \leq 2\tau \leq (3t_4 - t_7)$ , з якого невідоме  $\tau$  обчислюється за формулою:

$$\tau = 0,5(3t''_4 - t_7) \quad (3.89)$$



Рис. 3.17. Номограма для визначення коефіцієнтів диференційного рівняння інтерполяційним методом Ормана.

чення  $T$  і  $\tau$  за формулами:

$$\tau = 0,5(3t'_4 - t_7); \quad (3.90)$$

$$T = 1,25(t_7 - t'_4) \quad (3.91)$$

Знаходяться ординати  $h_p$  перехідної функції.

$$t_4 = 0,4T + \tau; \quad (3.92)$$

$$t_8 = 0,8T + \tau; \quad (3.93)$$

$$t_{20} = 2T + \tau. \quad (3.94)$$

Наприкінці проводиться порівняння ординат  $h_P(t)$  з відповідними ординатами  $h(t)$  експериментальної кривої ідентично попередньому прикладу.

*Приклад.* Виконати апроксимацію перехідної функції, що зображена на рис. 3.18, методом Ормана. При цьому відомо, що коефіцієнт підсилення  $k = 0,25$ .

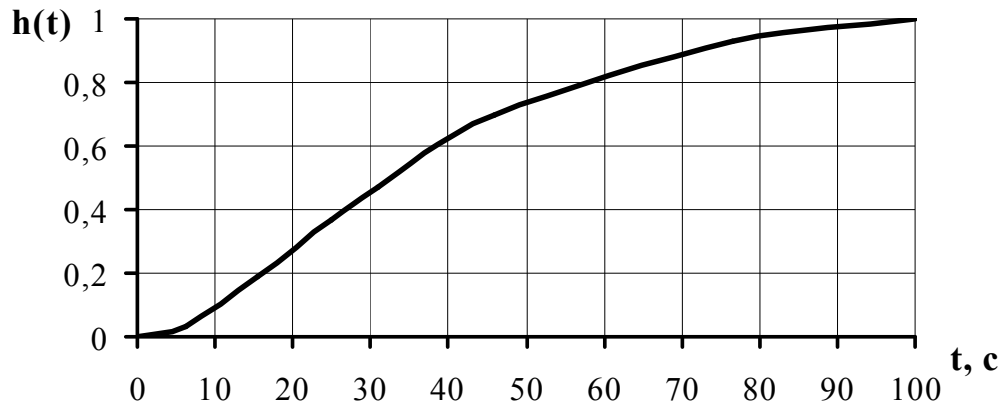


Рис. 3.18. Нормована експериментальна характеристика об'єкта по каналу регулювання.

За величиною  $h(t_7) = 0,7$  по графіку (див. рис. 3.18) визначається час  $t_7 = 46$  с. Згідно рівності (3.86) значення  $t_4 = 46/3 = 15,4$  с, а  $T = 15,4/0,4 = 38,5$  с. По номограмі (рис. 3.17) за величиною нормованої перехідної функції  $h(t_4) = 0,19$  встановлюється значення  $z^2 = 0,04$  чи  $z = 0,2$ . За формулами (3.87) і (3.88) обчислюються постійні часу:

$$T_1 = 0,416 \cdot 46(1 + 0,2) = 22,9 \text{ с};$$

$$T_2 = 0,416 \cdot 46(1 - 0,2) = 15,4 \text{ с}.$$

За допомогою номограми (рис. 3.17) для  $z^2 = 0,04$  визначаються  $h_P(t_{20}) = 0,9055$  і  $h_P(t_8) = 0,4825$ . По графіку (рис. 3.18) встановлюємо експериментальні значення ординат у відповідних точках часу:  $h(t_{20}) = h(2T) = 0,93$ ;  $h(t_8) = h(0,8T) = 0,47$ . Розраховується похибка апроксимації:

$$\frac{|0,9055 - 0,93|}{0,93} \cdot 100 = 2,6\%; \quad \frac{|0,4825 - 0,47|}{0,47} \cdot 100 = 2,6\%.$$

Отже відносні похибки апроксимації не перевищують 3%, тому слід вважати  $\tau = 0$  і експериментальну перехідну характеристику можна представити у вигляді:

$$W(p) = \frac{0,25}{(22,9p + 1) \cdot (15,4p + 1)}.$$

Спробуємо виконати апроксимацію перехідної характеристики рівнянням першого порядку із запізненням. При цьому знаходяться по експериментальній перехідній характеристиці час  $t_7 = 46$  с при  $h(t_7) = 0,7$  і час  $t'_4 = 25$  с при  $h(t'_4) = 0,35$ . Визначається час додаткового запізнення і постійна часу за формулами (3.90) і (3.91):

$$\begin{aligned}\tau &= 0,5(3 \cdot 25 - 46) = 14,5 \text{ с}; \\ T &= 1,25(46 - 25) = 26,2 \text{ с}.\end{aligned}$$

Передаточна функція прийме таку форму:

$$W(p) = \frac{0,25e^{-14,5p}}{26,2p + 1}.$$

Для перевірки виконаної апроксимації необхідно здійснити розрахунки за формулами (3.92) ÷ (3.94):

$$\begin{aligned}t_4 &= 0,4 \cdot 26,2 + 14,5 = 24,9 \text{ с}; \\ t_8 &= 0,8 \cdot 26,2 + 14,5 = 35,3 \text{ с}; \\ t_{20} &= 2 \cdot 26,2 + 14,5 = 66,5 \text{ с}.\end{aligned}$$

По графіку експериментальної перехідної характеристики визначаються для відповідних значень часу ординати:  $h(t_4) = 0,36$ ;  $h(t_8) = 0,55$ ;  $h(t_{20}) = 0,89$ . Розраховуються значення у відповідності з отриманим рівнянням у моменти часу  $t_4$ ,  $t_8$  і  $t_{20}$ , результат розв'язання якого як відомо має вигляд:  $h_P(t) = 1 - e^{-(t - \tau)/T}$ . При цьому  $h_P(t_4) = 0,33$ ,  $h_P(t_8) = 0,551$  і  $h_P(t_{20}) = 0,87$ . Порівняння відповідних значень для  $h(t)$  і  $h_P(t)$  свідчить, що за такої апроксимації похибка ще менше. Слід відзначити, якщо має місце ще й транспортне запізнення, то необхідно до отриманої величини  $\tau$  додавати значення транспортного запізнення.

*Графічний метод апроксимації перехідних функцій рівняннями другого порядку* передбачає насамперед визначення точки перегину  $w$ , у якій  $dh/dt$  має максимальне значення. Через цю точку проводять дотичну  $A$  до перетину її з віссю абсцис і лінією  $h(\infty) = 1$ . З графіка (див. рис. 3.19) безпосередньо визначаються допоміжні постійні часу  $T_f$  і  $T_c$ , а також відхилення  $a$  параметра у момент часу  $t_2 = (T_H + T_b)$ . Далі, з точки 1 перетину дотичної  $A$  з віссю абсцис, відтворюють перпендикуляр з висотою  $c$  (точка 3), яка обчислюється за емпіричною формулою:

$$c \approx a \left[ 2,73 + \frac{0,53}{1 + (150a)^{-3}} \right] \quad (3.95)$$

Через точку 3 проводиться пряма  $B$ , що паралельна дотичній  $A$ , та на осі абсцис визначається допоміжна постійна часу  $T_b$ . Постійні часу  $T_1$  і  $T_2$  обчислюються за наступними емпіричними рівняннями:

$$T_2 = T_b \left[ 1 + 10a + 1,73(30a^2) \right]^2 \text{ при } a \leq 0,005; \quad (3.96)$$

$$T_2 = (T_b + T_f) \left\{ 1 - 200(0,032 - a) \left[ 1 + \left( 0,086 + \frac{0,0015}{0,032 - a} \right)^{-1} \right]^{-1} \right\}$$

при  $a > 0,005$ ; (3.97)

$$T_1 = T_c - T_2 \quad (3.98)$$

Перевірка точності апроксимації здійснюється шляхом порівняння значень отриманої після апроксимації перехідної функції із значеннями експериментальної у 3 ÷ 5 точках. Розрахунок значень перехідної функції за результатами апроксимації здійснюється за формулою:

$$h(t) = k \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-(t-\tau)/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-(t-\tau)/T_2} \right] \quad (3.99)$$

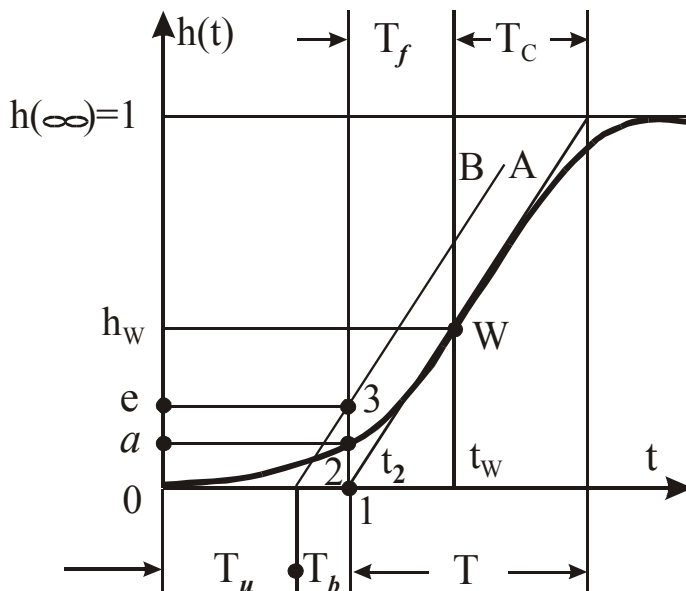


Рис. 3.19. До визначення коефіцієнтів диференційного рівняння другого порядку графічним методом.

При цьому величина похибки апроксимації визначається ідентично попередньому прикладу.

Аналізуючи розглянутий алгоритм можна відзначити, що він має як переваги, так і недоліки. До перших слід віднести простоту і наочність, а до других – складність у визначенні точки перегину, що обумовлює похибку суб'єктивного характеру.

*Апроксимація перехідних функцій астатичних об'єктів регулювання* полягає у наступному. Графік перехідної функції 1 (див. рис. 3.20) розбивається на два фіктивних графіки. Перший графік становить собою суто інтег-

руючу ланку 2, яка визначається по куту нахилу прямої. При цьому пряма проводиться паралельно сталому процесу, як показано на рис. 3.20.

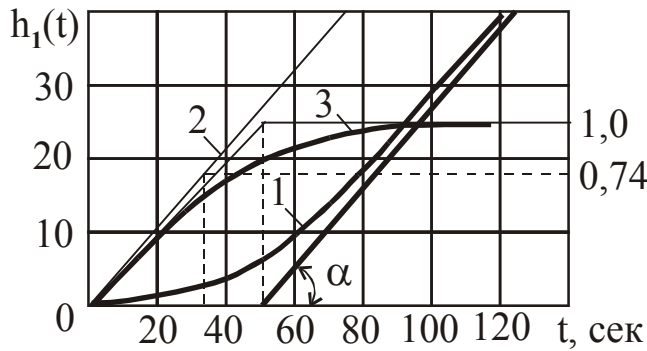


Рис. 3.20. Апроксимація перехідної функції астатичного об'єкта регулювання.

Далі з ординат проведеної прямої віднімаються ординати експериментальної перехідної функції. У підсумку отримується друга фіктивна перехідна функція статичного об'єкта регулювання 3, постійні часу якої визначаються будь-яким з наведених вище способів. Тоді передаточна функція астатичного об'єкта регулювання буде становити собою різницю передаточних функцій інтегруючої ланки  $W_2(p)$  і статичного об'єкта  $W_3(p)$ .

$$W_1(p) = W_2(p) - W_3(p) \quad (3.100)$$

За наявності запізнення передаточна функція прийме вигляд:

$$W_1(p) = [W_2(p) - W_3(p)]e^{-p\tau} \quad (3.101)$$

Постійна часу запізнення  $\tau$  виділяється наперед. У загальному випадку апроксимуюча передаточна функція має вигляд:

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{p(Tp + 1)^n} \quad (3.102)$$

або

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{p \prod_{i=1}^n (T_i p + 1)} \quad (3.103)$$

Розглянемо застосування цього методу на конкретному прикладі.

*Приклад.* Виконати апроксимацію перехідної функції, що представлена на рис. 3.20 (крива 1).



Проведемо асимптоту до цієї кривої 1 до перетину з віссю абсцис. На осі абсцис асимптота відсікає відрізок, що дорівнює  $T_2 = 50$  с. З початку координат проводимо пряму 2, паралельно асимптоті. Передаточна функція цієї прямої характеризується рівнянням:

$$W_2(p) = k/p = 1/T_1 p,$$

де  $T_1 = 1/k$  – постійна часу інтегруючої ланки;  $k = \operatorname{tg} \alpha / X(t)$  – відношення тангенсу кута нахилу функції  $h(t)$  до амплітуди діяння  $X(t) = I$ , що збурює.

Далі знаходиться різниця ординат прямої 2 і кривої 1. Результати цих обчислень зведені до табл. 3.4. У підсумку отримаємо криву 3 – перехідну функцію статичного об'єкта. Стале значення цієї перехідної функції приймається за одиницю. Передаточна функція, що апроксимує криву 1, дорівнює різниці двох передаточних функцій згідно рівняння (3.100):

$$W_1(p) = W_2(p) - W_3(p) = \frac{1}{T_1 p} - \frac{1}{T_2 p + 1} = \frac{(T_2 - T_1)p + 1}{T_1 p(T_2 p + 1)}$$

У зв'язку з тим, що величина  $(T_2 - T_1)$  достатньо мала у порівнянні з  $T_1$  і  $T_2$ , тому можна передаточну функцію  $W_1(p)$  можна представити у спрощеному вигляді:

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1 p(T_2 p + 1)} \quad (3.104)$$

Таблиця 3.4.

Результати обчислень в процесі апроксимації.

$t, \text{с}$	0	20	40	60	80	100	120
$h_1(t)$	0	2	5,5	11,5	21	33	45
$h_2(t)$	0	12	24	36	48	60	72
$h_3(t)$	0	10	18,5	24,5	27	27	27

У випадку наявності чистого запізнення передаточна функція буде мати такий вигляд:

$$W_1(p) = \frac{e^{-p\tau}}{T_1 p(T_2 p + 1)} \quad (3.105)$$

У відповідності з рис. 3.20 постійна часу  $T_2 = 50$  с, коефіцієнт  $k = \operatorname{tg} \alpha = \Delta h / \Delta t = 0,74 / 34 = 0,0217 \text{ с}^{-1}$ , а постійна часу

$T_1 = 1/0,0217 = 46$  с. Отже у підсумку передаточна функція буде мати вигляд:

$$W_1(p) = \frac{1}{46p(50p+1)} \quad \text{чи} \quad W_1(p) = \frac{0,0217}{p(50p+1)}.$$

### 3.6. СТАЛІСТЬ І ЯКІСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Сталість АСР вже була визначена вище як здатність системи, що виведена зі стану рівноваги під впливом параметрів збурення і регулювання, протягом деякого часу знову приходити у рівноважний стан. Сталість АСР і необхідна якість регулювання забезпечуються застосуванням регуляторів з тим чи іншим законом регулювання в процесі синтезу системи в цілому. При цьому визначаються значення параметрів динамічної характеристики регулятора, які носять назву параметрів настроювання.

**Закони регулювання** регуляторів безперервної дії характеризують залежність вихідної величини  $M$  від вхідної  $Y_p$ , де  $M = \Delta\mu/\mu_0$  – відносна величина зміни регулюючого діяння, а  $Y_p$  – розбіжність поміж поточним  $Y$  і заданим  $U$  значеннями параметра регулювання. За законами регулювання регулятори розподіляють на інтегральні (І), пропорційні (П), пропорційно-інтегральні (ПІ), пропорційно-диференціальні (ПД) і пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД).

*Інтегральний закон* забезпечує залежність вихідної величини  $M$  пропорційно інтегралу від вхідної величини  $Y_p$ . Рівняння динаміки І – закону має вигляд:

$$M = \frac{1}{T_{II}} \int_0^t Y_p dt, \quad (3.106)$$

де  $T_{II}$  – час інтегрування регулятора чи час зміни його вихідної величини на 1% при відхиленні вхідної величини на 1% від максимально можливого відхилення. Час  $T_{II}$  – параметр настроювання І – регулятора, з підвищенням якого діяння вхідної величини регулятора на вихідну зменшується.

Перехідна характеристика І – регулятора визначається рівнянням:

$$h(t) = t/T_I \quad (3.107)$$

Це рівняння прямої з нахилом (див. рис. 3.21). В обох випадках кут нахилу перехідних характеристик не змінюється у часі. Для визначення часу  $T_I$  по перехідній характеристиці на полі креслення наносять одиничну ступінчасту зміну вхідної величини у тому самому масштабі. Координата точки перетину цих характеристик по осі абсцис визначить величину  $T_I$ .

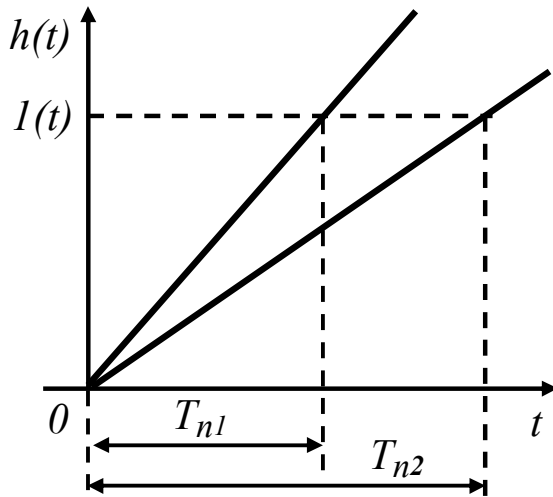


Рис. 3.21. Перехідні характеристики I – регулятора за різних значень часу інтегрування.

Основна перевага I – регулятора – відсутність залишкового відхилення параметра регулювання по закінченні процесу регулювання. Це пояснюється тим, що регулююче діяння I – регулятора на об'єкт припиняється тільки у той момент, коли відхилення параметра регулювання від заданого значення буде дорівнювати нулю. При цьому швидкість регулювання визначається постійною  $T_I$ , збільшення якої призводить до зменшення швидкості регулювання. Інтегральна ланка найчастіше уводиться у більш складні закони регулювання як одна із складових і самостійно майже не застосовується.

*Пропорційний закон* характеризується наступним рівнянням динаміки:

$$M = k_P Y_P, \quad (3.109)$$

де  $k_P$  – коефіцієнт передачі (пропорційності) регулятора.

Кожному значенню вхідної величини П – регулятора відповідає певне значення вихідної величини, тобто П – регулятор становить собою підсилюючу ланку. Перехідна характеристика і передаточна функція мають відповідно наступний вигляд:

У динамічному відношенні I регулятор становить собою інтегруючу ланку з передаточною функцією:

$$W(p) = 1/T_I p \quad (3.108)$$

Основна перевага I – регулятора – відсутність залишкового відхилення параметра регулювання по закінченні процесу регулювання. Це пояснюється тим, що регулююче діяння I – регулятора на об'єкт припиняється тільки у той момент, коли відхилення параметра регулювання від заданого значення буде дорівнювати нулю. При цьому швидкість регулювання визначається постійною  $T_I$ , збільшення якої призводить до зменшення швидкості регулювання. Інтегральна ланка найчастіше уводиться у більш складні закони регулювання як одна із складових і самостійно майже не застосовується.

$$h(t) = k_P; \quad (3.110)$$

$$W(p) = k_P. \quad (3.111)$$

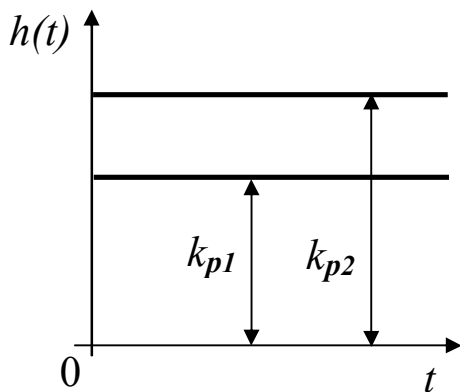


Рис. 3.22. Перехідні характеристики П – регулятора за різних значень його коефіцієнта передачі.

Вигляд перехідної характеристики наведено на рис. 3.22. Порівняння рівнянь (3.107) і (3.110) свідчить, що П – регулятор реагує на вхідні збурення значно швидше, ніж І – регулятор, тобто П – регулятори забезпечують високу швидкість регулювання, але водночас і достатньо велике залишкове відхилення параметра регулювання від заданого значення.

*Пропорційно-інтегральний закон* забезпечує зміну вихідної величини під дією пропорційної і інтегральної

складових. Рівняння динаміки ПІ – регулятора має вигляд:

$$M = k_P Y_P + \frac{1}{T_I} \int_0^t Y_P dt, \quad (3.112)$$

де  $k_P$  – коефіцієнт передачі регулятора;  $T_I$  – час інтегрування.

ПІ – регулятор має вже два параметри настроювання –  $T_I$  і  $k_P$ . Вплив вхідної величини ПІ – регулятора на вихідну підвищується із збільшенням коефіцієнту  $k_P$  і зменшення часу  $T_I$ . Перехідна характеристика ПІ – регулятора характеризується залежністю:

$$h(t) = k_P + t/T_I. \quad (3.113)$$

На рис. 3.23 наведена перехідна характеристика ПІ – регулятора, яка свідчить, що пропорційна складова діє одночасно із зміною вхідної величини регулятора, а інтегральна складова – і після зміни вхідної величини. Привівши рівняння (3.112) до операторної форми і виконавши перетворення, отримаємо передаточну функцію регулятора:

$$W(p) = k_P + 1/T_I p. \quad (3.114)$$

Порівняння рівнянь (3.107), (3.110) і (3.113) показує, що за однакової зміни вхідної величини ІІІ – регулятор буде реагувати з деяким відставанням у порівнянні з ІІ – регулятором, але завжди буде випереджати дію І – регулятора.

*Пропорційно-диференційні і пропорційно-інтегрально-диференційні закони* характеризуються відповідно наступними рівняннями динаміки:

$$M = k_P Y_P + T_D \frac{dY_P}{dt}; \quad (3.115)$$

$$M = k_P Y_P + T_I \int_0^t Y_P dt + T_D \frac{dY_P}{dt}, \quad (3.116)$$

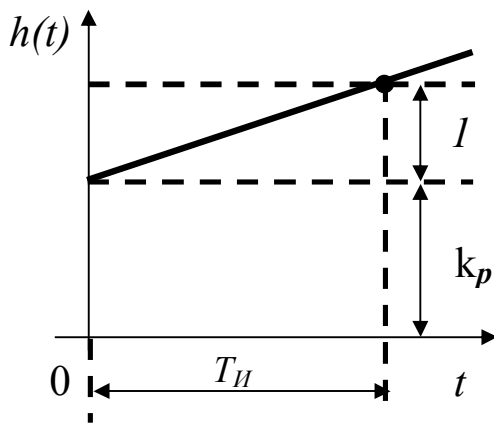


Рис. 3.23. Перехідна характеристика ІІІ – регулятора.

де  $k_P$  – коефіцієнт передачі;  $T_I$  – час інтегрування;  $T_D$  час диференціювання.

Рівняння (3.115) і (3.116) свідчать, що ПД – регулятор має два параметри настроювання  $k_P$  і  $T_D$ , а ПІД – регулятор має три параметри настроювання  $k_P$ ,  $T_D$  і  $T_I$ . Вплив вхідної величини у цих регуляторах на вихідну підвищується із збільшенням коефіцієнту  $k_P$  і часу  $T_D$  і зменшенням часу  $T_I$ . Передаточні функції у відповідності з рівняннями (3.109) і (3.110)

будуть мати вигляд:

$$W(p) = k_P + T_D p; \quad (3.117)$$

$$W(p) = k_P + l/T_I p + T_D p. \quad (3.118)$$

За наявності Д – складової вихідна величина регулятора  $M$  змінюється з деяким випередженням відносно вхідної величини, яке пропорційно швидкості її зміни  $dY_P/dt$ . Тому прийнято Д – регулятори називати регуляторами попередження. У зв'язку з цим регулятор буде реагувати не тільки на зміну вхідної величини, але і на зміну її швидкості, тобто на інтенсивність її зміни. Отже, ПД – регулятор вступає у роботу навіть швидше, ніж ІІ – регулятор. Наявність у законі регулювання впливу за похідною призводить до підсилення

впливу регулятора на перехідний процес, при цьому скорочується час перехідного процесу і зменшуються коливання параметра (динамічна помилка) регулювання.

Перехідна характеристика ПД – регулятора наведена на рис. 3.24, яка відрізняється від перехідної характеристики П – регулятора більшою зміною вихідної величини одразу ж після зміни величини  $Y_p$ . Протягом деякого часу відхилення  $M$  зменшується і величина  $M$  стає постійною, дорівнюючи вихідній величині у відповідності із значенням коефіцієнта передачі  $k_p$  П – складової регулятора. Таке поступове зменшення обумовлене тим, що практично ідеальну диференціюючу ланку реалізувати неможливо. Тому у структурі реальних конструкцій ПД чи ПД – регуляторів завжди присутнє більш чи менш виражена аперіодична (інерційна) ланка першого порядку, з урахуванням якої передаточні функції реальних ПД і ПД – регуляторів можуть бути представлені у наступній формі:

$$W(p) = \frac{k_p + T_D p}{T_\delta p + 1}; \quad (3.119)$$

$$W(p) = \frac{k_p + (1/T_I p) + T_D p}{T_\delta p + 1}. \quad (3.120)$$

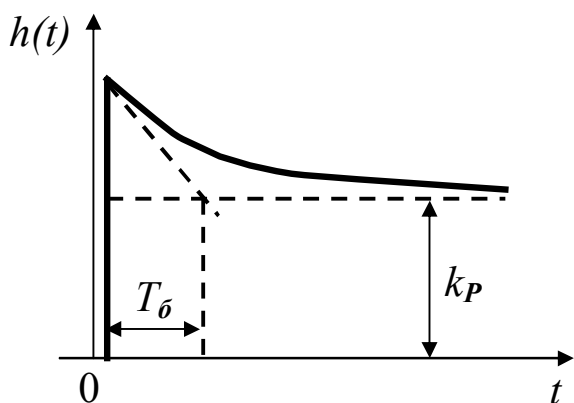


Рис. 3.24. Перехідна характеристика ПД – регулятора.

де  $T_\delta$  – постійна часу, яка враховує інерційність аперіодичної ланки. Постійну  $T_\delta$  ще іноді називають “баластною”.

Наявність цієї баластної інерційності і позначається на перехідній характеристиці, що набуває такого вигляду, як показано на рис. 3.24.

Переважає більшість АСР структурно сталі, проте вони ста-

новляться несталими при деякому сполученні чисельних значень параметрів динамічної характеристики об’єкта регулювання і параметрів настроювання регулятора.

**Прямий аналіз АСР на сталість і якість** можна провести шляхом розрахунку перехідного процесу замкненої системи регулювання. Для цього за структурною схемою АСР і передаточними функціями її елементів складається передаточна функція системи в ці-

лону. По цій передаточній функції встановлюється операторне рівняння системи, визначається зображення перехідної функції, після чого переходять до оригіналу, а далі будується графік перехідного процесу. За цим графіком здійснюється оцінка якості. Розглянемо застосування цього методу на окремих найпростіших прикладах.

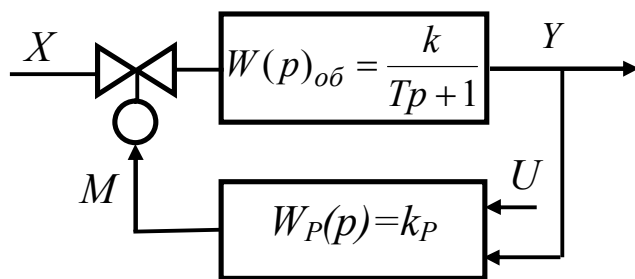


Рис. 3.25. Структурна схема АСР статичного об'єкта першого порядку з П – регулятором.

відповідності з рівнянням (3.22) прийме вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + kk_P + 1} \quad (3.121)$$

Зображення функції перехідного процесу у цій АСР за умови внесення стрибкоподібного збурення виразиться рівнянням:

$$Y(p) = \frac{kX_0}{p(1 + kk_P) \cdot \left(1 + \frac{Tp}{kk_P + 1}\right)} \quad (3.122)$$

Оригінал для останнього рівняння у відповідності з табл. 3.1 буде мати такий вигляд:

$$Y(t) = \frac{kX_0}{(1 + kk_P)} \left[ 1 - e^{-\frac{(1+kk_P)t}{T}} \right] \quad (3.123)$$

Отже, для АСР представленої на рис.3.25 перехідний процес має не коливальну форму. Час регулювання зменшується з підвищенням параметра настроювання  $k_P$  і по закінченні перехідного процесу величина залишкового відхилення (статична помилка регулювання)  $Y_{CT}$  буде дорівнювати:

$$Y_{CT} = kX_0 / (1 + kk_P) \quad (3.124)$$

*Приклад.* Для структурної схеми АСР, що представлена на рис. 3.25, необхідно визначити рівняння перехідного процесу за умови внесення стрибкоподібного збурення по каналу регулювання з амплітудою  $X_0$ .

Еквівалентна передаточна функція для представленої на рис. 3.25 структурної схеми у

Для зменшення  $Y_{CT}$  слід збільшувати значення  $k_P$ . Проте за будь-яких значень  $k_P$  АСР буде сталою.

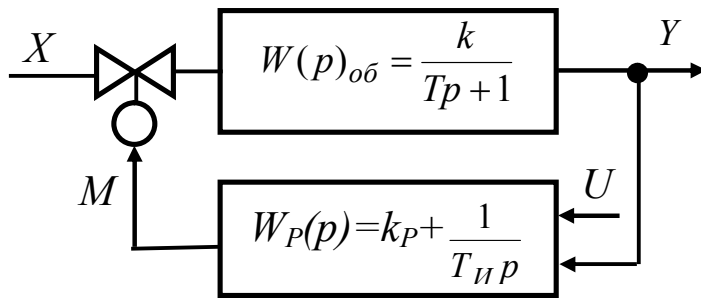


Рис. 3.26. Структурна схема АСР статичного об'єкта першого порядку з ПІ – регулятором.

Рівнянням (3.22) буде мати вигляд:

$$W(p) = \frac{kp}{Tp^2 + (1 + kk_P)p + (k/T_{II})}. \quad (3.125)$$

Зображення функції перехідного процесу за стрибкоподібного збурення по каналу регулювання буде представлено рівнянням:

$$Y(p) = \frac{kX_0}{T \left[ p^2 + \frac{(1 + kk_P)}{T} \cdot p + \frac{k}{T_{II}T} \right]}. \quad (3.126)$$

Оригінал для цієї функції (див. табл. 3.1) прийме наступну форму:

$$Y(t) = \frac{kX_0}{T \sqrt{\frac{k}{T_{II}T} - \frac{(1 + kk_P)^2}{4T^2}}} e^{-\frac{(1 + kk_P)t}{2T}} \cdot \text{Sin} \left( \sqrt{\frac{k}{T_{II}T} - \frac{(1 + kk_P)^2}{4T^2}} t \right) \\ \text{при } k/T_{II}T > (1 + kk_P)^2/4T^2 \quad (3.127)$$

Графік перехідного процесу згідно рівняння (3.127) наведено на рис. 3.27 (крива 1). Якщо  $k/T_{II}T < (1 + kk_P)^2/4T^2$ , то перехідний процес буде аперіодичним (крива 2).

*Приклад.* Для структурної схеми АСР, що представлена на рис. 3.26, необхідно визначити рівняння перехідного процесу за умови внесення стрибкоподібного збурення по каналу регулювання з амплітудою  $X_0$ .

Передаточна функція замкненої АСР (див. рис. 3.26) у відповідності з



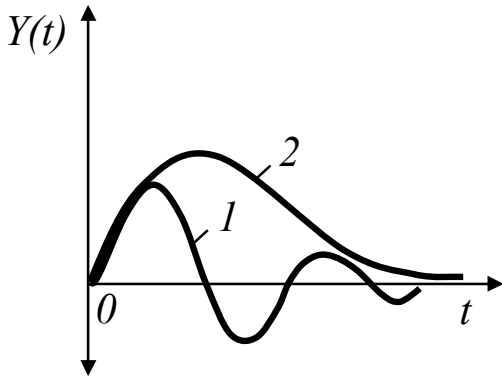


Рис. 3.27. Графіки переходних процесів в АСР для статичного об'єкта першого порядку з ПІ – регулятором: 1 – коливальний затухаючий; 2 – аперіодичний.

Однак достатньо нескладно розв'язуються диференційні рівняння тільки першого і другого порядків. Розв'язання рівнянь більш високого порядку пов'язано з подоланням деяких складностей, що зростають з підвищенням порядку рівнянь.

**Необхідні і достатні умови сталості динамічних систем у загальному вигляді були визначені А.М. Ляпуновим, який довів, що судити про сталість лінійної динамічної системи можна на основі аналізу її вільного руху, тобто зміні вихідного сигналу системи після зняття діяння,**

що збудує. Якщо вихідний сигнал системи за умови вільного руху повертається до заданої величини, то така система стала.

Вільний рух лінійної АСР характеризується розв'язанням її диференційного рівняння (3.15), права частина якого дорівнює нулю. Це рівняння в операторній формі називається характеристичним рівнянням АСР і має вигляд:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (3.128)$$

Як показано вище (див. розд. 3.3), розв'язання диференційного рівняння (3.128) у загальному випадку становить собою суму експонент, показники степені яких дорівнюють добутку коренів характеристичного рівняння на час:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{-p_i t}, \quad (3.129)$$

де  $n$  – порядок характеристичного рівняння;  $C_i$  – постійні інтегрування.

Аналіз цього рівняння свідчить, що  $Y(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , якщо усі  $p_i < 0$ . У цьому випадку усі експоненти, які визначають переходний процес, є такими, що убивають. Таким чином, для сталої АСР необхідно і достатньо, щоб усі дійсні корені  $p_i$  характеристичного рівняння системи чи дійсні частини  $\alpha_i$  усіх його комплексних коре-

нів були негативними. Якщо хоча б один корінь характеристичного рівняння позитивний чи має позитивну дійсну частину, то така АСР не буде сталою, що обумовлено необмеженим зростанням параметра регулювання в умовах вільного руху.

Отже аналіз сталості лінійних АСР може бути зведеним до обчислення коренів їх характеристичних рівнянь. Для систем невеликих порядків обчислення коренів не викликає труднощів. Однак з підвищенням порядку  $n \geq 4$  диференційного рівняння АСР обчислення коренів її характеристичного рівняння занадто ускладнюється. Тому на практиці для аналізу сталості застосовують низку непрямих оцінок, що отримали назву *критеріїв сталості*. Ці оцінки були отримані на основі необхідних і достатніх умов сталості, які дозволяють судити про сталість системи без обчислення коренів її характеристичного рівняння. Серед критеріїв сталості розрізняють алгебраїчні і частотні, які і використовуються в процесі синтезу АСР. Викладення цих критеріїв вимагає від студентів більш глибокої математичної підготовки і тому у нинішньому виданні не розглядаються. Сталість є необхідною, але не єдиною вимогою до АСР. Окрім сталості до перехідного процесу ставляться вимоги, щодо якості його протікання.

*Якість регулювання* оцінюється різними показниками, основні з яких як час регулювання, залишкове відхилення параметра регулювання, пере регулювання і динамічна помилка регулювання вже були розглянуті у розд. 3.2. Однак вимога одночасної мінімізації усіх цих показників не завжди може бути дотримана. Тому про якість регулювання найчастіше судять по узагальненому показнику – по інтегралу від квадрату відхилення параметра регулювання:

$$I = \int_0^{\infty} (Y - Y_{\infty})^2 dt. \quad (3.130)$$

Чим менше статична і динамічна помилки, час регулювання та ін., тим вище якість перехідного процесу, тобто менше величина інтегралу  $I$ . Для досягнення необхідної якості регулювання при обраному типовому перехідному процесі слід визначити придатний закон регулювання і знайти значення параметрів його настроювання.

Властивості складних об'єктів, перехідні процеси у яких описуються рівняннями високих порядків, визначають найчастіше експериментально. Накопичений практичний досвід і проведені дослі-

дження свідчать, що з достатньою точністю ці складні об'єкти по каналу регулювання чи збурення можна замінювати об'єктами 1 – го порядку із запізненням. При цьому їх рівняння динаміки, як вже відомо, мають наступний вигляд:

за наявності самовирівнювання (сталі об'єкти)

$$T \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = kX(t - \tau); \quad (3.131)$$

за відсутності самовирівнювання (астатичні об'єкти)

$$T_a \frac{dY(t)}{dt} = X(t - \tau), \quad (3.132)$$

де  $T$  – постійна часу об'єкта;  $T_a$  – час розгону об'єкта.

Отже для виявлення динамічних властивостей необхідно: у першому випадку знайти чисельні значення  $k$ ,  $T$  і  $\tau$ , а другому – значення  $T_a$  і  $\tau$ . Ці величини можуть бути визначені по експериментально отриманим перехідним характеристикам одним із способів, наведених у розд. 3.5. Знання динамічних параметрів об'єкта дозволяє здійснювати синтез АСР на задану якість, в процесі якого встановлюються характер дії регулятора і закон регулювання та визначаються чисельні значення параметрів настроювання регулятора для певного типу перехідного процесу.

**Вибір типу регулятора** (закону регулювання) передбачає насамперед встановлення характеру його дії (релейний, неперервний чи імпульсний). Характер дії регулятора орієнтовно встановлюється, виходячи з величини відношення часу чистого запізнення  $\tau$  об'єкта регулювання до його постійної часу  $T$  чи часу розгону  $T_a$ , тобто  $\tau/T$  чи  $\tau/T_a$ : при  $\tau/T(\tau/T_a) < 0,2$  – позиційний регулятор; при  $\tau/T(\tau/T_a) < 1$  – неперервний регулятор; при  $\tau/T(\tau/T_a) > 1$  – імпульсний регулятор або багатоконтурна система регулювання (іноді достатньо каскадної).

*Процес вибору закону регулювання для регуляторів неперервної дії* здійснюється з урахуванням динамічних параметрів (властивостей) технологічного об'єкта, максимальної величини збурення  $X_B$ , прийнятого для певного технологічного об'єкта типового перехідного процесу (аперіодичний, з 20%-вим пере регулюванням, з мінімальною квадратичною площиною відхилення), припустимих значень

показників якості процесу регулювання (динамічна помилка  $Y_{ДП}$ , статична помилка  $Y_{СП}$ , час регулювання  $t_{РП}$ ).

Підбір регулятора починають з визначення максимального динамічного відхилення параметра регулювання у замкнутому контурі ( $Y_I$  – для сталих об'єктів;  $\bar{Y}_1$  – для астатичних об'єктів). При цьому повинні виконуватись вимоги:

$$Y_I < Y_{ДП} \text{ чи } \bar{Y}_1 < Y_{ДП} \quad (3.133)$$

Для сталих об'єктів величина  $Y_I$  визначається за рівнянням:

$$Y_I = R_D k X_B \quad (3.134)$$

де  $R_D$  – динамічний коефіцієнт регулювання у системах із сталими об'єктами;  $X_B$  регулююче діяння, що викликає таку ж зміну параметра регулювання, як і максимальне діяння  $N_{МАКС}$ , що збурює;  $k$  – коефіцієнт передачі об'єкта по каналу регулюючого діяння.

Коефіцієнт  $R_D$  характеризує степінь діяння регулятора на об'єкт і для сталих об'єктів його знаходять за формулою:

$$R_D = Y_I / Y_\infty, \quad (3.135)$$

де  $Y_\infty = Y_B$  – максимальне відхилення параметра регулювання сталого об'єкта при нанесенні на нього діяння  $N_{МАКС}$ , що збурює, чи регулюючого діяння  $X_B$ .

Характер динамічних відхилень  $Y_B$  (для розімкнутої АСР) і  $Y_I$  (для замкнутої АСР) наведений на рис. 3.28а. У відповідності з рівнянням (3.134) виходить, що з підвищенням коефіцієнту  $R_D$  динамічне відхилення  $Y_I$  зростає.

Для астатичних (нейтральних) об'єктів величина  $\bar{Y}_1$  визначається за формулою:

$$\bar{Y}_1 = \bar{R}_D X_B, \quad (3.136)$$

де  $\bar{R}_D$  – динамічний коефіцієнт регулювання у системах з астатичними об'єктами.

Коефіцієнт  $\bar{R}_D$  обчислюється за рівнянням:

$$\bar{R}_D = \bar{Y}_1 / \bar{Y}_B, \quad (3.137)$$

де  $\bar{Y}_B = X_B$  – динамічне відхилення параметра регулювання астатичного об'єкта за час, що дорівнює  $T_a$ , при нанесенні на об'єкт регулюючого діяння  $X_B$ , еквівалентного максимально можливого діянню  $N_{\text{МАКС}}$ , що збурює.

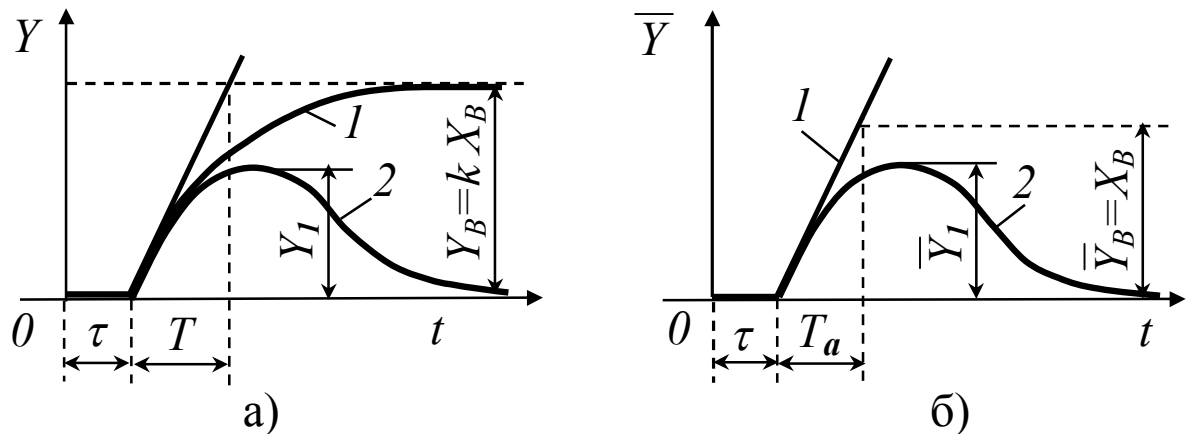


Рис. 3.28. Динамічні відхилення на сталих (а) і астатичних (б) об'єктах: 1 – для об'єкта; 2 – для замкнутої АСР.

Величини коефіцієнтів  $R_D$  і  $\bar{R}_D$ , які у замкнутій системі регулювання забезпечують протікання заданого типового перехідного процесу, знаходять по графікам (див. рис. 3.29 і 3.30).

По значенням  $R_D$  і  $\bar{R}_D$ , що визначаються спочатку для І – регулятора, за рівняннями (3.134) і (3.136) обчислюються значення  $Y_1$  і  $\bar{Y}_1$ , а далі виконується порівняння їх з припустимими за умовою (3.133). Якщо ця умова виконується, то І – регулятор перевіряється на відповідність часу регулювання  $t_p$  нерівності:

$$t_p < t_{p\Pi} \quad (3.138)$$

При неможливості забезпечення заданих динамічного відхилення і часу регулювання необхідно послідовно перейти до перевірки більш складних законів регулювання для задоволення умов (3.133) і (3.138). Слід відзначити, що для астатичних об'єктів перевірка починається з ІІ – регулятора.

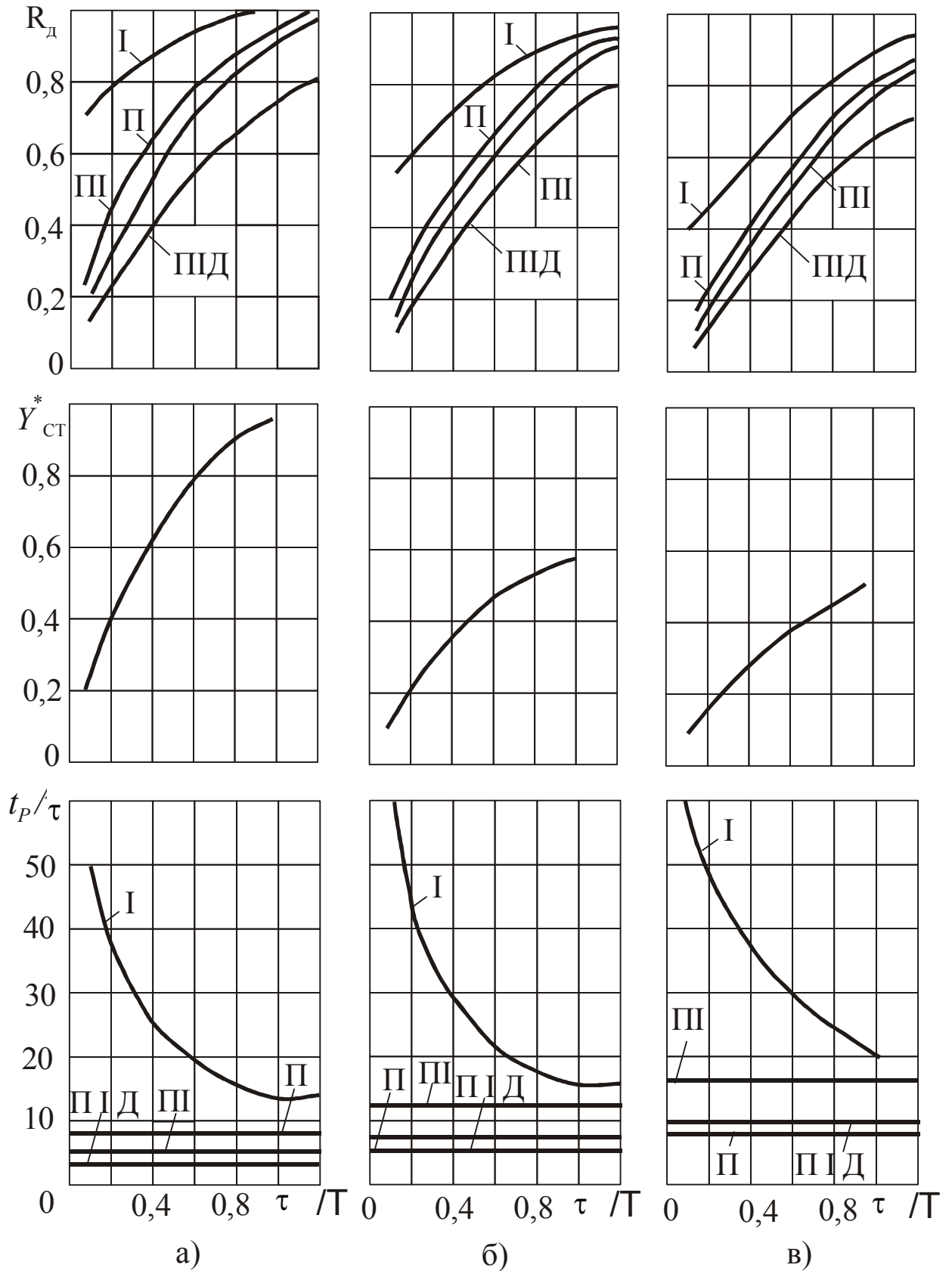


Рис. 3.29. Динамічні коефіцієнти регулювання  $R_{дв}$ , статичні помилки регулювання  $Y_{ст}^*$  і час регулювання  $t_p/t$  сталих об'єктів для різних типових перехідних процесів: а - аперіодичний; б - з 20 %-им перерегулюванням; в - з мінімальною квадратичною площиною відхилення.

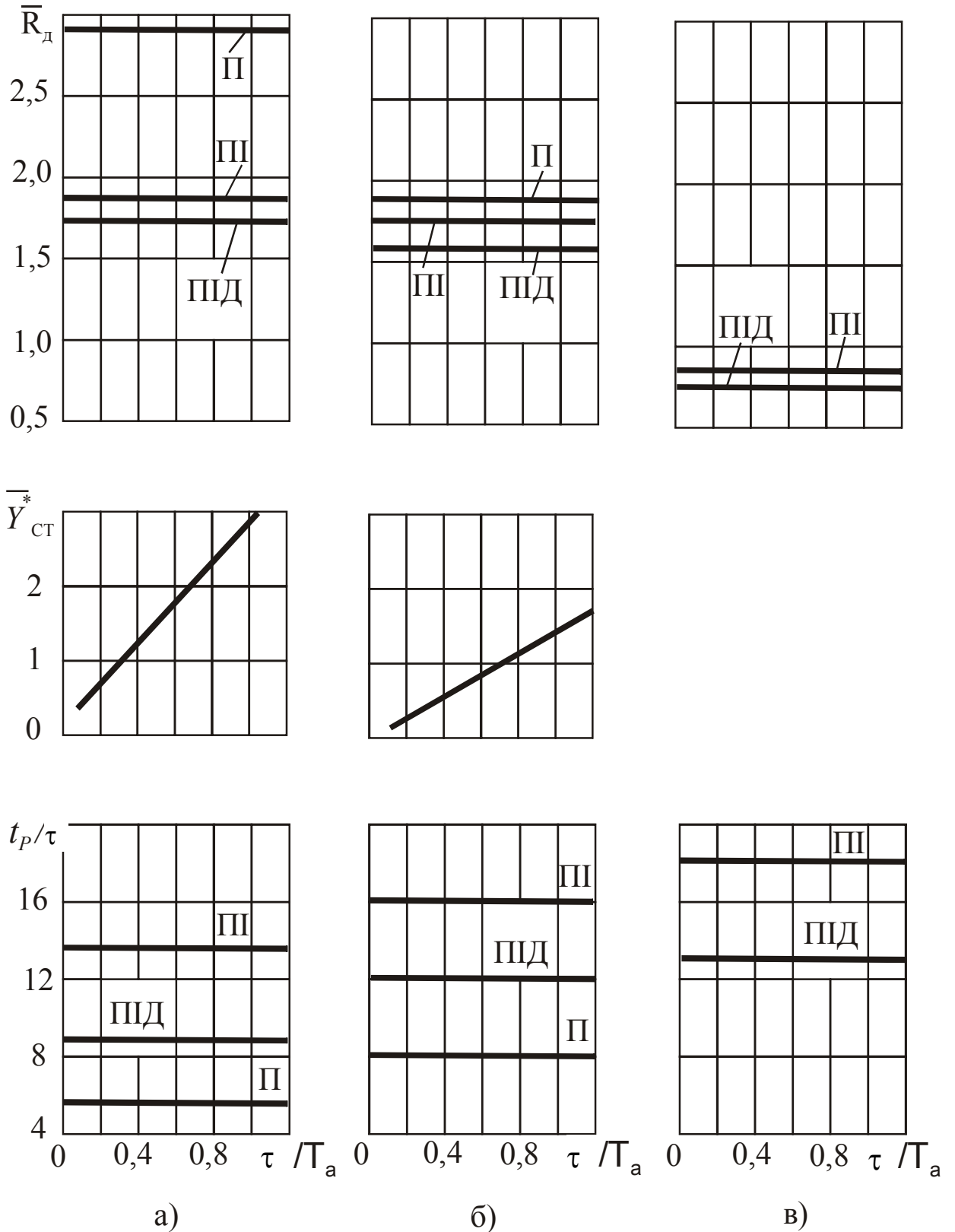


Рис. 3.30. Динамічні коефіцієнти регулювання  $\bar{R}_d$ , статичні помилки регулювання  $\bar{Y}_{CT}^*$  і час регулювання  $t_p/\tau$  астатичних об'єктів для різних типових перехідних процесів: а – аперіодичний; б – з 20%-им перерегулюванням; в – з мінімальною квадратичною площиною відхилення.

У разі вибору П – регулятора додатково перевіряється величина статичної помилки регулювання ( $Y_{CT}$  – для статичних чи  $\bar{Y}_{CT}$  – для астатичних об’єктів), яка повинна відповідати нерівності:

$$Y_{CT} < Y_{СП} \text{ чи } \bar{Y}_{CT} < Y_{СП} \quad (3.139)$$

Статична помилка регулювання визначається за рівняннями:

$$\text{для сталих об’єктів } Y_{CT} = Y_{CT}^* k X_B; \quad (3.140)$$

$$\text{для астатичних об’єктів } \bar{Y}_{CT} = \bar{Y}_{CT}^* X_B, \quad (3.141)$$

де  $Y_{CT}^*$  і  $\bar{Y}_{CT}^*$  відносні значення статичної помилки регулювання, що дорівнюють відповідно  $Y_{CT}$  чи  $\bar{Y}_{CT}$  при  $k = 1$  і  $X_B = 1$ .

Значення  $Y_{CT}^*$  і  $\bar{Y}_{CT}^*$  знаходяться по відповідним графікам, представленим на рис. 3.29 і 3.30. Якщо отримане значення  $\bar{Y}_{CT}^*$  чи  $Y_{CT}^*$  перевищує припустиме  $Y_{СП}$ , то слід переходити до регуляторів, що містять І – складову, тобто ПІ чи ПІД – регулятори. Після чого знову перевіряється виконання умови (3.138). При цьому значення  $t_p/\tau$ , за яких у АСР забезпечується протікання заданого типового перехідного процесу, знаходиться по графікам (див. рис 3.29 і 3.30). Якщо жоден з розглянутих законів регулювання не дозволяє отримати перехідний процес параметра регулювання, який не виходив би за межі заданих показників якості, то для регулювання цього параметра слід замість одноконтурної використати багатоконтурну АСР.

*Регулятори з релейним законом регулювання найбільш прості як за законом регулювання, так і за конструктивним виконанням. Релейні (двопозиційні) регулятори відпрацьовують вихідні діяння у відповідності з рівнянням (див. рис. 3.31):*

$$M = \begin{cases} 0 \text{ при } Y_p < -\Delta/2; \\ 1 \text{ при } Y_p > \Delta/2; \\ 0 \text{ при } -\Delta/2 < Y_p < \Delta/2 \text{ і } dY_p/dt > 0; \\ 1 \text{ при } -\Delta/2 < Y_p < \Delta/2 \text{ і } dY_p/dt < 0. \end{cases} \quad (3.142)$$

де  $\Delta$  - зона вороття чи зона нечутливості, у межах якої зміна параметра регулювання не викликає спрацьовування регулятора;  $dY_p/dt$  – швидкість зміни вхідного сигналу, яка у рівнянні (3.142) свідчить



про напрямок зміни вхідного сигналу  $Y_P$ : спадання  $-dY_P/dt < 0$  або зростання  $-dY_P/dt > 0$ .

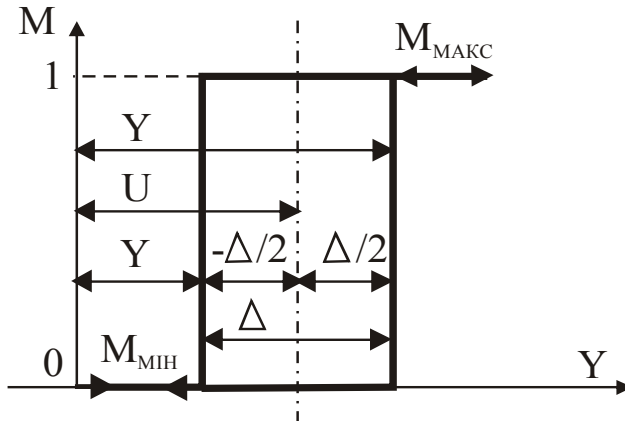


Рис. 3.31. Статична характеристика релейного (двопозиційного) регулятора.

Параметром настроювання цих регуляторів є зона вороття, визначення якої здійснюється у ході синтезу АСР. Можливість застосування у АСР релейного регулятора передбачає насамперед завдання або визначення показників якості автоколивального процесу в процесі регулювання, графік якого наведений на рис. 3.30.

В ході перевірки на можливість застосування релейного закону регулювання після визначення динамічних властивостей об'єкта слід встановити показники якості: припустима амплітуда коливань  $Y_A$ , період  $T_A$  автоколивань і припустима величина залишкового відхилення  $Y_{СП}$  від заданого  $U$  (див. рис. 3.32).

При застосуванні регулятора на статичному об'єкті значення  $Y_A$  визначається по графіку, представлено на рис. 3.33а. При цьому величина  $Y_A$  виражена не абсолютним значенням, а відношенням її до потенційного відхилення параметра регулювання, яке у свою чергу виражене через коефіцієнт підсилення об'єкта  $k$  і збурення  $X_B$ . Отримавши з рис. 3.33а величину відношення  $Y_A/kX_B$  та маючи значення динамічних параметрів об'єкта можна легко визначити показник  $Y_A$ . Зона нечутливості  $\Delta$  на рис. 3.33а задана також не абсолютним значенням, а у вигляді долі потенційного відхилення параметра регулювання.

Значення  $T_A$  визначається по графіку (див. рис. 3.33б) залежності  $T_A/\tau$  від навантаження (збурення)  $X_B$ . На рис. 3.33б наведено графік залежності відношення  $T_{ВКЛ}/T_{ВИК}$  (відношення часу перебування регулюючого органу у двох крайніх положеннях) від  $X_B$ . Представлені графіки відповідають випадку, коли зона нечутливості близька до нуля. Залишкове відхилення  $Y_{СТ}$  визначається по графіку залежності  $Y_{СТ}/Y_A$  від навантаження  $X_B$  (див. рис. 3.33в).

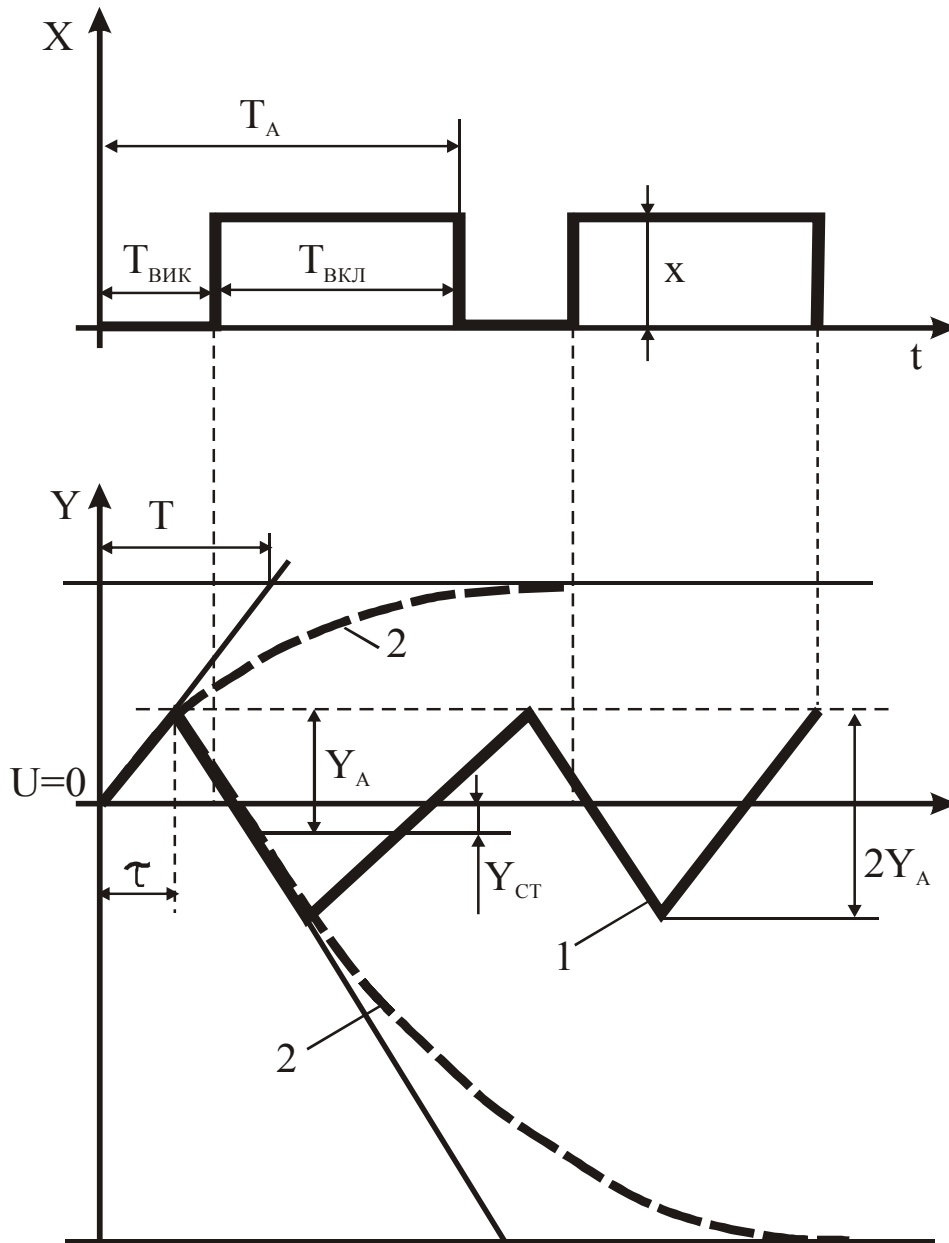


Рис. 3.32. Графік автоколивального перехідного процесу при двопозиційному законі регулювання: 1 - відхилення параметра регулювання  $Y$  від заданого значення  $U$  у часі; 2 - відхилення параметра регулювання  $Y$  у статичному об'єкті за відсутності регулятора;  $Y_{\text{СТ}}$  - середнє залишкове відхилення параметра регулювання.

При застосуванні двопозиційного закону регулювання на астатичному об'єкті значення  $Y_A$  визначається по графіку залежності  $Y_A/X_B$  від  $\tau/T_a$  (див рис. 3.34а), значення  $T_A$  – по графіку залежності  $T_A/\Delta$  від  $X_B$  (див. рис. 3.34б). Зона нечутливості у наведених графіках також близька до нуля. Значення  $Y_{\text{СТ}}$  встановлюється по графіку залежності  $Y_{\text{СТ}}/Y_A$  від  $X_B$  (див. рис. 3.34в).

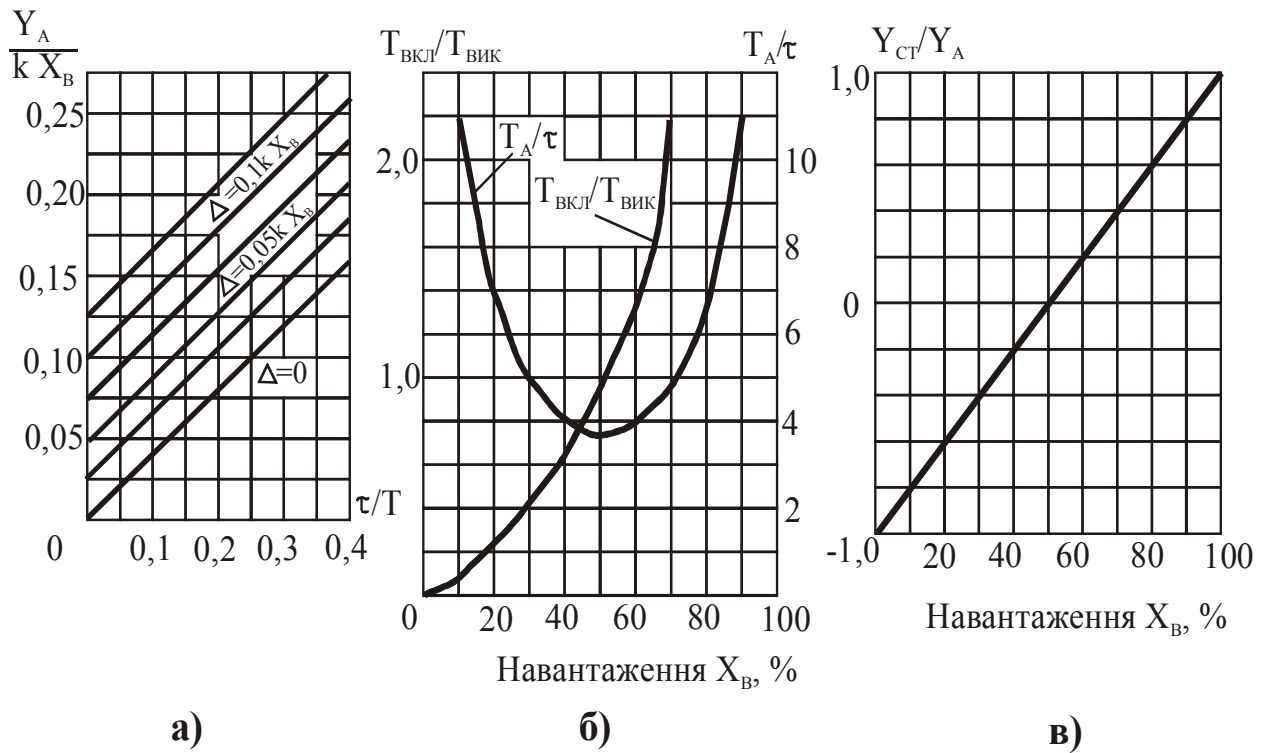


Рис. 3.33. Графіки показників якості перехідного процесу регулювання статичного об'єкту з двопозиційним регулятором: а – амплітуда автоколивань  $Y_A$ ; б – період автоколивань  $T_A$ ; в – залишкове відхилення параметра регулювання  $Y_{СТ}$ .

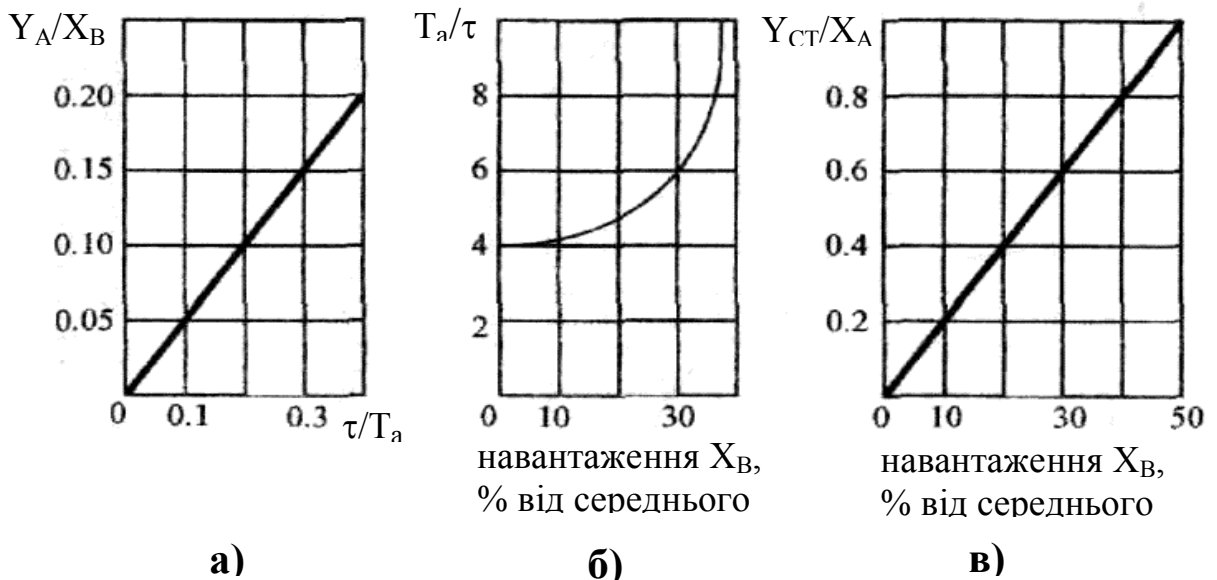


Рис. 3.34. Графіки показників якості перехідного процесу регулювання астатичного об'єкту з релейним регулятором: а – амплітуда автоколивань  $Y_A$ ; б – період автоколивань  $T_a$ ; в – залишкове відхилення параметра регулювання  $Y_{СТ}$ .

Послідовність перевірки можливості застосування релейного регулятора наступна. По графікам визначають для певного  $\tau/T$  чи  $\tau/T_a$  величину  $\Delta$ , яка може забезпечити необхідне значення  $Y_A$ . Якщо

ця величина реальна, тобто можливо обрати вимірювальний прилад і регулятор з такою  $\Delta$ , перевіряють величину  $Y_{CT}$ . Ці показники не повинні перевищувати заданих припустимих значень.

**Визначення параметрів настроювання регуляторів** може здійснюватись: експериментальним пошуком безпосередньо на діючий АСР об'єкта, розрахунковим шляхом, а також комбінованим методом шляхом поєднання попередніх двох.

*Експериментальний метод* пошуку передбачає визначення оптимальних параметрів настроювання регуляторів безпосередньо на діючому технологічному об'єкті. Це надійний, але досить трудомісткий шлях і ускладнений тим, що на реальному об'єкті не завжди припустимі великі відхилення параметрів від заданих технологічним регламентом значень.

*Розрахунковий метод*, частково вже розглянутий раніше, полягає у розв'язанні рівнянь динаміки системи при одиничному ступінчатому збуренні відносно вихідної величини (параметра регулювання). Далі підставляючи в отримане для вихідної величини рівняння конкретні значення чи різні комбінації параметрів настроювання регуляторів, отримують декілька перехідних процесів. Аналізуючи ці перехідні процеси обирають такий, що в найменшій мірі відрізняється від заданого типового перехідного процесу. Значення параметрів настроювання, що відповідають обраному перехідному процесу, приймають у якості оптимальних.

Узагальнення результатів математичного моделювання великої кількості одноконтурних АСР різних об'єктів (3.131) і (3.132) за допомогою обчислювальних машин дозволило отримати формули і графічні залежності (номограми), за якими визначаються оптимальні значення параметрів настроювання регуляторів. Слід відзначити, що отримані за номограмами чисельні значення параметрів настроювання ПІ – і ПІД – регуляторів відносяться до регуляторів із залежними параметрами настроювання  $T_{ИЗ}$  (постійна часу іподрому) і  $T_{П}$  (постійна часу попередження). Тому, якщо вибраний засіб регулювання має незалежні органи настроювання, то необхідно провести перерахунок за формулами:

$$T_{И} = T_{ИЗ} / k_{P} ; \quad (3.143)$$

$$T_{Д} = T_{П} k_{P}. \quad (3.144)$$

Крім того вибір типу і розрахунки параметрів настроювання регулятора можуть здійснюватись як у відносних, так і в абсолютних

одиницях, тобто без перерахунку у відносні одиниці заданих показників якості та отриманих динамічних параметрів об'єкта.

Графічні залежності оптимальних параметрів настроювання І-, П-, ПІ- і ПІД – регуляторів, встановлених на сталих об'єктах, рівняння динаміки яких характеризуються виразом (3.131), наведені на рис. 3.35. На цих графіках по осям абсцис відкладені відношення  $\tau/T$  (логарифмічна шкала) а по осям ординат – значення параметрів настроювання регуляторів.

По графікам для І – регулятора спочатку визначається добуток величин, що відкладені по осі ординат, і по ньому обчислюється значення величини  $k_{PI}$  – умовного коефіцієнта передачі І- регулятора. Коефіцієнт  $k_{PI}$  характеризує швидкість переміщення затвору виконавчого пристрою АСР за постійності величини відхилення поточного значення параметра регулювання від заданого. Для П-, ПІ- і ПІД- регуляторів по значенню коефіцієнта передачі системи регулювання  $k_C = k k_P$  з відомим значенням  $k$  об'єкта визначається коефіцієнт передачі регулятора  $k_P$ . Значення часу іподрому  $T_{ИЗ}$  і часу попередження  $T_{П}$  на графіках наведені по відношенню до часу запізнення об'єкта  $\tau$ .

Залежність оптимальних значень параметрів настроювання П-, ПІ- і ПІД – регуляторів від динамічних властивостей астатичних об'єктів, рівняння динаміки яких мають вигляд (3.132), представлені на рис. 3.36.

Коефіцієнт передачі регулятора  $k_P$  визначається по графікам. При цьому час  $T_{ИЗ}$  і час  $T_{П}$  на ведені на графіках також по відношенню до часу  $\tau$ . Розглянемо визначення типу регулятора і параметрів його настроювання на конкретному прикладі.

*Приклад.* Вибрати тип та визначити оптимальні параметри настроювання регулятора АСР температури у повітрянагрівачі доменної печі. Задане значення температури  $u = 1150$  °С підтримується зміною коефіцієнта надлишку повітря, що надходить на горіння. Динамічні параметри сталого об'єкта у відповідності з експериментальною часовою характеристикою наступні:  $\tau = 18$  с;  $T = 88$  с;  $k = 2,28$  °С/% ходу РО;  $\Delta x_B = 15\%$  ходу РО;  $\Delta y_\infty = 34,2$  °С.

При цьому збурення було внесене за допомогою РО (жалюзі вентилятора пальника) шляхом зміни степені його відкриття з 60 % до 45 %-ів повного ходу. Показники якості процесу регулювання:  $u_{ДП} = 20$  °С;  $u_{СП} = 15$  °С;  $t_{РП} = 200$  с; перехідний процес з 20%-им перерегулюванням.

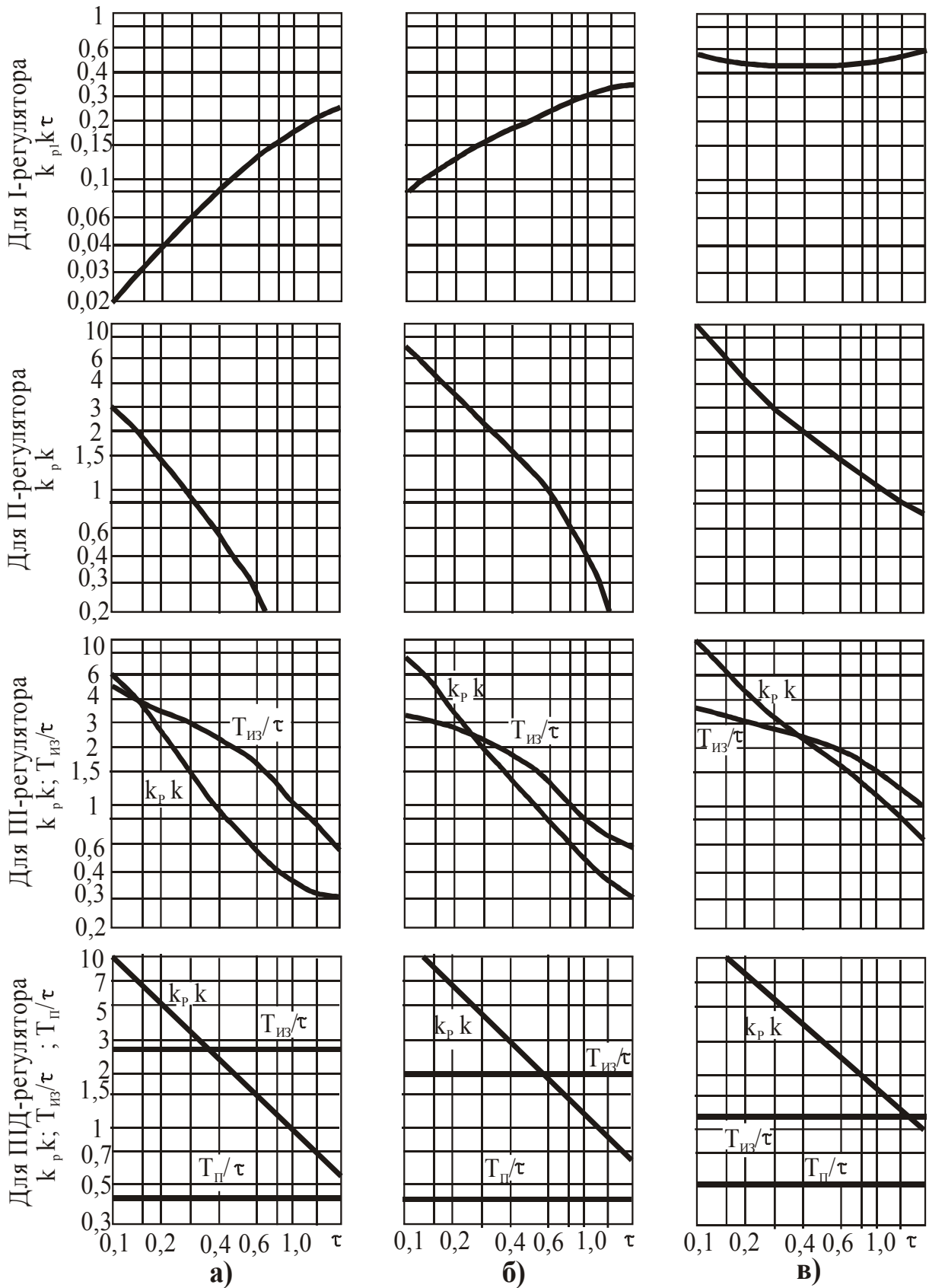


Рис. 3.35. Номограма для визначення оптимальних параметрів настроювання для I-, П-, ПІ- і ПІД-регуляторів при роботі на статичному (сталому) об'єкті за умови забезпечення перехідного процесу: **а**-апериодичного; **б**-з 20 %-им перерегулюванням; **в** - з мінімальною квадратичною площиною відхилення.

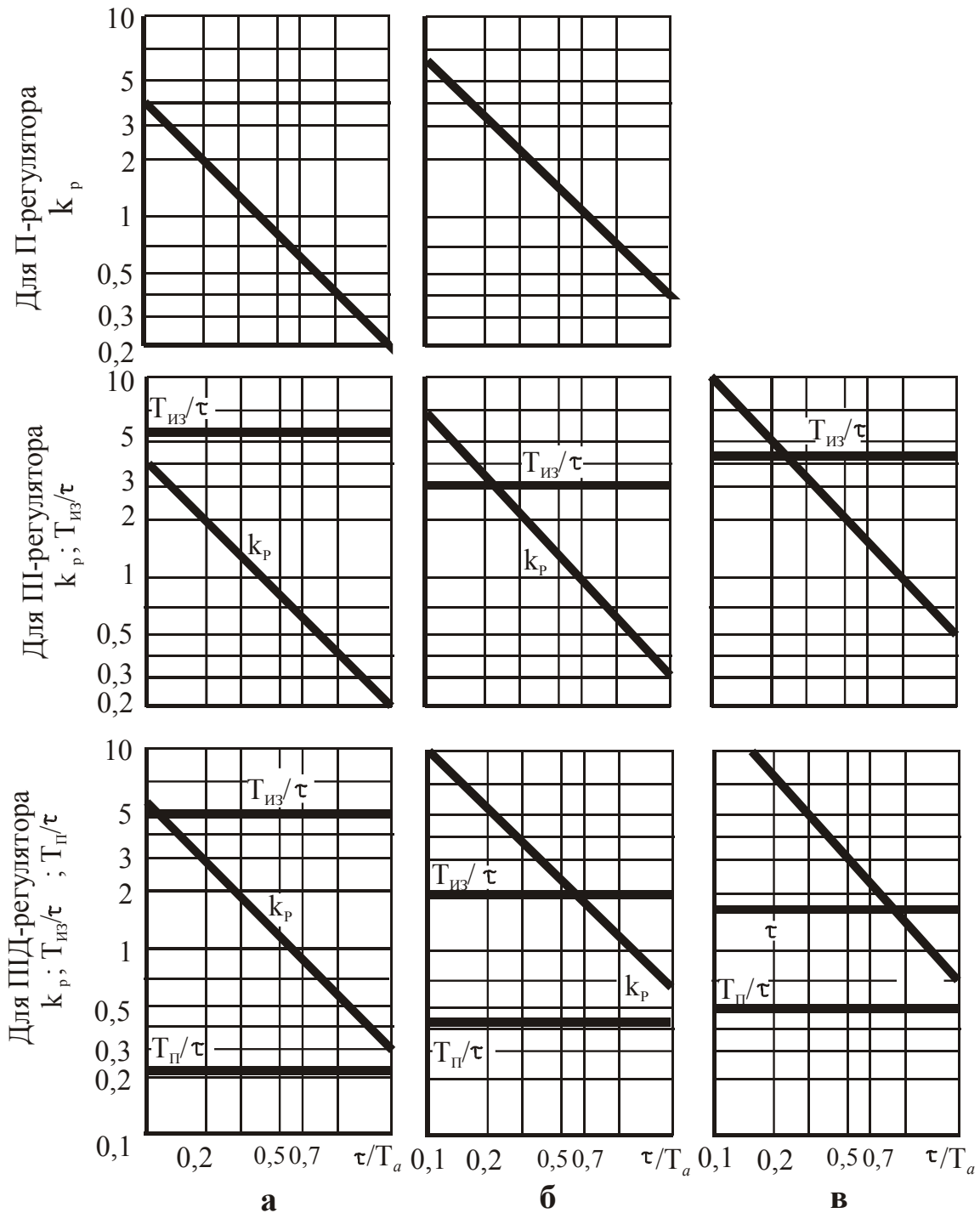


Рис. 3.36. Номограма для визначення оптимальних параметрів настроювання для І-, П-, ПІ- і ПІД-регуляторів при роботі на астатичному (нейтральному) об'єкті за умови забезпечення перехідного процесу: **а**-аперіодичного; **б**-з 20 %-им перерегулюванням; **в**-з мінімальною квадратичною площиною відхилення.

Визначаються відносні значення коефіцієнта підсилення  $k$ , регулюючого діяння  $X_B$ , що відповідає максимальній зміні збурення, показники якості процесу регулювання  $Y_{ДП}$ , і  $Y_{СП}$ :  $Y_{ДП} = 20 / 1150 = 0,017$ ;  $Y_{СП} = 15/60 = 0,013$ ;  $k = 34,2 \cdot 60 / 1150 \cdot 15 = 0,12$ ;  $X_B = 15/60 = 0,25$ .

Обчислюється відношення  $\tau / T = 18 / 88 = 0,2$ , що дозволяє зробити висновок про можливість застосування регулятора як неперервної дії, так і релейного.

Знаходиться максимальне відхилення параметра регулювання (див. рис. 3.28а):  $Y_B = 0,12 \cdot 0,25 = 0,03$ . По графікам (див. рис. 3.29б) визначається коефіцієнт  $R_D$  систем з різними регуляторами: I – регулятор – 0,6; П – регулятор – 0,35; ПІ – регулятор – 0,28; ПІД – регулятор – 0,2. За формулою (3.134) обчислюється величина  $Y_I$  для АСР з цими регуляторами: I – регулятор – 0,018; П – регулятор – 0,0105; ПІ – регулятор – 0,0084; ПІД – регулятор – 0,006.

Згідно умови (3.133) у системі з I – регулятором  $Y_I = 0,018 > Y_{ДП} = 0,017$  і тому він не може бути застосований, а усі інші припустимі. Далі перевіряється АСР з П – регулятором на величину  $Y_{СП}$ . Для цього по графіку (див. рис. 3.29б) знаходиться значення  $Y_{СТ}^*$  для процесу з 20%-им пере регулюванням і визначається за формулою (3.140) величина  $Y_{СТ}$ .

$$Y_{СТ} = 0,25 \cdot 0,03 = 0,0075.$$

Отже, у системі з П – регулятором  $Y_{СТ} = 0,0075 < Y_{СП} = 0,013$ , тобто умова (3.139) виконується.

Перевіряється для П – регулятора відповідність умові (3.138). При цьому для АСР з П – регулятором (див. рис. 3.29б) знаходиться час  $t_P = 5,5 \cdot 18 = 99 \text{ с} < 200 \text{ с} = t_{РП}$ . Умова (3.138) також виконується, тому най простішим регулятором, що забезпечує задані показники якості перехідного процесу, може бути пропорційний.

Оптимальне значення параметра настроювання П – регулятора (коефіцієнт передачі) встановлюється по графічним залежностям, наведеним на рис. 3.35б.

$$k_P = 3,5 / 0,12 = 29,2.$$

Виконаємо перевірку на можливість застосування релейного регулятора за наявності збурень на рівні до 15 % ходу РО. Тоді регулююче діяння  $\Delta x_B$  повинно складати не менше 20 % ходу РО.

Згідно графіка (див. рис. 3.33а) амплітуда автоколивань без урахування зони нечутливості ( $\Delta = 0$ ) при  $\tau / T = 0,2$  буде дорівнювати:  $Y_A = 0,08 \cdot 0,12 \cdot 0,34 = 0,00326$  або в абсолютних одиницях температури  $y_A = 0,00326 \cdot 1150 = 3,75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Період автоколивань  $T_A$  (див. рис. 3.33б) у цьому випадку змінюється при збуренні до 20% відносно початкового положення РО від  $4\tau$  до  $5\tau$ , тобто від 72 с до 90 с. Якщо відомо, що зона нечутливості



вимірювального і регулюючого пристрою складає  $6^{\circ}\text{C}$  ( у відносних одиницях  $\Delta = 6/1150 = 0,0052$ ), то реальна амплітуда автоколивань збільшиться (див. рис. 3.33а) і буде складати:  $Y_A = 0,21 \cdot 0,12 \cdot 0,34 = 0,00856$  або в одиницях температури  $y_A = 0,00856 \cdot 1150 = 9,8^{\circ}\text{C}$ . Середнє залишкове відхилення параметра регулювання  $Y_{CT}$  від заданого значення при зміні збурення на 20 % буде дорівнювати (див. рис. 3.33в):  $Y_{CT} = 0,4 \cdot 0,00856 = 0,00342$  або в абсолютних одиницях температури  $y_{CT} = 3,93^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, слід вважати, що для регулювання температури у повітрянагрівачі доменної печі шляхом зміни витрати повітря за рахунок переміщення жалюзі вентилятора пальника можуть бути застосовані як П – регулятор неперервної дії, так і релейний регулятор.

Результати вищенаведених розрахунків свідчать, що як за прямим методом розрахунку АСР на задану якість, так і за допомогою узагальнюючих номограм точність визначення параметрів настроювання в значній мірі залежить від точності математичної моделі об'єкта. Однак в процесі експлуатації об'єкта параметри і навіть структура математичної моделі з часом можуть змінюватись. Останнє за постійності параметрів настроювання регулятора безумовно буде сприяти погіршанню якості регулювання. Тому у випадку, коли якість регулювання суттєво впливає на економічні показники технологічного процесу застосовують комбінований метод.

*Комбінований (адаптивний) метод* передбачає встановлення по експериментальним даним структури і параметрів математичної моделі, визначення за відомими алгоритмами розрахунку параметрів настроювання регулятора, що забезпечують необхідну якість перехідного процесу, з подальшим уточненням їх значень на діючій АСР. За такого підходу стає можливим усунути недоліки суто експериментального метода (занадто великих відхилень параметрів регулювання від заданих значень у пусковий період) за рахунок попередньо встановлених оцінок параметрів настроювання регуляторів розрахунковим шляхом.

Комбінований метод, незважаючи на необхідність проведення через деякі інтервали часу великої кількості розрахунків, порівняно нескладно може бути реалізований із застосуванням сучасних мікропроцесорних контролерів (приладів) чи комплексів з бібліотекою алгоритмів, до складу якої входять спеціальні алгоритми настроювання параметрів якості регулювання.

## 4. МІКРОПРОЦЕСОРНІ ЗАСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ

### 4.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.

Розвиток технології і схемотехніки мікроелектронних схем призвів до створення великих інтегральних схем (БИС), які становлять собою універсальні за призначенням, функціонально завершені пристрої, а за своїми функціями і структурою в деякій мірі ідентичні процесорам звичайних ЕОМ, але мають значно менші розміри. Велика інтегральна схема – це напівпровідниковий прилад, у якого на одній пластині напівпровідникового матеріалу площиною у декілька квадратних міліметрів розміщується до мільйона і більше компонентів: діодів, транзисторів, резисторів, конденсаторів, з'єднаних поміж собою деяким наперед заданим способом.

*Мікропроцесор (МП)* – це програмно - керуємий пристрій, що здійснює прийняття, арифметико-логічну обробку і видачу цифрової інформації, а також керування процесом цієї обробки, вміщує одну чи декілька кристалів БИС і призначений для спільної роботи з пристроями пам'яті та вводу-виводу інформації. Таким чином, МП – це стандартний (оскільки це БИС) універсальний (оскільки він програмується) пристрій, який дозволяє реалізувати прийняття, обробку і передачу цифрової інформації.

*Мікропроцесорна система (МПС)* – це сукупність взаємозв'язаних пристроїв, що вміщує один чи декілька МП, пам'ять (ОЗУ), пристрій вводу-виводу і ряд інших пристроїв, націлених на виконання деяких чітко визначених інформаційних чи керуючих функцій.

*Мікро ЕОМ (МЕОМ)* – це конструктивно завершена МПС, що має пристрій зв'язку із зовнішніми компонентами, панель керування, власне джерело живлення і комплект програмного забезпечення.

*Мікроконтролер (МКО)* – це мікро ЕОМ з невеликими обчислювальними ресурсами і спрощеною системою команд, що зорієнтована не на виконання обчислень, а на виконання операцій логічного керування різним обладнанням. Прикладами МКО є пристрої (мікропроцесорні), що керують роботою стандартних периферійних пристроїв вводу-виводу МЕОМ: накопичувачів на гнучких магнітних дисках (НГМД), магнітних стрічках (МЛ), друкарських пристроїв, графопобудівників та ін.

*Мікропроцесорний комплекс інтегральних схем (МПК ІС)* – це сукупність мікропроцесорних БІС (базовий МПК) та інших ІС, що однотипні за конструктивно-технологічним виконанням і забезпечені функціональною, структурною, інформаційною та енергетичною сумісністю для використання у складі МПС, тобто МПК становить собою елементну базу МПС, МЕОМ і МПАС.

*Мікропроцесорна автоматична система (МПАС)* – це автоматична система з вмонтованими у неї засобами мікропроцесорної техніки (МТ). Структура і взаємозв'язок основних засобів МТ у межах МПАС наведені на рис. 4.1. Приблизно таку саму структуру мають і МЕОМ.

Центральне місце у цій структурі займає мікропроцесор МП, який може бути як однокристальний МП з фіксованою системою команд, так і багатокристальний МП з мікропрограмним керуванням. МП подібно процесору звичайних ЕОМ безпосередньо виконує арифметичні і логічні операції над даними, здійснює програмне керування процесом обробки інформації, організує взаємодію усіх пристроїв, що входять у систему. Основні елементи МП: арифметико-логічний пристрій АЛУ, пристрій керування УУ і блок регістрів БРГ. АЛУ призначено для виконання арифметичних операцій складання і віднімання, основних логічних операцій (І, ІЛИ, виключення ІЛИ) та зсувів. Для прийому, зберігання і передачі різної інформації призначений БРГ, який приймає участь в процесі виконання програми. Пристрій керування (УУ) керує роботою АЛУ, БРГ та іншими компонентами МП. Пристрій керування генерує послідовність синхронізуючих і логічних сигналів, які здійснюють по черговому виймання команд з пам'яті та їх виконання. Порядок виконання команд задається шляхом їх відповідного розміщення у програмі, що міститься у пам'яті. Адреса наступної команди міститься у пам'яті програмного лічильника БРГ.

Пам'ять МП може бути реалізована на підставі різних запам'ятовуючих пристроїв (ЗУ) і ділиться на постійну (ПЗУ) та оперативну (ОЗУ). У процесі роботи ПЗУ здійснюється тільки читання завчасно записаних даних (програм) і не припускається зміна інформації, що занесена до них під час виготовлення. Напівпровідникові ОЗУ призначені для запису і зчитування оперативної інформації, яка може змінюватись у процесі функціонування МПС. На відміну від ПЗУ інформація в ОЗУ не зберігається під час короткочасного зник-

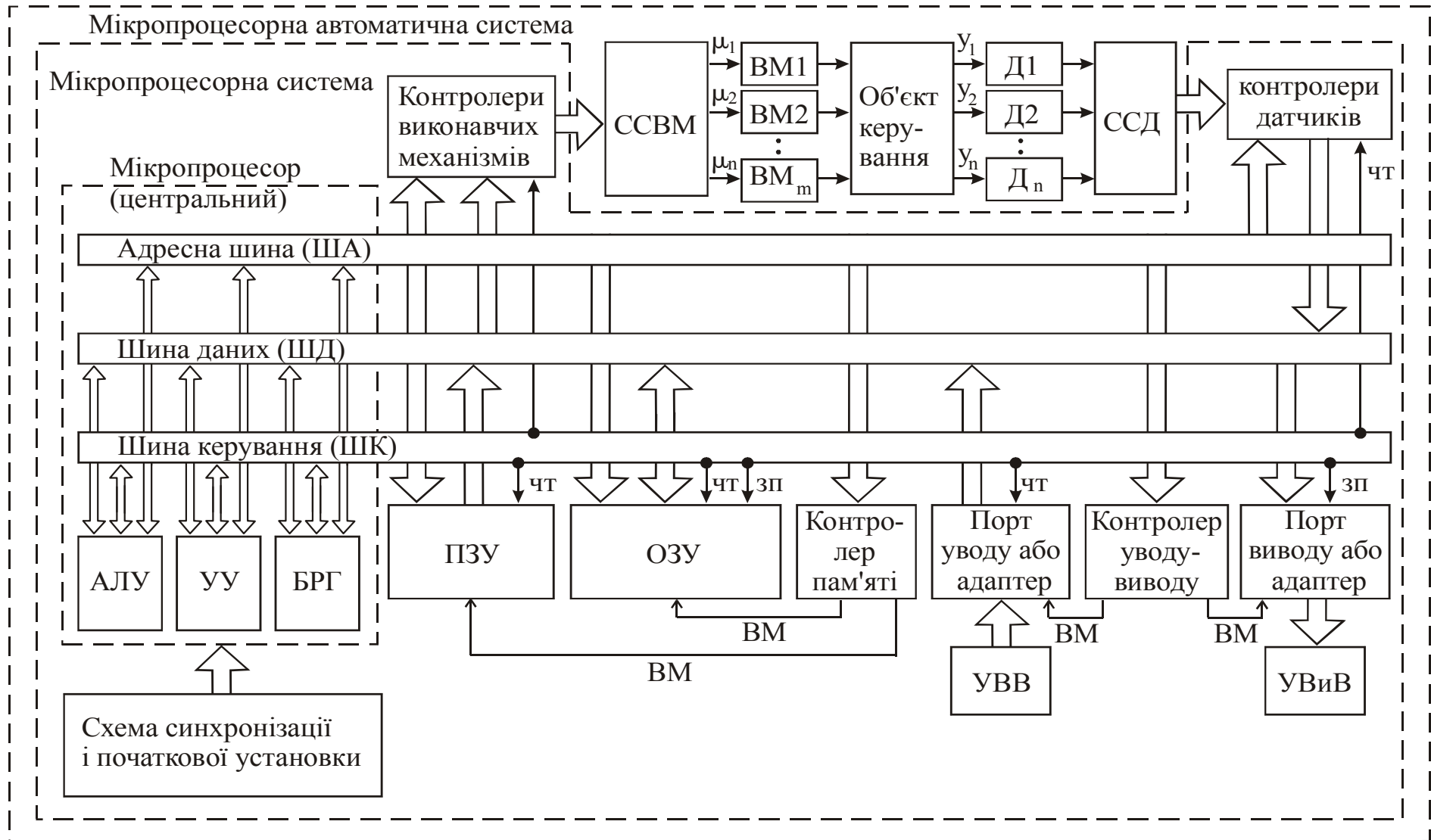


Рис.4.1 Типова структура і взаємозв'язок основних засобів мікропроцесорної техніки у межах мікропроцесорної автоматичної системи.

нення джерела живлення. Інформація записується в адресованій ячейці пам'яті у вигляді слова, яке становить собою сукупність двоїчних розрядів (*bit*). Слово довжиною 8 *bit* отримало назву – байт. Пам'ять МПС компонується порціями, ємкість яких кратна 1024 словам. Цей розмір адресного простору (кількість ячеек пам'яті) позначається  $1 K$ . Тому, якщо МП має 16-розрядну шину адреси (ША), то це дозволяє встановлювати об'єм адресного простору  $2^{16} = 64 K$  ячеек пам'яті.

У МПС застосовуються статичні і динамічні ОЗУ. У статичних ОЗУ кожний елемент пам'яті становить собою симетричний тригер, здатний зберігати тільки один біт інформації, як завгодно довго, доки надходить електроживлення.

Динамічні ОЗУ призначені для запам'ятовування інформації (тільки один біт) на короткий термін. Тому для зберігання інформації через деякий час її потрібно періодично оновлювати, тобто здійснювати регенерацію. До складу МПСА керування технологічними процесами (див. рис. 4.1) входить велика кількість зовнішніх периферійних пристроїв: датчики ( $D_1, D_2, \dots D_n$ ) для вимірювання параметрів стану об'єкта керування, виконавчі механізми ( $BM_1, BM_2, \dots BM_n$ ), за допомогою яких здійснюється регулювання параметрів об'єкта, стандартні периферійні пристрої (пульти ручного вводу, пристрої завантаження і відладки програм), зовнішньої пам'яті, пристрої зв'язку з об'єктом. Ефективна робота такої системи реалізується завдяки застосуванню чотирьох визначальних принципів: модульність конструкції, магістральність організації, мікропрограмне керування, регулярність структури.

*Модульний принцип* конструювання передбачає виготовлення МПС чи МЕОМ у вигляді набору БИС з необхідною кількістю зовнішніх виводів і високою регулярністю логічних структур, для яких характерна універсальність і гнучкість МП, як приладу з програмним керуванням та спеціальними апаратно-логічними засобами.

*Магістральний принцип* організації МПС передбачає наявність інформаційно-логічної сумісності модулів в умовах обмежень, викликаних інтегральною технологією (мала кількість вихідних контактів БИС). Сукупність задач інформаційно-логічної сумісності компонентів МПС вирішується застосуванням інтерфейсного зв'язку.

*Інтерфейс* – це комплекс засобів уніфікованого супряження модулів МПС, що вміщує апаратні і алгоритмічні засоби. До складу апаратних засобів входять: система уніфікованих шин, уніфікованих

сигналів і електронних схем. Алгоритмічна частина – це алгоритм (найчастіше має назву – протокол) обміну, тобто сукупність правил взаємодії цих модулів у процесі обміну інформацією. З точки зору загальної задачі, що вирішує інтерфейс, слід розподіляти загальний, внутрішній і зовнішній (відносно МПС) інтерфейси. *Внутрішній інтерфейс* передбачає організацію супряження модулів пам'яті, контролерів периферійних пристроїв, і портів вводу-виводу чи адаптерів з магістральними шинами МП. *Магістральний* або *загальний інтерфейс МП* забезпечує паралельний спосіб передачі інформації по адресній шині (ША), шині даних (ШД) і шині керування (ШУ). Шина адреси є однонаправленою, тобто код адреси ячейки пам'яті чи регістра периферійного пристрою генерується центральним мікропроцесором і передається по адресній шині від МП до решти пристроїв МПС. Шина даних є двонаправленою, тобто працює у мультиплексному режимі. Шина керування являє собою сукупність однонаправлених каналів зв'язку, по яких передаються сигнали керування. Останні призначені для синхронізації роботи пристроїв і визначення операцій. Загальну синхронізацію забезпечує зовнішній пристрій синхронізації і початкової установки (тактовий генератор). *Зовнішній інтерфейс* організує супряження частин МПС із зовнішніми компонентами, такими, як периферійні пристрої (стандартні і зовнішні), канали передачі даних, контролери і т. ін. Цей інтерфейс не виходить безпосередньо на шини МПС і тому суттєво менше структуризований. До нього відносяться перетворення зовнішніх сигналів, які можуть мати любую природу (у тому числі і аналогову), у сигнали, сумісні з сигналами на шинах, і зворотне перетворення. Периферійні пристрої у складі МПС мають стандартний інтерфейс з боку підключення до інформаційної магістралі і нестандартний інтерфейс з боку пристроїв вводу-виводу (УВВ і УВиВ). *Стандартний інтерфейс* – це схема супряження МП з периферійними пристроями і каналами вводу-виводу, яка реалізується за допомогою уніфікованих систем зв'язку (див. рис. 2.114, табл. 2.19 – 2.22).

В організації зв'язку периферійних пристроїв (ПП) з МПС у сучасних умовах спостерігається тенденція децентралізації апаратури керування вводом-виводом, уніфікація і поширення функціональних можливостей блоків керування ПП, за допомогою яких ПП приєднується до інтерфейсу, і надання цим блокам властивостей програмної налаштуваності на виконання визначених функцій. Різноманітні уніфіковані програмно-налаштовані електронні блоки ке-

рування уводів-виводом, порти уводу-виводу, адаптери, контролери і т.п., об'єднані поняттям інтерфейсні схеми (інтерфейсні БИС).

Різні ПП з'єднуються з МПС за допомогою невеликої кількості уніфікованих інтерфейсних БИС. Їм притаманна висока універсальність, яка досягається шляхом програмування необхідних функцій виконання. Функціональне призначення інтерфейсних БИС встановлюється або подачею на них керуючих сигналів від зовнішніх джерел чи з боку МП, або шляхом попередньої комутації їх керуючих входів. Внаслідок чого з'являється можливість встановлювати такі параметри інтерфейсних БИС, як напрямок передачі, формат символу, контроль на парність чи непарність і т.п., у залежності від вимог конкретного застосування. У найпростіших випадках використовуються адресуємі багаторежимні буферні регістри уводу-виводу (порти), можливості програмування яких обмежені. Застосування портів доцільно при керуванні простим ПП, який виконує невелику кількість операцій, у цьому випадку керувати ПП через порт можливо командами уводу-виводу.

Більш складними блоками керування периферійними пристроями є контролери, які забезпечують умови відмикання і замикання окремих регульовальних органів чи їх груп, а також запуску різних виконавчих механізмів або приймання сформованих інформаційних сигналів від датчиків. Універсальні контролери, що програмуються, виконуються у вигляді однокристальних БИС, які підключаються до магістральних адресних шин і здійснюють селекцію сигналів, неприпускаючи передачі по одній шині декількох повідомлень одночасно. Від МП по адресній шині передається на всі контролери ПП код вибору зовнішнього пристрою, що міститься у командах уводу-виводу. Контролер ПП виконує наступні функції: декодування адреси ПП, що отримана від МП, і надання відповіді про готовність до обміну у шину керування, коли ця адреса співпадає з ключем цього пристрою (забезпечує селектор); декодування коду операції, що надходить від МП; передача до МП інформації про поточний стан ПП; керування передачею інформації поміж МП і ПП. Згідно отриманого коду, з контролера ПП, на вхід вибору модуля (ВМ) відповідного порту уводу чи виводу надходить сигнал, що забезпечує обмін інформацією тільки між окремим зовнішнім пристроєм (модулем) і МП. Таким чином, шляхом перепрограмування контролера можна реалізувати конкретний алгоритм керування без додаткових апаратних витрат.

Логічна структура універсального програмуемого контролера наведена на рис. 4.2. Контролер працює у відповідності з конкретною програмою. При цьому, керування периферійними пристроями УВВ і УВиВ забезпечується мікропроцесором МП. Контролер має також магістральну структуру. До шин адреси, даних і керування можуть бути підключені поширюючі ОЗУ і ПЗУ (ППЗУ), якщо можливостей МП недостатньо для керування обміном інформацією. До магістралей контролера підключаються також вузли програмуємих інтерфейсів (УПИ) з модульною структурою. Пульти керування (ПУ) МПС і ПП вводу і виводу зв'язані з УПИ за допомогою вузлів супрЯження (УС). Для показання напрямку передачі інформації з шини керування МПС надходять сигнали читання ЧТ, по яких відбувається прийняття інформації з портів вводу до мікропроцесора, а по сигналам запису ЗП здійснюється зворотна передача від мікропроцесора у порти виводу інформації.

Організація вводу-виводу інформації у МПС здійснюється двома способами системних пересилань: програмно-керуємих обмін даними, за умов якого керування відбувається за програмою МП (центрального); контролерний обмін даними або прямий доступ до пам'яті (ПДП).

Увід і вивід інформації при програмно-керуємому обміні даними відбувається під керуванням основної програми, за допомогою якої МП взаємодіє з периферійними пристроями. Оскільки МПАС керування технологічними процесами працює у реальному масштабі часу, то для керування ПП широко застосовується режим переривань. Сигнали переривань формуються портами вводу-виводу ПП чи периферійними адаптерами (ПА), які становлять собою програмно-керуємі блоки регістрів інтерфейсу. Через ці регістри МП здійснює керування ПП із застосуванням керуючих слів, що визначають не тільки режим роботи різних частин ПА, але і надають спеціальні модифікатори команді вводу-виводу. Отримавши запит на переривання, МП відкладає виконання основної (робочої) програми і починає виконувати підпрограму згідно адреси ПП. Виконання підпрограми закінчується командою вороття, що передає керування на продовження виконання перерваної основної програми.

Для реалізації контролерного обміну даними використовуються контролери ПДП, які дозволяють ПП звертатися безпосередньо до



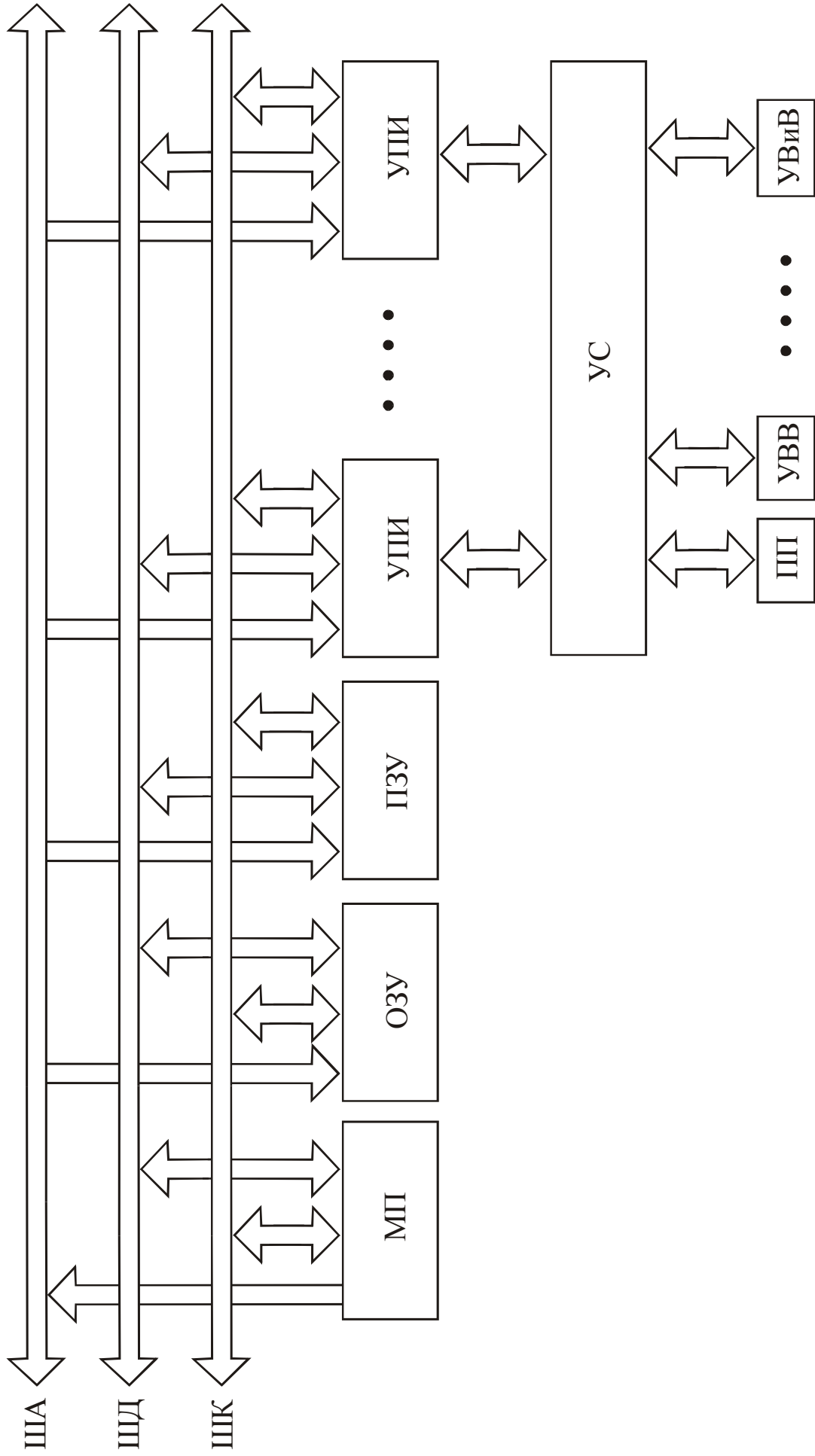


Рис. 4.2. Загальна структура універсального програмуємого контролера.

пам'яті (ОЗУ) МПС, завдяки чому скорочується процес обміну інформацією, бо дії програм відбуваються без втручання МП. Режим ПДП не порушує нормальної роботи МПС, а лише призупиняє її на час циклу виконання операцій уводу-виводу. Таким чином, операція керування МПАС здійснюється за допомогою програмного забезпечення (ПО), яке дозволяє реалізувати необхідну проблемну орієнтацію системи будь-якої складності. *Принцип мікропрограмного керування*: підвищує гнучкість пристроїв за рахунок можливості зміни мікропрограм; збільшує регулярність їх структури за рахунок застосування матричних структур пам'яті; підвищує надійність пристроїв завдяки використанню серійних БИС; спрощує контроль функціонування МП, що зводиться до контролю вмісту запам'ятовуючого пристрою. *Регулярність структури* передбачає закономірну повторюваність елементів структури і зв'язків між ними на різних рівнях МПСА.

Безпосередній увід інформації  $y_1, y_2 \dots y_n$  від датчиків у МПАС здійснюється шляхом застосування систем супряження з датчиками (ССД), яка містить пристрої уводу інформації з аналогових, дискретних перетворювачів і датчиків переривання. Система супряження з виконавчими механізмами (ССВМ) формує сигнали керування  $\mu_1, \mu_2 \dots \mu_m$  на виконавчі механізми, які у залежності від вимог алгоритмів керування можуть бути як аналогової, так і дискретної дії.

## **4.2. КОМПЛЕКС МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИЛАДІВ СЕРІЇ МИНИТЕРМ.**

Комплекс приладів МИНИТЕРМ – це група локальних засобів автоматизації різноманітних технологічних об'єктів, яка відрізняється простотою застосування при достатньо високій точності регулювання і широких функціональних можливостях. Комплекс призначений для автоматичного регулювання технологічних параметрів різноманітних установок: печей і сушильних камер, котлоагрегатів і систем теплопостачання, водо- і повітрянагрівачів, кліматичних камер і кондиціонерів, установок для переробки пластмас, агрегатів для пастеризації молока і випічки хлібобулочних виробів, а також багатьох інших процесів і установок.

**Комплекс приладів МИНИТЕРМ 400** утворюють регулятори: МИНИТЕРМ 400.00 – для роботи з датчиками, що мають вихідні сигнали ( $0 \div 5 \text{ мА}$ ,  $0(4) \div 20 \text{ мА}$ ,  $0 \div 10 \text{ В}$ ,  $0 \div 50 \text{ мВ}$ ) постійного струму;

МИНИТЕРМ 400.20, 400.21, 400.22 – для роботи з термометрами опору з НСХ 50П, 50М, 100П, 100М; МИНИТЕРМ 400.30, 400.31 – для роботи з термоелектричними термометрами (термопарами) з НСХ ХА(К), ХК(Л), ПП(С). Модифікації приладів відрізняються лише програмою, що міститься у постійному запам'ятовуючому пристрої (ПЗУ) відповідного регулятора.

На замовлення споживача регулятор може комплектуватися будь-яким із наступних підсилювачів потужності, що входять до складу комплексу: У300, У330, У330.Р2 – тиристорні реверсивні підсилювачі для керування однофазними електродвигунами; У24 – тиристорний реверсивний підсилювач для керування трифазними електродвигунами; У13Н – тиристорний підсилювач потужності змінного струму для керування електронагрівачами. Кожний з цих підсилювачів додатково забезпечує живлення регулятора напругою 24В постійного струму. Якщо підсилювач не застосовується, тоді для живлення регуляторів може бути використаний один із наступних групових джерел живлення серії П300: П300.2 здійснює живлення двох регуляторів, П300.4 – чотирьох регуляторів, а П300.Р2 – двох регуляторів з можливістю видачі дискретних сигналів, завдяки вмонтованих у ньому трьох реле.

Комплекс забезпечує цифровий інтерфейсний зв'язок кільця, що може вміщувати до 16 регуляторів з ПЕОМ верхнього рівня керування за протоколом RS232C (“Стик С2”). Для підвищення дальності передачі інформації до складу комплексу входить перетворювач И300, що здійснює перетворення сигналу RS232C у сигнал за протоколом ІРПС (“струмова петля”). По каналу інтерфейсного зв'язку можливий вивід на ЕОМ усіх входів і параметрів налаштування регулятора, а також зміна завдання та інших параметрів по командах з ЕОМ.

Регулятори реалізують наступні функції: ПІД, ПІ, ПД, П і дво-позиційне регулювання з імпульсним чи аналоговим вихідним сигналом; можливість використання аналогового виходу у якості сигналу, що лінійно залежить від регульованого параметра; захист від обриву кола датчика; сигналізація верхнього і нижнього межових відхилень регульованого параметра від заданого значення; автоматизоване налаштування динамічних параметрів регулятора; цифровий інтерфейсний зв'язок з верхнім рівнем керування; цифрова індикація параметрів процесу і самого регулятора, або у відсотках, або безпосередньо у одиницях фізичних величин. До входу регулятора можливе підк-

лючення шести датчиків з вихідними сигналами постійного струму. Сигнали  $0 \div 50 \text{ мВ}$  подаються на вхід регулятора безпосередньо, а сигнали  $0 \div 10 \text{ В}$ ,  $0 \div 5 \text{ мА}$ ,  $0(4) \div 20 \text{ мА}$  – через додаткові пристрої відповідно ВП10М, ВП05М і ВП20М, що входять у комплект постачання. До того ж, замість датчиків з вихідними сигналами постійного струму на вхід може бути підключено до трьох реостатних (потенціометричних) датчиків з опірністю до  $2,2 \text{ кОм}$ . Регулятор має тільки один вихід для імпульсного чи аналогового керування, і три дискретних виходи. Вихідним імпульсним сигналом можуть бути або “сухі” транзисторні ключі ( $45 \text{ В}$ ;  $0,15 \text{ А}$ ), або сигнал ( $0$ ;  $24 \text{ В}$ ) постійного струму. Аналоговий вихід у залежності від схеми підключення формується у вигляді сигналу постійного струму ( $0 \div 10 \text{ В}$ ;  $0 \div 5 \text{ мА}$ ,  $0(4) \div 20 \text{ мА}$ ). Для схем з імпульсним регулюванням аналоговий вихід застосовують для підключення зовнішнього вторинного приладу. Дискретні виходи призначені для сигналізації верхнього і нижнього межових відхилень регульованого параметра від завдання, а також для сигналізації відмови приладу. Вид і параметри дискретних вихідних сигналів такі самі, як у імпульсного вихідного сигналу.

Основна похибка вимірювання сигналів складає:  $\pm 0,2 \%$  – для сигналів  $0 \div 50 \text{ мВ}$ ;  $\pm 0,3 \%$  – для сигналів  $0 \div 5$ ,  $0 \div 20$ ,  $4 \div 20 \text{ мА}$ ,  $0 \div 10 \text{ В}$  за умов відображення цих сигналів на дисплеї у натуральних фізичних одиницях. Похибка встановлення завдання на рівні  $0,01 \%$ . Статична похибка регулювання не більше  $\pm 0,3 \%$ . Регулятори призначені для експлуатації у закритих вибухо- і пожежнобезпечних приміщеннях за відсутності у навколишньому повітрі агресивних парів і газів. Температура навколишнього повітря у приміщеннях від  $5$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  при відносній вологості до  $80 \%$ . Припустима вібрація до  $0,1 \text{ мм}$  і частоті не більше  $25 \text{ Гц}$ .

Конструктивно регулятор вміщує шасі, яке встановлене у пластмасовий корпус. Шасі складається з двох електронних плат, що скріплені поміж собою стійками, лицьової панелі і штепсельного роз'єму (25 клем). Роз'єм (СНП-101-25В) розпаяний на одній з електронних плат і призначений для підключення зовнішніх пристроїв. На рис. 4.3. зображена лицьова панель регулятора, де наведено призначення індикаторів, дисплея і кнопок, а також вказані номери клем штепсельного роз'єму розташованого на задній стінці корпусу. Функціональна схема регулятора представлена на рис. 4.4. Склад і призначення основних пристроїв цієї схеми наступні.

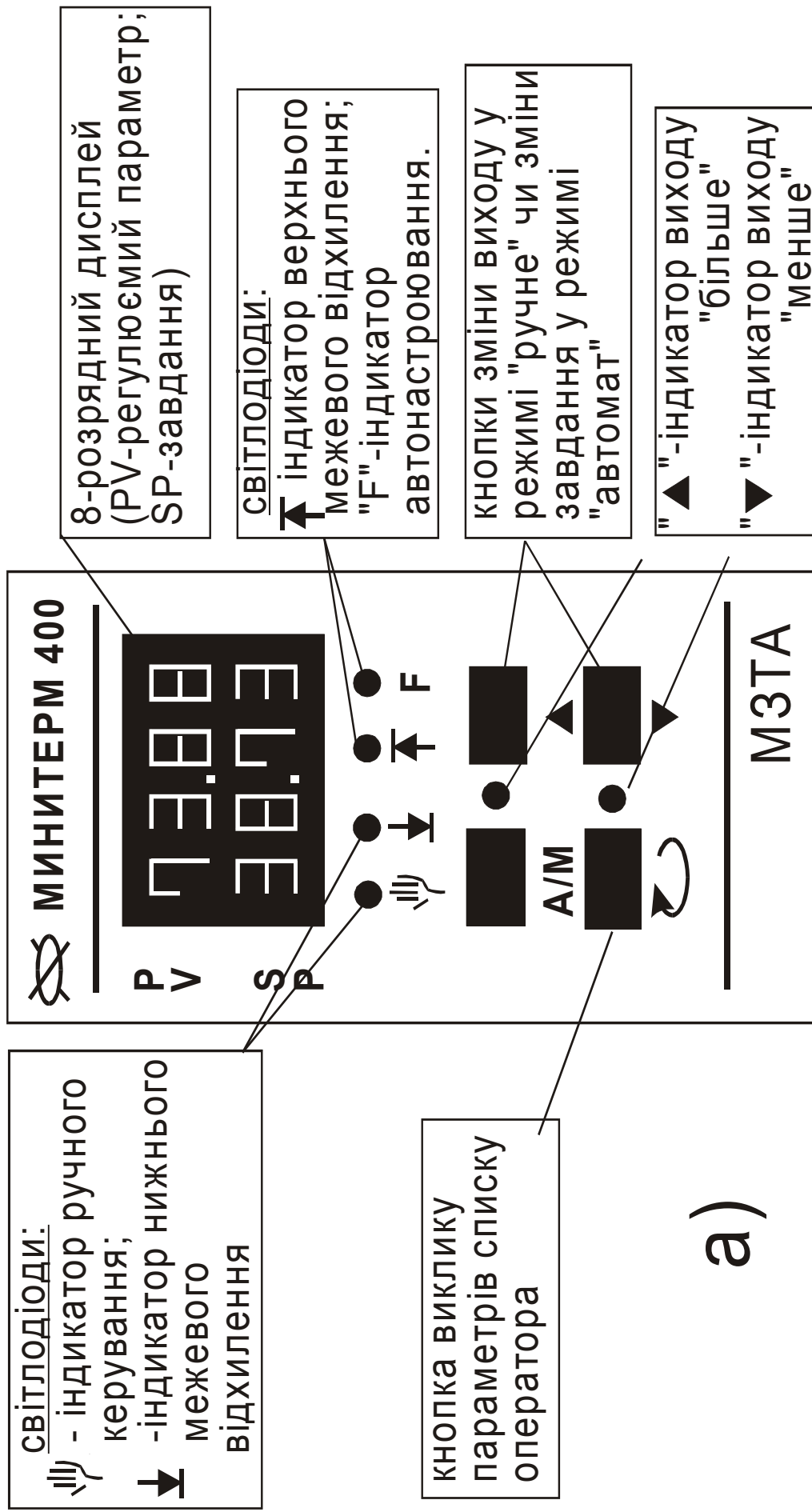


Рис.4.3. Загальний вигляд лицьової панелі регулятора МИНИТЕРМ 400 (а) і задньої стінки корпусу мікропроцесорного (б).

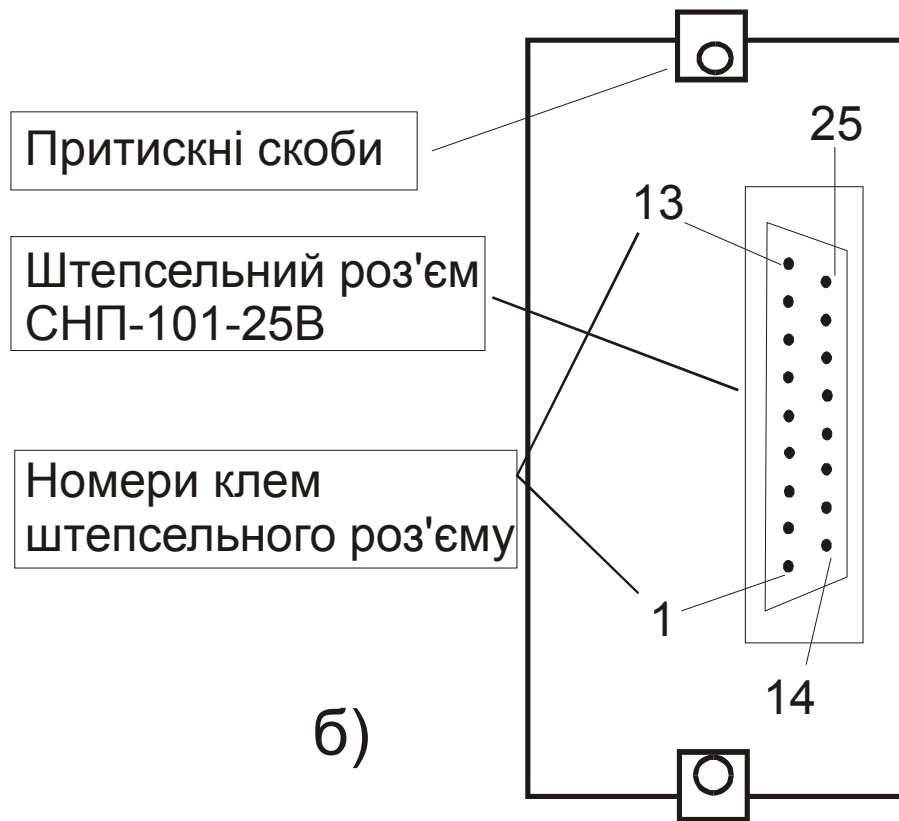


Рис.4.3. Закінчення.

*Апаратний пристрій уводу інформації*, де перетворюються аналогові сигнали ( $X_A, X_b, X_e, X_F, X_G, X_h$ ) у цифрову форму за допомогою аналогово-цифрового перетворювача АЦП. Цифрові еквіваленти аналогових сигналів мають такі позначення: А, Б, В, Г, Д, Е. Цей пристрій містить також три джерела струму для живлення реостатних (потенціометричних) датчиків. Вхід  $X_A$  сприймає сигнал датчика, що вимірює регульований параметр. На входи  $X_b, X_e, X_F, X_G$  можуть бути подані корегуючі сигнали. До входу  $X_h$  може надсилатися сигнал від датчика положення виконавчого механізму.

*Апаратний пристрій виводу інформації* містить: п'ять "сухих" транзисторних ключів, що керуються імпульсним виходом ( $Z1, Z2$ ) і дискретними виходами ( $Z3, Z4, Z0$ ); цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП); перетворювач аналогово сигналу напруги ( $У1$ ) у струмовий сигнал ( $У2$ ); засоби уводу і виводу інформації за цифровим інтерфейсним каналом (прийм-передача).

*Джерело живлення* формує напругу постійного струму для живлення усіх вузлів регулятора.

*Цифровий обчислювальний пристрій* містить однокристальну мікро-ЕОМ, оперативний і постійний запам'ятовуючі пристрої, елементи для передачі і обробки інформації. Ці апаратні засоби реалізують шляхом програмування функціональні блоки, що вказані на рис. 4.4.

*Перетворювач вхідних сигналів (П)* перетворює сигнал  $X_A$  для індикації регульованого параметра ( $\Pi$ ) на дисплеї у відсотках або у одиницях фізичної величини (Ф.В.). До того ж, блок  $\Pi$  обчислює загальне завдання  $P$  (% , Ф. В.) і розбіжності  $E$ , яке фільтрується у фільтрі ( $\Phi$ ) з постійною демпфірування  $FL\tau$ . Вхідний сигнал  $h$  приводиться на будь-якій ділянці від  $h_-$  до  $h_+$  у діапазон 0-100% і виводиться на дисплей у вигляді змінної.

*Задавач* призначений для формування сигналу завдання  $P$ .

*Блок формування закону регулювання (ПДД')* реалізує ПДД- закон спільно з виконавчим механізмом (при використанні імпульсного виходу) чи спільно з інтегратором  $I$  (при використанні аналогового виходу).

*Блок автонастроювання* дозволяє перевести замкнену систему регулювання у режимі автоколивач з обмеженою амплітудою, виконує на підставі аналізу сталих автоколивач розрахунок оптимальних значень параметрів настроювання регулятора  $C, P, I, \tau, \tau_i$  (коефіцієнт підсилення і постійна інтегрування)

*Широтно-імпульсний модулятор (ШИМ)* перетворює вихідний сигнал блоку ПДД' в імпульс, що керує ключами імпульсного виходу  $Z_1, Z_2$ . Аналогові вихідні сигнали  $U_1(U_2)$  для регулятора з імпульсним виходом можуть використовуватись для виводу на самописець інформації про величину регульованого параметра.

*Компаратори програмні* порівнюють величину відхилення  $E$  з уставками верхнього ( $E_+$ ) і нижнього ( $E_-$ ) граничних відхилень, впливають на ключі дискретних виходів відповідно  $Z_3$  і  $Z_4$ . Ключ  $Z_3$  замкнений, якщо  $E > E_+$ , а ключ  $Z_4$  замкнений, коли  $E < E_-$ .

*Блок діагностики відмов* аналізує несправності регулятора і за їх наявності розмикає ключ дискретного виходу  $Z_0$ , забороняє функціонування виходів  $Z_1, Z_2$ , "заморожує" для аналогового регулятора вихід  $U_1 (U_2)$  та періодично висвітлює на дисплеї код виду несправності.

Вказані на рис. 4.4. параметри настроювання усіх програмних блоків уводяться налагодником за відповідними списками, які наводяться в інструкції по експлуатації приладу.





Загальна схема підключення зовнішніх пристроїв до регулятора наведена на рис. 4.4. Усі з'єднання виконуються мідним проводом з перерізом не менше  $0,35 \text{ мм}^2$ . На рис. 4.5 – 4.8 наведені основні схеми підключення зовнішніх пристроїв.

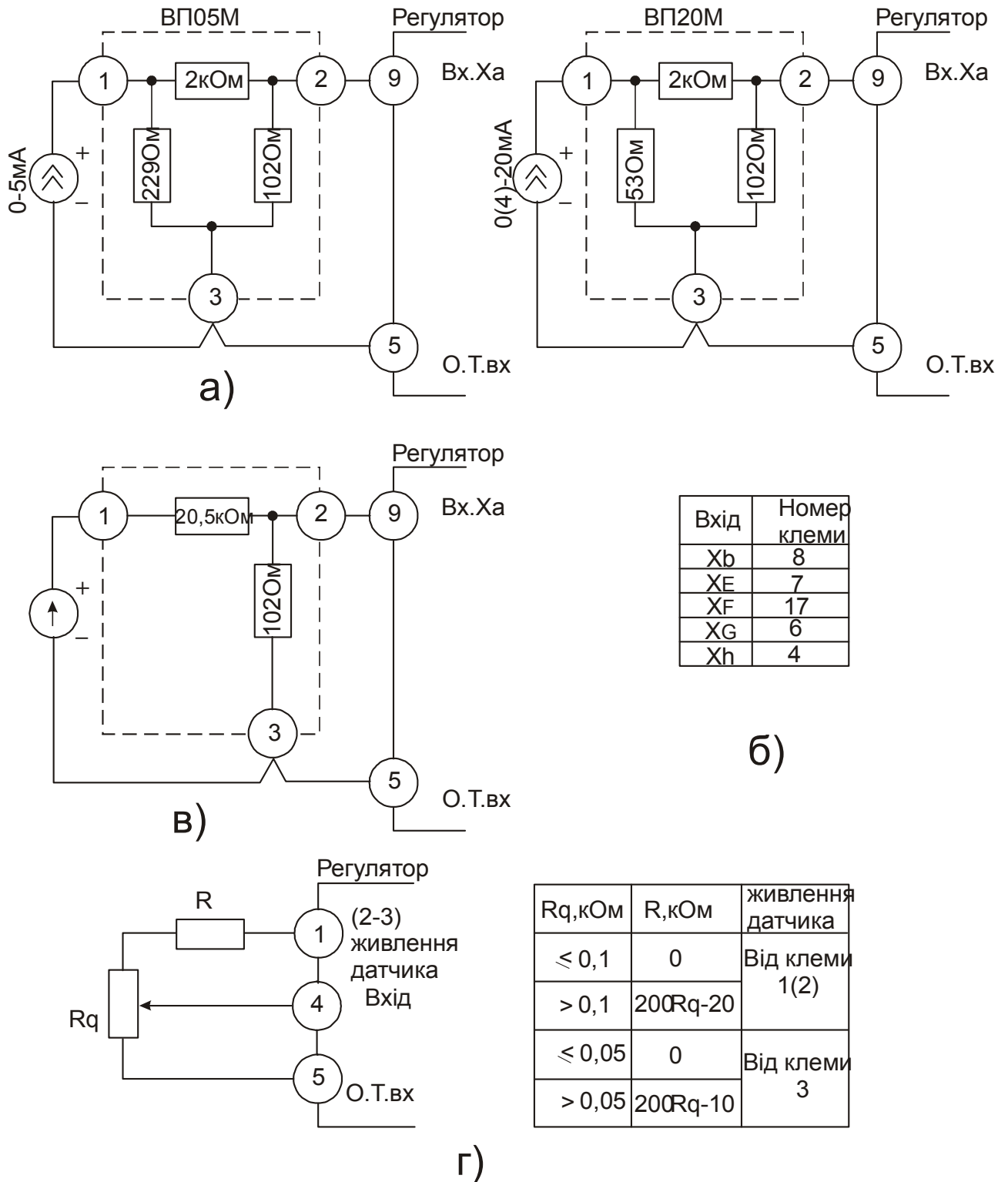


Рис. 4.5. Схеми підключення датчиків потенціометричних (г) і постійного струму (а-в).

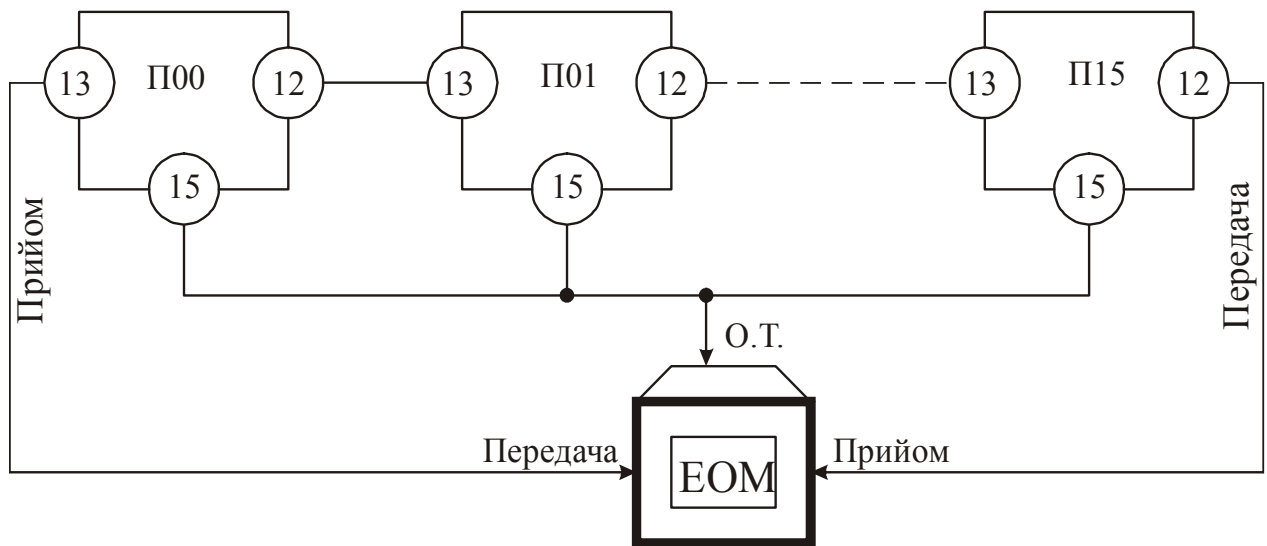


Рис. 4.6. Схема підключення кола інтерфейсного зв'язку: П00- П15 відповідний номер регулятора МИНИТЕРМ 400.00 в інтерфейсному каналі(список Stat).

Підключення датчиків потенціометричних і постійного струму (див. рис. 4.5) проводяться за допомогою окремих жгутів. При цьому довжина ліній, що з'єднує узгоджуючі пристрої ВП05М, ВП20М і ВП10М з регулятором, не повинна перевищувати  $1 - 2$  м. Вивід “-“ датчиків необхідно з'єднувати безпосередньо до клеми 3 пристроїв ВП. Підключення датчиків до входів  $X_b$ ,  $X_e$ ,  $X_G$ ,  $X_h$  аналогічне, але клемма 9 змінюється на клему згідно таблиці на рис. 4.5 (б). Клеми входів, що не використовуються необхідно з'єднувати перемичкою з клемою 5.

Підключення кола інтерфейсного зв'язку проводиться за схемою, що представлена на рис. 4.6.

Усі з'єднання виконуються звитими проводами, довжина лінії поміж сусідніми приладами не більше  $15$  м, а при використанні перетворювача И300 – до  $500$  м. На рис. 4.7 наведена схема підключення кіл інтерфейсного зв'язку до послідовного порту ЕОМ.

Підключення кіл живлення і виходів наведено на рис. 4.8.

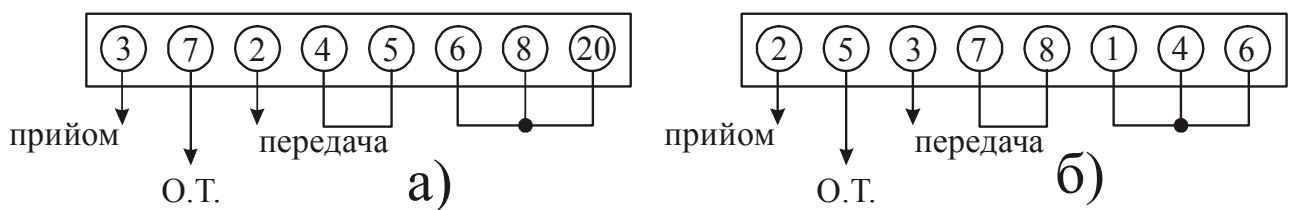


Рис. 4.7. Схема підключення кіл інтерфейсного зв'язку до послідовного порту ЕОМ: а)- 25 клемний роз'єм; б)- 9 клемний роз'єм.

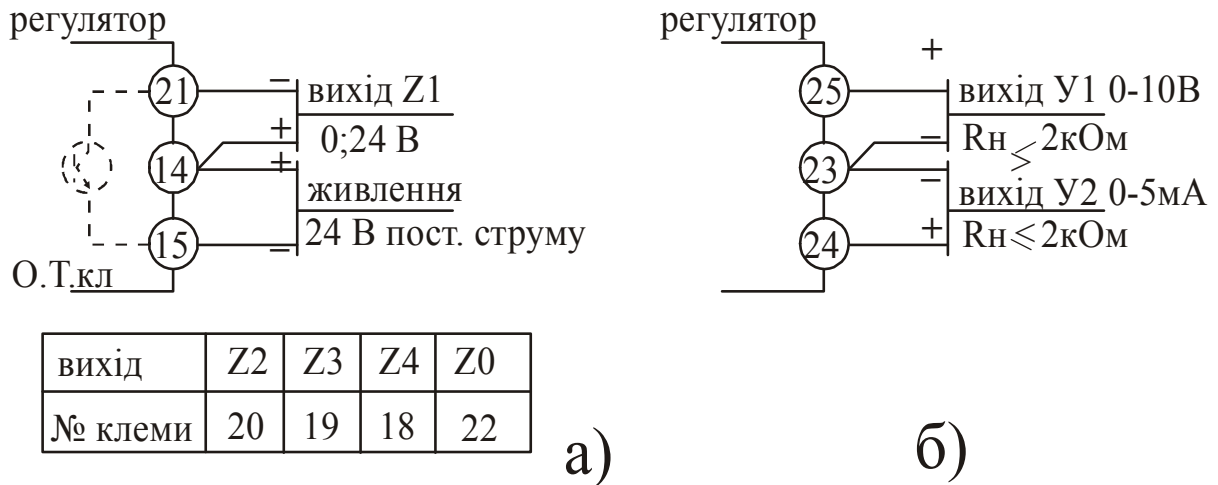


Рис. 4.8. Схеми підключення кіл живлення, дискретних виходів (а) і аналогових виходів (б).

На рис. 4.8 а показано підключення до виходу **Z1**. Підключення навантаження до виходів **Z2**, **Z3**, **Z4** і **Z0** здійснюється аналогічно. При цьому замість клеми 21 використовується клемма згідно таблиці представленої на рис 4.8 а. Вихід у регуляторі захищений від перенапруги при роботі на індуктивне навантаження. Підсумковий опір навантаження не менше  $160 \text{ Ом}$ .

Для аналогових виходів припустимо як одночасне підключення навантажень до виходів **Y1** і **Y2** так і окремо будь-якого з виходів по вибору.

*Приклади схем підключення регулятора з різними зовнішніми пристроями наведені на рис. 4.9 – 4.13. Вибір перерізу проводів кола навантаження підсилувачів визначається максимально припустимим струмом не більше  $6 \text{ А/мм}^2$ . Кола навантажень повинні бути захищені автоматом живлення або швидкодіючим запобіжником.*

Клеми У300: 15, 17, 20, 13 і 10 – є вільними і використовуються як проміжні для підключення зовнішніх пристроїв. Максимальне сумарне навантаження на виходи “ $\blacktriangle$ ”, “ $\blacktriangledown$ ” і “відмова” не менше  $800 \text{ Ом}$ .

При підключенні за схемою, наведеною на рис. 4.11, здійснена можливість організації ручного дистанційного керування підсилувачем У13Н незалежно від регулятора. Якщо такої необхідності немає, то клеми 13, 17 і 18 підсилувача У13Н залишаються вільними. Також у цьому підсилувачі вільними є клеми 12, 14 і 16, що можуть бути використані для підключення зовнішніх пристроїв.

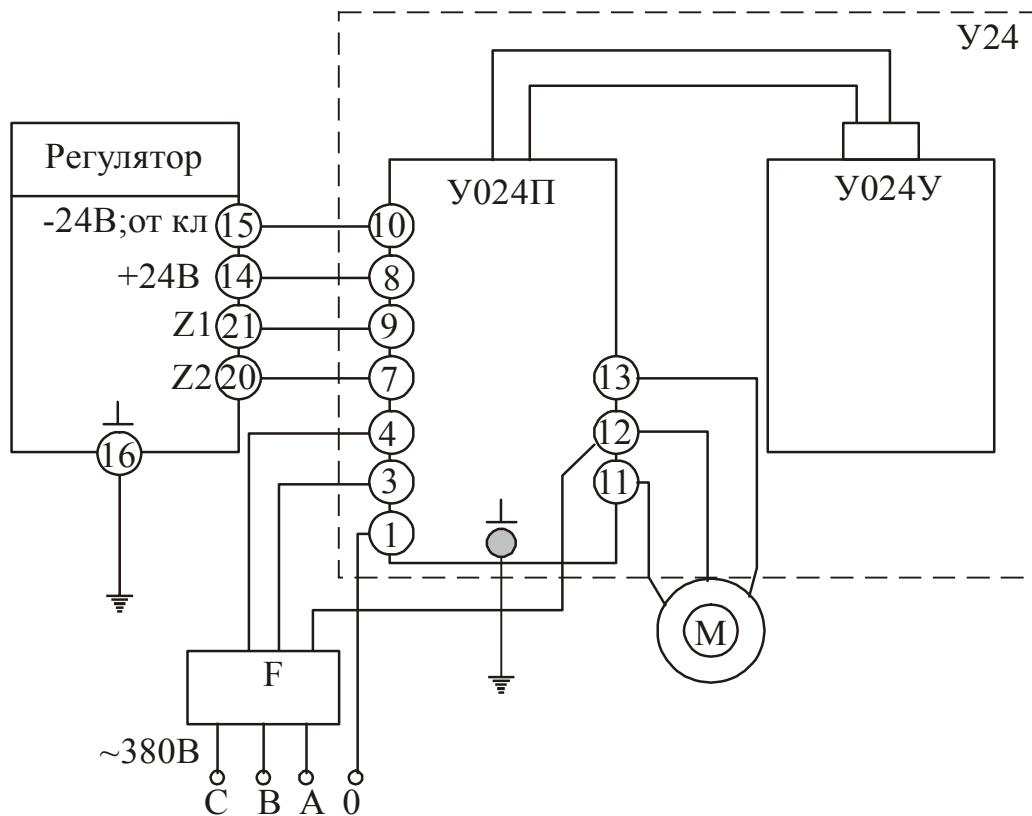


Рис. 4.9. Схема підключення регулятора з підсилювачем У24:

- F автомат захисту типу АП50-3МТ;
- М трифазний синхронний електродвигун.

При застосуванні у схемах керування пневматичних виконавчих пристроїв підключення регулятора здійснюють за схемою, що приведена на рис. 4.12, з використанням групового джерела живлення П300.4. Схема підключення з джерелом П300.2 аналогічна, але останній має тільки два виходи (вихід 1 і вихід 2) для живлення регулятора. При цьому номери клем зберігаються.

Підключення регулятора з джерелом живлення П300.Р3 наведено на рис. 4.13. Пристрій П300.Р3 має вмонтовані реле РП21-003, які мають наступну комутаційну спроможність:  $1,2\text{ A}$  змінного струму для  $220\text{ V}$  і  $2,4\text{ A}$  постійного струму для  $24\text{ V}$ . Підключення інший кіл регулятора здійснюється у відповідності зі схемою представленою на рис. 4.4.

Споживча потужність приладу не перевищує  $3,6\text{ Вт}$ . У регуляторі передбачено резервне живлення від сухого елемента СR-2032 ( $3,2\text{ В}$ ) з метою збереження інформації, що закладена наладником, при зривах живлення у мережі. Маса приладу до  $0,6\text{ кг}$ . Габаритні розміри:  $48 \times 96 \times 161\text{ мм}$ .

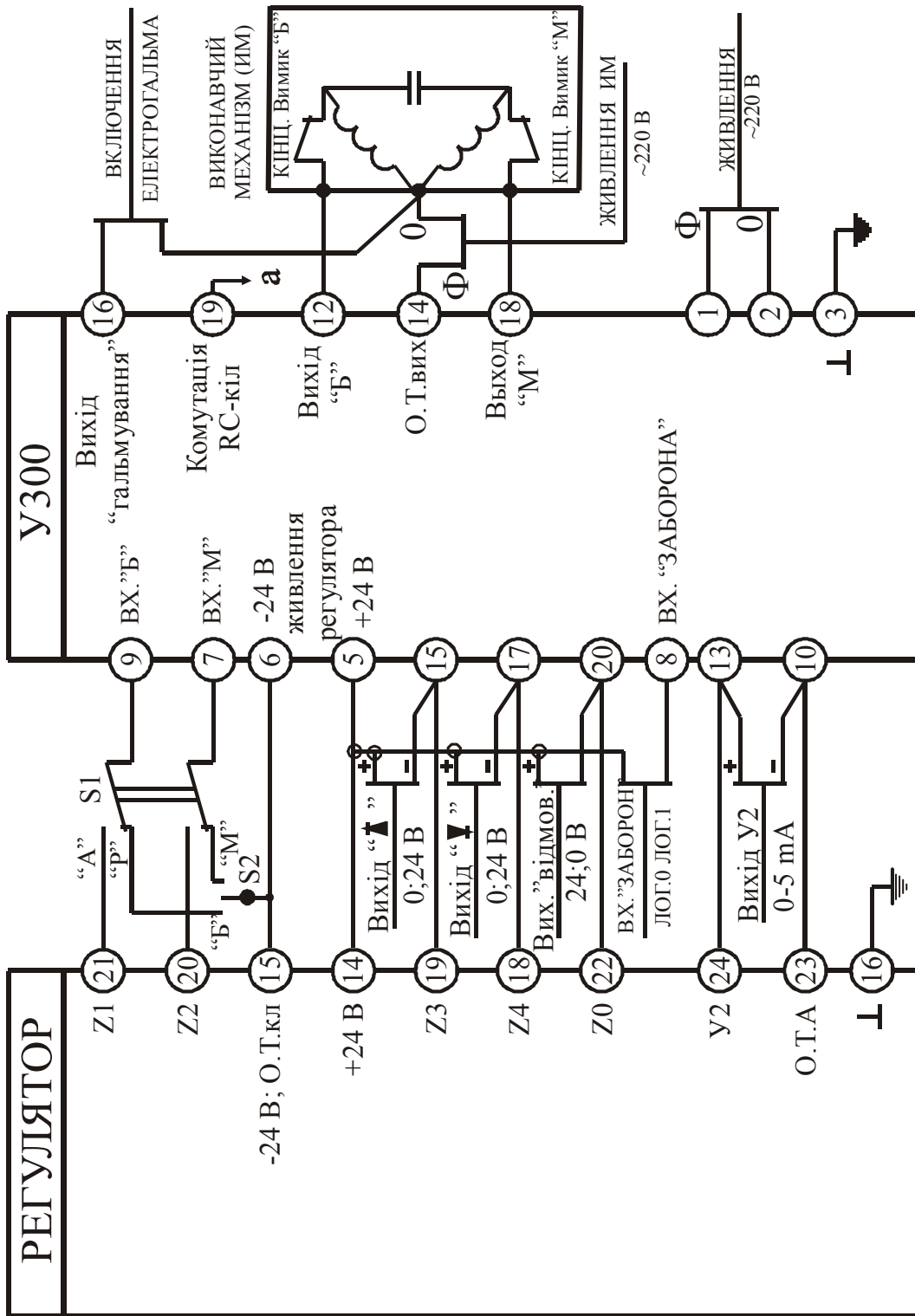


Рис. 4.10. Схема підключення регулятора з підсилювачем УЗ00.

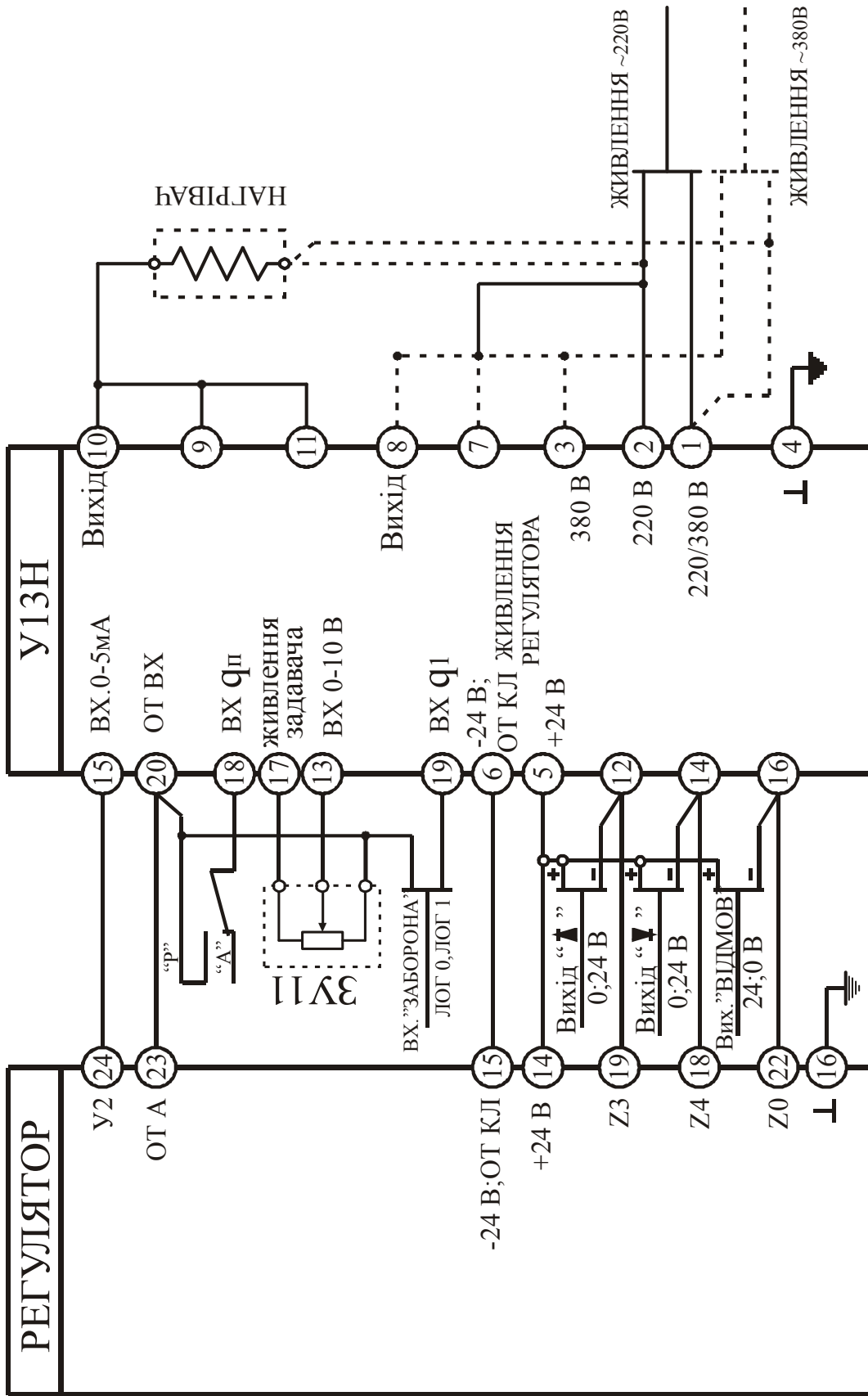


Рис. 4.11. Схема підключення регулятора з підсилювачем У13Н.

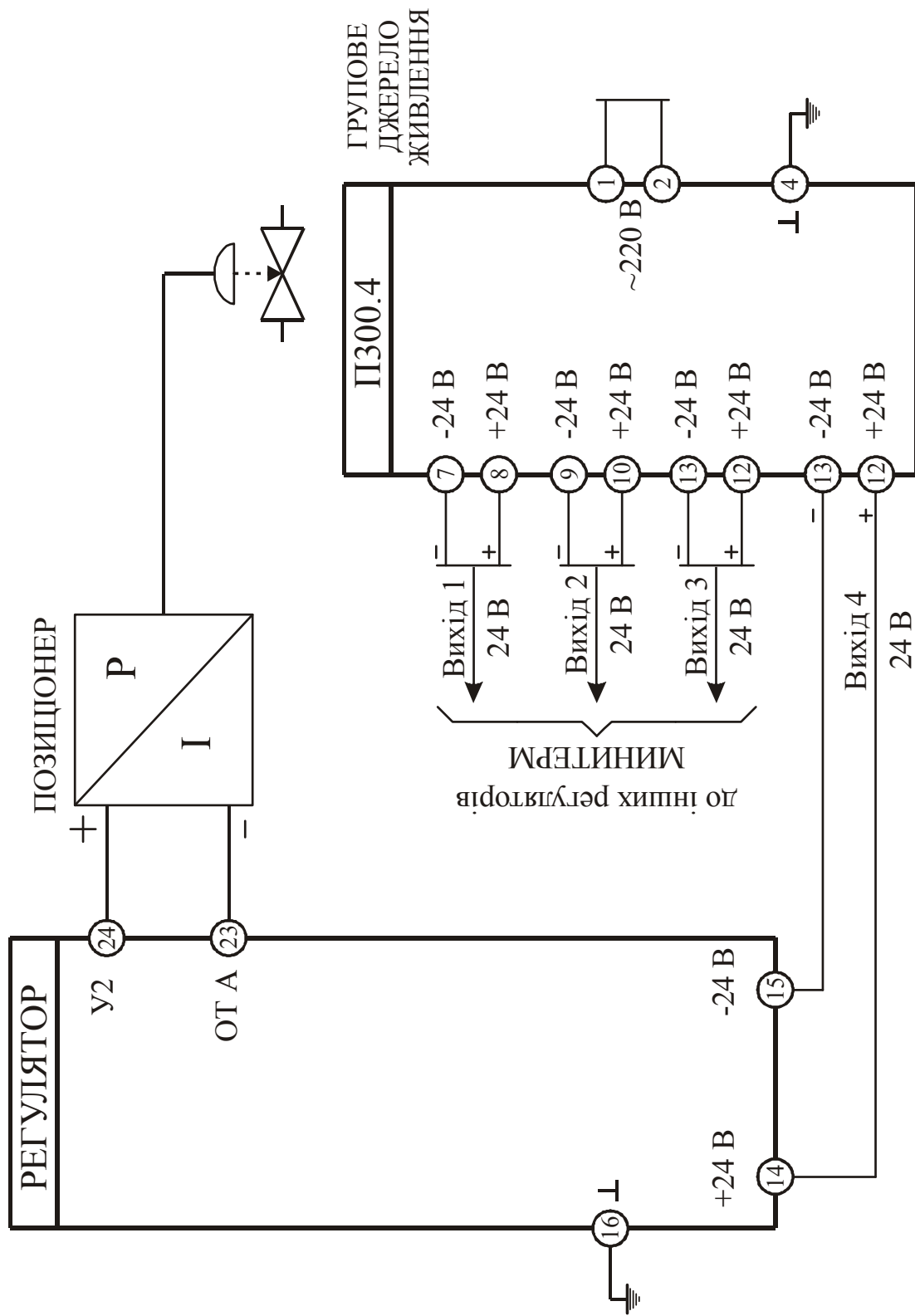


Рис. 4.12. Схема підключення регулятора з електропневматичним позиціонером (перетворювач) і груповим джерелом живлення серії ПЗ00.

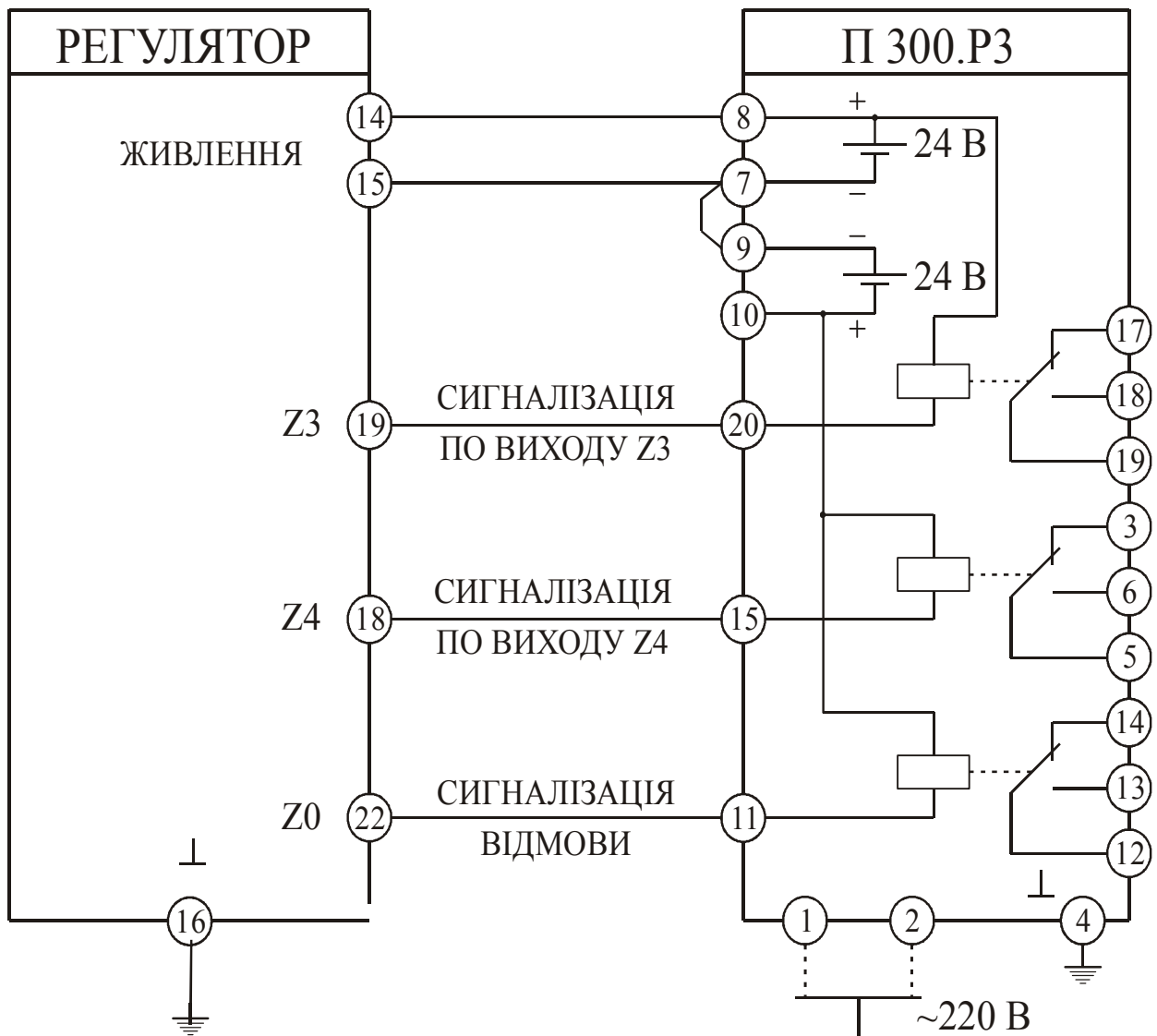


Рис. 4.13. Схема підключення регулятора з груповим джерелом П300.РЗ

**Комплекс приладів МИНИТЕРМ 450** утворюють регулятори, основні модифікації яких у залежності від характеристик входів-виходів наведені у табл. 4.1.

Регулятори містять два цифро-символьних дисплея та програмний задавач (до 24-х дільниць) і дозволяють здійснювати дистанційне керування програмним задавачем та основними виходами. Можуть безпосередньо керувати однофазними електричними виконавчими механізмами, а також електронагрівачами через зовнішній оптосимістор. Мають шість входів для дискретних сигналів. Основна похибка вимірювання аналогових входних сигналів регуляторів складає (не більше): для сигналів  $0 \div 50$  мВ постійного струму – 0,25 %; для термометрів опору – 0,4 %; для термопар з НСХ ХА(К), ХК(L), ПП(S) і ВР(A)-1 – відповідно 0,3 %, 0,5 % і 1 %.



Таблиця 4.1.

## Модифікації регуляторів МИНИТЕРМ 450.

Модифікація регулятора	Аналогові входні сигнали	Основні вихідні сигнали
МИНИТЕРМ 450.00.0	Шість входів для датчиків постійного струму 0-5, 0(4)-20мА, 0-50 мВ, 0-10В.	Один імпульсний вихід (два “сухих” ключа на 380В, 1А змінного струму. Один аналоговий вихід 0-5, 0(4)-20мА)
МИНИТЕРМ 450.00.1		Один імпульсний вихід (два “сухих” ключа на 380В, 1А змінного струму).
МИНИТЕРМ 450.22.0	По вибору: три, два або один вхід для термометрів опору з НСХ 50П, 50М, 100П, 100М.	Один імпульсний вихід (два “сухих” ключа на 380В, 1А змінного струму. Один аналоговий вихід 0-5, 0(4)-20мА)
МИНИТЕРМ 450.21.1	Можливо підключення датчиків постійного струму: два входи – замість другого і третього термометрів опору.	Один імпульсний вихід (два “сухих” ключа на 380В, 1А змінного струму).
МИНИТЕРМ 450.22.1		
МИНИТЕРМ 450.21.2		Один вихід ШИМ (“сухий” ключ на 48В, 0,15А постійного струму). Один аналоговий вихід 0-5, 0(4)-20мА)
МИНИТЕРМ 450.31.2	Один вхід для термопари по вибору: ХА(К), ХК(Л), ПП(С), ВР(А)-1.	Один імпульсний вихід (два “сухих” ключа на 380В, 1А змінного струму).
МИНИТЕРМ 450.31.2	Два входи для датчиків постійного струму.	Один вихід ШИМ (“сухий” ключ на 48В, 0,15А постійного струму). Один аналоговий вихід 0-5, 0(4)-20мА)
Примітка: 1. Додатково регулятори всіх модифікацій мають три дискретних виходи (“сухі” ключі на 48В, 0,15А постійного струму) і вмонтоване джерело 24В постійного струму для живлення навантаження основних і додаткових виходів. 2. Модифікації МИНИТЕРМ 450.22.0 і 450.22.1 мають умонтований енергозберігаючий таймер-календар, а програмований задавач відсутній.		

Вимірювальні кола підключаються за допомогою штепсельного 25-ти клемного роз'язтя, а силові кола з'єднуються затискачами “під гвинт” (чотирнадцять клем). Живлення регулятора та умови застосування ідентичні приладам МИНИТЕРМ 400. Споживча потуж-

ність не перевищує  $4,5 \text{ ВА}$ . Маса приладу до  $0,6 \text{ кг}$ , габаритні розміри –  $96 \times 48 \times 160 \text{ мм}$ .

### 4.3. КОМПЛЕКС МІКРОПРОЦЕСОРНИХ РЕГУЛЯТОРІВ СЕРІЇ РТЭ.

Регулятори серії РТЭ застосовуються у автоматизованих системах керування в енергетичній, металургійній, хімічній, харчовій та інших галузях промисловості. Основне призначення цих приладів – це регулювання температури у електротермічному обладнанні (електропечі опору, плавильні, контактного нагріву), а також для керування нагрівом газових печей. Основні моделі цих регуляторів, їх загальні характеристики та функціональні можливості наведені у табл. 4.2.

Живлення приладів здійснюється напругою змінного струму  $220 \text{ В}$  частотою  $50 \text{ Гц}$ , а споживча потужність складає  $5 \text{ ВА}$ . За виходом регулятори виготовляються у трьох виконаннях (остання цифра у позначенні): 0 – імпульсний сигнал постійного струму до  $0,5 \text{ А}$  і напругою до  $30 \text{ В}$  для керування тиристорами по трьом фазам з включенням у нулі по кожній фазі; 1 – дискретний сигнал змінного струму до  $2 \text{ А}$  напругою до  $220 \text{ В}$  для керування магнітними пускачами; 2 – дискретний сигнал змінного струму до  $2 \text{ А}$  напругою до  $220 \text{ В}$  для керування електрорушійними виконавчими механізмами постійної швидкості. Діапазони зміни динамічних коефіцієнтів пропорційні  $K_D$ , постійних часу інтегрування  $T_{II}(с)$  і диференціювання  $T_{Д}(с)$  складають від 0 до 2000. Межа припустимої додаткової похибки, що виникає із зміною температури навколишнього повітря від температури  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до будь-якої температури у межах від 5 до  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  при зміні температури на кожні  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , дорівнює  $\pm 0,1 \%$  від діапазону для РТЭ-5.4 і  $\pm 0,25 \%$  – для усіх інших моделей.

Регулятори розраховані для зануреного монтажу на вертикальних щитах і панелях. Кріплення до щита здійснюється за допомогою кронштейнів.

Регулятори призначені для експлуатації у приміщеннях з температурою навколишнього повітря від 5 до  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  при відносній вологості до 80 %. Умови впливу вібрації не повинні перевищувати частоти  $35 \text{ Гц}$  і амплітуди  $0,35 \text{ мм}$ . Не дозволяється застосовувати у приміщеннях з підвищеним впливом концентрації пилу, бризок і води.

Таблиця 4.2

## Технічні характеристики мікропроцесорних регуляторів РТЭ.

Позначення регулятора	Вид вихідного сигналу	Діапазон вимірювання і регулювання	Функціональні можливості		Кількість			Тривалість по кожному кроку, хвилин.	Маса не більше, кг	Габаритні розміри, мм
			Загальні	Додаткові	Каналів регулювання	Розрядів АЦП/ЦАП	Температурно-часових кроків програми			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
РТЭ-4.1-10 РТЭ-4.1-11 РТЭ-4.1-12	ТХА(К)	0÷1200 <sup>0</sup> С	За умов жорсткої структури конфігурування забезпечує: регулювання за ПД-алгоритмом широтно-імпульсною або число-імпульсною модуляцією; автоматичне відключення нагріву (роботи) по закінченні часу, встановленого таймером; цифрову	Позиційний алгоритм регулювання	1	8/0	12	0÷250	1	40×96×150
РТЭ-4.1-20 РТЭ-4.1-21 РТЭ-4.1-22	ТХК(L)	0÷600 <sup>0</sup> С								
РТЭ-4.1-30 РТЭ-4.1-31 РТЭ-4.1-32	ТСМ	0÷200 <sup>0</sup> С								
РТЭ-4.1М-10 РТЭ-4.1М-11 РТЭ-4.1М-12	ТХА(К) ТХК(L) Постійний струм	0÷1200 <sup>0</sup> С 0÷600 <sup>0</sup> С 4÷20, 0÷5мА	Інтерфейсний зв'язок RS485 чи RS232; вільна структура конфігурування; можливість підключення спеціалізованого табло для індикації значень параметрів регулювання.	1	16/10	24	0÷5999	1.2	43×96×150	
РТЭ-4.1М-20 РТЭ-4.1М-21 РТЭ-4.1М-22	ТПП10 Постійний струм	0÷1600 <sup>0</sup> С 4÷20, 0÷5мА								

Продовження табл. 4.2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
РТЭ-4.1М-30 РТЭ-4.1М-31 РТЭ-4.1М-32	ТСМ ТСП Постійний струм	0÷200 <sup>0</sup> С  4÷20, 0÷5мА	індикацію поточного параметра, параметрів завдання (за викликом) і уставок (значень кроків програми); світлодіодну індикацію режиму роботи, видачу сигналу на виконавчий пристрій, аварійного відключення; керування тиристорами імпульсними сигналами постійного струму, магнітними пускачами, електричними виконавчими пристроями постійної швидкості.	-//-	1	16/10	24	0÷5999	1.2	43×96×150
РТЭ-4.4-10 РТЭ-4.4-12	ТХА(К) ТХК(Л)	0÷1200 <sup>0</sup> С 0÷600 <sup>0</sup> С		Позиційний алгоритм регулювання	4	8/0	-	-	2	80×140×160
РТЭ-4.4-20 РТЭ-4.4-22	ТСМ ТСП	0÷200 <sup>0</sup> С		Позиційний алгоритм регулювання; можливість підключення спеціалізованого табло для індикації значень параметрів регулювання	8	10/0	-	-	2	80×140×160
РТЭ-4.4М-10 РТЭ-4.4М-12	ТХА(К) ТХК(Л)	0÷1200 <sup>0</sup> С 0÷600 <sup>0</sup> С		Інтерфейсний зв'язок RS485 чи RS232; вільна структура конфігурування; можливість підключення спеціалізованого табло для індикації значень параметрів регулювання.	4	16/10	24	0÷5999	1,5	170×85×200
РТЭ-4.4М-20 РТЭ-4.4М-22	ТСМ ТСП	0÷200 <sup>0</sup> С								
РТЭ-5.4-10 РТЭ-5.4-11 РТЭ-5.4-12	ТПП10 ТХА(К) ТХК(Л) Постійний струм	0÷1600 <sup>0</sup> С 0÷1200 <sup>0</sup> С 0÷600 <sup>0</sup> С 4÷20, 0÷5мА								

Примітка: точність індикації, часу - ( $\pm$ ) 1хвил.; точність індикації температури для приладів РТЭ-4.1, РТЭ-4.1М, РТЭ-4.4 і РТЭ-5.4 відповідно складає - 0,5%, 0,2%, 0,5% і 0,15% від діапазону виміру; параметри конфігурування - сигнали, що надходять на входи, метод керування зовнішніми пристроями (ШИМ, ЧИМ, 4-20, 0-5 мА), закон регулювання (ПІД, адаптивний з елементами FUDZZY-logic).

*Регулятор РТЭ-4.1* – призначений для виробки регульовального впливу за ПІД – алгоритмом керування. Метод керування – число-імпульсний з включенням у нулі по кожній фазі силових тиристорних елементів .

Регулятор забезпечує: регулювання температури за заданою програмою; цифрову індикацію поточної температури; значення уставок температури (за викликом); світлодіодну індикацію режиму роботи; номери поточного кроку програми; аварійного відключення; вихід на зовнішні пристрої для керування силовими тиристорами по трьом фазам з включенням у нулі по кожній фазі; закінчення роботи і аварійного відключення (перехід у режим “стоп”) у разі обриву термоперетворювача чи виході параметра за встановлені межі.

Загальний вигляд регулятора та його габаритно-установочні розміри наведені на рис. 4.14.

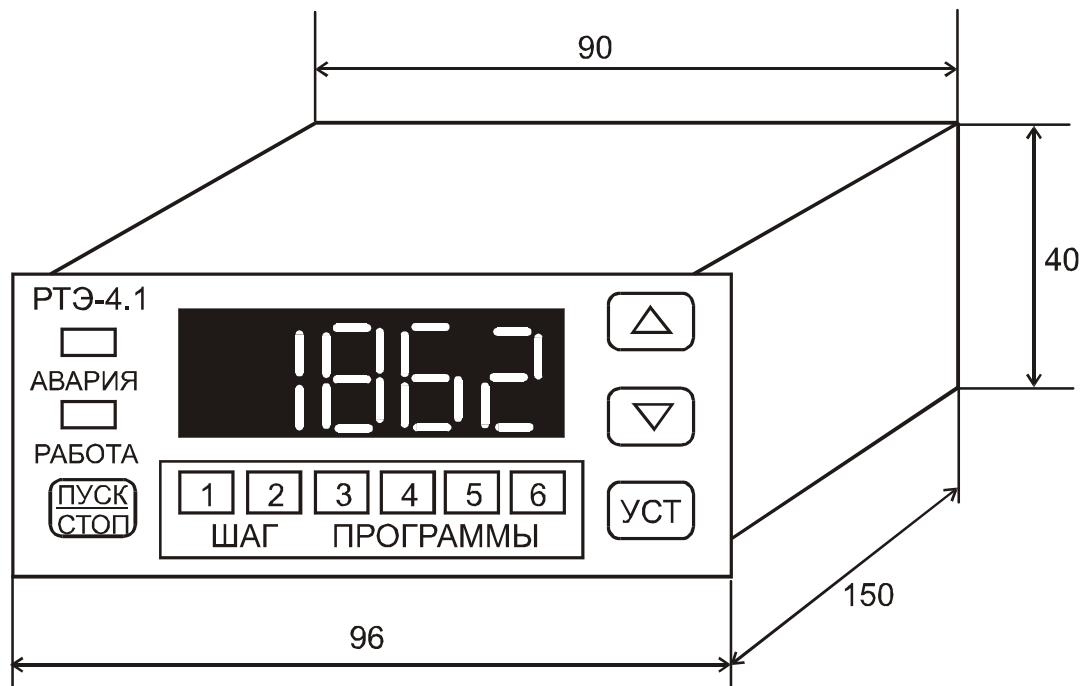


Рис. 4.14. Загальний вигляд регулятора РТЭ-4.1.

Згідно з рис. 4.14 на лицьовій панелі розташовані: чотирихзначне інформаційне табло; світлодіодні індикатори стану процесу регулювання (крок програми); світлодіодні індикатори стану “робота” і порушення температурного режиму “Аварія”; кнопки уводу уставок (“більше “>”, менше “<”) і керування регулятором “ПУСК/СТОП”.

На задній панелі розташовані колодки для підключення регулятора до зовнішніх пристроїв і гвинт заземлення.

Регулятор складається з вхідного пристрою, центрального процесора, індикатора і вихідного пристрою. Вхідний пристрій містить: підсилювач сигналу термоперетворювача ТП, схему компенсації температури холодного спаю або генератора струму живлення ТП опору.

Вхідні сигнали від термоперетворювачів, що надходять на вхід регулятора, підсилюються підсилювачами. Далі цей сигнал перетворюється у низькочастотний і через схему гальванічного розв'язування прямує на вхід мікроконтролера. Мікроконтролер вимірює вхідну частоту і обчислює температуру термоперетворювачів з урахуванням температури холодного спаю (для термоелектричних перетворювачів) та виводить сигнали керування на зовнішній пристрій (симістор), синхронізовані по фазі з частотою мережі живлення. Вихідні пристрої по сигналах “ПУСК/СТОП” і “Кінець роботи” містять у якості ключових елементів симістори типу ТС-106 – для керування зовнішніми пристроями.

Джерело живлення регулятора має стабілізовані гальванічно розв'язані напруги величиною  $5\text{ В}$  і  $\pm 15\text{ В}$  для живлення схеми керування та  $9\text{ В}$  – для живлення вихідних симісторів.

Регулятор РТЭ-4.1М також призначений для виробки регульованого впливу за ПІД – алгоритмом керування. Габаритно-установочні розміри регулятора ідентичні наведеним на рис. 4.14. Регулятор забезпечує: виробку імпульсних сигналів за ПІД алгоритмом керування у відповідності із заданою програмою; цифрову індикацію поточного значення температури, значення уставки (за викликом); поточного кроку програми; значення параметрів регулювання (за викликом); світлодіодну індикацію режиму роботи, видачі сигналу на виконавчі пристрої, аварійного відключення; вихід на зовнішні пристрої сигналу постійного струму  $0 \div 5\text{ мА}$  по каналу регулювання; керування тиристорними вихідними елементами, колами аварійної сигналізації, стану регулятора (ПУСК/СТОП), керування виконавчими механізмами (у відповідності з виконанням  $0 \div 2$ ); зв'язок з ПЕОМ за інтерфейсом RS485.

Розташування і призначення індикаторів та кнопок керування на лицьовій панелі ідентично попередньому регулятору. На задній панелі регулятора розташовані колодки і роз'єкти для підключення регулятора до зовнішніх пристроїв.

Загальний устрій регулятора майже не відрізняється від РТЭ4.1. Але на відміну від нього вхідні сигнали від термоперетво-

рювачів подаються на 16-ти розрядний багатоканальний АЦП, виконаний на базі мікросхеми AD7706. До того ж джерело живлення видає стабілізовані гальванічно розв'язані напруги величиною  $5\text{ В}$  – для живлення схеми керування і лінії зв'язку RS485,  $15\text{ В}$  – для живлення вхідного пристрою.

*Регулятор температури РТЭ-5.4* призначений для керування виконавчими електрорушійними механізмами типу МЕО шляхом виробки регульовального впливу за ПІД-алгоритмом. Регулятор забезпечує: виробку керуючого впливу, на три виконавчі механізми за ПІД-алгоритмом; цифрову індикацію поточної температури, поточного номера кроку програми, типу аварії, значень настроювальних коефіцієнтів (за викликом); світлодіодну індикацію режиму роботи, аварійної ситуації, стану виконавчих механізмів, сигналів керування виконавчими механізмами, аварійного відключення; зв'язок із зовнішніми пристроями по вхідних сигналах (термоперетворювачі, струмові входи по витратам, контактні входи стану МЕО і готовності) і вихідних сигналах (керування трьома виконавчими механізмами МЕО, постійного струму  $0 \div 5\text{ мА}$  для реєстрації поточної температури, контактні виходи “Аварія” і “Робота”, інтерфейсний – RS485).

На лицьовій панелі розташовані: шестизначне інформаційне табло; світлодіодна індикація стану виконавчих механізмів; світлодіодний індикатор стану “Робота” і порушення режиму регулювання “Аварія”; кнопки уводу уставок і керування регулятором “ПУСК/СТОП”, більше “>” та менше “<”.

На задній панелі регулятора розташовані запобіжник на  $5\text{ А}$ , колодки для підключення регулятора до зовнішніх пристроїв. По каналу RS485 з ПЕОМ у регуляторі можна у разі необхідності змінювати конфігурування.

#### **4.4. МІКРОПРОЦЕСОРНІ РЕГУЛЯТОРИ СЕРІЇ МІК та МТР.**

Мікропроцесорні регулятори МІК та МТР представляють собою новий клас сучасних компактних малоканалних контролерів, потужних і універсальних у використанні, але одночасно простих з погляду програмування (конфігурації), обслуговування та експлуатації. Кліматичне виконання дозволяє застосовувати у приміщеннях з температурою навколишнього повітря від  $5$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{С}$  і відносній вологості до  $80\%$ . Живлення здійснюється напругою змінного стру-

му 220 В і частотою 50 Гц. Споживча потужність не перевищує 8 Вт. Технічні характеристики окремих приладів зведені до табл. 4.3.

Габаритні розміри: 96×96×165 мм. Прилади призначені для щитового монтажу.

*Мікропроцесорні регулятори МІК-2* призначені для виміру і контролю вхідних параметрів, а також управління виконавчими пристроями різних типів відповідно до заданої логіки, та роботи по відповідним законам регулювання. Вони містять два незалежні регулятори і мають програмовану функцію логіки виходу, а також можливість вибору закону регулювання: 2-х позиційне регулювання, 3-х позиційне регулювання, П, ПІ, ПД, ПІД – регулювання з імпульсним виходом. Оснащені гальванічно розділеним інтерфейсом RS485 (протокол MODBUS), що дозволяє використовувати прилад у якості віддаленого мікроконтролера при роботі у сучасних мережах управління та збору інформації. Кожен вхід гальванічно розв'язаний від інших входів та інших кіл.

*Мікропроцесорні регулятори МІК-21* призначені для застосування у системах автоматичного керування технологічних процесів з реалізацією 2-х, 3-х позиційних алгоритмів, П, ПІ, ПД, ПІД – алгоритмів керування з імпульсним або аналоговим виходом. Внутрішня програмна пам'ять контролера містить велику кількість стандартних функцій, необхідних для вирішення більшості інженерних прикладних задач. Контролери не вимагають від користувача спеціальних знань та навиків програмування, дуже гнучкі у практичній роботі за рахунок можливості швидкої зміни конфігурації. Конфігурування здійснюється через передню панель приладу або через гальванічно розділений інтерфейс RS485 (протокол MODBUS), що дозволяє використовувати прилад у якості віддаленого контролера при роботі у сучасних мережах управління та збору інформації. Параметри конфігурації контролера зберігаються в енергонезалежній пам'яті і він здатний відновити виконання задач керування після переривань напруги живлення.

*Мікропроцесорні терморегулятори МТР-8* можуть використовуватись в якості: 8-ми каналних вимірювачів температури; 8-ми каналного сигналізатора виходу параметра за припустимі границі; 8-ми каналного приладу захисного відключення по температурі; 8-ми каналного двопозиційного регулятора температури. Кожен з 8-



ми каналів може виконувати будь-яку з вищенаведених функцій при відповідній переконфігурації терморегулятора.

Таблиця 4.3.  
Технічні характеристики мікропроцесорних регуляторів  
МІК та МТР.

Найменування показника	Тип мікропроцесорного регулятора			
	МІК-2	МІК-21	МТР-8	
Кількість аналогових входів	2	2	8	
Вид аналогового вхідного сигналу (опір вхідний)	0 ÷ 10В (27кОм), 0 ÷ 5мА (100Ом), 0 ÷ 20мА (100Ом), 4 ÷ 20мА (400Ом)		ТСМ (НСХ100М), ТСП (НСХ100П)	
Діапазон вимірювання температур по входу, °С	-	-	-50 ÷ 180 -100 ÷ 750	
Максимальна похибка АЦП, ± %	0,25	0,2	0,25	
Час вимірювання, с	0,5			
Тип виходу (за виконанням)	Дискретний або імпульсний	Транзисторний ключ ВК * або релейний вихід на напругу 220В і струм 8А		
	Аналоговий	-	0 ÷ 5мА (R <sub>н</sub> =2,5кОм) 0 ÷ 20мА (R <sub>н</sub> =1кОм) 4 ÷ 20мА (R <sub>н</sub> =1кОм)	
Кількість виходів	Дискретних (імпульсних)	2(2)	4(2)	8
	аналогових	-	2	-
Максимальна похибка ЦАП, ±%	-	0,5	-	
Маса блоку, кг	1	1	0,9	
Примітка: R <sub>н</sub> – опір зовнішнього навантаження, ВК – відкритий колектор				

Внутрішня схема вимірювань температури має високу захищеність від перешкод і дозволяє підключати до МТР-8 датчики ТСМ по 3-х та 4-х провідній схемі включення, у залежності від виконання приладу. У випадку обриву чи короткого замикання датчика, при перевищенні температури для даного типу датчика, а також при досягненні поточного температурного заданого значення в будь-якому з каналів – прилад подає сигнал аварії. При цьому на передній панелі засвічується відповідний світлодіод, а вихідний транзисторний ключ відповідного каналу змінить своє положення. У приладі застосована групова (по всіх входах) гальванічна розв'язка аналогових входів від інших кіл.

#### **4.5. КОМПЛЕКС МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИЛАДІВ ПРОТАР.**

Прилади цього комплексу є універсальними та багатофункціональними і призначені для застосування у різних галузях промисловості. Деякі технічні характеристики приладів комплексу ПРОТАР зведені до табл. 4.4. Основні функціональні можливості приладів ПРОТАР: гальванічне розділення чотирьох аналогових вхідних сигналів і двох дискретних вхідних сигналів один від одного та від інших сигналів; безударне перемикавання режимів керування з автоматичного на ручне і навпаки; ручне керування пультом оператора та з верхнього рівня АСКТП; цифрова індикація сигналів і параметрів. Для реалізації вільно програмуємої структури існують спеціальні функції (алгоритми), які у більшості випадків можуть використовуватись багатократно.

Найчастіше прилади цього комплексу у режимі вільного програмування виконують: регулювання у відповідності з П, ПД, ПІ, ПІД – алгоритмом по двом незалежним каналам з імпульсним виходом і одному каналу з аналоговим виходом, обчислення сигналів розузгодження, завдання та інших проміжних сигналів алгоритму; селекування, переключення і відключення сигналів; уведення в алгоритми регулювання додаткових статичних і динамічних, лінійних і нелінійних ланок; автоматична зміна будь-яких параметрів і перенастроювання алгоритму приладу за бажанням користувача; формування сигналів програмного задавача з кількістю кроків програми до 100 діляниць, програмне регулювання; каскадне регулювання; формування сигналу аварійної сигналізації відмови системи регулюван-

ня за сформованим споживачем алгоритмом, у тому числі захист від обриву у колі датчика; індикація будь-яких параметрів у зручних для користувача розмірностях.

Таблиця 3.5.

Технічні характеристики регулювальних приладів  
комплексу ПРОТАР.

Найменування показника	Модифікація приладу							
	100	110	101	111	102	112	120	130
Кількість вхідних дискретних сигналів	11	10	11	10	11	10	11	10
Кількість вхідних аналогових сигналів	6							
Діапазон вхідного аналогового сигналу	0-10 В (постійний струм)				0-10 В, 0-5, 0(4)-20мА (постійний струм)			
Величина дискретного (імпульсного) вхідного сигналу	0 і 24 (постійний струм) чи зміна стану безконтактного ключа							
Кількість функцій вільного програмування	38		60		60		47	
Наявність жорсткої структури	присутня						відсутня	
Умонтаване автоматичне налаштування параметрів ПІД регулятора методом аналізу автоколевань	Відсутнє (можливе програмування)		Полуавтоматичне налаштування				Повністю автоматичне налаштування	
Маса приладу, кг	2,6	3,1	2,6	3,1	2,6	3,1	2,6	3,1
Примітка: увід аналогових струмових сигналів здійснюється через пристрої ВТ 05/2 і ВН 10/2; вага приладів мод. 110, 111, 112, 130 наведена разом з пультом оператора.								

За допомогою кнопок і індикаторів вмонтованих у прилад чи з'єднаного з приладом винесеного пульта здійснюється початкова

установка, зміна і індикація параметрів, індикація вхідних сигналів, програмування структури приладу, а також діагностика, індикація і сигналізація відмов приладу. На замовлення, виготовником поставляється для приладів спеціальне програмне забезпечення для ПЕОМ.

Живлення приладів здійснюється від мережі змінного струму напругою  $220\text{ В}$  і частотою  $50$  чи  $60\text{ Гц}$ . Споживча потужність не більше  $10\text{ ВА}$ . Габаритні розміри приладу і зовнішнього пульта оператора відповідно складають (мм):  $120\times 60\times 32$ ;  $130\times 60\times 32$ .

#### **4.6. КОМПЛЕКС МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИЛАДІВ СЕРІЇ Р-130.**

Реміконт Р-130 є малоканальним багатофункціональним мікропроцесорним контролером (МК), що призначений для автоматичного регулювання і логічного керування технологічними процесами в різних галузях промисловості. Завдяки його малоканальності забезпечується економічне керування невеликими агрегатами і висока живучість складних систем керування. МК мають до 28 аналогових і дискретних входів – виходів і оснащені інтерфейсним каналом цифрового послідовного зв'язку. За допомогою Р-130 можна реалізувати одноконтурні, каскадні, програмні, супервізорні й багатозв'язкові АСР, а також системи логіко – програмного керування з послідовною дією команд. Випускаються три моделі Р-130: регулювальна, логічна і безперервно – дискретна.

*Регулювальна модель*, призначена для вирішення завдань автоматичного регулювання, дає змогу виконувати локальне, каскадне, програмне, супервізорне, багатозв'язане керування. Завдяки структурі цієї моделі можна вручну чи автоматично вмикати, вимикати, перемикаючи та реконфігурувати контури регулювання. Крім того, всі ці операції виконуються безударно, незалежно від складності структури керування. У поєднанні з обробкою дискретних сигналів ця модель дозволяє виконувати також логічні перетворювання сигналів і видавати не лише аналогові чи імпульсні, а й дискретні команди керування.

За допомогою регулювальної моделі можна реалізувати до чотирьох незалежних контурів регулювання, кожний з яких може бути локальним чи каскадним, з аналоговим чи імпульсним виходом, з ручним, програмним чи супервізорним задавачем. Модель уміщує 76 зашитих у постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗУ) алгорит-

мів безперервної і дискретної обробки інформації, до яких входять алгоритм ПД – регулювання, математичних, динамічних, нелінійних, аналого – дискретних і логічних перетворювань. Крім того, є 99 алгоблоків з можливістю вільного їх заповнення різними алгоритмами з бібліотеки і конфігурування алгоблоків між собою та з входами – виходами МК. На базі цієї моделі можна здійснювати ручне встановлювання чи автопідстроювання будь – яких коефіцієнтів настроювання в різних алгоритмах, безударну зміну режимів керування і безударне вмикання, вимикання, перемикавання та реконфігурування контурів регулювання будь – якого ступеня складності, оперативне керування контурами регулювання за допомогою 12 клавіш, двох чотирирозрядних цифрових індикаторів і набору світлодіодів, які дають змогу змінювати режими, встановлювати завдання, керувати виконавчими механізмами (ИМ), контролювати сигнали, індицирувати аварійні ситуації, вибирати необхідну програму при програмному регулюванні, запускати, зупиняти і скидати програми, переходити до наступних ділянок програм, а також контролювати хід виконання програм.

*Логічна модель*, призначена для реалізації логічних програм крокового керування, дає змогу формувати логічну програму крокового керування з аналізом умов виконання кожного кроку, завдання контрольного часу на кожному кроці та з умовним чи безумовним переходом програми до заданого кроку. В поєднанні з обробкою аналогових сигналів ця модель дає змогу виконувати також різноманітні функціональні перетворювання аналогових сигналів і виробляти не лише дискретні, а й аналогові керуючі сигнали. За допомогою логічної моделі можна реалізувати чотири незалежні логічні програми крокового керування, кожна з яких може бути лінійною (що послідовно виконується крок за кроком ) чи розгалуженою з безумовним чи умовним переходами. Ця модель дозволяє здійснювати до 87 етапів програми з можливістю реалізації на кожному етапі до 20 кроків. При цьому на кожному кроці задаються умови його виконання, контрольний час, протягом якого аналізуються умови, і визначається поведінка програми у випадку, коли ці умови не виконуються. Інші можливості моделі в основному аналогічні попередній.

*Безперервно – дискретна модель* призначена для вирішення змішаних завдань регулювання та логіки і дає змогу виконувати різноманітні перетворювання як аналогових, так і дискретних сигналів.

За допомогою цієї моделі можна реалізувати: одну логічну програму крокового керування, що вміщує до дев'яти кроків; чотири контури регулювання з аналоговим виходом чи вісім контурів імпульсного або позиційного регулювання. Інші функціональні можливості моделі аналогічні в основному попереднім.

Усі моделі Реміконту Р-130 містять засоби оперативного керування, що розміщені на лицьовій панелі контролера, за допомогою яких можна вручну змінювати режими роботи, встановлювати завдання, керувати ходом виконання програм, вручну керувати виконавчими пристроями, контролювати сигнали та індицирувати помилки. Стандартні аналогові й дискретні датчики, виконавчі пристрої підключаються до Р-130 за допомогою індивідуальних кабельних зв'язків.

Реміконт Р-130 можуть об'єднуватися в локальну керуючу мережу "транзит" кільцевої конфігурації без застосувань якихось допоміжних пристроїв. В одну мережу можуть вмикатись як однаково, так і різні моделі контролерів. Через мережу контролери можуть обмінюватись інформацією в цифровій формі по витій парі проводів. За допомогою шлюзу, що входить до складу Р-130, мережа "Транзит" може взаємодіяти з будь-яким зовнішнім абонентом (наприклад, ПЕОМ), що має інтерфейс ІРПС чи RS-232C.

Реміконт Р-130 – це програмований пристрій. Процес програмування простий і зводиться до того, що натисканням кількох клавіш у певній послідовності з бібліотеки, яка зашита в ПЗУ, витягуються потрібні алгоритми. Ці алгоритми потім об'єднуються в систему заданої конфігурації і в них встановлюються необхідні параметри настроювання.

При відімкненні живильної напруги запрограмована інформація зберігається за допомогою вмонтованої батареї. Запрограмована інформація може бути записана з ОЗУ у ПЗУ (ППЗУ).

**Склад мікроконтролера** являє собою цілий комплекс технічних засобів. До його складу входить центральний мікропроцесорний блок контролера (БК) і низка допоміжних блоків. У табл. 4.5 наведено перелік блоків, що входять до складу Р-130.

Найменування моделі блока БК дає найменування Р-130 в цілому. Центральний блок перетворює аналогову і дискретну інформацію в цифрову форму, обробляє цифрову інформацію та виробляє керуючі впливи. Допоміжні блоки використовуються для попереднього підсилення сигналів термопар і термоопорів, формування дис-

кретних вихідних сигналів напругою 220 В, організації зовнішніх перемикачів і блокування та ін.

Таблиця 4.5

## Склад технічних засобів комплексу Ремікоонт Р-130.

Найменування	Позначення	Споживча потужність, ВА	Маса, кг	Габаритні розміри, мм
Блок контролера	БК-1	9	3	160x80x365
Пульт настроювання	ПН-1	-	0,35	168x81x36
Блок живлення	БП-1	15	1,8	133x100x137
Підсилювач для термопар	БУТ-10	2	0,6	133x40x146
Підсилювач для термоопорів	БУС-10	2	0,6	133x40x146
Підсилювач потужності	БУМ-10	80 мА - кожний індивідуальний вхід; 320 мА – груповий вхід; 6 мА – вхід “заборони”.	0,7	133x40x146
Блок перемикачів	БПР-10	48 мА – груповий вхід; 6 мА – кожний інший вхід.	0,6	133x40x130
Блок шлюзу	БШ-1	9	3	160x80x365
Блок стирання	БСТ-1	60	9	360x130x320
Резистори нормувальні	РН-1	-	-	-
Міжблоковий з'єднувач	МБС	-	-	-
Клемно–блочні з'єднувачі	КБС-1	-	0,4	133x40x77
	КБС-2	-	1	133x110x77
	КБС-3	-	1	133x110x77
Клемна колодка	КБС-0	-	0,35	133x40x77

В Р-130 вмонтовано розвинуті засоби самодіагностики, сигналізації та ідентифікації несправностей, в тому числі при відмові апаратури, виході сигналів за припустимі межі, збої в оперативному запам'ятовуючому пристрої (ОЗУ), порушенні обміну по кільцевій мережі. Для дистанційної передачі інформації про відмову передбаче-

ні спеціальні дискретні виходи. Р-130 розрахований на щитовий та навісний монтаж.

*Блок контролера БК-1* є центральним блоком і виконує такі функції: пряме і зворотне перетворення аналогових і дискретних сигналів у цифрову форму; обробку інформації, що надходить згідно з потрібними алгоритмами керування, які об'єднані в систему заданої конфігурації; вироблення дискретних аварійних сигналів; оперативний контроль і керування за допомогою клавіш та індикаторів, розміщених на лицьовій панелі блоку.

Блок БК-1 складають основна і змінна частини. До основної частини блока входять модуль контролю і програмування (МКП), модуль процесора (ПРЦ), що має безпосередній зв'язок з акумуляторною батареєю, і модуль стабілізованої напруги (МСН), що забезпечує живленням увесь контролер. Змінну частину утворюють два модулі пристроїв зв'язку з об'єктом УСОА і УСОБ, куди може входити одна з трьох модифікацій модулів УСО: модуль аналогових сигналів (МАС), модуль аналогових і дискретних сигналів (МДА), модуль дискретних сигналів (МСД). Виконання лицьової панелі (ПЛ) блока залежить від виду бібліотеки алгоритмів керування.

Розглянемо лицьову панель регулюючої моделі блока контролера, що найчастіше використовується у системах автоматизації хіміко-технологічних і хіміко-фармацевтичних виробництв.

Лицьова панель (див. рис. 4.15) призначена для оперативного керування контурами регулювання і містить світлодіодні лампові індикатори (ЛИ), світлодіодні цифрові індикатори (ЦИ), шкальний індикатор і клавіатуру. У верхній частині 3 ПЛ розміщені п'ять ЛИ, що контролюють помилки. Однорозрядний ЦИ (контур) 1 показує номер контуру, з яким працює оператор. На чотирирозрядний ЦИ (завдання) 4 виводиться сигнал завдання. Сім ЛИ в групі (види контролю) 6 вказують, яка інформація виводиться на нижній 5 чотирирозрядний ЦИ. Шкальний індикатор 7 (вихід) має 21-ламповий індикатор і показує значення сигналу на виході контуру чи положення виконавчого механізму. Два ЛИ “∇” і “Δ” у цій групі 7 сигналізують про роботу імпульсного регулятора в напрямку “менше” чи “більше”. Чотири ЛИ (режим керування) 2 вказують, у якому режимі працює контур (каскадне КУ, локальне ЛУ, дистанційне ДУ і ручне РУ керування). Три ЛИ (режим завдання) 8 вказують, який вид завдання встановлений у контурі (ручне РЗ, програмне ПЗ і зовнішнє завдан-



ня ВЗ). Перелік параметрів групи 6, які контролюють за нижнім ЦИ 5, наведено в табл. 4.6.

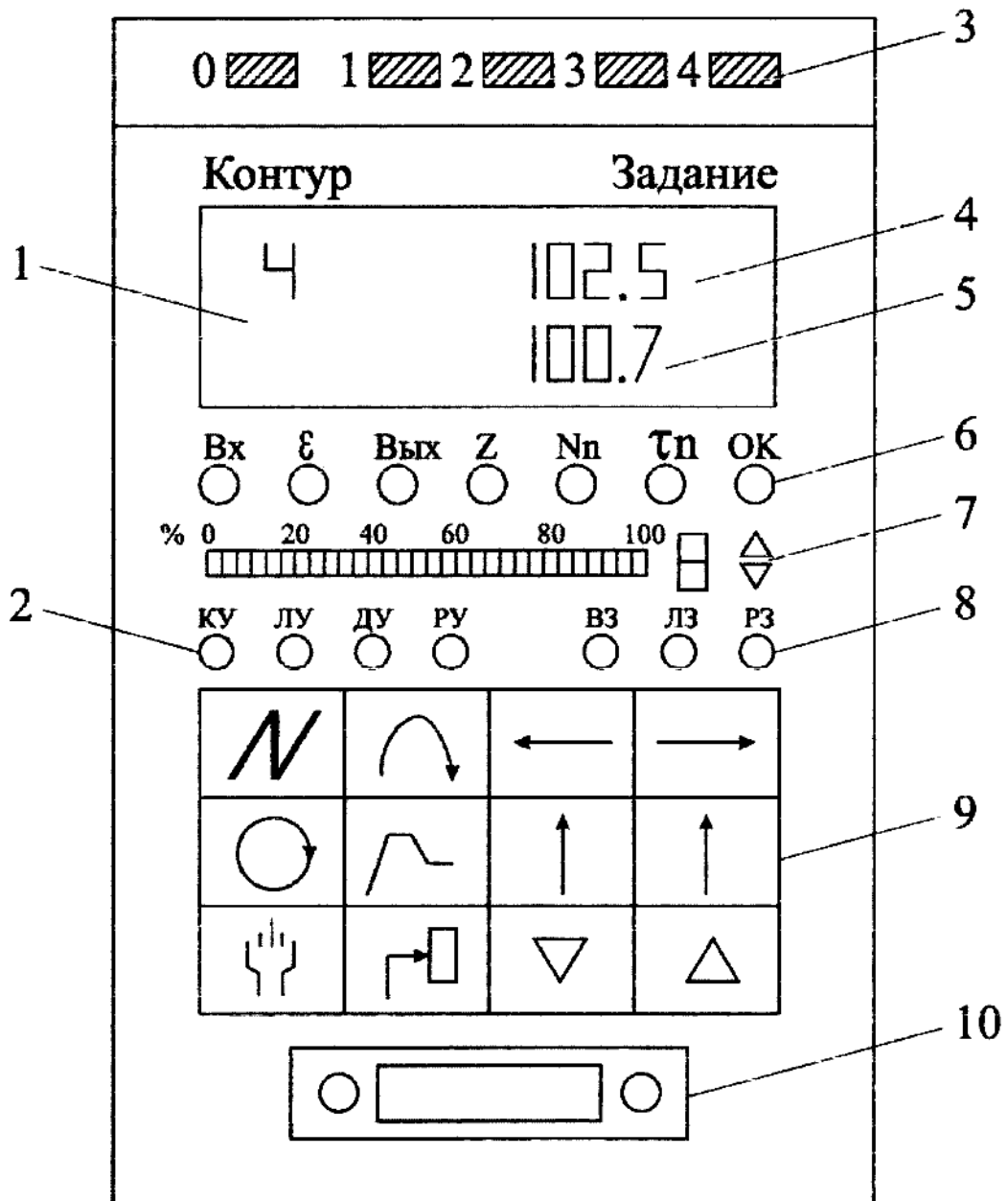


Рис. 4.15. Лицьова панель регулюючої моделі блока БК-1: 1 – номер контуру; 2 – режими керування; 3 – помилки; 4 – сигнал задання; 5 – значення контрольованих параметрів; 6 – види контролю; 7 – вихід; 8 – режими завдання; 9 – клавіатура; 10 – підключення пульту налаштування.

Лицьова панель має 12 клавiш 9, за допомогою яких здійснюється оперативне керування контурами регулювання. Загальний перелік команд керування наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.6.

## Перелік контрольованих параметрів і їх позначення


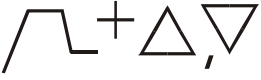

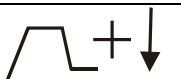
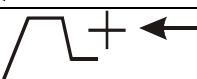
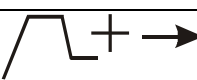

Режим контролю	Контрольований параметр	Розмірність
ВХ	Вхідний сигнал (регульований параметр)	Технічні одиниці
$\varepsilon$	Сигнал розузгодження	Технічні одиниці
ВИХ	Вихідний сигнал (керуючий вплив)	%
Z	Довільний сигнал, призначення якого програмується	Програмується
Nп	Номер програми (при програмному регулюванні) і номер поточної ділянки програми	Число (два знаки)
$\tau_{п}$	Час що залишився до закінчення поточної ділянки програми	с, хв, год.
ОК	Помилка контур: вказується номер сигналу, що вийшов за припустимі значення	число

Таблиця 4.7.

## Команди оперативного керування контурами регулювання.

Позначення клавiш	Команди
1	2
N	Вибір номера контуру
$\leftarrow \rightarrow$	Вибір режиму контролю
	Перехід на ручний режим
	ручна зміна виходу
	Перехід на автоматичний режим
	Перехід на дистанційний режим
	Відміна дистанційного режиму
	Перехід на локальний режим
	Перехід на каскадний режим
	Перехід на ручний задавач
	Ручна зміна завдання

Продовження табл. 4.7

1	2
	Перехід на програмний задавач
	Зміна номера програми (здійснюється тільки в стані "стоп")
	Пуск програми
	Зупинка програми "стоп"
	Скидання програми (здійснюється тільки у стані "стоп" і "конец" програми)
	Перехід до наступної ділянки програми (здійснюється тільки в стані "стоп")
	Перехід на зовнішній задавач

Блок БК-І живиться від джерела напруги постійного струму  $24\text{ В}$ . Діапазон усіх аналогових входів блока однаковий і дорівнює  $0...2\text{ В}$ . Настроювання на цей діапазон вхідних сигналів, що змінюються у межах  $0...5$ ,  $4...20\text{ мА}$  чи  $0...10\text{ В}$ , забезпечується за допомогою нормуючих резисторів РН чи клемно-блокових з'єднувачів КБС. Вихідні аналогові сигнали БК-І є струмовими сигналами. Діапазон  $0...5$ ,  $4...20\text{ мА}$  користувач вибирає програмно при настроюванні блока на об'єкті. Блок має заводозахисні дискретні входи з пороговою напругою не менше  $7\text{ В}$ .

Дискретні виходи (транзисторний ключ) можуть працювати на індуктивне навантаження і захищені від короткого замикання. Аналогові входи, гальванічно ізольовані від усіх інших кіл. Аналогові виходи зв'язані попарно в межах однієї групи, яка гальванічно ізольована від інших кіл. Дискретні входи зв'язані також у межах однієї групи, яка гальванічно ізольована від усіх інших кіл. Аналогічно організовані дискретні (імпульсні) виходи.

Пульт настроювання ПН-І підмикається до БК-І за допомогою кабелю, що закінчується вилкою роз'єму. Застосовується для технологічного програмування, тестування і настроювання БК будь-якої моделі. Після виконання вказаних операцій пульт відмикається. Пульт має спеціальний роз'єм, через який підмикають зовнішню програмуючу напругу (до  $13,6\text{ В}$ ) при записуванні інформації в ППЗУ. ПН-І, лицьову панель якого зображено на рис. 4.16, містить лампові (ЛИ), цифрові (ЦИ) індикатори і клавіатуру. ЛИ в групі 6

(помилки) сигналізують про помилки контролера чи неправильні дії оператора, в групі 7 (процедура) – проте, які параметри контролюються і змінюються за допомогою ПН-І, у групі 4 (режим) – про режим роботи контролера (програмування і робота), в групі 8 (стан) – про стан алгоритмів керування (індикація працює тільки в процедурі "ВЫХОД"). ЦИ використовуються при контролі сигналів і параметрів, при програмуванні, тестуванні та ін. Шість клавіш 5 застосовуються для вибору режиму, процедур, параметрів, для зміни параметрів, запускання тестів та ін. Про наявність зовнішньої програмуючої напруги при записуванні програми в ППЗУ сигналізують ЛІ "U<sub>пр</sub>".

У режимі програмування БК-І вимкнено із системи керування і можна змінювати всі параметри як контролера в цілому, так і алгоблоків. У режимі роботи можна контролювати сигнали і параметри, але жодні параметри, крім коефіцієнтів, за допомогою ПН-І змінювати неможливо. При переході з режиму програмування в режим роботи контури регулювання включаються в роботу безударно. Контролер має наступні процедури програмування: тестування, встановлення приладних і системних параметрів, вибору алгоритмів, конфігурування, встановлення параметрів настроювання і початкових умов.

*Блок живлення БП-1* підключається до промислової мережі змінного струму і виробляє дві нестабілізовані напруги 24 В постійного струму, які використовуються для живлення блока контролера, кіл дискретного входу і виходу, аналогового виходу, інтерфейсних кіл, аварійного виходу БК, підсилювачів для термопар і термоопорів, блока шлюзу.

*Підсилювач для термопар БУТ – 10* забезпечує перетворення сигналу термопари в струмовий сигнал (0...5 мА), компенсацію зміни температури вільних кінців термопари, зміщення нуля і зміни діапазону вхідного сигналу. Один підсилювач містить два незалежних канали підсилення, розраховані на однакову термопару. Вхід і вихід кожного каналу гальванічно ізольовані один від одного і від БП-1.

*Підсилювач термоопорів БУС – 10* призначений для перетворення сигналів термоопорів чи інших резистивних датчиків у струмовий сигнал (0...5) мА, забезпечення живлення датчиків постійним стабілізованим струмом, зміщення нуля і вимірювання діапазону вхідного. Кількість каналів і гальванічна ізоляція аналогічні блоку БУТ.

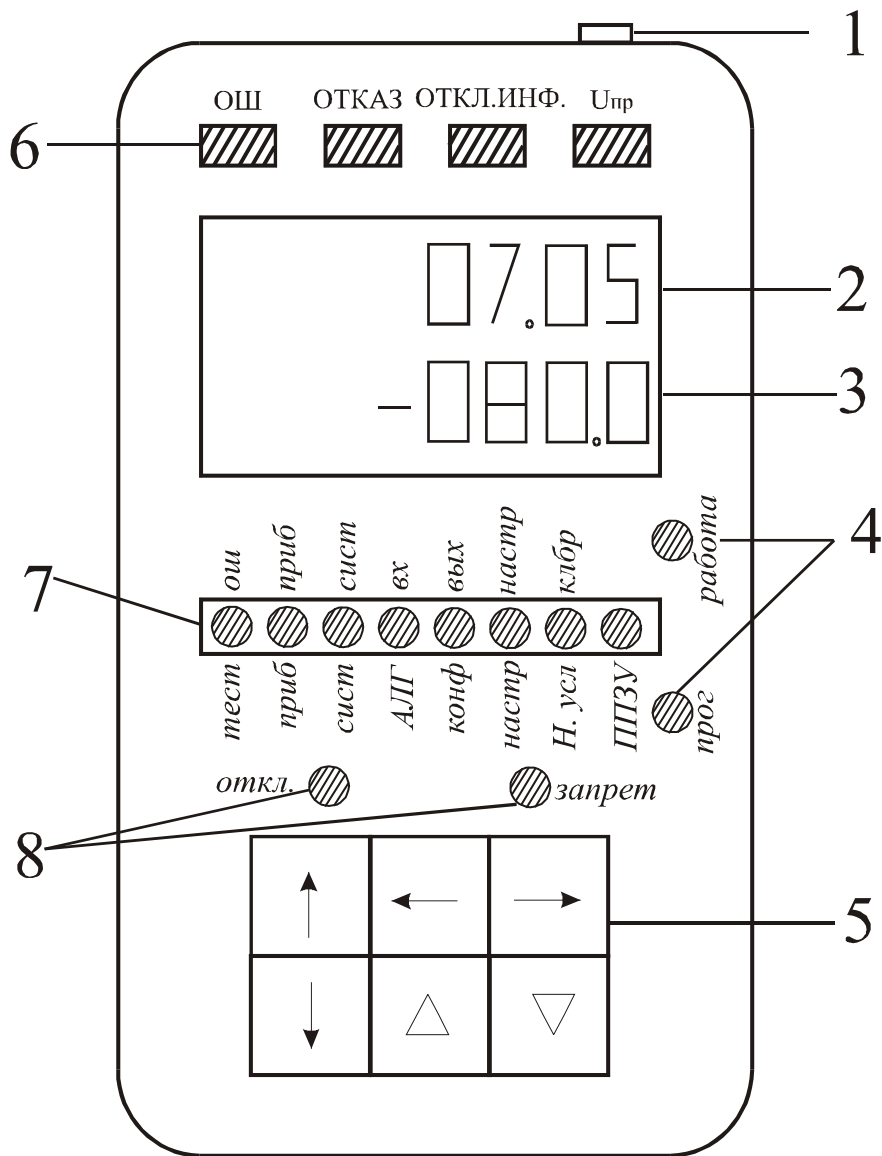


Рис. 4.16. Лицьова панель ПН-1: 1 – роз'єкти для зовнішньої напруги при записуванні в ППЗУ; 2 – верхній ЦИ; 3 – нижній ЦИ; 4 – режим; 5 – клавіатура; 6 – помилки; 7 – процедури; 8 – стан.

*Підсилювач потужності БУМ-10* містить чотири сильнотрумових реле РПГ-8, нормально відкриті контакти якого можуть комутувати змінну напругу до  $220\text{ В}$  при струмі до  $2\text{ А}$ . Кожне з чотирьох реле може управлятися як незалежно, так і одночасово з іншими, є можливість групової заборони на перемикання. Обмотки реле підмикаються до дискретних виходів БК, а їх живлення здійснюється блоком БП-І. Вихідні контакти реле електрично попарно зв'язані, але гальванічно ізольовані від інших кіл.

*Блок перемикання БПР-10* містить вісім слабкострумових реле типу РЭС54А, перекидні контакти яких можуть використовуватися в колах перемикання, захисту, сигналізації, блокування та ін. Органі-

зація керування і живлення реле аналогічна блоку БУМ.

*Блок шлюзу БШ-1* є з'єднувальною ланкою між мережею "Транзит", що об'єднує кілька БК, і засобами верхнього рівня керування (наприклад, ЕОМ). Для зв'язку з ЕОМ використовується інтерфейс ИРПС. Зв'язок виконується за допомогою двох пар витих проводів. БШ є мікропроцесорним пристроєм, низка параметрів якого програмується за допомогою пульта ПН-І. Конструкція БШ аналогічна блоку БК, однак відсутні органи оперативного керування. До складу однієї мережі "Транзит" можуть входити кілька блоків БШ.

*Блок стирання БСТ-1* застосовується для стирання ППЗУ. Для цього модуль ПРЦ 10 виймається з БК і вставляється в блок БСТ, що має вмонтоване джерело стабілізованої напруги, яка може змінюватися. Її вказують у супроводжувальній документації.

*Резистори нормуючи РН-1* застосовуються для перетворення сигналів  $0...5,4$  (О) –  $20$  мА і  $0...10$  В у сигнал  $0...2$  В. Ці резистори монтуються безпосередньо на клемних збірках, до яких підмикають з одного боку кабельні зв'язки від датчиків чи підсилювачів (БУТ, БУС), з іншого – аналогові входи блока БК. Резистори використовуються лише в тому разі, коли відсутні клемно-блокові з'єднувачі КБС-3. Тип резистора (РН-І/05, РН-І/20, РН-І/10) залежить від виду вхідного сигналу, а число – від кількості аналогових входів БК.

*Міжблоковий з'єднувач МБС* застосовується для зв'язку приладних кіл БК з БП. МБС являє собою відрізок кабелю, що закінчується з обох боків вилками роз'єднання РП-І5.

*Клемно-блоковий з'єднувач КБС-1* також являє собою відрізок кабелю, на одному боці якого змонтовано вилку роз'єднання РПІ5-9, а на іншому – однорядну клемну колодку на 8 клем. Застосовується для підключення до блоків БП, БУС, БУТ, БУМ, що мають гніздо роз'єднання РПІ5-9.

*Клемно-блоковий з'єднувач КБС-2* за конструкцією аналогічний КБС-1, але має вилку роз'єднання РПІ5-23 і трирядну клемну колодку на 24 клеми. Призначений для підключення до блоків БК, БПР, що мають гніздо роз'єднання РПІ5-23 (дискретні входи-виходи).

*Клемно-блоковий з'єднувач КБС-3* аналогічний КБС-2, однак трирядна клемна колодка містить 24 клеми з розпаяними на її внутрішньому боці резисторами РН-І. Застосовується для підключення вхідних і вихідних аналогових ланцюгів БК з метою перетворення вхідних сигналів у сигнал  $0...2$  В.

*Клемно-блоковий з'єднувач КБС-0* аналогічний за конструкцією КБС-1, але не має кабелю і застосовується для розмножування кіл.

**Бібліотека алгоритмів мікроконтролера** дозволяє розв'язувати складні завдання автоматичного регулювання і логіко – програмного керування. Взагалі бібліотечний алгоритм має свої входи, виходи і функціональне ядро. Входи алгоритму бувають сигнальними і настроюваними. Сигнали, що надходять на сигнальні входи алгоритму, обробляються їм відповідно до призначення алгоритму, а сигнали, що надходять на настроювані входи, керують параметрами настроювання алгоритму. Сигнальні й настроювані входи мають цілком однакову можливість конфігурування. Кількість входів і виходів алгоритму не фіксована і визначається його видом. Однак кількість входів не перевищує 99, а кількість виходів – 24. У частинному випадку алгоритм може не мати входів чи виходів. Для алгоритмів, що утворюють групу зв'язкових алгоритмів (уводу-виводу, прийому-передачі, оперативного керування) та мають неявні входи і виходи, відсутня можливість конфігурування. Неявні входи і виходи на функціональних схемах показують пунктиром. Усі явні входи алгоритму мають крізну нумерацію від 01 до 99, виходи – від 01 до 24. У кожному конкретному алгоритмі число входів і виходів може бути менше від вказаного максимального значення.

У загальному випадку бібліотечний алгоритм на схемах має три реквізити (параметри): бібліотечний номер (код), модифікатор (m) і масштаб часу (МВ). Бібліотечний номер являє собою двозначне десяткове число і є основним параметром, що характеризує властивість алгоритму. Модифікатор задає додаткові властивості алгоритму. Звичайно модифікатор задає число однотипових операцій, які може виконувати один алгоритм. Ряд алгоритмів модифікатора не мають. Масштаб часу мають такі алгоритми, робота яких пов'язана з реальним часом (таймер, програмний задавач, регулювання та ін.). Бібліотечні алгоритми зберігаються в бібліотеці і самі по собі жодної функції не виконують. Для того щоб він включився в роботу його потрібно помістити в один із алгоблоків при проведенні технологічного програмування. При цьому існують два правила: будь - який алгоритм можна вміщувати в будь – який (за номером) алгоблок; один і той самий алгоритм можна вміщувати в різні алгоблоки.

Бібліотеку утворюють такі групи алгоритмів: лицьової панелі, вводу – виводу, регулювання, динамічних, статичних і аналогово-дискретних перетворювань, логічних операцій, дискретного та гру-

пового безперервно – дискретного керування. Далі розглянуто послідовно основні алгоритми, що найчастіше використовуються при побудові найпростішої АСР.

*Алгоритм ОКО (код ОІ)* – оперативний контроль регулювання використовується в складі регулювальної моделі Р-ІЗО і звичайно в поєднанні з алгоритмами ЗДН, ЗДЛ, РУЧ, РАН, РИМ. Алгоритм ОКО вміщують тільки в алгоблоки з номерами від 1 до 4. Номер алгоблока, у який вміщено алгоритм ОКО, визначає номер контуру. Алгоритм має модифікатор  $m = 0...15$ , який визначає вид регулятора в складі АСР. Перелік модифікацій із зазначенням виду регулятора наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8.

## Перелік модифікацій алгоритму.

Вид регулятора (АСР)	Режим		Модифікатор
	Зовнішнього завдання (ВНШ)	Дистанційного керування (ДСТ)	
Звичайний аналоговий	-	-	00
	-	+	01
	+	-	02
	+	+	03
Звичайний імпульсний	-	-	04
	-	+	05
	+	-	06
	+	+	07
Каскадний аналоговий	-	-	08
	-	+	09
	+	-	10
	+	+	11
Каскадний імпульсний	-	-	12
	-	+	13
	+	-	14
	+	+	15

Якщо який-небудь із режимів завдання чи каскадного регулювання не передбачається, то перемикання в ці режими блокуються.

Алгоритм ОКО має 10 чи 15 входів. Якщо  $m \leq 7$  є 10 входів, при  $m \geq 8$  є 15 входів. Функціональну схему алгоритму зображено на рис. 4.17.



	Код	m = 00-15	МВ відсутній
ХзДН	01	Керування завданням і індикація завдання, входу, розузгодження стандартного чи ведучого регуляторів в каскадному режимі	
Хвх	02		
W <sub>0</sub>	03		
W <sub>100</sub>	04		
Хε	05		
Хруч	06	Ручне керування і індикація виходу, довільного параметра та помилки	
Хвр	07		
Z	08		
Nz	09		
Нок	10		
ХзДН	11	Керування завданням і індикація завдання входу, розузгодження веденого регулятора в локальному режимі (тільки при m ≥ 8)	
Хвх.Л	12		
W <sub>0.Л</sub>	13		
W <sub>100.Л</sub>	14		
Хε.Л	15		

Рис. 4.17. Функціональна схема алгоритму ОКО.

Вхід  $X_{зДН}$  визначає сигнал, що є сигналом поточного завдання, і виводиться на цифровий індикатор "задание" БК. Звичайно цей вхід підключається до основного виходу алгоритму ЗДН.

Вхід  $X_{вх}$  визначає сигнал, що є вхідним (регульованим параметром) і виводиться на цифровий індикатор у позиції "ВХ". Звичайно цей вхід підключається до одного із виходів алгоритму вводу аналогового ВАА чи ВАБ. Вхід  $X_{\epsilon}$  визначає сигнал розбіжності і виводиться на цифровий індикатор контролю в позиції "ВХ". Звичайно цей вхід підключається до виходу  $Y_{\epsilon}$  алгоритмів РАН чи РИМ. Входи  $W_0$  і  $W_{100}$  – настроювані. Ці входи задають технічні одиниці, що індицирують сигнал завдання, вхідний сигнал і сигнал розбіжності (одні й ті самі одиниці вимірювання для всіх трьох параметрів). Вхід  $W_0$  задає значення, що відповідає 0 % аналогового сигналу, вхід  $W_{100}$  – значення, що відповідає 100 % сигналу. Поточне значення  $W_{инд}$  сигналів  $X_{зДН}$ ,  $X_{вх}$  і  $X_{\epsilon}$ , що виражені в процентах, визначається за формулою:

$$W_{\text{инд}} = W_0 + \frac{W_{100} - W_0}{100} X \quad (4.1)$$

Вхід  $X_{\text{руч}}$  підключається до основного виходу алгоритму ручного керування РУЧ. На вхід  $X_{\text{вр}}$  (вихід регулятора) подається сигнал керуючого впливу. На вхід  $Z$  подається будь-який (за вибором) сигнал, який необхідно індициувати при оперативному керуванні. Тип сигналу (аналоговий – 8, дискретний – 0 та ін.) задається на настроюваному вході  $N_z$ .

Вхід  $N_{\text{ок}}$  (помилка контуру) використовується, якщо необхідно проконтролювати вихід одного чи кількох сигналів за припустимий діапазон. Якщо  $N_{\text{ок}} > 0$ , то на лицьовій панелі БК засвічується один із лампових індикаторів “1-4” у зоні “ошибки”, що відповідає номеру контуру регулювання, який обслуговується алгоритмом ОКО. Вхід  $N_{\text{ок}}$  звичайно з’єднується з виходом алгоритму граничного контролю ПОК. У цьому разі за цифровим індикатором вибіркового контролю БК у позиції “ОК” (помилка контуру) можна визначати номер сигналу, що вийшов за припустимі межі. Якщо  $N_{\text{ок}} = 0$ , то ламповий індикатор БК (“ошибка”) не засвічується.

Усі перелічені входи (від 01 до 10) задають параметри оперативного керування як звичайного регулятора, так і каскадного. В останньому випадку входи 01-05 визначають параметри ведучого регулятора в каскадній схемі, а входи 06-10 параметри регулятора в цілому. Можливості керування каскадної АСР у локальному режимі (ведений контур) визначаються сигналами, що подаються на входи 11-15.

Вхід  $X_{\text{зд}}$  звичайно з’єднують з основним виходом алгоритму локального задавача ЗДЛ. У цьому разі сигнал локального завдання в режимі ЛУ контролюється за цифровим індикатором “задание”. Входи  $X_{\text{вх.л}}$  і  $X_{\text{л}}$  задають відповідно сигнали, що контролюються за цифровим індикатором вибіркового контролю БК у позиції “ВХ” і “ε” при ЛУ. Призначення входів  $W_{0\text{л}}$  і  $W_{100\text{л}}$  таке саме, як і входів  $W_0$  і  $W_{100}$ .

Таким чином, алгоритм ОКО визначає, які сигнали будуть виведені на індикатори лицьової панелі БК і в яких технічних одиницях сигнали (завдання, вхід і розбіжність) будуть індициуватися.

*Алгоритм ВИН (код 05)* – увід інтерфейсний застосовується для прийому сигналів, що надходять на вхід РІЗ0 інтерфейсного каналу. Один алгоритм ВИН організує зв’язок з одним абонентом-джерелом.

Якщо необхідний зв'язок з кількома абонентами-джерелами, в контролері використовуються кілька алгоритмів ВИН. Зокрема, алгоритм ВИН застосовується при вмиканні РІЗО у кільцеву локальну мережу "Транзит". Для прийому через інтерфейсний канал команд оперативного керування від засобів верхнього рівня алгоритм ВИН не потрібно використовувати. Алгоритм ВИН виділяє з кількох сигналів  $N_i$  абонента-джерела необхідні (за номером) сигнали і розміщує їх на своїх виходах  $Y_1, \dots, Y_m$  (при  $m = 0..21$ ). Виділені на виходах  $Y_i$  сигнали обробляються потім іншим алгоритмами, що зв'язані за конфігурацією з алгоритмами ВИН. На рис. 4.18 зображено функціональну схему даного алгоритму.

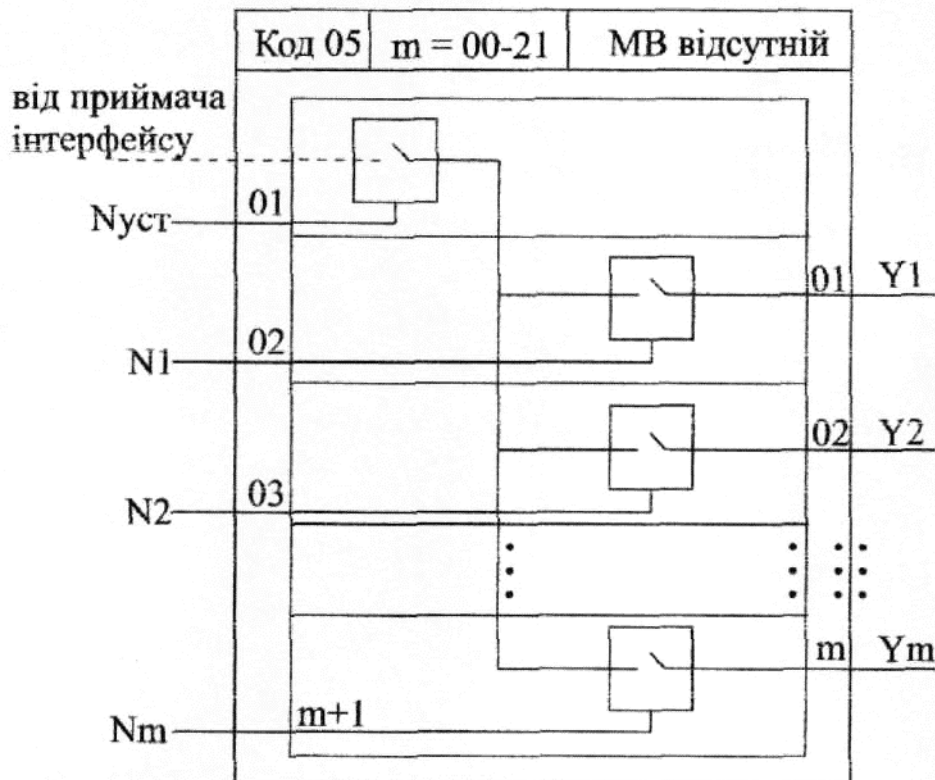


Рис. 4.18. Функціональна схема алгоритму ВИН.

Номер необхідного сигналу абонента-джерела, що виділяється на виході  $Y_i$ , задається при настроюванні на вході  $N_i$  алгоритму. Наприклад, якщо на виходах  $Y_1, Y_2$  і  $Y_3$  мають бути виділені сигнали третього абонента-джерела, що мають номери відповідно 5, 12 і 2, то встановлюються параметри  $N_{\text{нушт}} = 3$ ,  $N_1 = 5$ ,  $N_2 = 12$ ,  $N_3 = 2$ . Для того щоб зв'язатися з іншим абонентом-джерелом, застосовують інший алгоритм ВИН, у якого при настроюванні встановлюється по-

трібне значення Нулт.

Алгоритм ИИВ (код 06) - інтерфейсний вивід - застосовується для передачі яких-небудь сигналів через канал інтерфейсу. На рис. 4.19 зображено функціональну схему алгоритму.

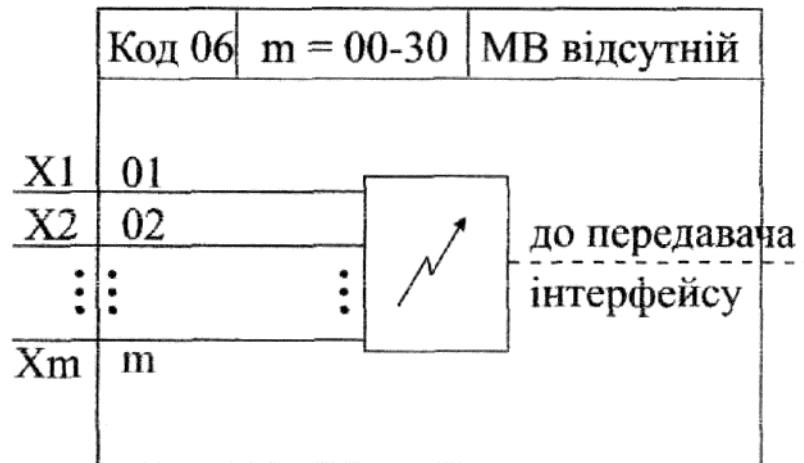


Рис. 4.19. Функціональна схема алгоритму ИИВ

Сигнали, які необхідно передати через інтерфейс, попередньо потрібно сформувані на входах  $X_i$  алгоритму за допомогою конфігурування. Число сигналів  $m = 0...30$ , що передаються також задається модифікатором. В інформаційному пакеті що передається через інтерфейс, сигналам приписуються номери, які дорівнюють номерам відповідних входів  $X_i$ .

Так, сигнал на вході  $X_i$  дістає номер 1, сигнал на вході  $X_2$  – номер 2 і т.д. Увесь пакет отримує номер джерела, що дорівнює системному номеру контролера, який встановлюється в процесі його програмування. На вхід  $X_i$  можуть надходити як аналогові, так і дискретні сигнали в будь-якому сполученні. Число дискретних сигналів, що передаються, можна підвищити за допомогою алгоритму шифрації ШИФ. У цьому разі в рамках одного сигналу, що передається, можна передати до 13 дискретних сигналів. Таким чином, кількість дискретних сигналів, що передаються при їх пакуванні, можна підвищити до 390. На прийомному боці спаквані дискретні сигнали мають бути розпаковані за допомогою алгоритму дешифрації ДЕШ. В одному контролері використовується лише один алгоритм ИИВ.

Алгоритми ВАА (код 07) і ВАБ (код 08) – увід аналогових груп А і Б – застосовуються для зв'язку функціональних алгоритмів з

апаратними засобами аналогового входу (з АЦП). Кожний алгоритм вхідної групи А чи Б обслуговує до восьми аналогових входів.

Число незалежних каналів ( $m = 0...8$ ) задається модифікатором. На рис. 4.20 зображено функціональну схему алгоритму ВАА (ВАБ).

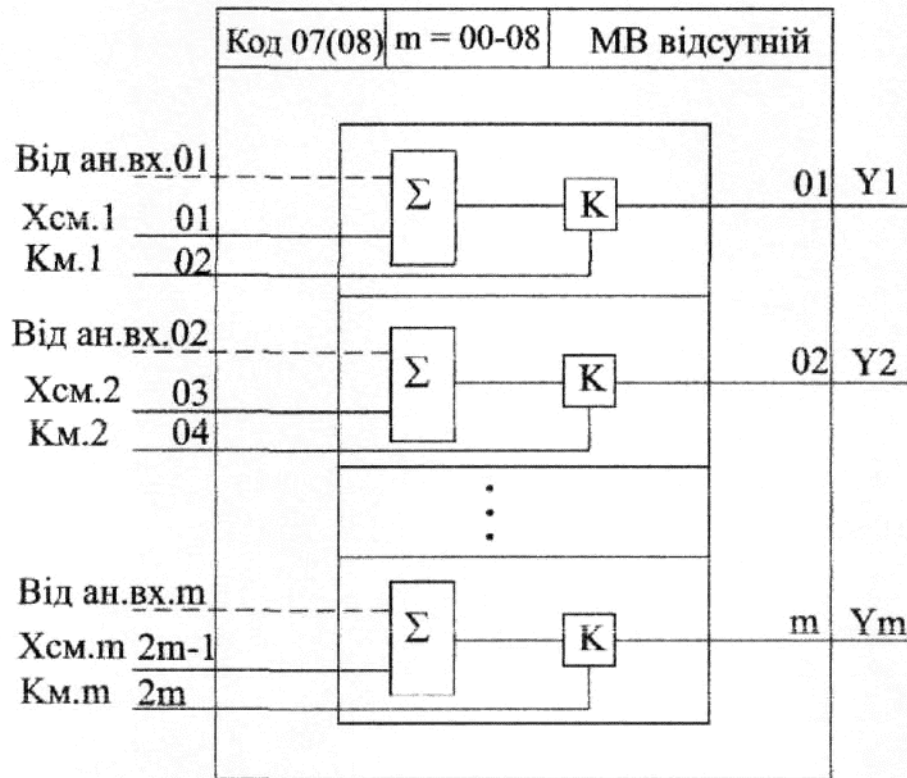


Рис. 4.20. Функціональна схема алгоритму ВАА (ВАБ).

Кожний канал зв'язаний з відповідним (за номером) аналоговим входом контролера. Цей зв'язок утворюється автоматично, як тільки алгоритм ВАА (ВАБ) буде введений в один із алгоблоків контролера. До вхідного аналогового сигналу додається сигнал зміщення  $X_{см.i}$ , а здобутий результат множиться на коефіцієнт  $K_{м.i}$ . Ці операції дають змогу компенсувати зміщення нуля та діапазону як АЦП, так і датчика, підключеного до контролера. Таким чином, вихідний сигнал каналу  $Y_i$  визначається рівнянням:

$$Y_i = (X_{ан.вх.i} + X_{см.i}) K_{м.i}, \quad (4.2)$$

де  $X_{ан.вх.i}$  – аналоговий вхідний сигнал, що надходить від АЦП на  $i$ -й канал (якщо корекція не потрібна, то  $Y_i = X_{ан.вх.i}$ .)

Алгоритми АВА (код 11), і АВБ (код 12) – аналоговий вивід груп А і Б - застосовуються для зв'язку функціональних алгоритмів з

апаратними засобами аналогового виводу (з ЦАП), Кожний алгоритм вихідної групи А чи Б обслуговує до двох аналогових виходів. Число незалежних каналів ( $m = 0...2$ ) задається модифікатором. На рис. 4.21 зображено функціональну схему алгоритму АВА (АВБ).

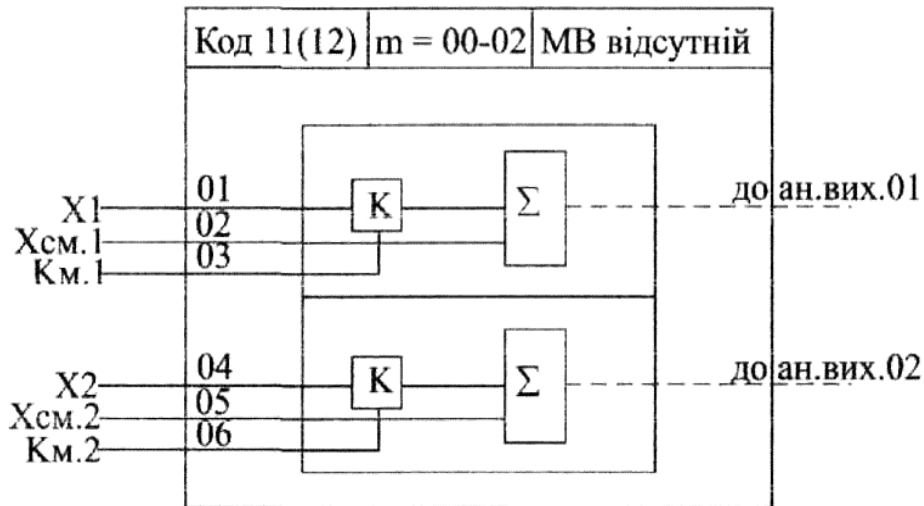


Рис. 4.21. Функціональна схема алгоритму АВА (АВБ).

Кожний канал зв'язаний з відповідним (за номером) аналоговим виходом контролера. Цей зв'язок утворюється автоматично, як тільки алгоритм АВА (АВБ) уводиться в один із алгоблоків контролера. Вихідний сигнал (на виході ЦАП)  $Y_{ан.вих.i}$  визначається рівнянням:

$$Y_{ан.вих. i} = X_i * K_{mi} + X_{см.i} \quad (4.3)$$

де  $X_i$  – вхідний сигнал алгоритму.

Операція множення  $X_i$ , на масштабний коефіцієнт  $K_{mi}$  і введення зміщення  $X_{см.i}$  дають змогу компенсувати зміщення діапазону і нуля ЦАП.

Алгоритм ИВА (код 15) і ИВБ (16) – імпульсний вивід груп А і Б – застосовуються для реалізації схем АСР з виконавчими механізмами постійної швидкості (МЕО чи МЕП). Алгоритми перетворюють сигнали, сформовані алгоблоками з алгоритмами імпульсного регулювання РИМ, у послідовність імпульсів змінної шпаруватості. Алгоритм видає послідовність зазначених імпульсів на засоби дискретного виходу контролера. На рис. 4.22 зображено функціональну схему алгоритму ИВА (ИВБ).

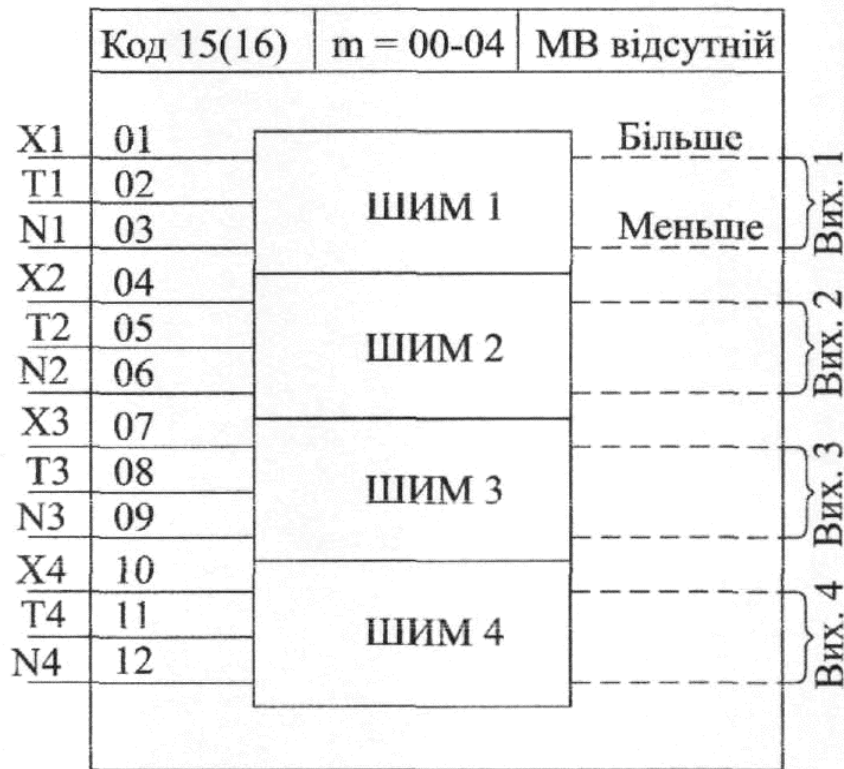


Рис. 4.22. Функціональна схема алгоритму ИВА (ИВБ).

Алгоритм містить чотири канали зв'язку, число яких задається модифікатором. Якщо імпульсний вихід використовується як у групі А, так і в групі Б, то загальне число імпульсних виходів не може перевищувати чотирьох. Кожний незалежний канал містить широтно-імпульсний модулятор (ШИМ), що перетворює вхідний сигнал  $X_i$  у послідовність імпульсів, шпаруватість яких визначається за формулою

$$Q = |X_i| / 100\%. \quad (4.4)$$

При  $|X| > 100\%$  величина  $Q = 1$ . Якщо  $X_i > 0$ , то імпульси формуються у вихідному колі "більше", а якщо  $X_i < 0$  – у колі "менше". При  $X_i = 0$  вихідний сигнал дорівнює нулю. Параметр  $T_i$  задає мінімальну тривалість вихідних імпульсів ( $T_i = 0,12 \dots 3,84$  с). Параметр  $N_i$  визначає, до якого контуру АСР віднесений цей канал алгоритму ИВА (ИВБ). Цей параметр задається в разі необхідності синхронного засвічування лампових індикаторів ПЛ (більше, менше) з формуванням вихідних імпульсів. Наприклад, якщо встановлено параметр  $N_1$ , то при роботі ШИМ1 на ПЛ контролера будуть засвічуватись індикатори при виклику першого контуру.

Алгоритм РАН (код 20) – регулювання аналогове – застосовується при побудові ПІД-регулятора, що має аналоговий вихід. Додатково в алгоритмі можна обчислювати сигнал розбіжності, здійснювати його фільтрацію, вводити зону нечутливості і обмежувати вихідний сигнал за максимумом чи мінімумом. В алгоритмі є вузол настроювання, що дозволяє за допомогою алгоритму АНР автоматично змінювати параметри настроювання. Функціональна схема алгоритму, що зображена на рис 4.23, містить кілька ланок.

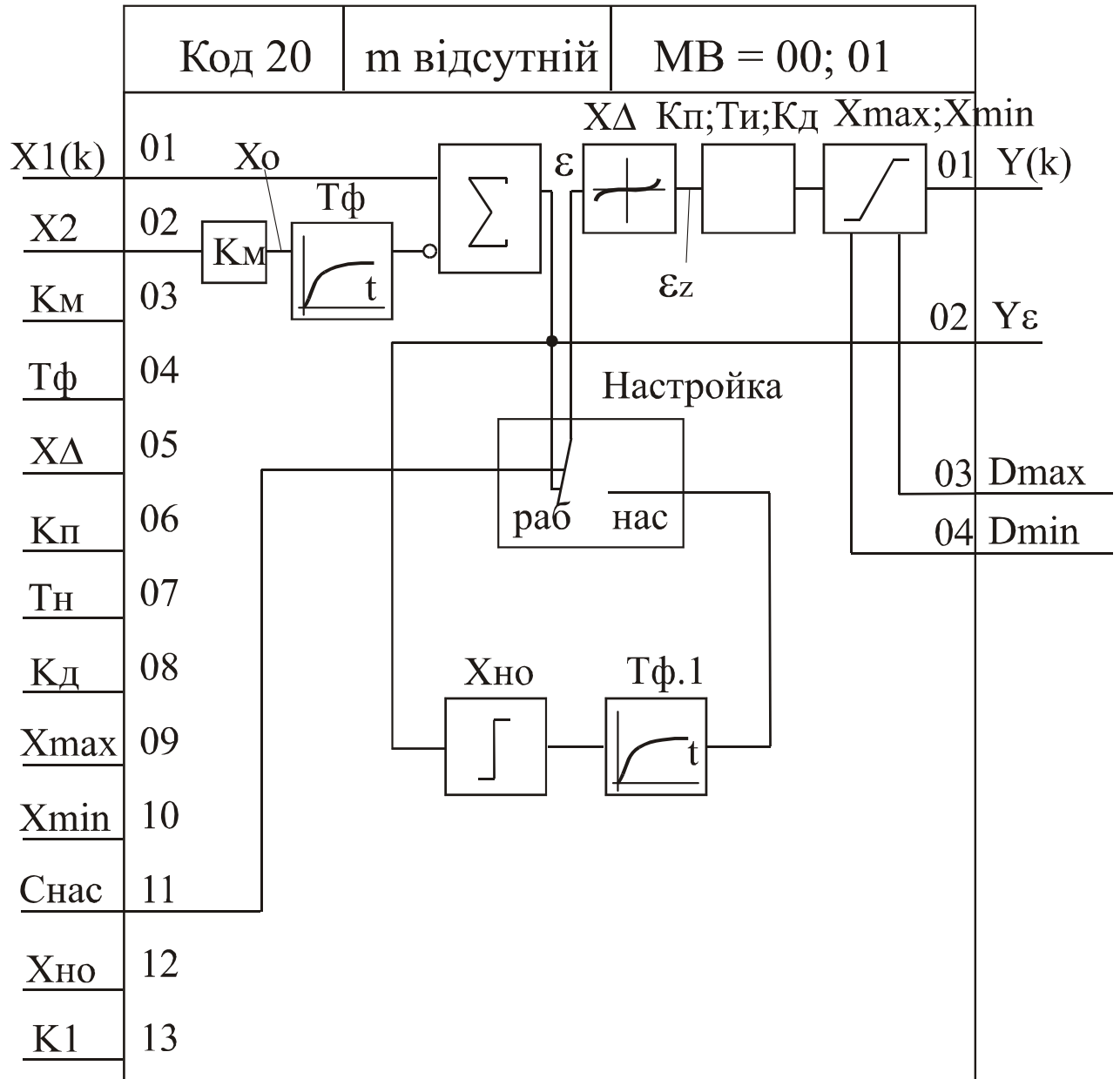


Рис. 4.23. Функціональна схема алгоритму РАН.

Ланка розбіжності формує сигнал

$$\varepsilon = X_1 - K_m X_2 \quad (4.5)$$



де  $X_1$  – немасштабований вхідний сигнал;  $K_m$  – масштабний коефіцієнт;  $X_2$  – масштабований вхідний сигнал.

Вхідний сигнал  $X_2$  перед суматором попередньо фільтрується та інвертується. При цьому фільтр реалізується рівнянням першого порядку зі сталою часу  $T_f$ . Ланка нечутливості із зоною  $\varepsilon_z$  не пропускає на свій вихід сигнали, значення яких знаходяться всередині встановленого значення цієї зони. Сигнал  $\varepsilon_z$  на виході цієї ланки визначається виразами

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= 0 \text{ при } |\varepsilon| < X\Delta/2, \\ \varepsilon_z &= (|\varepsilon| < X\Delta/2) \text{sign} \varepsilon \text{ при } |\varepsilon| > X\Delta/2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ПІД-ланка перетворює сигнал згідно з передаточною функцією

$$W(P) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i P} + \frac{K_d T_i P}{\left[ 1 + \frac{K_d T_i}{8} P \right]^2} \right], \quad (4.7)$$

де  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $K_d$  – відповідно коефіцієнт пропорційності, стала часу інтегрування і коефіцієнт диференціювання, що визначає відношення сталої часу диференціювання  $T_d$  до  $T_i$ . Рівні обмеження ланки встановлюються коефіцієнтами  $X_{\max}$  і  $X_{\min}$ . Окрім двох вхідних сигналів  $X_1$  і  $X_2$  алгоритм має вісім настроюваних входів (03-13), що задають параметри настройки алгоритму. Додатково настроюваними вхідними параметрами є:  $S_{\text{нас}}$  – командний сигнал переходу в режим настройки;  $X_n$  – рівень сигналу на виході нуля-органу;  $K_1$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей об'єкта. При  $S_{\text{нас}} = 0$  алгоритм переходить у режим роботи.

Алгоритм має чотири виходи. Вихід  $Y(k)$  є основним. На виході формується відфільтрований сигнал розбіжності. Два дискретних виходи ( $D_{\max}$  і  $D_{\min}$ ) фіксують момент настання обмеження вихідного сигналу  $Y(k)$ . Якщо сигнал  $Y(k)$  лежить у діапазоні  $X_{\max}$  і  $X_{\min}$ , то сигнали  $D_{\max} = D_{\min} = 0$ .

*Алгоритм РИМ (код 21)* – регулювання імпульсне – застосовується при побудові ПІД-регулятора для АСР, що містить виконавчий механізм постійної швидкості. Окрім формування закону регулювання, алгоритм обчислює сигнал розбіжності, фільтрує його і вво-



У поєднанні з інтегруючим виконавчим механізмом, що має передаточну функцію  $W_{им}(P) = 1/T_m P$ , загальна передаточна функція регулятора з алгоритмом РИМ матиме вигляд

$$W_p(P) = K_p(T_m/T_i) \left[ 1 + \frac{1}{T_i P} + \frac{K_d T_i P}{\left[ 1/8 \cdot (K_d T_i P) + 1 \right]^2} \right], \quad (4.9)$$

Алгоритм має два виходи. Вихід  $Y(k)$  є основним, а вихід  $Y_\varepsilon$  формує сигнал розбіжності.

Алгоритм ЗДН (код 24) – завдання – застосовується для формування сигналу ручного завдання в АСР. Через цей алгоритм до регулятора підключаються також програмні задавачі й сигнал зовнішнього завдання. В АСР використовується в поєднанні з алгоритмом ОКО. Функціональну схему алгоритму зображено на рис. 4.25.

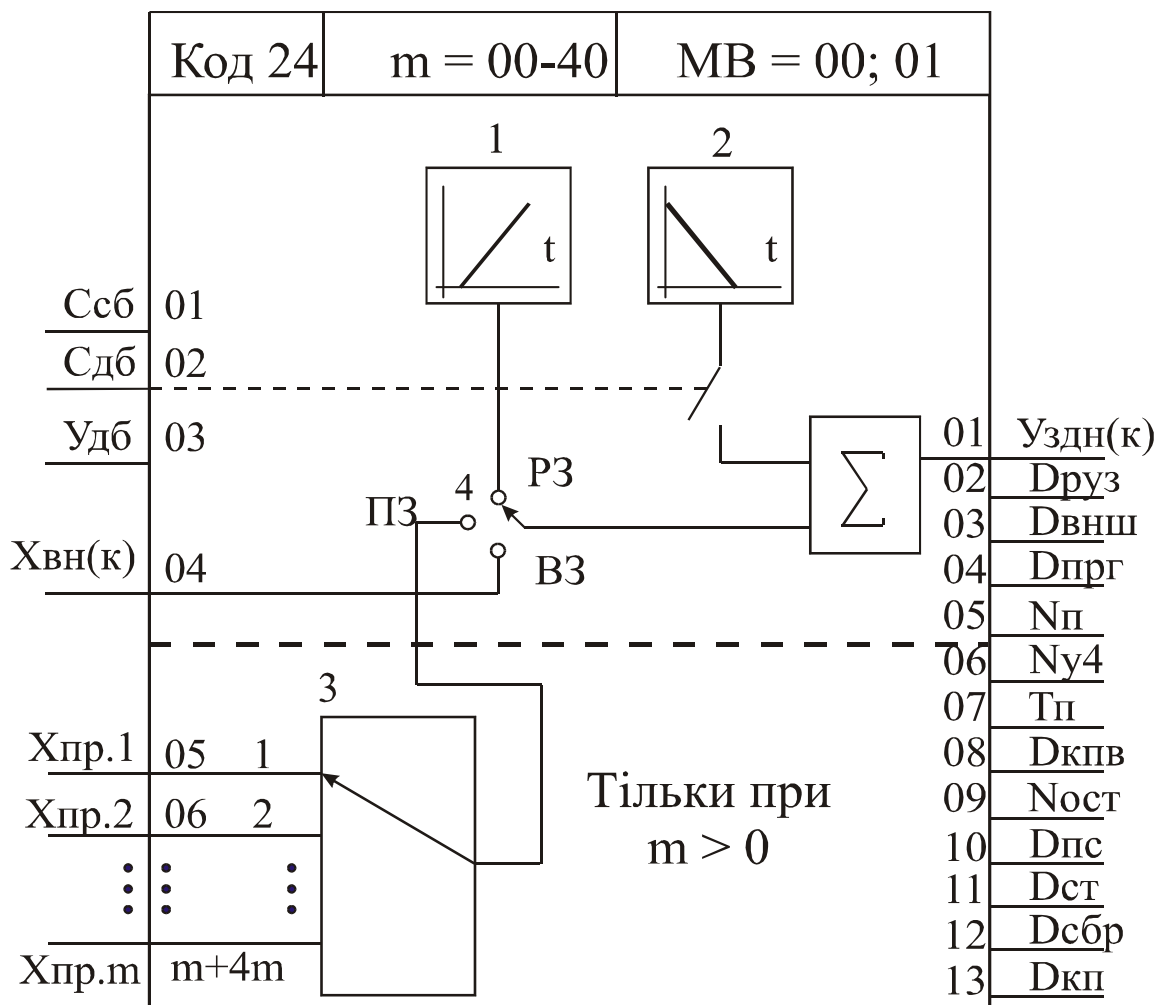


Рис. 4.25. Функціональна схема алгоритму ЗДН.

Алгоритм містить вузол ручного завдання 1, динамічного балансування 2, перемикачі програм 3 і виду завдання 4. Алгоритм має модифікатор  $0 < m < \theta$ , який визначає число незалежних програмних задавачів, що підключаються до регулятора. За відсутності програмних задавачів встановлюють  $m = 0$ . Зміна виду завдання ручне (РЗ), програмне (ПЗ) чи зовнішнє (ВЗ) – здійснюється перемикачем 4. У режимі ПЗ сигнал завдання надходить із входів  $X_{пр.і}$  від програмних задавачів. У режимі ВЗ завдання надходить із входу  $X_{вн(к)}$ , який може бути з'єднаний з виходом будь-якого алгоблока. При ввімкненому статичному балансуванні ( $C_{сб} = 1$ ) вузол ручного задавача відмикається і відслідковує поточне завдання в режимах ПЗ і ВЗ чи початкове значення на виході  $Y_{здн(к)}$ . Після вмикавання ручного задавача останнє значення сигналу завдання запам'ятовується, а потім може бути змінене вручну. Якщо ввімкнено динамічне балансування ( $C_{дб} = 1$ ), то за будь-яких перемикачів перемикача 4 вузол 2 виробляє сигнал компенсації, за допомогою якого сигнал  $Y_{здн(к)}$  у першу мить зберігається незмінним. Далі сигнал компенсації буде зменшуватися до нуля з постійною швидкістю, що задається входом  $V_{дб}$ . Вихідний сигнал  $Y_{здн(к)}$  таким чином плавно переходить (ненаголошено) до поточного значення будь-якого з видів завдання. Якщо  $C_{сб} = C_{дб} = 1$ , вузол ручного завдання (режим РЗ) працює згідно з правилами статичного балансування, а в режимах ПЗ і ВЗ, змін номера програми і вмикавання алгоритму (режими ПЗ і ВЗ) діятиме динамічне балансування.

Дискретні виходи  $D_{руз}$ ,  $D_{внш}$ ,  $D_{прг}$  призначені для індикації встановленого виду завдання. Наприклад, якщо  $D_{руз} = 1$ , а  $D_{внш} = D_{прг} = 0$ , то завдання ручне.

У випадку  $m > 0$  (увімкнено хоча б один програмний задавач) алгоритм ЗДН має також інші виходи. Вихід  $N_{п}$  визначає номер програми, що виконується (положення перемикача 3), а вихід  $N_{уч}$  – номер поточної ділянки програми. Відлік часу, що залишився до кінця поточної ділянки програми, встановлюється виходом  $T_{п}$ . Якщо в алгоритмах програмного задавача ПРЗ задано число повторень  $N_{пвт} > 1$ , то після закінчення кожного поточного повторення програми на один цикл роботи контролера ( $T_0 = 0,2 \div 2$  с) встановлюється дискретний сигнал (кінець повторень)  $D_{кпв} = 1$ . Після закінчення останнього повторення сигнали  $D_{кп} = D_{кпв} = 1$  постійно і зберігають ці значення, доки програма не буде скинута ( $D_{кп}$  – кінець програми). Якщо  $N_{пвт} = 1$ , то після закінчення програми

$D_{кп} = D_{кпв} = 1$ . Вихід  $N_{ост}$  визначає число повторень програми, що залишилися. Дискретні сигнали  $D_{пс}$ ,  $D_{ст}$   $D_{сбр}$ , дорівнюють логічній одиниці, якщо програма знаходиться в стані пуску, зупинки і скидання. На вході  $Y_{руз}$  формується сигнал, ідентичний вихідному сигналу вузла ручного задавача. При  $t = 0$  вихід  $Y_{руз}$ , має номер 05, а при  $t > 0$  – номер 14.

*Алгоритм ЗДЛ (код 25)* – завдання локальне - використовується в складі каскадного регулятора і в поєднанні з алгоритмом ОКО. Цей алгоритм дає змогу передбачити перемикання каскадного регулятора в локальний режим і ручну зміну завдання веденого регулятора в цьому режимі. На рис. 4.26 зображено функціональну схему алгоритму.

Алгоритм містить вузол ручного завдання і перемикач режимів (ЛУ – локальне керування і КУ – каскадне керування). У схемах АСР його вмикають між веденим і ведучим регуляторами. У режимі КУ сигнал на вході  $X(k)$  передається на його вихід  $Y(k)$ . Звичайно вхід  $X(k)$  підключається до виходу ведучого регулятора, а вхід веденого регулятора – до виходу  $X(k)$ . У режимі ЛУ завдання може змінюватися вручну за допомогою клавіш ПЛ контролера. На дискретному виході  $D_{лок}$  встановлюється значення  $D_{лок} = 0$  у режимі КУ і  $D_{лок} = 1$  у режимі ЛУ.

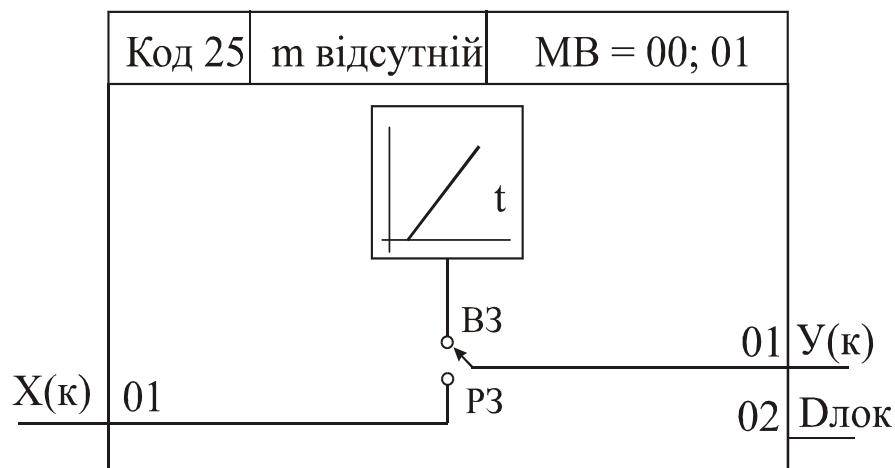


Рис. 4.26. Функціональна схема алгоритму ЗДЛ.

*Алгоритм РУЧ (код 26)* ручне управління – застосовується для зміни режимів управління регулятора в поєднанні з алгоритмом ОКО. При цьому може працювати у складі як аналогового так і імпульсного регулятора. На рис. 4.27 зображено функціональну схему алгоритму.

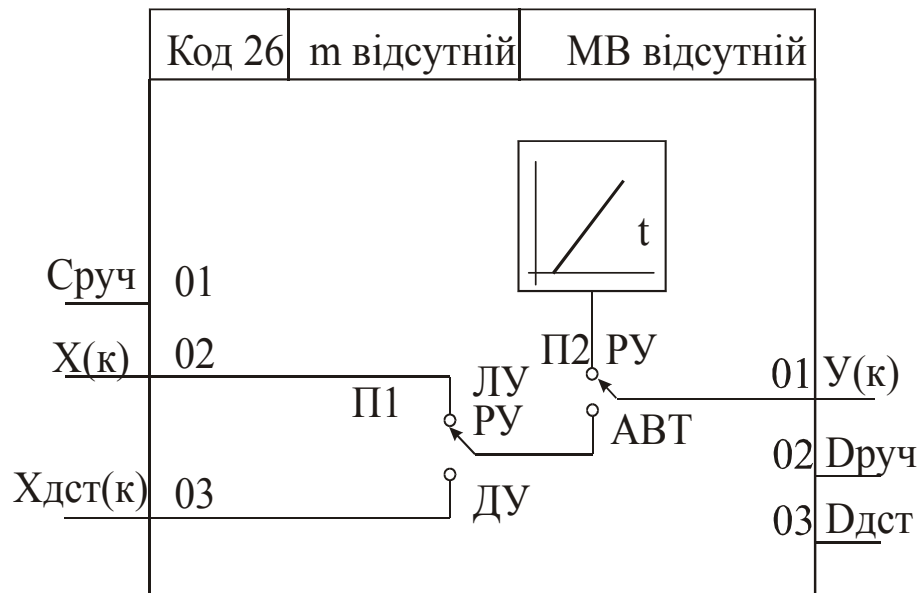


Рис. 4.27. Функціональна схема алгоритму РУЧ.

Алгоритм містить перемикачі режимів роботи П1, П2 і вузол ручного управління. Якщо на ПЛ контролера натискається клавіша ручного режиму, то до виходу алгоритму РУЧ підключається вузол ручного управління. При завданні в алгоритмі ОКО аналогового регулятора вузол ручного управління алгоритму РУЧ працює за принципом "більше-менше". Якщо в алгоритмі ОКО задано імпульсний регулятор, то вузол ручного управління формує константу ( $-100$ ,  $-25$ ,  $0$ ,  $25$  чи  $100$  %), що визначає середню швидкість переміщення виконавчого механізму.

Якщо на ПЛ контролера натискається клавіша автоматичного режиму управління, то вузол ручного управління відмикається і вихід  $Y(k)$  алгоритму РУЧ з'єднується з його входом  $X(k)$ , чи  $X_{дст}(k)$ . Із входом  $X(k)$  вихід  $Y(k)$  з'єднується в режимах ДУ і КУ, а із входом  $X_{дст}(k)$  – у дистанційному режимі (ДУ). За допомогою входу  $Сруч = 1$  алгоритм може бути примусово переключений у ручний режим. При цьому його переведення в автоматичний режим (АВТ) блокується. Перехід у режим АВТ здійснюється тільки вручну. При положенні перемикача П2 у положенні РУ сигнал  $Друч = 1$ , у протилежному разі  $Друч = 0$ . Якщо перемикач П1 знаходяться в положенні ДУ, то  $Ддст = 1$ . Для іншого положення П1  $Ддст = 0$ .

Алгоритм ПРЗ (код 27) – програмний задавач – формує кусково лінійну функцію часу, яка може вміщувати до 47 відрізків. Для кожного відрізка задається його тривалість за часом і кінцева ордината. Передбачено можливість запускати, зупиняти і скидати програму.

Окрім того, програма може виконуватися задане число разів. На рис. 4.28 зображено функціональну схему алгоритму ПРЗ.

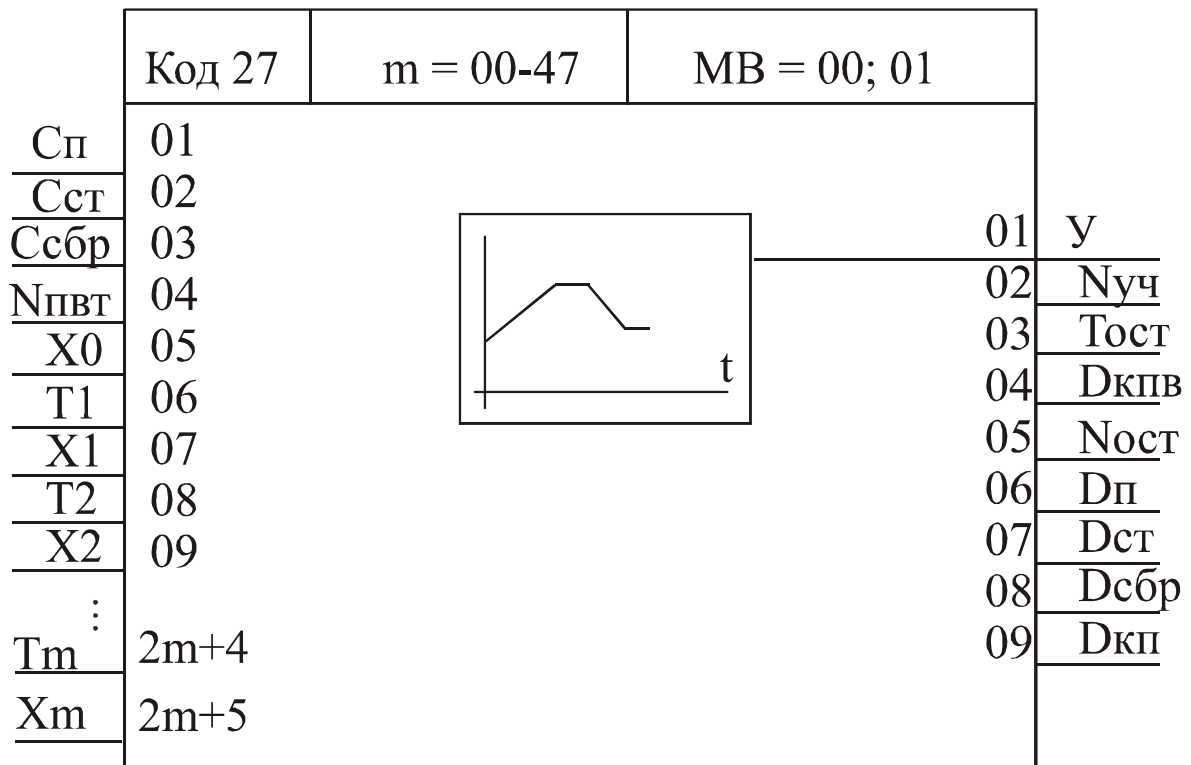


Рис. 4.28. Функціональна схема алгоритму ПРЗ.

Вхідні сигнали  $X_i$  і  $T_i$  на настроюваних входах задають відповідно кінцеві ординати і тривалість окремих ділянок на виході  $Y$ . При цьому в стані скидання сигнал  $Y$  на виході алгоритму має початкове значення  $Y_0 = X_0$ . Якщо вихід  $Y$  з'єднаний з одним із входів  $X_{пр}$  алгоритму ЗДН, то запускати, зупиняти та скидати програму можна за допомогою клавіш ПЛ контролера. Незалежно від зв'язку з алгоритмом ЗДН алгоритм ПРЗ може бути переведений у стан пуску, зупинки та скидання дискретними сигналами  $Cп$ ,  $Cст$  і  $Cсбр$  при їх переході до значення логічної одиниці. Сигнал  $Cсбр$  є пріоритетним, і при  $Cсбр = 1$  алгоритм ПРЗ не можна перевести в інші стани ні за допомогою ПЛ, ні за допомогою команд  $Cп = Cст = 1$ . При одночасних командах  $Cп = Cст = 1$  виконуватиметься команда зупинки. Кількість повторень програми задається командою  $Nпвт$  на вході. При  $Nпвт = 1$  команда виконується один раз, після чого програма переходить у стан КП (кінець програми) і вихідний сигнал  $Dкп = 1$ . При  $Nпвт > 1$ , якщо програма доходить до кінця, вона автоматично переходить на початок і буде знаходитись у стані пуску, доки не закінчиться задане число повторень. Після кожного закінчення про-

грами сигнал Дкпв (кінець повторення) переходить у стан логічної одиниці.

Інші виходи мають таке призначення: Нуч – поточний номер ділянки програми; Тост – час, що залишився до закінчення поточної ділянки; Ност – число повторень програми, що залишилося. Дп, Дст, Дсбр – дискретні сигнали, що реєструють стан програми, відповідно пуску, зупинки і скидання.

*Алгоритм ПОК (код 29)* – граничний контроль – дозволяє контролювати до 20 аналогових сигналів, порівнюючи кожний із них з припустимими для них верхнім і нижнім значеннями. Використовується разом із алгоритмом ОКО. При виході за межі припустимих значень засвічується один із індикаторів ПЛ "ошибка контура" чи "ошибка програми". На рис. 4.29 зображено функціональну схему алгоритму.

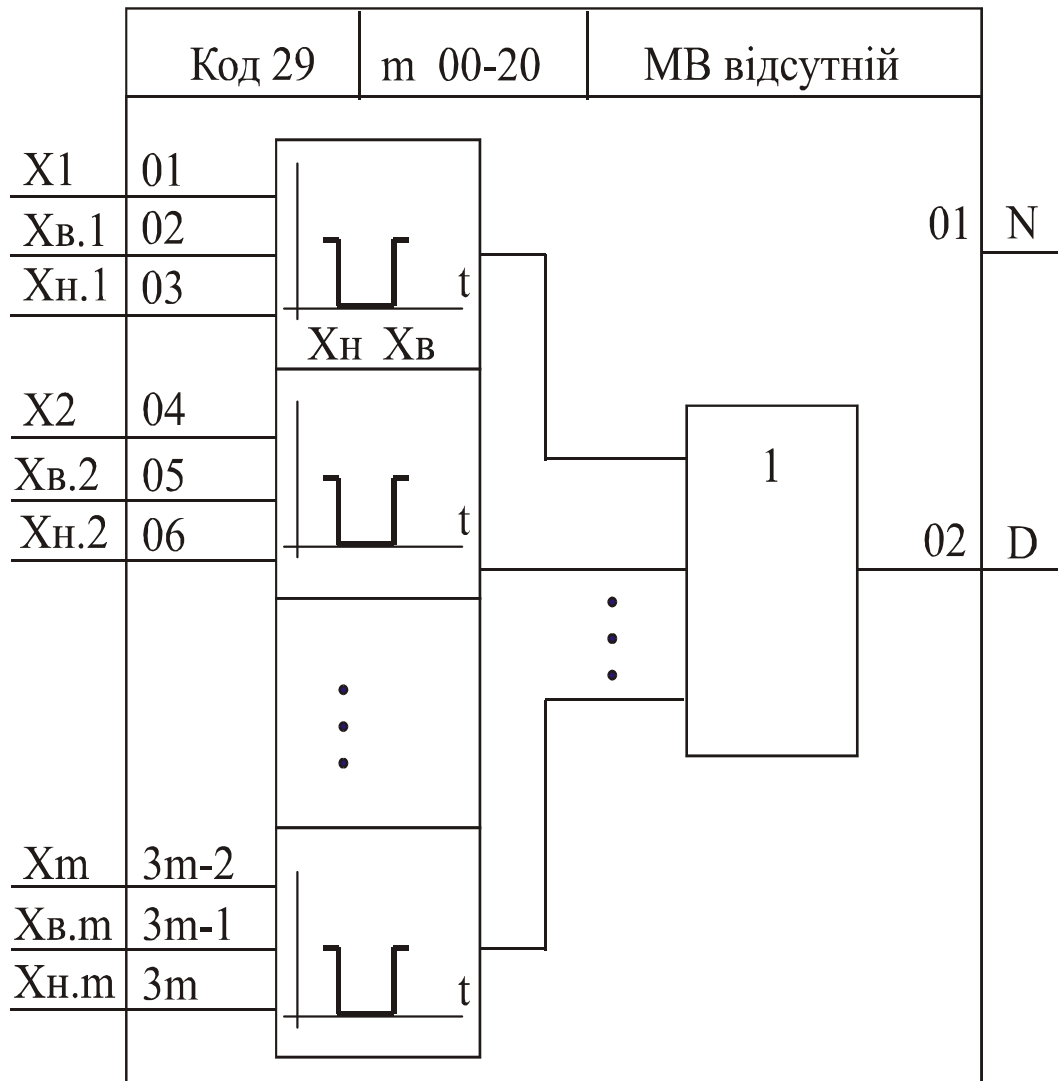


Рис. 4.29. Функціональна схема алгоритму ПОК



Кількість контрольованих сигналів  $X_i$  задається модифікатором  $m$ . По кожному вхідному каналу здійснюється порівнювання з верхньою і нижньою уставкою. Якщо хоча б один із контрольованих сигналів досягне заданої для нього уставки, вихідний сигнал  $D = 1$ , інакше  $D = 0$ . При цьому на виході  $N$  формує номер вхідного сигналу  $i$ , який вийшов за задані межі. Якщо кілька сигналів вийшли за припустимі межі, тоді  $N$  дорівнює молодшому із цих сигналів.

Алгоритм АНР (код 30) – автонастройка регулятора – використовується для автоматизації процесу розрахунку динамічної настройки регулятора і застосовується разом з алгоритмами РАН і РИМ. Функціональну схему алгоритму зображено на рис. 4.30.

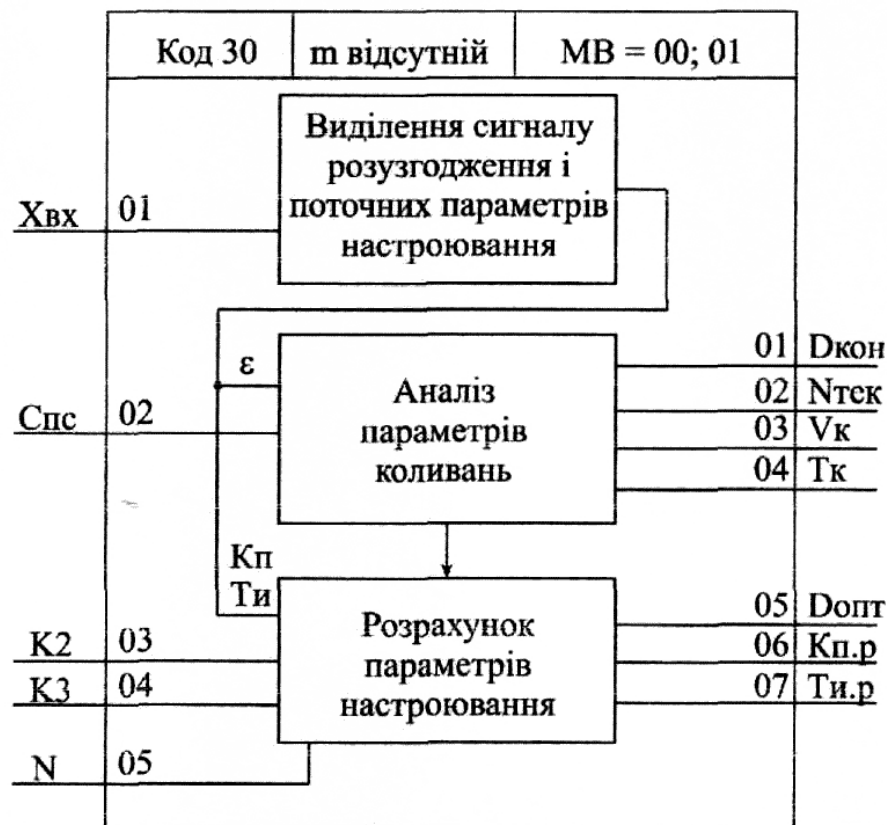


Рис. 4.30. Функціональна схема алгоритму АНР.

Вона містить три вузли: виділення сигналу розбіжності  $\epsilon$  і поточних значень параметрів настройки  $K_p$  і  $T_i$ , аналізу параметрів коливань; розрахунку параметрів настройки. Звичайно вхід  $X_{вх}$  алгоритму підключається до виходу 4 алгоритмів РАН чи РИМ. При такій схемі алгоритм АНР виділяє сигнал  $\epsilon$  і поточні значення  $K_p$  і  $T_i$ , що встановлені в алгоритмі РАН (РИМ), а також значення  $X_{но}$ , встановлене в цьому алгоритмі.

Виділений сигнал  $\epsilon$  надходить на вхід вузла аналізу параметра коливачь. Аналіз починається при команді  $Спс = 1$  (пуск). В результаті чого даний вузол визначає усереднене значення амплітуди  $Y_k$  і періоду  $T_k$  коливачь. На вході  $N$  алгоритму задається максимальне число періодів коливачь, протягом яких виконується аналіз. При закінченні аналізу за число періодів, що менше чи дорівнює  $N$  на дискретному виході  $D_{кон}$  формується одиничний сигнал. Результати аналізу параметрів коливачь разом з виділеними значеннями поточних параметрів настройки  $K_p$  і  $T_i$  надходять на вхід вузла розрахунку параметрів. На вході цього вузла задаються також два настроюваних коефіцієнти  $K_2$  і  $K_3$ , що попередньо розраховані. Якщо інформація про об'єкт відсутня, то беруть  $K_2 = 0,92$ , а  $K_3 = 3,7$ . На підставі цих даних вузол визначає розрахункові значення  $K_{пр}$  і  $T_{ир}$ . При досягненні цими параметрами значень, близьких до оптимальних, на дискретному виході сигнал  $D_{опт} = 1$ . У стані скидання ( $Спс = 0$ ) значення  $D_{опт} = 0$ , а величини  $K_{пр}$  і  $T_{ир}$  дорівнюють значенням, що розраховані на попередньому циклі. Вихід  $N_{тек}$  фіксує номер поточного періоду коливачь. У випадку використання ПІД-закону регулювання в алгоритмі РАН (РИМ) після визначення  $K_p$  і  $T_i$  встановлюється коефіцієнт  $K_d = T_d/T_i \approx 0,1 \dots 0,3$ . Значення  $K_p$  при цьому можна підвищити на  $20 \dots 40 \%$ . При настроюванні може бути використана як ручна оцінка коливачь, так і автоматичний розрахунок настройок.

*Алгоритм СМА (код 43)* застосовується в АСР при побудові регуляторів співвідношення чи для введення статичної корекції. Число сигналів, що масштабуються з коефіцієнтом  $K_m$  і підсумовуються  $X_i$ , задаються модифікатором  $m = 0 \dots 20$ . Немасштабований основний сигнал  $X_0$  присутній завжди, незалежно від  $m$ . На рис. 4.31 зображено функціональну схему алгоритму.

*Алгоритм ОГР (код 48)* використовується для обмеження верхньої чи нижньої межі діапазону зміни сигналу. Функціональну схему алгоритму зображено на рис. 4.32. На двох дискретних виходах  $D_v$  і  $D_n$  фіксується досягнення сигналом меж обмеження, рівень яких задається настроюваними входами  $X_v$  і  $X_n$ . Для правильної роботи алгоритму необхідно дотримуватись умови  $X_v > X_n$ . При виході вхідного сигналу  $X(k)$ , за зону обмеження на відповідному дискретному виході з'являється одиничний сигнал.

*Алгоритми ДВА (код 13) і ДВБ (код 14)* – дискретний вивід груп А і Б – застосовуються для зв'язку функціональних алгоритмів

з апаратними засобами дискретного виводу (з ЦДП). Функціональну схему алгоритму зображено на рис. 4.33.

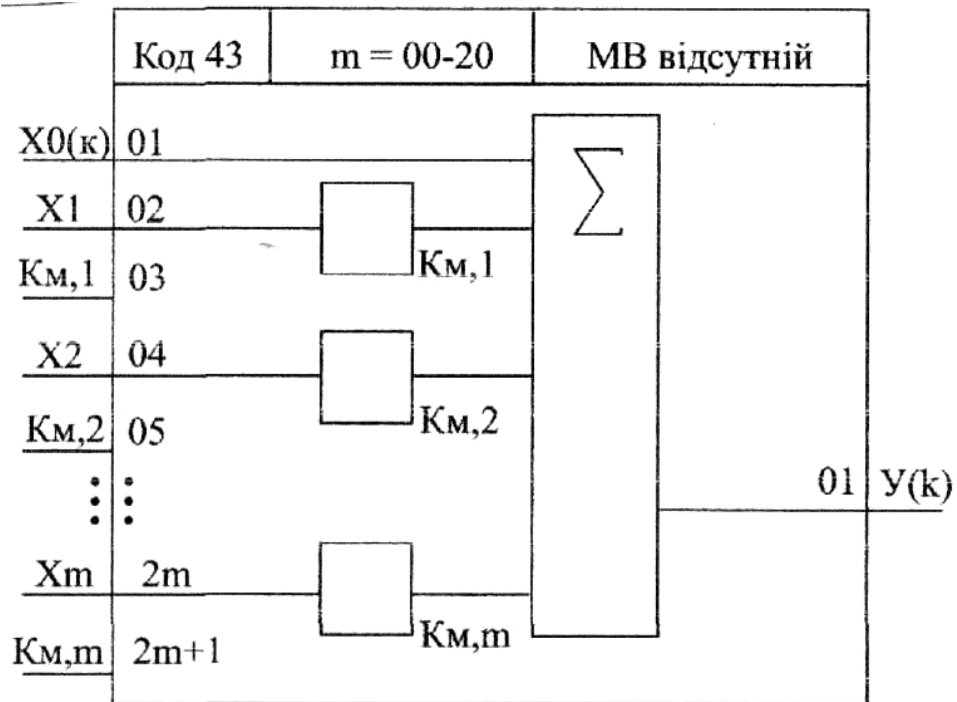


Рис. 4.31 Функціональна схема алгоритму СМА.

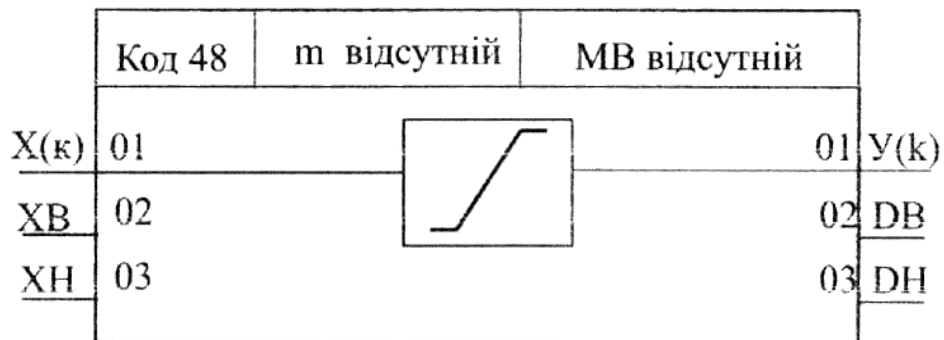


Рис. 4.32. Функціональна схема алгоритму ОГР.

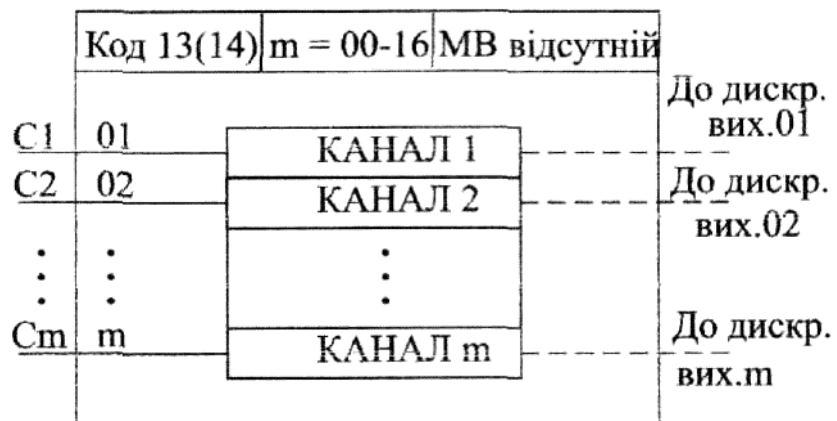


Рис. 4.33. Функціональна схема алгоритму ДВА (ДВБ).

**Виконання функціональних схем** здійснюється за допомогою алгоритмів контролера, які зображені у вигляді однакових прямокутників довільних розмірів з урахуванням номеру алгоблоку і позначення алгоритму, системи зв'язків між входами і виходами (конфігурація) і наявності (при необхідності) інверсії сигналу на вході алгоритму. Крім того, на схемі бажано вказувати числові значення параметрів настройки, що задаються на настроюваних входах алгоритмів, і відмічати, чи є даний параметр константою, що встановлюється в режимі програмування, чи коефіцієнтом, який можна змінювати в режимі оперативного управління. При конфігуруванні необхідно керуватись такими правилами:

- будь-який вихід будь-якого алгоблока можна зв'язати з будь-яким входом будь-якого алгоблока чи залишити вільним;
- на будь-якому вільному вході будь-якого алгоблока можна вручну задавати сигнал у вигляді константи чи коефіцієнта;
- на будь-якому зв'язаному вході будь-якого алгоблока сигнал можна інвертувати.

Приклад виконання фрагменту функціональної схеми показано на рис. 4.34.

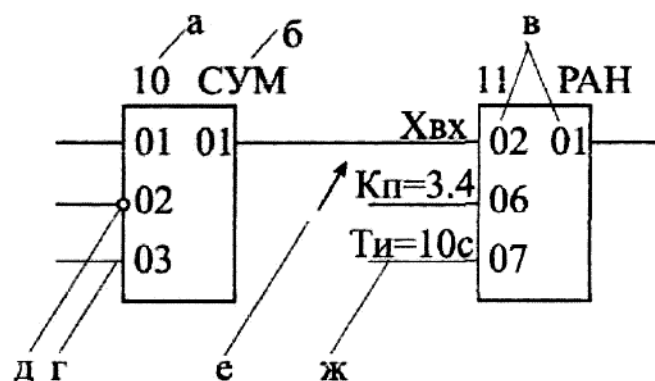


Рис. 4.34. Фрагмент функціональної схеми: а – номер алгоблока; б – позначення алгоритму та номер його коду з модифікатором; в – номер входу чи виходу алгоритму; г – сигнал, без інверсії, д – інвертований сигнал; е – коефіцієнт; ж – константа

Звичайно графічне зображення функціональної схеми доповнюється її табличним зображенням (табл. 4.9).

У табл. 4.9 наведено інформацію, яку зручно використовувати при її введенні в контролер за допомогою ПН при конфігуруванні. Згідно з правилами конфігурування конфігурація 00.00 означає, що на даному вході задається константа, а 00.01 – коефіцієнт. Усі інші

позначення (наприклад 10.01) задає, номер алгоблока – джерела (перше двозначна цифра) і номер його виходу (друга двозначна цифра). Для запобігання можливих; помилок при конфігуруванні у такій таблиці найчастіше вказуються стани і невикористані входи.

Таблиця 4.9

Табличне зображення функціональної схеми

Номер алгоблока	Алгоритм			Конфігурація			Настройка
	код	m	МВ	Номер входу	Інв.	Конф.	
10	42	03	—	01	—	05.01	
				02	ІНВ.	07.02	
				03	—	20.05	
11	20	00	00	02		10.01	
				06		00.01	3,4
				07		00.00	10,0 с

Перед початком виконання конфігурування необхідно вибрати модифікацію БК (див. табл. 4.10), яка б відповідала вимогам до вхідних і вихідних сигналів.

**Приклади побудови автоматичних систем регулювання**, що розглянуті нижче, виконані за допомогою алгоритмів регулюючої моделі Р-130. У кожному контролері можна реалізувати до чотирьох незалежних чи взаємозв'язаних АСР.

*АСР стабілізації технологічного параметра*, схему якої показано на рис. 4.35, реалізована на базі алгоритму РАН.

Як впливає з рис. 4.35, сигнал завдання ХзДн, що формується в режимі РЗ алгоритмом ЗДН, надходить на вхід алгоритму РАН. На другий вхід цього алгоритму надходить сигнал Хвх від датчика, що попередньо перетворений калібруванням і масштабуванням алгоритмом уводу ВАА. Вихідний сигнал Y алгоритму РАН через алгоритм РУЧ у режимі "АВТ", що встановлюється за допомогою клавіші ПЛ блока БК, і алгоритм виводу АВА надходять на аналоговий вихід контролера. За допомогою алгоритму ОКО забезпечується оперативне управління. Функції, що виконуються при оперативному управлінні, задаються конфігуруванням входів алгоритму ОКО. Сигнал, що надходить на вхід 01 цього алгоритму, завжди виводиться на верхній цифровий індикатор "задание" ПЛ блока БК незалежно від того, до виходу якого алгоблока підключений вхід 01 алгоритму

ОКО. Однак, якщо сигнал, завдання необхідно не лише контролювати, а й змінювати вручну, вхід 01 алгоритму ОКО повинен бути обов'язково підключений до виходу 01 алгоритму ЗДН.

Таблиця 4.10.

## Модифікації блока контролера БК

Номенклатура	Мо- дифі- кація	Число входів - виходів			
		Аналогові входи	Аналогові виходи	Дискретні входи	Дискретні виходи
Аналогові входи – виходи	10	8	2	-	-
	11	6	4	-	-
Аналогові й дис- кретні входи - ви- ходи	12	16	2	-	4
	13	8	2	-	16
	14	8	2	4	12
	15	8	2	8	8
	16	8	2	12	4
	17	8	2	16	-
Аналогові входи і дискретні виходи - входи	20	8	-	-	4
	22	16	-	-	8
	23	8	-	-	20
	24	8	-	4	16
	25	8	-	8	12
	26	8	-	12	8
	27	8	-	16	4
Дискретні входи виходи	30	-	-	-	16
	33	-	-	-	32
	40	-	-	4	12
	43	-	-	4	28
	50	-	-	8	8
	53	-	-	8	24
	60	-	-	12	4
	63	-	-	12	20
	70	-	-	16	-
	73	-	-	16	16
	74	-	-	20	12
	75	-	-	24	4
	76	-	-	28	4
	77	-	-	32	-

На нижньому цифровому індикаторі вибіркового контролю в положенні "вх", "ε", "вых" можуть індициватися сигнали відпові-

дно датчика, розбіжності і виходу регулятора, що надходять на входи 02, 05 і 07 алгоритму ОКО. Сигнал виходу регулятора "ВР" надходить не тільки на нижній цифровий індикатор у положенні "вух", а й на шкальний індикатор.

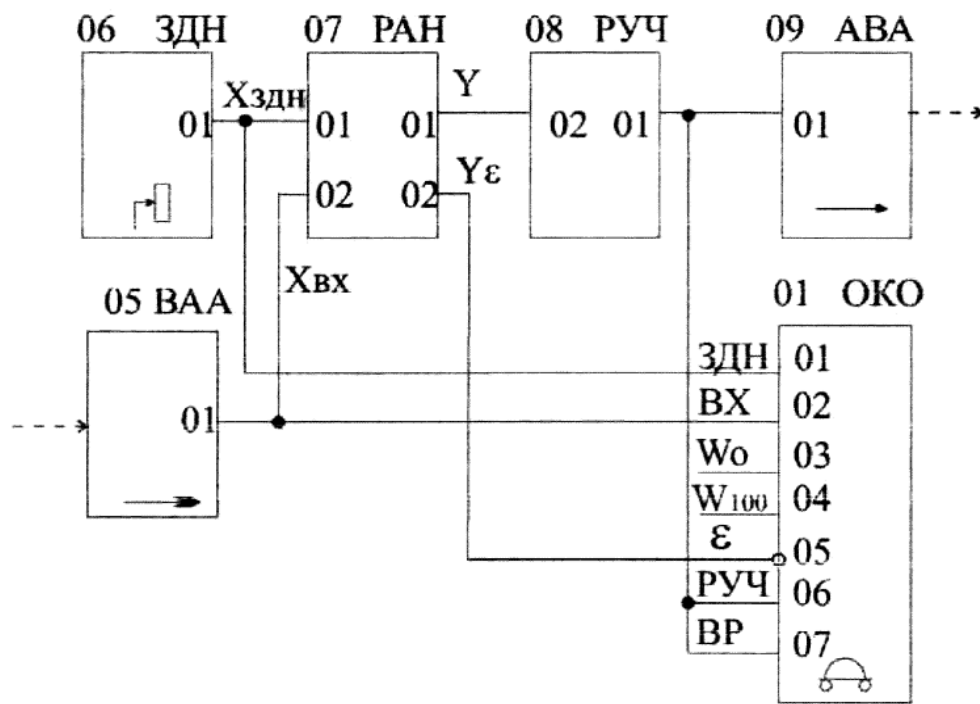


Рис. 4.35. Схема АСР стабілізації технологічного параметра на базі алгоритму РАН.

При цьому за шкальним індикатором контролюється вихідний сигнал регулятора  $Y$  незалежно від того, який сигнал у даний момент виводиться на нижчий цифровий індикатор. Крім того, вхід 06 алгоритму ОКО обов'язково має бути підключений до виходу 01 алгоритму РУЧ, що дає змогу змінювати режим керування і управляти виконавчим механізмом за допомогою клавіш ПЛ блока БК.

На двох настроюваних входах 03 і 04 алгоритму ОКО задаються константи  $W_0$  і  $W_{100}$ , що визначають технічні одиниці, в яких контролюються сигнали завдання, входу і розбіжності. При цьому значення констант визначаються згідно з рівнянням (4.1).

Вихідний сигнал як за цифровим, так і за шкальним індикатором завжди контролюється в процентах незалежно від одиниць завдання значень  $W_0$  і  $W_{100}$ . Знаку сигналу розбіжності  $Y_{\epsilon} = Y_{здн} - Y_{вх}$  прийнято приписувати протилежний зміст. Тому сигнал на вході 05 алгоритму ОКО інвертується.

АСР стабілізації технологічного параметра, схему якої зображено на рис. 4.36, реалізована за допомогою алгоритму РИМ.

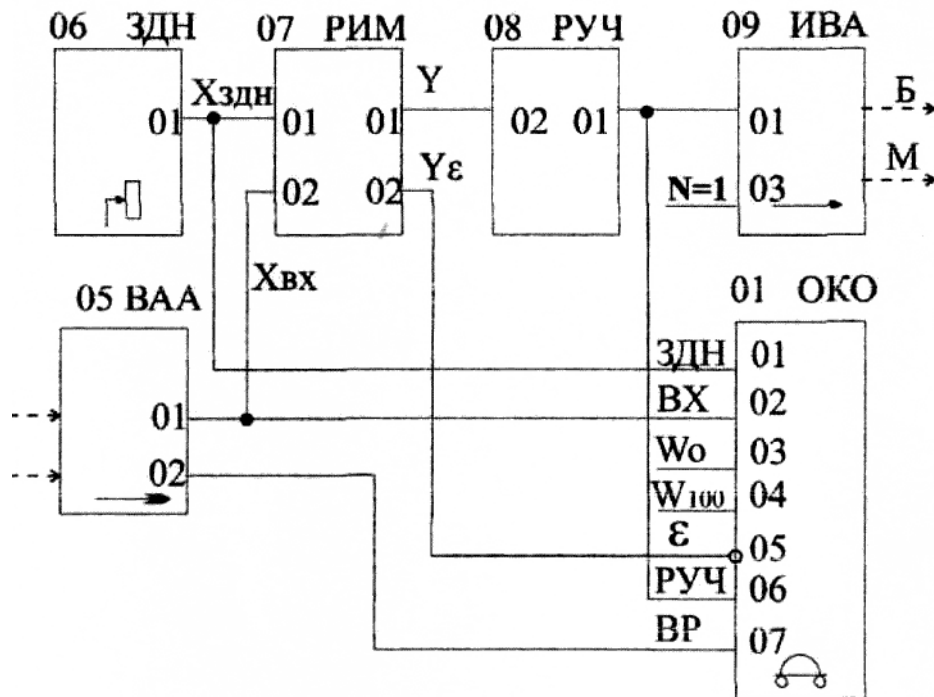


Рис. 4.36. Схема АСР стабілізації технологічного параметра на базі алгоритму РИМ.

Із порівняння схем, показаних на рис. 4.35 та 4.36, випливає, що вони різняться лише алгоритмами виводу інформації. При цьому алгоритм ИВА перетворює аналоговий сигнал, що сформований алгоритмом РИМ, у послідовність імпульсів, які управляють виконавчим механізмом постійної швидкості. За допомогою алгоритму ИВА додатково встановлюється мінімальна тривалість імпульсу  $T_{\text{імп}}$  і номер контуру, до якого віднесений цей канал алгоритму ИВА. Зазначення номера контуру забезпечує включення в роботу індикаторів "∇" і "Δ" на ПЛ при виклику даного контуру. Ще одна особливість цієї АСР пов'язана з контролем виходу алгоритму РИМ, а саме для контролю положення виконавчого механізму датчик його положення підключається до одного з вільних входів контролера, з яким і з'єднується вхід 07 алгоритму ОКО.

Для реалізації схем АСР на базі алгоритму РАН у алгоритмі ОКО встановлюється  $m = 00$  (аналоговий регулятор), а на базі алгоритму РИМ –  $m = 04$  (імпульсний регулятор). У алгоритмі ЗДН значення  $m = 00$ , що забезпечує блокування переходу на інші режими задавання і керування.



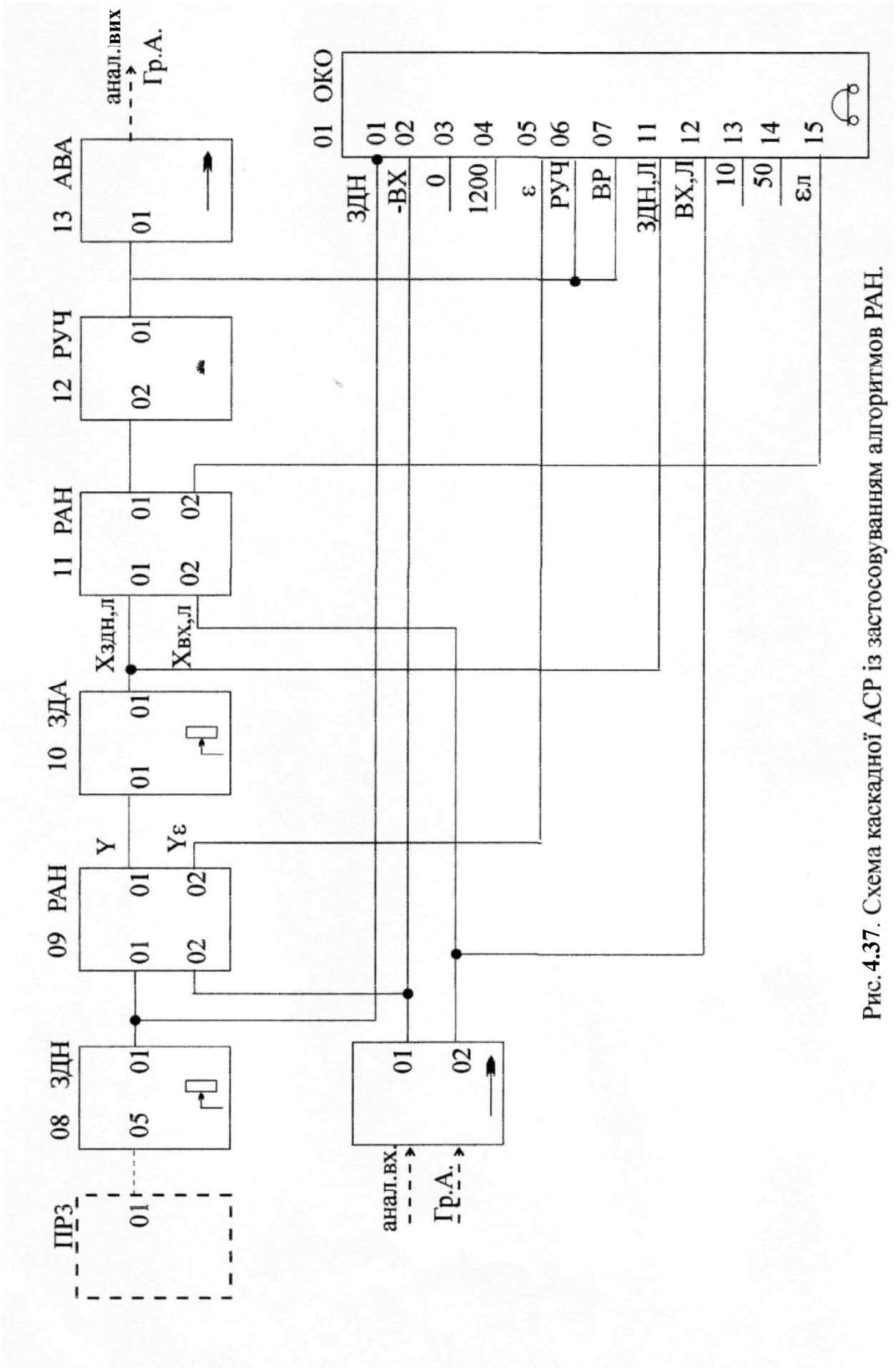


Рис. 4.37. Схема каскадної АСР із застосуванням алгоритмів РАН.

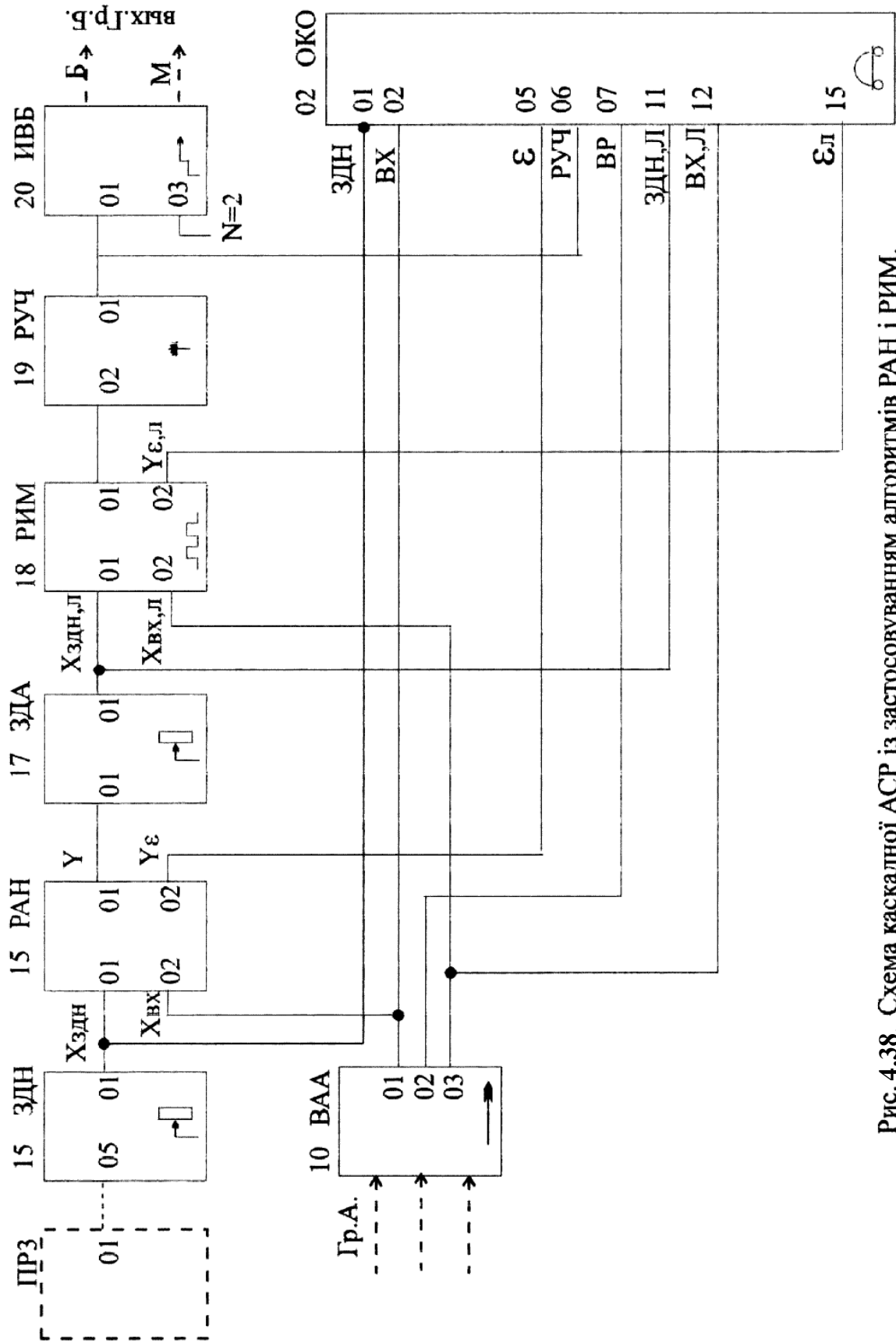


Рис. 4.38. Схема каскадної АСР із застосуванням алгоритмів РАН і РИМ.

*Каскадну АСР* можна побудувати за допомогою алгоритмів РАН і РИМ, а також тільки на базі алгоритмів РАН. На рис. 4.37 і 4.38 зображено схеми каскадних АСР для цих двох варіантів.

На відміну від АСР стабілізації в каскадних АСР в алгоритмі ОКО задається інший модифікатор (наприклад, 08 і 12). Крім того, задіяні його входи I2-I5. Сигнали другої групи входів виходять на цифрові індикатори ПЛ контролера в каскадному режимі роботи, а сигнали першої групи виходів - у локальному режимі.

При переході в режим ЛУ ведучий регулятор (алгоблок 09) негаголошено відмикається, а завдання веденому регулятору (алгоблок 11) встановлюється вручну за допомогою алгоритму ЗДЛ. У режим КУ повертаються також негаголошено. Для того щоб зазначені перемикання могли виконуватися, вхід 11 алгоритму ОКО має бути безпосередньо (без проміжних алгоблоків) підключений до виходу 01 алгоритму ЗДЛ.

Між алгоритмами ЗДН, РАН, ЗДЛ, РИМ, РУЧ при необхідності можуть бути ввімкнені інші алгоритми. У каскадній АСР також задаються одиниці  $W$ , у яких контролюються сигнали, при цьому ці одиниці можуть бути різними для ведучого і веденого регуляторів. Для прикладу на рис. 3.77 задано технічні одиниці для ведучого регулятора  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (0 %) і  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (100 %), а для веденого регулятора –  $10\text{ кгс/см}^2$  (0 %) і  $50\text{ кгс/см}^2$  (100 %).

У деяких випадках необхідна зміна напрямку вихідного сигналу регулятора. Тоді на вході алгоритмів РАН чи РИМ інвертуються сигнали, а на вході 06 сигналу ОКО інверсії сигналу не виконують.

---

## 5. ВИКОНАВЧІ ПРИСТРОЇ

### 5.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

*Виконавчі пристрої (ИУ)* є складовою частиною будь-якої автоматичної системи регулювання. ИУ різноманітні за принципом дії, конструкції, але усі вони складаються з двох частин: виконавчого механізму (ИМ) і регулюючого органу (РО).

**Виконавчі механізми** перетворюють сигнали регулювального блоку у пропорційне переміщення РО, який при пересуванні змінює приплив чи стік речовини або енергії для впливу на об'єкт. У залежності від роду енергії, що використовується у ИМ, відрізняють електричні, пневматичні і гідравлічні ИМ. За способом керування ИМ розділяються на контактні з релейно-контакторними блоками керування і безконтактні з регулювальними пристроями безперервної дії на підставі безконтактних реверсивних пускачів. Взагалі ИМ складаються із сукупності наступних елементів: виконавчого двигуна, що є джерелом силового впливу на РО; передаточного чи перетворювального пристрою, що розташовується між виконавчим двигуном та РО і призначеного для отримання визначеної швидкості, напрямку і характеру переміщення РО; кінцевих вимикачів, що служать для обмеження переміщення РО і фіксації його положення у схемах керування і автоматичного регулювання; елементів керування (пускачів, реле, золотників, клапанів і т.п.), захисту (попереджувальних і переливних клапанів, муфт обмеження обертального моменту і т. ін.), сигналізації і контролю (дистанційних покажчиків положення та ін.).

Основними характеристиками ИМ є наступні: номінальне значення обертального моменту на вихідному валу чи перестановочного зусилля на вихідному штоку; максимальне значення обертального моменту чи зусилля; зона нечутливості, у межах якої зміна величини керуючого сигналу не викликає руху ИМ; постійна часу, що характеризує інерційне запізнення початку руху ИМ після надходження на вхід керуючого сигналу; час оберту вихідного валу ИМ чи хода його штоку; величина інерційного вибігу вихідного валу ИМ. При цьому інерційний вибіг чинить суттєвий вплив на якість процесу регулювання, особливо при скороченому ході ИМ. Зменшення вибігу здійснюють встановленням і налаштуванням гальмуючих пристроїв.

*Електричні виконавчі механізми* за принципом дії розподіляються на електромагнітні і електродвигунні, а за характером роботи вихідного органу – на однооборотні, багатооборотні і поступальної дії. Електромагнітні ИМ найчастіше є двопозиційними елементами, здійснюючими поступальний рух привідних органів за дискретним принципом „увімкнено – вимкнено”. Усі електромагнітні ИМ розподіляються на дві групи: елементи з котушкою електромагніта, що розрахована на тривале обтікання струмом, і елементи з котушкою, що розрахована на короткочасну дію. Електромагнітні ИМ першої групи спрацьовують (відкривають чи закривають) при надходженні до котушки напруги і відпадають під впливом сили ваги якоря електромагніта чи пружини при відключенні живлення. Електромагнітні ИМ другої групи мають тяговий електромагніт і електромагніт заціпки, які розраховані на короткочасне вмикання.

Електродвигунні ИМ розподіляються на однооборотні (МЭО), багатооборотні (МЭМ) і прямохідні (МЭП). Виконавчі механізми типу МЭО зчленовуються з арматурою РО, у якій затвор має обертальне чи поступальне переміщення. ИМ типу МЭМ зчленовуються з гвинтовим шпинделем трубопровідної арматури РО, що мають велику площину прохідного перерізу затвору. ИМ типу МЭП і МЭО зчленовуються з арматурою у поєднанні з РО, які мають малу чи середню площину прохідного перерізу затвору. Електродвигунні ИМ також можуть бути з постійною і змінною швидкостями переміщення вихідного органу (шток, кривошип, шпindel). ИМ з постійною швидкістю використовуються у сполученні з релейними (імпульсними) регуляторами.

*Пневматичні виконавчі механізми* за конструкцією приводу, що сприймає командний сигнал стислого повітря від регулювального блоку, розподіляються на мембранні, сифонні і поршневі. Мембранні пневмоприводи мають два виконання: прямохідні, що застосовуються для керування регулювальними дросельними клапанами і конструктивно об'єднані з ними; важільні, що служать найчастіше для керування поворотними заслінками. Мембранні пневматичні ИМ можуть бути прямої чи зворотної дії, пружинні чи безпружинні. Для підвищення потужності мембранного пневмоприводу і покращання характеристик застосовуються позиціонери.

Поршневі пневмоприводи на відміну від мембранних мають більшу величину переміщення робочого вихідного органу (шток) і більш потужну величину зусилля на вихідному елементі. Конструк-

тивно поршневі пневмоприводи виконуються з циліндром одно- чи двосторонньої дії. Поршневі приводи можуть бути позиційної і пропорційної дії.

**Регулюючі органи** можуть бути дозуючими і дросельними. До дозуючих РО відносять такі, що змінюють витрату речовини за рахунок зміни продуктивності агрегатів (дозатори, живильники, насоси, компресори та ін.). Дросельні РО становлять собою перемінний гідравлічний опір, що змінює витрату речовини за рахунок зміни свого прохідного перерізу. Регулювальні органи мають велику кількість параметрів, що характеризують їх роботу, основними з яких є наступні: пропускна і умовна пропускна здатність; умовний і робочий тиск; перепад тиску на РО і умовний прохід.

*Пропускна здатність  $K_v$  ( $m^3/год$ )* – це витрата рідини з густиною  $1000 \text{ кг}/m^3$ , що проходить крізь РО, при перепаді тиску на ньому  $10^5 \text{ Па}$  за нормальних умов. *Умовна пропускна здатність  $K_{vu}$  ( $m^3/год$ )* – це номінальне значення пропускної здатності РО за максимальної (умовної) ходи затвору  $S_u$ . Умовна пропускна здатність залежить від типу РО і розміру його умовного проходу. *Умовним проходом  $D_u$*  у РО називають номінальний діаметр проходу у приєднувальних патрубках. Стандартні розміри умовних проходів не розповсюджуються на розміри проходу усередині корпусу. *Умовний тиск  $P_u$*  – це найбільший припустимий тиск середовища на РО за нормальної температури. Міцність металів з підвищенням температури знижується, тому для арматури і з'єднувальних частин слід передбачати максимальний робочий тиск. *Максимальний робочий тиск* – найбільш можливий встановлений тиск середовища на РО при фактичній температурі. Дозволяється перевищення фактичного робочого тиску не більш ніж на 5 % понад встановленого для заданої температури. *Перепад тиску* на РО визначає зусилля, на яке розраховують ИМ, а також зношення дросельних поверхонь. Для багатьох видів ИУ, у яких затвор не розвантажений від статичних і динамічних впливів середовища, гранично припустимий перепад тиску встановлюють у залежності від потужності ИМ.

Серед характеристик, що ураховують при виборі РО у залежності від конкретних умов їх застосування, відрізняють наступні: пропускна, конструктивна, витратна і негерметичність затвору. *Пропускна характеристика* (ідеальна) встановлює залежність пропускної здатності відносно переміщення затвору  $S$  (хід штоку) при постійному перепаді тиску. *Конструктивна характеристика* встановлює

залежність зміни відносного прохідного перерізу РО від переміщення затвору. Дросельні РО регулювальних клапанів, що серійно виготовляють, профілюють найчастіше з лінійною чи рівновідсотковою (логарифмічною) характеристикою. При цьому регулювальні заслінки не профілюють і мають пропускну характеристику близьку до рівновідсоткової. *Витратна характеристика* встановлює залежність відносної витрати середовища від переміщення затвору у робочих умовах. *Негерметичність затвору* характеризує пропуск середовища при повністю закритому проході РО.

Дросельні РО отримали найбільш широке розповсюдження у АСР. Серед них слід відзначити наступні: заслінкові з поворотними дросельними заслінками (рис. 5.1а); клапанні односідельні (з поступальним переміщенням запірно–регулювального елемента уздовж осі сідла – рис. 5.1б ) і двосідельні (з поступальним переміщенням запірно–регулювального елемента уздовж осі двох сідел – рис. 5.1в); клапанні триходові (з поступальним переміщенням запірно–регулювального елемента уздовж осі двох сідел) з корпусом розрахованим на три проходи, через які один потік може розділятися на два чи, навпаки, – два потоки з'єднуються в один (рис. 5.1г); шлангові із змінним прохідним перерізом пружистого елемента у вигляді відрізка шлангу (рис. 5.1д); діафрагмові з поступальним переміщенням центра діафрагми відносно сідла, виконаного у вигляді перегородки в корпусі (рис. 5.1е); заслінкові жалюзного типу (рис. 5.1 ж). Для повного або неповного відкриття чи закриття трубопроводів використовують перекиваючі органи: кранові (рис. 5.1 з) і кульові (рис. 5.1и), з поворотом запірного елемента навколо своєї осі; засувочні з переміщенням запірного елемента навколо осі штока приводу (рис. 5.1.к).

*Заслінкові РО* широко застосовуються у системах автоматичного регулювання компресорних і вакуумних машин та установок, у системах кондиціонування, вентиляції, у криогенній техніці. Великий економічний ефект дає використання заслінкових пристроїв замість клапанних при діаметрах трубопроводу понад 150 мм. Це пояснюється значно меншими витратами тисків у трубопроводах через малі коефіцієнти гідравлічного опору дросельних заслінкових пристроїв. При використанні заслінкових пристроїв на діаметри умовного проходу 500 мм і більше через наявність великих невірноважених обертальних моментів на валу заслінок необхідно застосовувати приводи великої потужності. Найчастіше використовуються за-

слінкові РО з діаметром умовно проходу  $50 \div 1000$  мм і призначених для тиску  $0,6 \div 2,5$  МПа і перепаду тиску  $0,01 \div 1,6$  МПа.

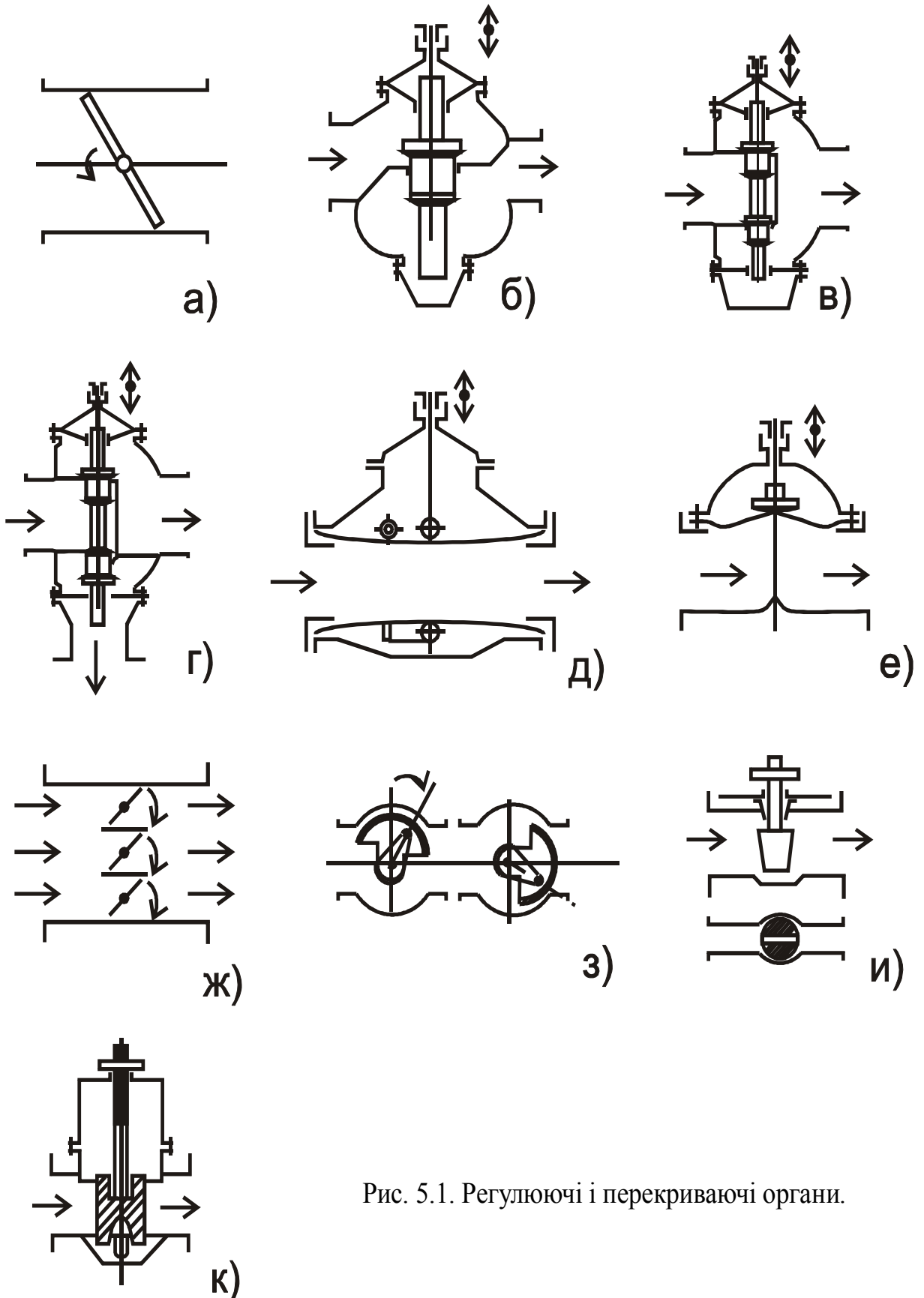


Рис. 5.1. Регулюючі і перекриваючі органи.



Клапанні РО є найбільш розповсюдженим видом дросельних пристроїв. Регулювальні клапани відрізняються за видом і кількістю опірних поверхонь (одно – і двосідельні), по конструкції затворів (тарілчасті, пробкові і поршневі) і корпусів. Односідельні РО можуть бути прохідними і кутовими. У прохідних РО напрямок потоку середовища при вході і виході не змінюється, а у кутових змінюється при виході на  $90^\circ$  по відношенню до напрямку на вході. Двосідельні клапани виготовляються нормального (типу НО) і зворотного (НЗ) виконання. Недоліком двосідельного РО є відносно велике значення негерметичності затвору. Крім того, при великих перепадах тиску і звичайних конфігураціях дросельних поверхонь рух середовища створює великі зусилля на клапан через динамічну невривноваженість затвору. Односідельні РО застосовують у тих випадках, коли неможливо застосування розвантажених двосідельних РО, у разі необхідності забезпечення герметичності закриття проходу, при малих розмірах проходів (до 15 мм), а також при великих проходах, якщо середовище має велику в'язкість чи містить тверді частинки. При регулюванні потоків з великим перепадом тиску на клапані ( $\Delta P > 1,5 \text{ МПа}$ ), у разі коли об'єм регульованого середовища при виході з щілини між затвором і сідлом різко підвищується, а також при регулюванні в'язких потоків і середовищ, що містять тверді частинки, слід застосовувати кутові односідельні клапани. Це пов'язано з тим, що вони мають менше „мертвих” просторів для осідання і кристалізації твердих частинок.

Тарілчасті затвори мають плоску чи конічну форму поверхні запирання і дросельної поверхні. Затвори з плоскою формою найчастіше застосовують як запиірні органи або при двопозиційному регулюванні, а з конічною формою – при регулюванні великих витрат. Конструктивна характеристика тарілчастих клапанів має лінійну залежність. Недолік цих затворів – швидке зношення поверхні.

Пробкові затвори становлять собою дросельну поверхню, яка має форму поверхні оберту параболі, а поверхня запирання виконана і вигляді конічних кромек. Пробкові затвори використовують у важких умовах експлуатації при регулюванні витрати в'язких рідин і середовища, що виділяє кристали. Конструктивні характеристики клапанів з пробковим затвором можуть бути будь-якими у залежності від профілю дросельної поверхні. Для запобігання швидкого зношення дросельної поверхні на ній роблять наплавлення твердими сплавами, що забезпечує їх широке застосування у двосідельних РО.

Поршневі затвори мають дросельну поверхню, що виконана у вигляді шліців чи різьбових отворів. У першому випадку (шліці) площа прохідного перерізу між затвором і сідлом утворюється сумарною площиною окремих шліців. Застосовують цей тип затворів для регулювання нев'язких рідин і таких, що не кристалізуються. У затворів з різьбовими отворами кількість отворів підбирають таким чином, щоб з підняттям затвору підвищувалась і сумарна площа прохідного перерізу. У клапанах, призначених для роботи в умовах кавітації, поршневі затвори мають велику кількість різьбових отворів на боковій поверхні поршня. Характеристики конструктивні і пропускні можуть бути будь-якими і легко змінені шляхом зміни профілю шліців.

*Триходові клапанні РО* звичайно застосовують для безперервного і двопозиційного регулювання. При безперервному регулюванні використовують клапани, що розділяють потік чи змішують два потоки. Для двопозиційного регулювання ці клапани застосовують у тому випадку, коли потік почергово направляється то в одному, то в іншому напрямках або коли обидва потоки почергово переміщуються в одному напрямку.

*Шлангові РО* мають пружисті елементи для зміни витрати середовища. Пружистий елемент – шланг (рис. 5.1д) виготовляють з якісної гуми на основі тканинного армування, що забезпечує високу міцність. При роботі РО два вали, між якими розташований шланг, наближуються чи розходяться у площині, що перпендикулярна осі проходу корпусу. При посуванні донизу верхнього валу, керованого штоком приводу, нижній вал переміщується догори, а при посуванні верхнього валу догори нижній вал переміщується у зворотному напрямку. Шлангові клапани застосовують у якості запірних і регулювальних органів для потоків середовищ, що містять тверді і абразивні частинки. У конструкції шлангових клапанів передбачена можливість зміни зношених шлангів на нові. Найбільш інтенсивне підвищення пропускної здатності відбувається при посуванні штоку від 0 (з положення закриття РО) до 0,25 його максимального значення. На цій ділянці пропускна (витратна) характеристика РО майже лінійна.

*Діафрагмові РО* застосовуються для регулювання витрат агресивних рідин і газів. Особливість діафрагмових РО полягає у посуванні у якості ущільнення і рухливого дросельного елемента гнучкої мембрани (діафрагми з резини, фторопласту та ін.), а внутрішня

поверхня пристрою футерується кислотостійкими матеріалами (емаль, гума, вініпласт, фторопласт і т.п.). Витратна характеристика діафрагмових РО ідентична шланговим.

*Кранові перекриваючі органи* містять перекриваючий елемент (затвор), який має форму тіла обертання і обертається навколо власної осі, сковзаючи своєю поверхнею запирання по поверхні запирання сидла. Найчастіше використовуються конічні і сферичні затвори. Останні мають суттєві переваги у порівнянні з першими. В них виключена можливість заклинення. Затвор здійснює обертальний рух, а розміри і маса завдяки сферичній (кульовій) формі поверхні запирання незначні.

*Засувні перекриваючі органи* містять затвор, що постійно сковзає поверхнями запирання по поверхням запирання сидел, які доволі швидко зношуються. Переміщення затвору вимагає великих установочних зусиль. Конструктивна характеристика засувних органів майже лінійна.

При виборі типу, конструкції та розмірів РО і ИМ для роботи їх у конкретних умовах необхідно ураховувати: характер середовища (газ, рідина, пар), що регулюється, їх склад і робочі параметри (тиск, температура, густина, в'язкість); максимальна і мінімальна витрати середовища, що проходить крізь РО; крайнє положення, яке повинен зайняти РО (відкрите, закрите) при аварійному відключенні сигналу, поданого до приводу ИУ чи при виході з ладу самого приводу; конструкція РО повинна бути розрахована на максимальний тиск і мінімальну чи максимальну робочу температуру середовища; матеріали основних деталей РО повинні бути хімічно стійкими до агресивних дій з боку середовища; швидкодію спрацьовування запірних клапанів. Вибір діаметра умовного проходу і характеристик РО та ИМ проводять розрахунковим шляхом. Регулюючі органи зчленовуються з виконавчими механізмами різними способами. Дросельні РО з пневматичними та електричними ИМ серійно випускаються як єдиний блок, що має назву промислової регулюючої арматури.

## 5.2. ЕЛЕКТРОДВИГУННІ ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ

**Склад електричних виконавчих механізмів**, як правило утворюють, наступні елементи: асинхронний електродвигун, редуктор, кінцеві і шляхові вимикачі, датчики положення, гальмуючий пристрій, ручний привід. Електродвигун з редуктором здійснюють

перетворення електричної енергії у механічну, достатню для подолання опору середовища з боку регулювального органу. Кінцеві вимикачі використовуються для вимикання пускового пристрою при досягненні РО крайніх положень, тобто виконують захисні функції, а шляхові вимикачі – для обмеження діапазону переміщення РО у автоматичному режимі. Датчики положення (індуктивні, реостатні, струмові) формують сигнал, пропорційний куту повороту вихідного валу ИМ. Цей сигнал надходить до індикатора положення на пульті оператора, а також може використовуватись у системі керування у якості сигналу зворотного зв'язку за положенням РО чи забезпечення потрібного алгоритму регулювання. Гальмуючі пристрої встановлюються у ИМ для зменшення вибігу вихідного валу (штоку) у процесі зупинки електродвигуна (після припинення дії керуючих сигналів). Ручний привід передбачений у ИМ для забезпечення можливості переміщення РО у разі виходу з ладу пускового пристрою.

Пускові пристрої призначені для керування ИМ і забезпечують необхідне підсилення потужності керуючих сигналів від регулювальних блоків чи блоків керування у ручному режимі. Пускові пристрої можуть бути контактні і безконтактні. Кожний тип пускового пристрою розрахований на роботу у комплекті з певним типом ИМ. Вхідні кола пускових пристроїв дозволяють використовувати найчастіше два види керуючих сигналів: активний сигнал керування у вигляді постійного чи пульсуючого струму напругою 24 В; пасивний сигнал керування у вигляді замикання відповідних вхідних застискачів за допомогою безконтактних чи контактних ключів. Активний сигнал використовується звичайно при керуванні пусковим пристроєм від релейно-імпульсних регулювальних блоків, а пасивний сигнал застосовується в основному при ручному дистанційному керуванні за допомогою відповідних кнопок чи ключів. Енергія, необхідна для спрацьовування пускового пристрою, в останньому випадку надходить від джерела живлення самого пускового пристрою. Для кожного з розглянутих способів керування використовується трипровідна лінія зв'язку. Один з проводів є загальний, а два інших необхідні для подачі керуючого сигналу у напрямку „менше” і „більше”. Параметри сигналів зв'язку регулювальних блоків, пускових пристроїв і ИМ стандартизовані, що сприяє застосуванню одного і того ж типу ИМ з різними системами регулювальних блоків. Окрім наведених у розд. 4.2 пускових пристроїв ще досить широко застосовуються контактні пускові пристрої типу ПМРТ ПМЕ і МКР, а та-

кож безконтактні – ПБР–2 і ПБР–3.

**Механізми виконавчі електричні однооборотні типу МЭО** (див. рис. 5.2) більш потужні, призначені для переміщення з постійною швидкістю регулюючих органів у системах автоматичного регулювання у відповідності з командними сигналами від релейно-імпульсних регулюючих пристроїв. У цих механізмах вихідний орган здійснює обертальний рух у межах  $0,25$  чи  $0,63$  оберту. ИМ мають позначення, згідно якого вказується послідовно три величини:  $M_{кр}$  – номінальний обертальний момент на вихідному валу,  $H\cdot м$ ;  $T_{ИМ}$  – номінальний час повної ходи вихідного валу від одного крайнього положення до іншого,  $с$ ;  $\varphi_{ИМ}$  – номінальна повна хода вихідного валу, *оберти*. Наприклад, ИМ з шифром МЭО 100/25 – 0,63 – 99 має номінальне значення обертального моменту  $100 H\cdot м$ , номінальний час повної ходи вихідного валу  $25 с$ , номінальне значення ходу  $0,63$  оберту, рік розробки – 1999 р. У механізмах типу МЭО використовуються синхронні типу ДСР і асинхронні трифазні типу ДСТР електродвигуни.

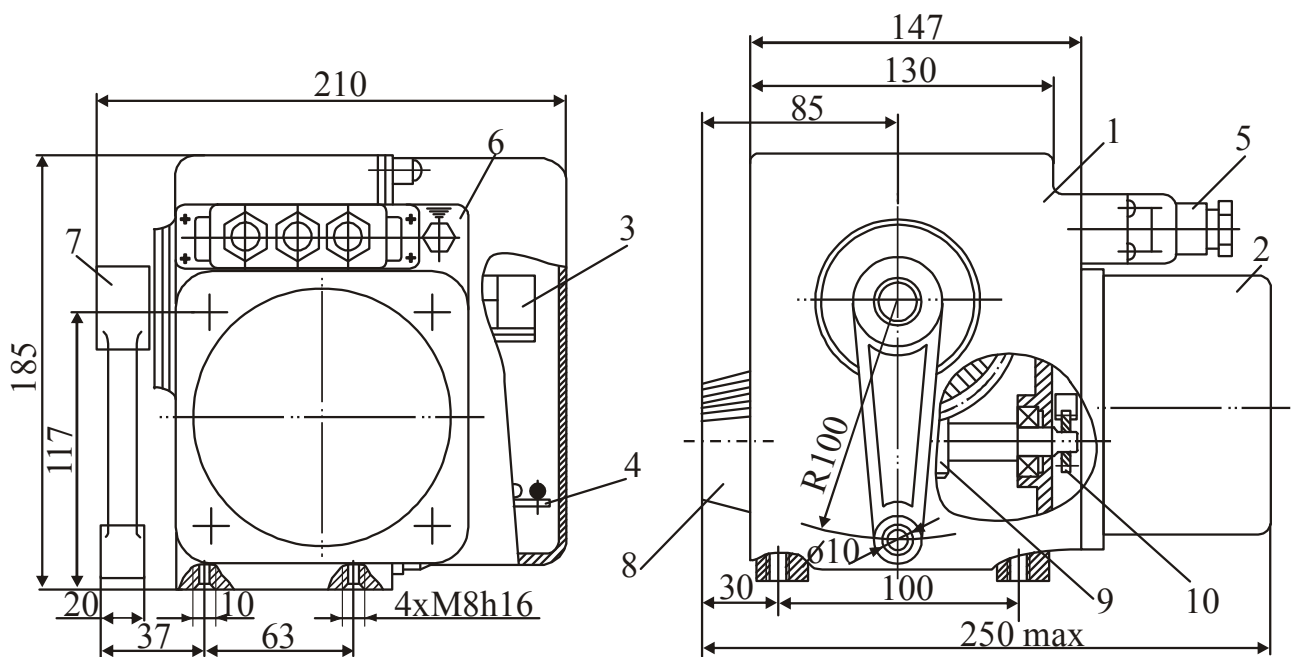


Рис. 5.2. Загальний вигляд і габаритно-приєднувальні розміри механізму типу МЭО з електродвигуном типу ДСР: 1 – редуктор; 2 - електродвигун; 3 – датчик; 4 – панель; 5 – штепсельний роз'єм; 6 – бовт заземлення; 7 – важіль; 8 – ручний привід; 9 – черв'ячна пара; 10 – зубчаста циліндрична пара.

**Електричні виконавчі механізми прямохідні типу МЭП, ЕСПА** призначені для прямолінійного переміщення з постійною швидкістю регулювальних органів у системах автоматичного і дис-

танційного керування. У механізмах прямохідних, як і в МЭО, встановлені блок датчиків зворотного зв'язку (положення ИМ) і мікрровимикачі, є маховик для ручного керування регульовальним органом. Обертальний механізм, що утворений швидкісним і силовим редукторами, працює у межах повної ходи від  $0,25$  до  $4$  *обертів* вихідного валу. При цьому прямохідний вихідний орган становить собою шарикову гвинтову пару, яка перетворює обертальний рух вихідного валу швидкісного редуктора у поступальний рух штоку. У позначенні модифікації ИМ перша цифра – номінальне зусилля на штоку ( $H$ ), друга цифра – номінальний час повної ходи штоку ( $c$ ), третя цифра – повний хід штоку ( $мм$ ), остання цифра – рік розробки. Наприклад ИМ модифікації МЭП25000/100 – 50 – 99 має номінальне значення зусилля  $25$  *кН*, номінальний час повної ходи штоку  $100$  *с*, повний хід штоку  $50$  *мм*, розробка 1999 р.

Живлення механізмів МЭП здійснюється трифазним змінним струмом, а механізмів ЕСПА – від однофазної мережі змінного струму. Загальний вигляд механізму ЕСПА наведений на рис. 5.3.

**Електричні багатооборотні виконавчі механізми** призначені для дистанційного, місцевого і автоматичного керування трубопроводною запірною арматурою (засувкою, вентилем, заслінкою і т.п.) і становлять собою електромеханічний привід, що складається з електродвигуна, понижуючого кількість обертів механічного редуктора і низки допоміжних пристроїв. Незважаючи на конструктивні і схемні різниці, усі ці ИМ взагалі дозволяють здійснювати: дистанційний чи автоматичний пуск електроприводу за допомогою пускових кнопок “відкрити” і “закрити” чи через контакти блокувальних реле; зупинку електроприводу у будь-якому проміжному положенні РО за допомогою кнопки “стоп” чи відповідних контактів блокувальних реле; автоматичну зупинку електроприводу при надмірному зростанні обертального моменту, що можливо при відмові путьових вимикачів чи заїданні рухливих частин приводу чи робочого органу; дистанційну світлову сигналізацію крайніх положень РО; місцеве визначення положення РО у певний момент за допомогою стрілкового покажчика, що є на коробці путьових вимикачів; дистанційне показання будь-якого проміжного положення РО за допомогою покажчика положення, датчик якого може бути встановлений на коробці путьових вимикачів; електричне блокування певного електроприводу з іншими механізмами і агрегатами; ручне керування електроприводом за допомогою маховика на випадок тимчасового припинення

подачі електроенергії.

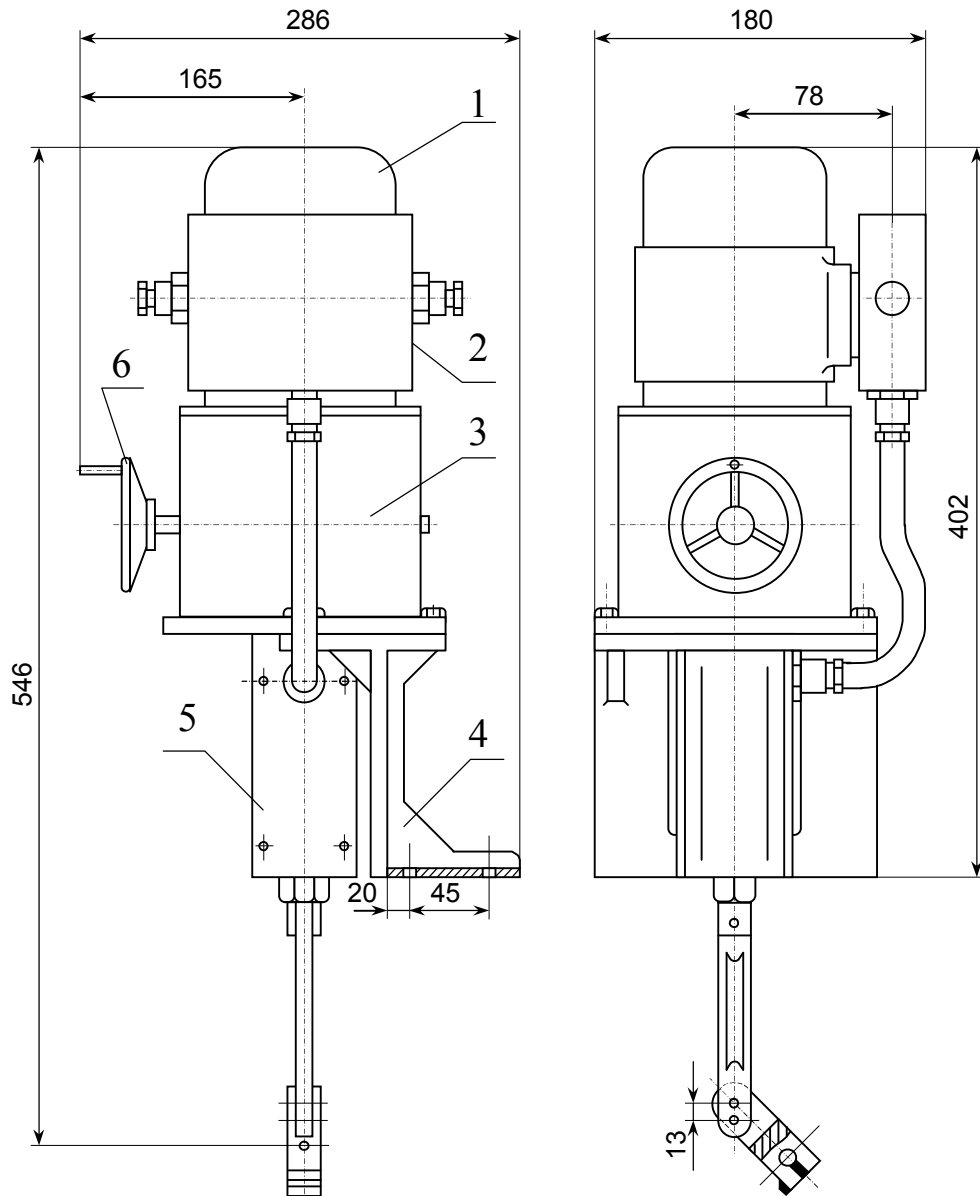


Рис. 5.3. Габаритні розміри механізму типу ЕСПА: 1- електродвигун; 2 – розподільча коробка; 3 – редуктор; 4 – стійка; 5 – керуюча коробка; 6 – ручний дублер.

Слід відзначити, що найчастіше багатооборотні ИМ є пристроями позиційної дії, і лише ИМ типу МСМ, які забезпечені датчиком зворотного зв'язку по положенню вихідного валу, можуть бути застосовані в автоматичних системах для реалізації П-, ПІ-, і ПІД- законів регулювання.

Багатооборотні ИМ типів М, А, Б, В, Г і Д відрізняються поміж собою величиною максимального обертового моменту, конструк-

цією редуктора, способом обмеження припустимого моменту на приводному валу, габаритними і приєднувальними розмірами та деякими іншими конструктивними особливостями. По способу обмеження обертального моменту ИМ усіх типів розподіляються на приводи з однібічною муфтою, що діє тільки при роботі приводу у бік закривання арматури, і двобічною муфтою, що діє як у бік закривання, так і відкривання арматури. Спосіб обмеження за допомогою електромеханічної муфти забезпечує необхідну щільність закриття запірних вентилів, а також захист запірної арматури від поломки при заїданні шпинделя, відмові кінцевого вимикача чи попаданні в арматуру стороннього предмета.

Вибір електроприводу здійснюється у залежності від потрібного обертального моменту, частоти обертання вихідного валу, числа обертів вихідного валу, необхідного для закриття (відкриття) арматури, приєднувальних розмірів і умов експлуатації. Живлення електродвигунів забезпечується змінною трифазною напругою.

Загальний вигляд та габаритні розміри електроприводів з двобічною муфтою типу А наведені на рис. 5.4.

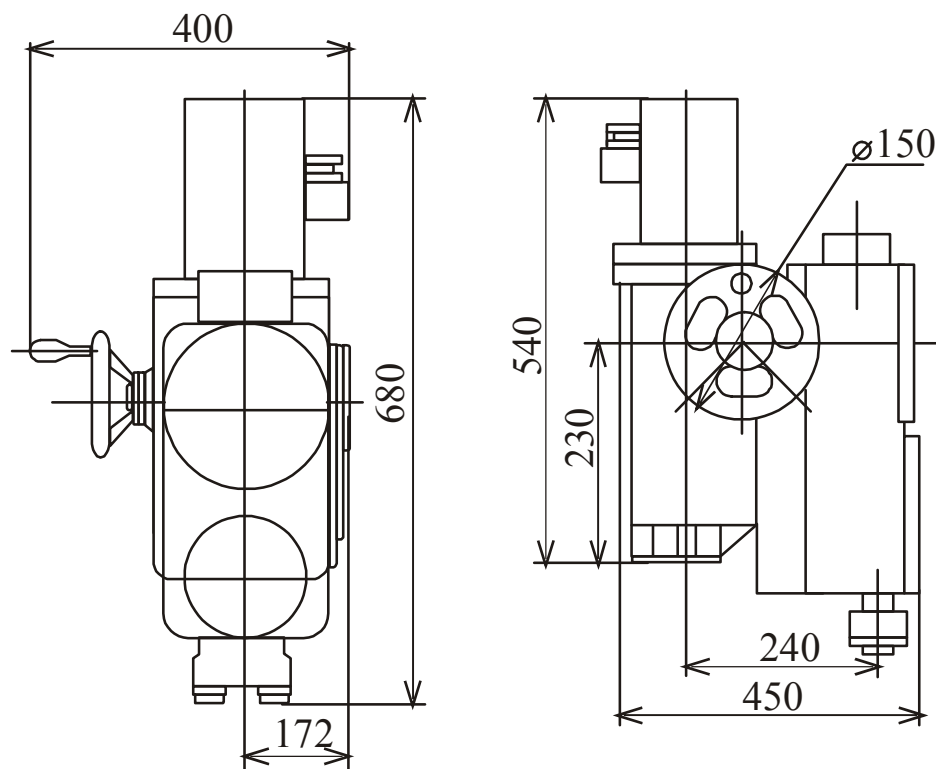


Рис. 5.4. Габаритні розміри електроприводу з двобічною муфтою типу А.



### 5.3. ПНЕВМАТИЧНІ ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ

Пневматичні виконавчі механізми отримали широке розповсюдження завдяки простоті конструкції, надійності у роботі і можливості застосування у вибухонебезпечних умовах виробництва.

Пересувне зусилля у цих механізмах утворюється за рахунок дії стислого повітря на чутливий елемент (мембрана, поршень або пневмодвигун, сильфон). Пневматичні механізми мембранні і поршневі забезпечують зворотно-поступальний рух штоку, який може бути перетворений у поворотній за допомогою додаткового механічного пристрою, а пневмодвигуни - тільки поворотній рух вихідного валу. Наявність робочої пружини у мембранних і поршневих ИМ дозволяє утворювати пересувне зусилля в одному напрямку за рахунок стислого повітря.

У протилежному напрямку пересувне зусилля утворюється за рахунок зусилля, що розвивається пружиною, і значна частина зусилля від дії тиску повітря витрачається на стиск пружини. У безпружинних ИМ пересувне зусилля у протилежних напрямках утворюється дією тиску з обох боків чутливого елемента – тиск з одного боку підвищується, а з іншого зменшується або ж навпаки. Отже ці механізми належать до пристроїв двосторонньої дії.

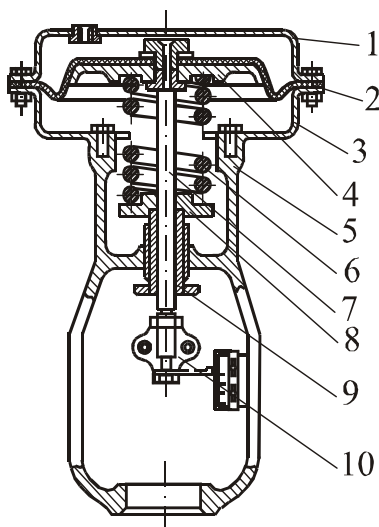


Рис. 5.5. Мембранний виконавчий механізм прямої дії.

**Мембранні виконавчі механізми** типу МИМ найчастіше використовуються у системах керування у якості приводів регулюючих поворотних заслінок, одно- і двосідельних клапанів, шлангових і діафрагмових регулюючих органів. Основними елементами МИМ прямої дії (ППХ), що побудований за принципом компенсації зусиль є мембранна камера, кронштейн з пружиною і рухлива частина (див. рис. 5.5). Мембранна камера утворена кришками 1, 3 і затиснутою між кришками мембраною 2. Кришка 3 прикріплена до кронштейну 5. Верхня кришка і мембрана утворюють робочу порожнину. Рухлива частина складається з опорного диску 4, до якого прикріплена мембрана 2 і шток 7 із з'єднувальною гайкою 10. Остання призначена для з'єднання штоку механізму зі штоком РО. Пружина 6 одним

торцем спирається в опорний диск 4, а іншим через опірне кільце 8 - у регульовальну втулку 9, яка служить для зміни початкового натягування пружини і напрямку руху штоку. У мембранних пружинних механізмах зворотної дії (ОПХ) з підвищенням тиску повітря у робочій порожнині (тиск підводиться під мембрану) кінець штоку наближується до площини забиття мембрани, тобто утягується. Мембранні ИМ дуже часто комплектуються боковими чи верхніми ручними дублерами, які призначені для керування РО у випадку аварійного відключення стислого повітря. При цьому бокові дублери забезпечують керування РО ручним способом не тільки у випадку припинення подачі стислого повітря, але і при відмові самого МИМ (зламу пружини, розгерметизація робочої пружини і т.п).

В процесі експлуатації у залежності від умов роботи МИМ його характеристика змінюється. Для запобігання великого гістерезису (не більш 1,5 – 2 % повного ходу РО), який може бути викликаний внутрішнім тертям пружини чи зовнішнім тертям у сальниковому ущільненні штоку, а також з метою підвищення чутливості ИМ до командного тиску застосовуються підсилювачі (позиціонери) потужності із зворотним зв'язком по положенню РО. Позиціонери підвищують швидкодію і точність установки штоку ИМ. Для підвищення перестановочних зусиль у кінці ходи штоку звичайні МИМ компонуються більш жорсткими пружинами. В таких більш потужних механізмах МИМП менш жорстка пружина застосовується у механізмах прямої дії, а у механізмах зворотної дії - більш жорстка.

Мембрани ИМ звичайно виготовляють із гуми з парусиновим прошарком. Іноді застосовують мембрани з неопрена чи з неопрена з парусиновою чи капроною прокладкою. Останні мембрани тонше гумових і більш міцні.

*Механізми типу МИМ ППХ і МИМП ППХ* на відміну від *МИМ ОПХ і МИМП ОПХ* розповсюджені більше. Це пояснюється тим, що у двосідельних РО зміна положення «нормально відкрите»(НО) на «нормально закрито» (НЗ) досягається перестановкою положення затвору.

У залежності від комплектації додатковими блоками виконавчі механізми типу МИМ (МИМП) мають наступні позначення: 10 – без додаткових блоків; 01 – з боковим дублером; 02 – з позиціонером; 05 – з позиціонером і боковим дублером; 01В – з верхнім дублером; 05В – з позиціонером і верхнім дублером.

Максимально припустимий тиск стислого повітря у робочій

порожнині механізмів з діаметром забиття мембрани  $160\text{ мм}$  складає  $0,4\text{ МПа}$ , а з діаметром  $200\text{ мм}$  і більше –  $0,26\text{ МПа}$ . Повний робочий хід вихідного елемента механізму МИМ без позиціонера і з позиціонером, механізму МИМП з позиціонером здійснюється при зміні пневматичного командного сигналу від  $20$  до  $100\text{ кПа}$ . Повний робочий хід вихідного елемента МИМП без позиціонера здійснюється при зміні сигналу від  $100 \div 130$  до  $200 \div 230\text{ кПа}$ .

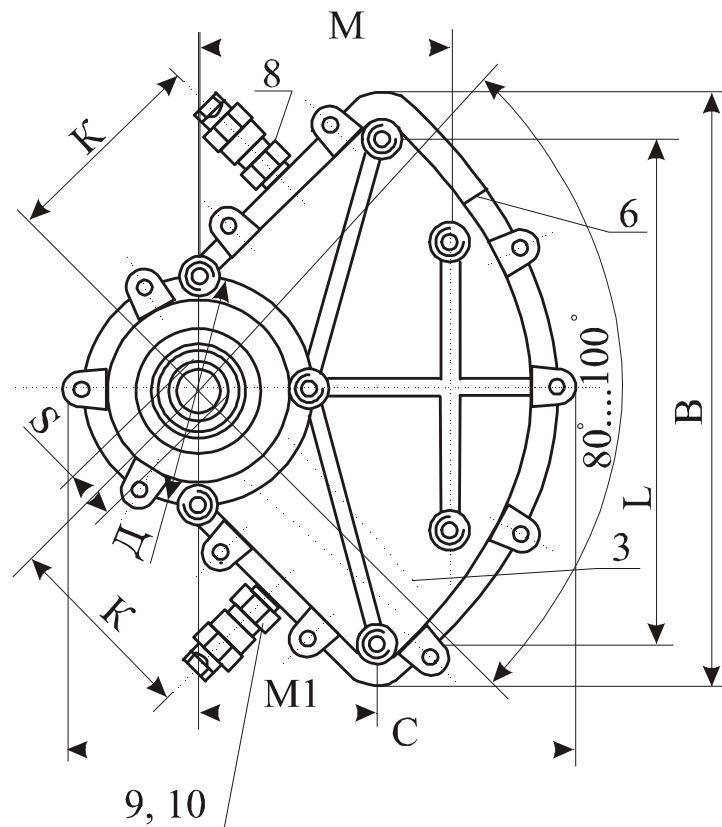
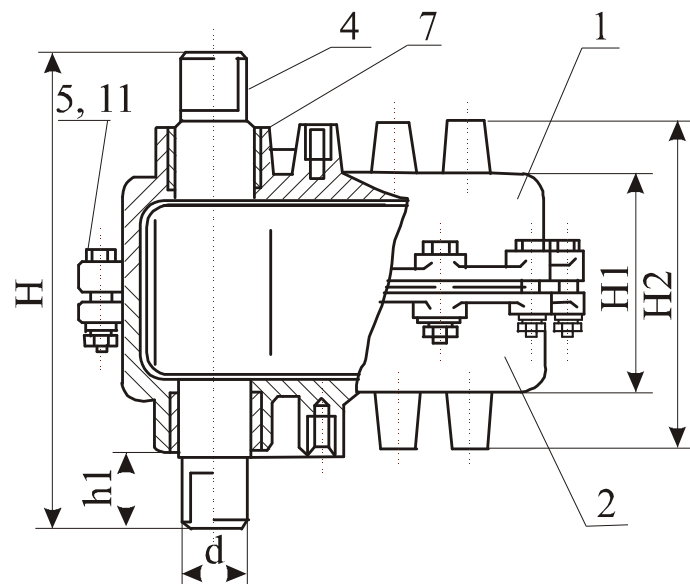
Виготовляються також мембранні механізми коливальної дії типу МИМ – К, які відрізняються від механізмів типу МИМ тим, що вихідною ланкою у них є важіль. Останній кріпиться до штоку і тяги. Робочий хід кінця важеля  $100\text{ мм}$ .

Мембранні пружинні механізми за температурою навколишнього повітря, при якій вони можуть застосовуватись, розподіляються на дві групи: I група для температури від  $(-50)$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  і II група для температури від  $(-30)$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Приклад умовного позначення (шифр) – МИМ ППХ-320-40-0,5-I: виконавчий механізм типу МИМ ППХ; 320 – діаметр забиття мембрани,  $\text{мм}$ ; 40 – умовний хід штоку,  $\text{мм}$ ; 05 – комплектність механізму згідно стандарту (позиціонер і ручний боковий дублер); I – температурна група.

**Пневмодвигуни поворотні** типу ППР призначені для приводу поворотної трубопровідної арматури (крани кульові, крани пробкові, шиберні затвори і т.п.). Живлення пневмодвигунів здійснюється стислим повітрям  $250 \div 600\text{ кПа}$ . У залежності від величини обертового моменту на валу і кута повороту вихідного валу пневмодвигуни мають чотири виконання (див. рис. 5.6).

Принцип дії пневмоприводу оснований на повороті лопаті з вихідним валом під впливом стислого повітря, що надходить в одну з порожнин, яка утворена лопатою і частиною корпусу. При досягненні валом пневмодвигуна крайніх положень здійснюється скидання тиску керуючого сигналу з робочої порожнини пневмодвигуна. Конструкція пневмоприводу наведена на рис. 5.6. В корпусах 1, 2 (верхній і нижній) пневмоприводу розташована лопать 3 з валом. По контуру лопаті (показана пунктиром), у канавці міститься манжета, що забезпечує герметичність між порожнинами. Лопать 3 жорстко з'єднана з валом 4. Корпус 1 і 2 з'єднані поміж собою бовтами 5 і фіксуються від зміщення один відносно іншого штифтами 6. Площина роз'єднання корпусів 1 і 2 ущільнюється герметиком КЛТ-30.



Позначення	РОЗМІРИ, мм													
	С	Н	В	Н1	Н2	Д	С	К	Л	М	М1	h	Н1	d
ППР-1,6-1	106	105	125	44	67	35	9	19	-	-	-	-	-	12
ППР-3-1	143	160	192	56	96	85	14	72	147	70	54	15	32	20
ППР-10-1	197	214	233	88	136		22	83	197	100	72	23	39	28
ППР-20-1	253	230	297	98	148		24	122	255	130	100	25	43	38

Рис. 5.6. Конструкція і габаритно-монтажні розміри пневмодвигунів типу ППР.

Вихідний вал 4 знаходиться у втулках 7, виконуючих функції підшипників. Надходження командного сигналу у порожнини пневмоприводу здійснюється крізь штуцера 8. Регулювання і обмеження кута повороту лопаті 3 забезпечується за допомогою гвинтів 9, які фіксуються гайками 10.

Пневмодвигуни поворотні можуть бути оснащені наступними додатковими пристроями: сигналізатори крайніх положень пневматичні чи електричні; модулятори забезпечення короткочасної дії на вихідному валу обертального моменту позмінно у різних напрямках з ціллю зрушення виконавчих пристроїв, встановлених на потоках рідин, що кристалізуються чи полімеризуються; опозиціонери пневматичні двобічної дії для приводу поворотних пристроїв шляхом повороту валу на кут, пропорційний вхідному аналоговому сигналу тиском  $20 - 100 \text{ кПа}$ ; блоки керування та сигналізації пневматичні і електричні.

#### 5.4. ПРОМИСЛОВА РЕГУЛЮЮЧА АРМАТУРА

Сучасна промислова регулююча арматура (виконавчі пристрої) завдяки системі літерних і цифрових індексів, що розроблена конструкторським бюро арматуробудування (ЦКБА, м. Москва), забезпечується кодом умовних позначень. Цей код у системній формі дозволяє зафіксувати деякі основні технічні характеристики виробу, що дає можливість правильного вибору арматури, використанню її за призначенням і підвищення її контролю під час монтажу. Кодове позначення містить п'ять елементів, розташованих послідовно (за відсутності приводу код виробу складається з чотирьох елементів).

Перші дві цифри позначають тип арматури (табл. 5.1), букви за ними – матеріал корпусу (табл. 5.2), одна чи дві цифри після буквені номер моделі.

У разі наявності трьох цифр після букв-перша з них позначає вид приводу (табл. 5.3), а дві наступні-номер моделі. Останні букви вказують на матеріал ущільнюючих поверхонь (табл. 5.4) чи спосіб нанесення внутрішнього покриття корпусу (табл. 5.5).

В окремих випадках після букв, що свідчать про матеріал ущільнюючих поверхонь, додають цифру, яка позначає варіант виконання його з іншого матеріалу. Виріб без вставних чи наплавлених кілець, тобто з ущільнюючими поверхнями, що виконані безпосередньо на корпусі чи затворі, позначається буквами «бк» (без кілець).

Наприклад кодове позначення виконавчої арматури 15с 922нж свідчить: 15 – клапан запірний; с – з вуглецевої сталі; 9 – електропривід; 22 – номер моделі; нж – ущільнюючі поверхні, наплавленні корозійностійкою сталлю.

Для арматури з електроприводами у вибухозахищеному виконанні наприкінці умовного позначення додається буква «Б», а у тропічному виконанні – буква «Т». Поряд з системою ЦКБА користуються кодом, отриманим шляхом скорочення назви виробу. Окремі конструкції позначаються тільки номером креслення, за яким вони виготовлені. Іноді до позначення входить буква, що вказує завод-виготовник арматури.

Кріплення арматури до трубопроводу найчастіше забезпечується за допомогою фланцевих з'єднань, а на трубопроводах малого діаметру ( $D_u \leq 80$ ) розповсюдженні і різьбові з'єднання (муфтові). У деяких випадках застосовують і зварні з'єднання. Арматура звичайно постачається з комплектом фланців для з'єднань, деталями для кріплення і прокладками.

Регулювальні клапани при монтажі слід розташовувати на прямих ділянках трубопроводів (направлення потоку середовища повинно відповідати напрямку стрілки на корпусі клапану). Найкраще клапани встановлювати на горизонтальній ділянці у вертикальному положенні. Припускається установка клапану і в інших положеннях обумовлених у інструкціях. Довжина прямої ділянки трубопроводу до і після клапану має бути не менше  $10D_u$ . В окремих відповідальних випадках слід передбачити байпасні лінії для забезпечення можливості відключення з технологічної системи.

**Виконавчі пристрої з пневматичним приводом** у залежності від вимог до герметичності та функціональної дії АСР виготовляються: регулюючими, запірно-регулюючими та запірними (відсічними).

У запірних клапанах час спрацьовування, звичайно, не обмежується і складає 1 – 10 с у залежності від діаметра умовного проходу. У відсічних клапанах час спрацьовування не перевищує 1 с.

Нижче детальніше розглянуті найбільш розповсюджені типи конструкцій і характеристики запірно-регулювальних і регулювальних виконавчих пристроїв.

*Пневматичні односідельні виконавчі пристрої типу ПОУ* призначені для регулювання витрати потоків рідини, пари і газу.

Таблиця 5.1.

## Позначення типу арматури.

Тип арматури	Умовне позначення
Кран (пробово – спускний)	10
Кран (для трубопроводу)	11
Запірний пристрій показчика рівня	12
Клапан (вентиль) запірний	13,14,15
Клапан відсічний	22,24
Клапан зворотній (підйомний і приймальний з сіткою)	16
Клапан запобіжний	17
Затвор зворотній (клапан зворотній поворотній), клапан герметичний	19
Клапан перепускний	20
Регулятор тиску	18,21
Клапан розподільчий	23
Клапан регулювальний	25,26
Клапан змішувальний	27
Засувка	30,31
Затвор поворотний дисковий	32
Засувка шлангова	33
Елеватор	40
Конденсатовідводжувач	45

Таблиця 5.2.

## Позначення матеріалу корпусу арматури.

Матеріал	Умовне позначення
Вуглецевиста сталь	с
Легована сталь	лс
Нержавіюча сталь	нж
Сірий чавун	ч
Ковкий чавун	кч
Високоміцний чавун	вч
Латунь, бронза	б
Алюміній	а
Монель – метал	мн
Пластмаси (крім вініпласту)	п
Вініпласт	вп
Фарфор	к
Титановий сплав	тн
Скло	ск

Таблиця 5.3.

## Позначення виду приводу ИУ

Вид приводу	Умовне позначення
Під дистанційне керування	0
Механічний: з черв'ячною передачею	3
з циліндричною зубчастою передачею	4
з конічною передачею	5
Пневматичний	6
Гідравлічний	7
Пневмогідравлічний	6(7)
Електромагнітний	8
Електричний	9

Таблиця 5.4.

## Позначення матеріалу ущільнюючих поверхонь.

Матеріал	Умовне позначення
Латунь, бронза	бр
Монель – метал	мн
Нержавіюча сталь	нж
Нітрирована сталь	нт
Бабіт	бт
Стеліт	ст
Сормайт	ср
Кожа	к
Ебоніт	э
Гума	р
Пластмаси (крім вінілпласту)	п
Вінілпласт	вп
Фторопласт	фт

Таблиця 5.5.

## Позначення способу нанесення внутрішнього покриття.

Спосіб нанесення	Умовне позначення
Гумування	гм
Емалювання	эм
Свинцювання	св
Футерування пластмасою	п
Футерування найритом	н



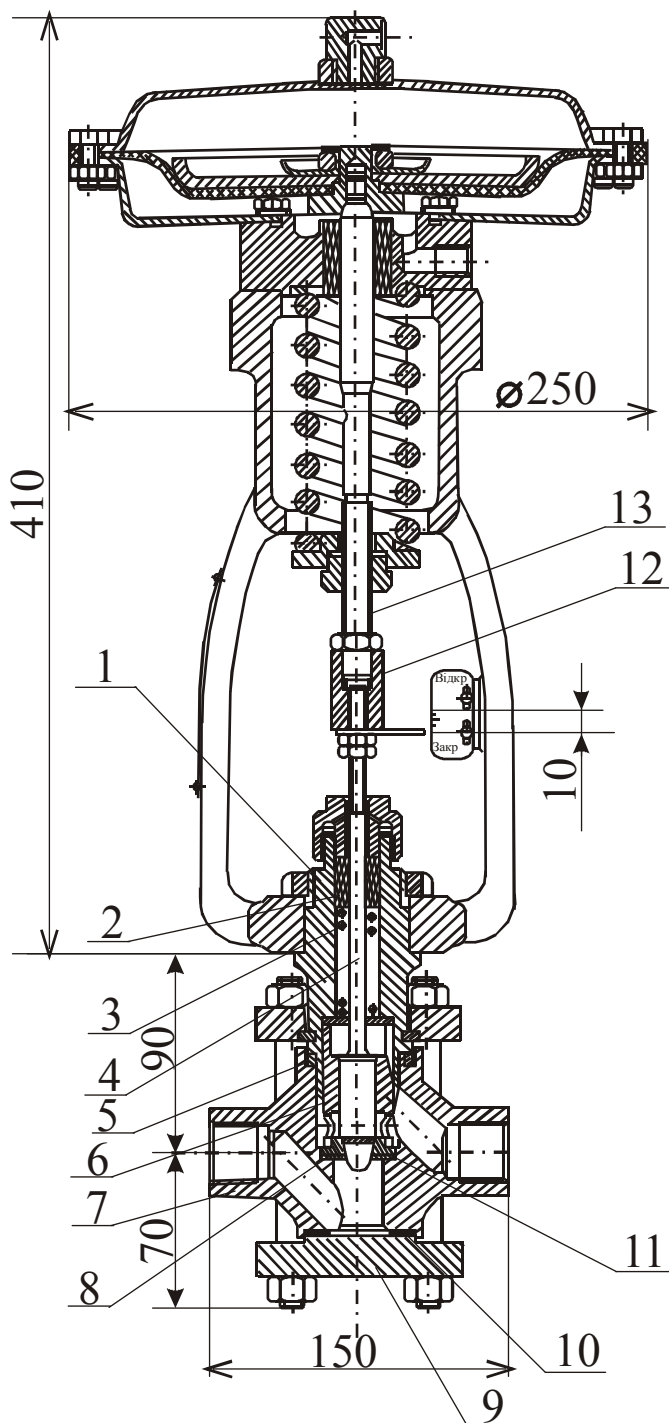


Рис. 5.7. Конструкція та габаритно-монтажні розміри виконавчого пристрою типу ПОУ-7 виконання 10НЗ.

Регулювальний орган (див. рис. 5.7) складається з наступних основних частин: корпусу 7; обойми 1, у якій встановлюється втулка 6 з умонтованими в ній сідлом 8 і затвором 4; кришки 9. Ущільнення обойми з корпусом здійснюється за допомогою спірально навитої прокладки 5, а сідла і кришки – за допомогою паронітових прокладок 10 і 11. Переміщення затвору здійснюється виконавчим механізмом, шток 13 якого жорстко зв'язаний зі штоком затвору 4 з'єднувальною гайкою 12. Усі ІУ комплектуються прокладками спірально навитими (ПОУ-7, ПОУ-8, ПОУ-10, ПОУ-11). При цьому фторопластові ущільнюючі кільця 2 піджаті пружиною 3, а у ІУ типів ПОУ-9, ПОУ-12 ущільнюючі кільця виготовлені з азбестової набивки марки АПС. Змащування азбестового сальника здійснюється лубрикатором.

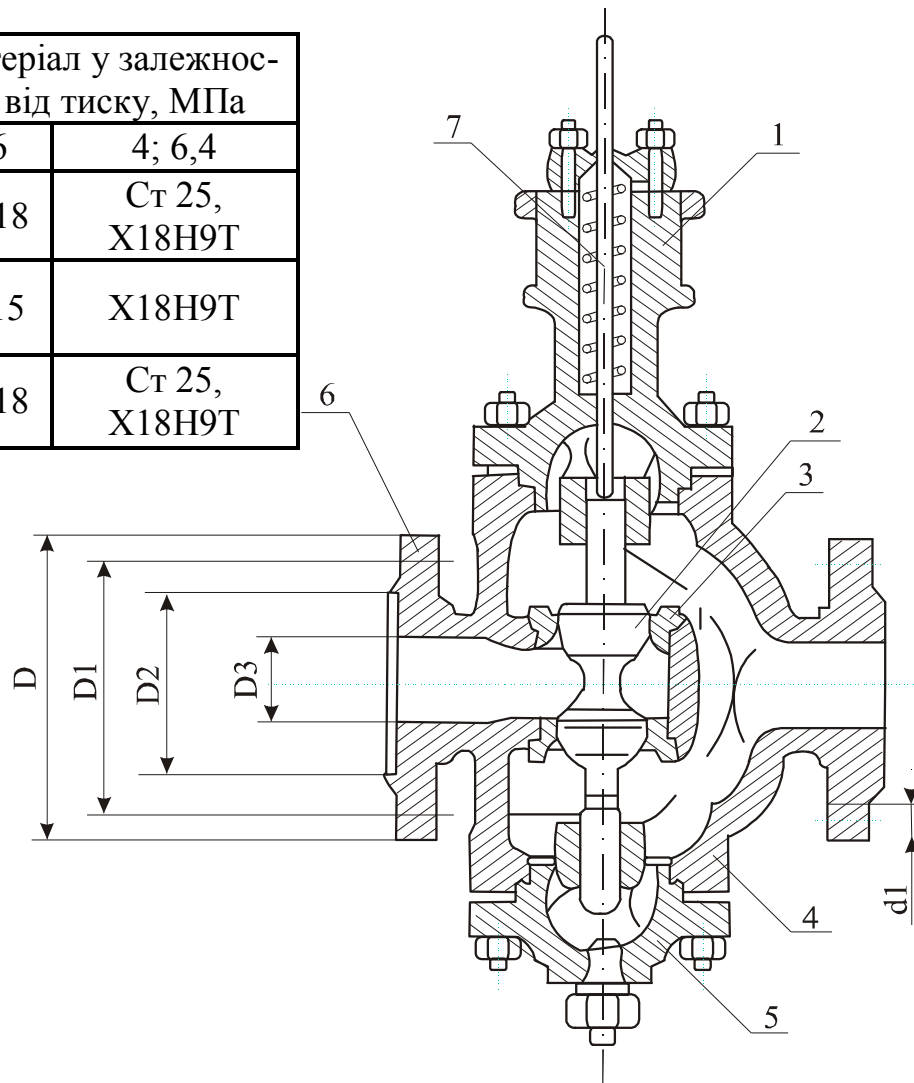
Пристрої ПОУ-7, ПОУ-8, ПОУ-9 є прохідними; а ПОУ-10, ПОУ-11, ПОУ-12 – кутівими. При цьому з'єднання корпусів з трубопровідною лінією пристроїв ПОУ-7, ПОУ-10 – муфтове, а ПОУ-8, ПОУ-9, ПОУ-11, ПОУ-12 – фланцеве. Пропускна характеристика ІУ – лінійна. Умовна пропускна здатність  $K_{ву}$  пристроїв з діаметром  $D_u$  умовного проходу

15 мм може мати значення одне із наступного ряду (в скобках наведений код, який входить до умовного позначення): 0,1(01); 0,1 (02); 0,25(03); 0,4(04); 0,6(05); 1(06); 1,6(07); 2,5(08) м<sup>3</sup>/год. Пристрої з Ду 20 мм можуть мати значення умовної пропускної здатності – 1,6(09); 2,5(10); 4(11) м<sup>3</sup>/год. Негерметичність закриття ІУ не більше 0,05% К<sub>ву</sub>. Клас точності ІУ без позиціонера – 6, а з опозиціонером – 2,5. ІУ можуть витримувати вібрацію з частотою 25 Гц і амплітудою не більше 0,1 мм.

Приклад умовного позначення ІУ: ПОУ-9 720 10 02 НЗ II, тобто пневматичний одно сідельний пристрій типу ПОУ-9 регулювальний, сальниковий, прохідний, фланцевий з регулювальним органом із сталі Х18Н9Т, Р<sub>у</sub>=16 МПа, Ду=20, К<sub>ву</sub> =2,5 м<sup>3</sup>/год, виконання по комплектації МИМ – 02 (з позиціонером), по виду дії – НЗ, група виконавчих пристроїв – II.

Регулювальні клапани прямої дії ЕСПА 04 з пневматичним мембранним виконавчим механізмом прямої дії типу БУП призначені для зміни витрати рідини чи газу у трубопроводах. До складу ІУ входить ручний верхній дублер і позиціонер типу ЕСПА 04НА05, принцип дії якого оснований на компенсації зусилля чутливого елемента і вимірювальної пружини. Виконавчий механізм може бути встановлений як на двоходовому РО (тип РГ), так і на триходовому РО (тип РИ, змішувальні і розподільчі), конструкція яких відповідно наведена на рис. 5.8 і 5.9. При цьому двоходові РО виконавчих пристроїв типу БУП виготовляються з лінійною і рівновідсотковою (логарифмічною) пропускною характеристикою, а триходові – з лінійною. ІУ типу ЕСПА 04 у залежності від діаметру умовного проходу Ду (мм) мають наступні показники умовної пропускної здатності К<sub>ву</sub> (м<sup>3</sup>/год): для Ду =25, К<sub>ву</sub> =(4; 6,3; 10); для Ду=50 – К<sub>ву</sub> =(16, 25; 40); для Ду = 80 – К<sub>ву</sub> = (40; 63; 100). Негерметичність закриття затвору не більше 0,1 % К<sub>ву</sub>. Клас точності ІУ без позиціонера – 4, з позиціонером – 2,5. Діапазон зміни вхідного сигналу для МИМ у межах 0,02 ÷ 0,1 МПа, тиск живлення позиціонера складає 0,25 МПа. Параметри потоку крізь прохід РО повинні бути у межах: температура від (-20) до 225 °С для Р<sub>у</sub> = 1,6 МПа; густина для рідини від 500 до 1800 кг/м<sup>3</sup>, а для газів і пари – без обмежень; кінематична в'язкість не більше  $0,86 \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с; вміст твердих домішок з розмірами до 0,05 мм не більше 2 % від загальної витрати потоку. Габаритні розміри ІУ (висота × діаметр), мм: для Ду = 25 – 133 × 200; для Ду = 50 – 172 × 260; для Ду = 80 – 230 × 320; для Ду = 100 – 284 × 400.

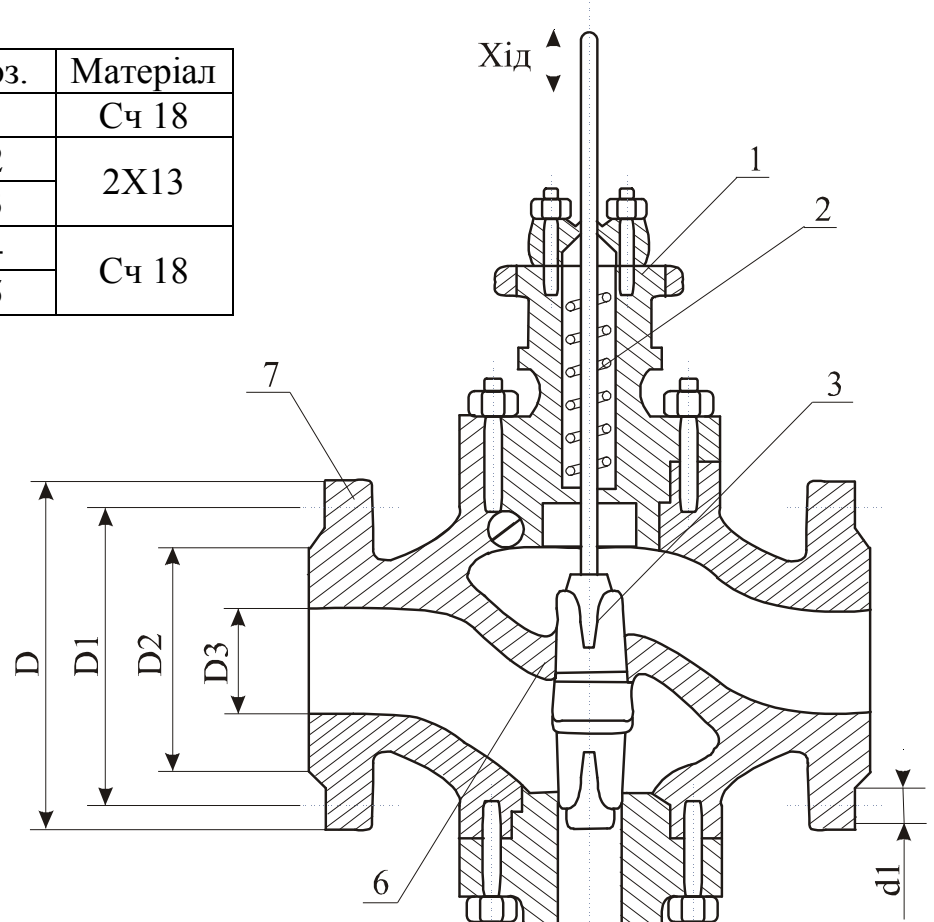
Поз.	Матеріал у залежності від тиску, МПа	
	1,6	4; 6,4
1	Сч 18	Ст 25, X18H9T
2	2X15	X18H9T
3		
4	Сч 18	Ст 25, X18H9T
5		



Умовний діаметр Ду, мм	Умовний тиск Ру, МПа	Зовнішній діаметр D, мм	Діаметр бовтових з'єднань D1, мм	Діаметр виступу D2, мм	Діаметр отворів під бовти d1, мм	Маса, кг
15	1,6	95	65	-	14	8,3
	4,0	95	65	29	14	8,3
	6,4	105	75	29	14	10
25	1,6	115	85	-	14	9
	4,0	115	85	58	14	9
	6,4	135	100	58	18	14
60	1,6	160	125	-	18	20
	4,0	160	125	88	18	20
	6,4	175	135	88	23	29
80	1,6	195	160	-	18	51
	4,0	195	160	121	18	52
	6,4	210	170	121	23	68
100	1,6	230	190	-	23	75
	4,0	230	190	150	23	78
	6,4	250	200	150	25	102
150	1,6	300	250	-	25	148
	4,0	300	250	204	25	171
	6,4	340	280	204	34	227

Рис. 5.8. Конструкція двоходового регулювального органу виконавчих пристроїв типу ЕСПА 04 РГ: 1-верхня кришка; 2-шток із затвором двосідельного РО; 3-сідло; 4-корпус; 5-нижня кришка; 6-фланець (справа-для корпусу з чавуну зліва-для корпусу із сталі); 7-пружина з салініковим ущільненням

Поз.	Матеріал
1	Сч 18
2	2Х13
3	
4	Сч 18
5	



Умовний прохід Du, мм	Зовнішній діаметр D, мм	Діаметр бовтового з'єднання D1, мм	Діаметр виступу D2, мм	Діаметр отворів під бовти d1, мм	Кількість отворів	Маса, кг
50	160	125	108	18	4	29
65	180	145	128	18	4	39
80	195	160	138	18	4	54
100	215	180	138	18	8	69
150	280	240	212	23	8	123

Рис.5.9. Конструкція триходового регулювального органу виконавчих пристроїв типу ЕСПА 04 РИ: 1-верхня кришка; 2-пружина з сальниковим ущільненням; 3-затвор зі штоком РО; 4-корпус; 5-нижня кришка; 6-сідло; 7-фланець з отворами.

*Виконавчі запірно-регулюючі пристрої кульові типу ИУШ* призначені для двопозиційного чи багатопозиційного (аналогового) керування технологічними потоками рідких агресивних середовищ (крім абразивних і тих, що полімеризуються та кристалізуються). Виконання пристроїв залежить від матеріалу кульового крану, умовного проходу і оснащення функціональними блоками поворотного пневмодвигуна типу ППР.

Пристрої з кульовим краном з пентопласту роботоздатні в інтервалі температур робочого середовища від (-5) до 100 °С, а з кульовим краном із сталі – в інтервалі температур від (-40) до 150 °С. ИУ з блоками керування і сигналізації пневматичними та з позиціонерами придатні для встановлення у вибухонебезпечних приміщеннях усіх категорій, а ИУ з блоками керування і сигналізації електропневматичними – лише у приміщеннях, що дозволяють експлуатацію з видом вибухозахисту “вибухонепроникна оболонка” (ІExdsІІСТ6). На рис. 5.10. наведена принципова схема запірно-регулювального кульового виконавчого пристрою з позиціонером.

Принцип дії пристрою оснований на повороті затвору крану на кут пропорційний вхідному пневматичному сигналу від регулятора під впливом зусилля, що утворюється поворотним пневмодвигуном з позиціонером. Вхідний сигнал Рвх від регулювального блоку надходить у сильфон 1. Різниця моментів, що утворені сильфоном 1 і пружиною зворотного зв'язку 2, переміщує заслінку 3 у той чи інший бік. Це призведе до зміни тиску у лінії сопел 4. Тиск, що утворюється у лінії сопел прямує у керуючі камери реле 5, звідки підсилений за потужністю сигнал надходить в одну з порожнин пневмодвигуна 6, що викличе поворот затвору кульового крану 7. При цьому вал пневмодвигуна через кулачок 8 буде натягувати (послаблювати) пружину зворотного зв'язку. Поворот затвору кульового крану буде відбуватись до тих пір, доки момент, що утворюється пружиною зворотного зв'язку на заслінці 3, не врівноважить момент, що утворюється сильфоном 1. Отже, кожному значенню вхідного сигналу буде відповідати визначене положення затвору кульового крану. Корегування початкового положення затвору кульового крану здійснюють зміною початкового натяжіння пружини зворотного зв'язку 2 шляхом зміни натяжіння тяги 9 гайками 12. Настроювання кута повороту затвору кульового крану 7 здійснюється зміною кількості робочих витків пружини 2 гвинтом 10. Постійні дроселі 11 виконують роль демпферів для усунення коливань тиску.

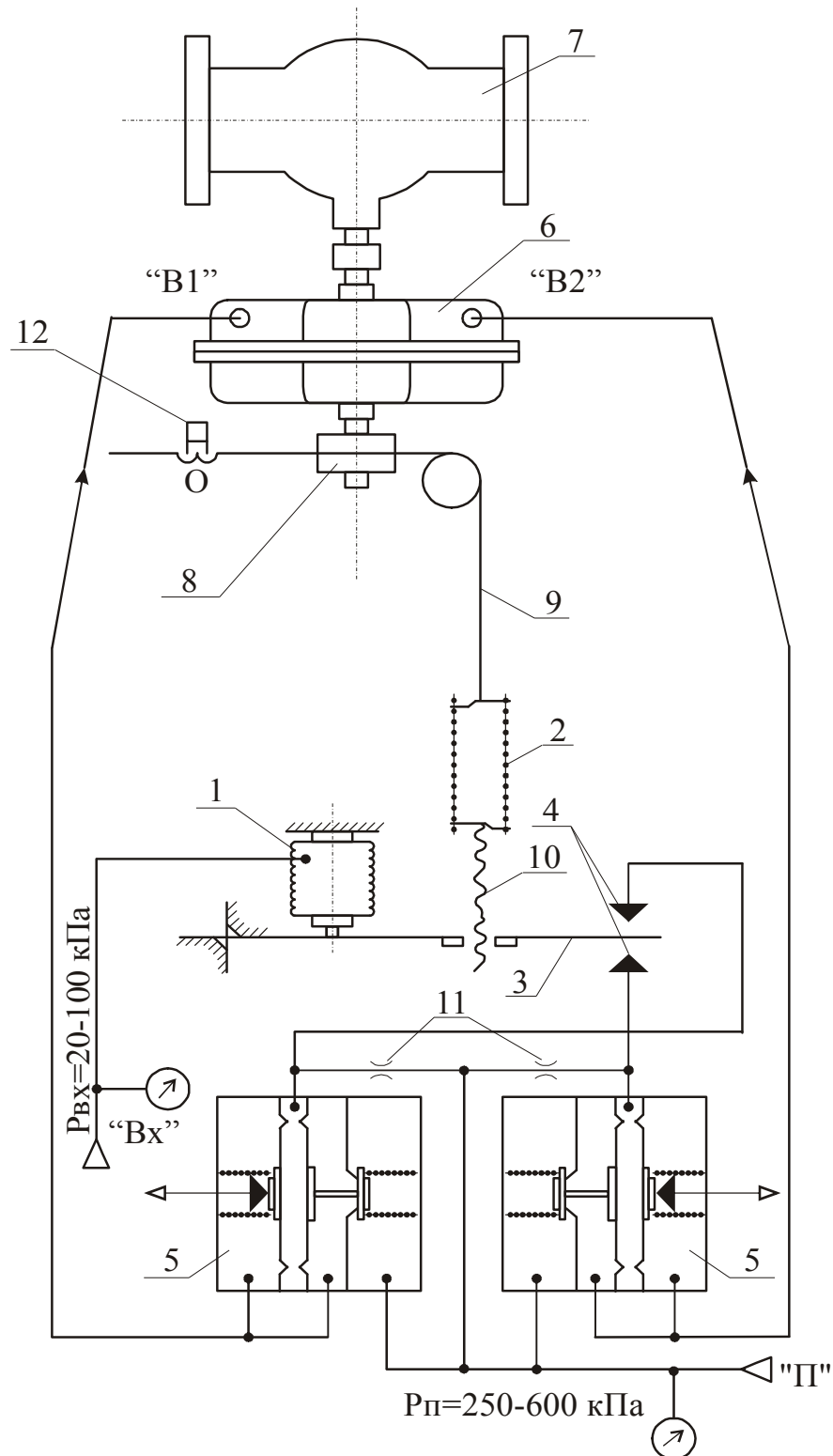


Рис. 5.10. Принципова схема виконавчого пристрою типу ІУШ позиціонером: "П", "ВХ", "В1" і "В2" - маркування штуцерів.

Загальний вигляд з позначенням габаритних розмірів ІУ з фланцевим приєднанням до трубопроводу представлений на рис. 5.11. Робоче положення ІУ при монтажі – пневмодвигуном до-

гори, а напрямок подачі потоку середовища крізь кульовий кран може бути будь-яким.

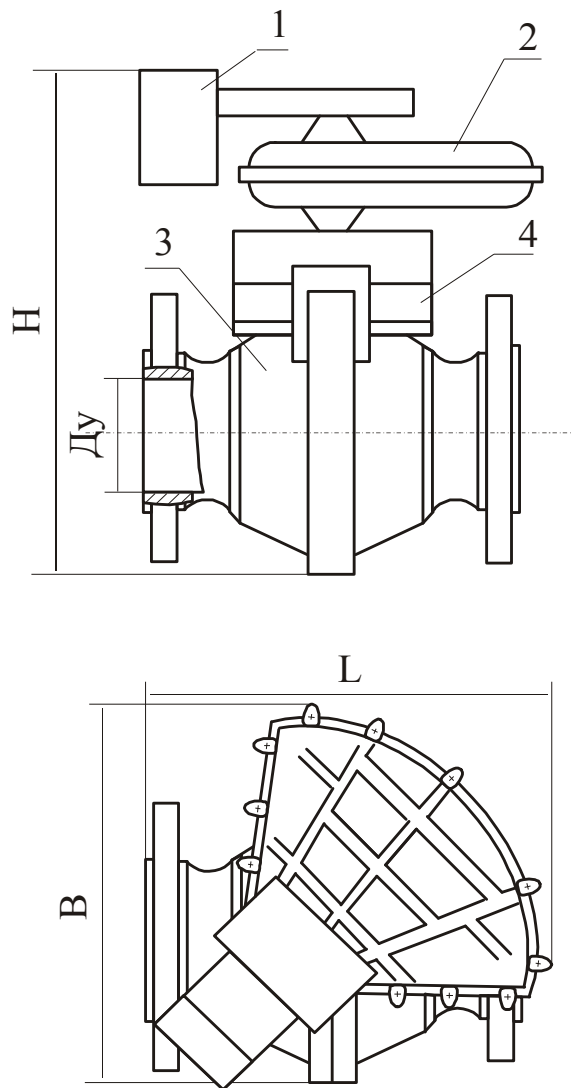


Рис. 5.11. Загальний вигляд виконавчого пристрою типу ИУШ фланцевого виконання: 1-блок керування і сигналізації; 2-пневмодвигун; 3-кульовий кран; 4-кронштейн.

ності від застосованих функціональних блоків можуть керуватись як аналоговими так і дискретними сигналами. Аналоговий сигнал – тільки пневматичний, а дискретний – електричний чи пневматичний. Матеріал деталей (полімери, нержавіюча сталь, резина НО-68-1), що контактують з робочим середовищем дозволяють застосовувати затвори в умовах температур від  $(-30)$  до  $100$  °С, а тиск середовища не повинен перевищувати  $1,6$  МПа.

Межа припустимої основної похибки, що наведена до повного кута повороту затвору ИУ, складає не більше  $\pm 2,5\%$ . Характеристика перетворення керуючого вхідного сигналу у кут повороту затвору пристрою – лінійна.

*Затвори запірно-регулюючі дискові поворотні типу ЗДП* знайшли широке застосування в енергетиці, хімічній, нафтохімічній, цукровій і лакофарбній промисловості завдяки високій ремонтпридатності, відсутності застійних порожнин, можливості встановлення на лужних середовищах, невеликій масі і габаритних розмірах. Затвори як і кульові виконавчі пристрої комплектуються поворотними пневмодвигунами типу ППР з функціональними блоками, що наведені вище. На рис. 5.12. наведено загальний вигляд цих затворів. Застосування ИУ у вибухонебезпечних зонах технологічних систем визначається типом функціональних блоків. ИУ, що містять пневмодвигуни у залеж-

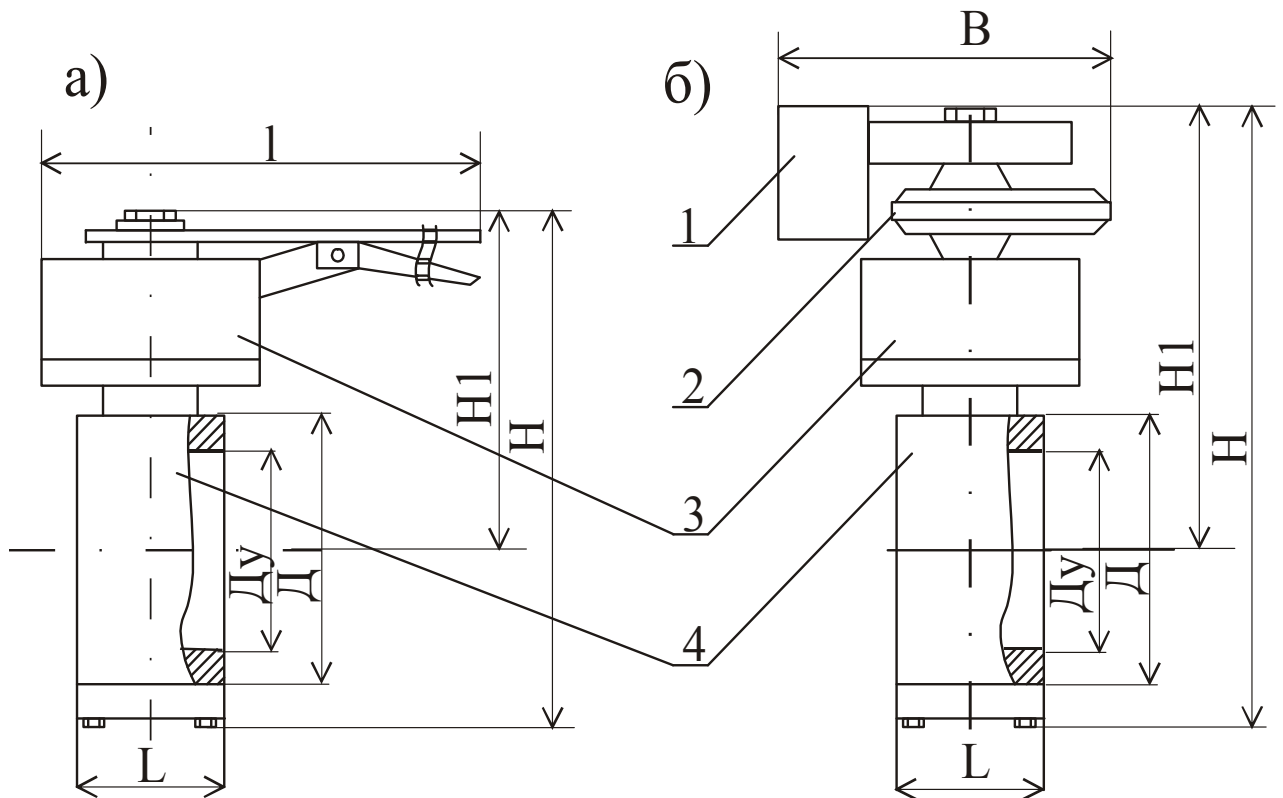


Рис. 5.12. Загальний вигляд і габаритно-монтажні розміри затворів з ручним (а) та пневмоприводом (б) типу ЗДП: 1- функціональний блок; 2-пневмодвигун; 3- кронштейн; 4-затвор дисковий.

**Виконавчі пристрої з електромагнітним приводом** застосовуються звичайно у автоматичних системах позиційного і багатопозиційного регулювання, блокування і захисту. У порівнянні з електродвигунними ІУ вони відрізняються значно простішою конструкцією і схемою керування, меншою вагою і розмірами. Завдяки відсутності редуктора вони більш надійні в експлуатації. Однак застосування їх обмежується не тільки характером позиційної дії, але і невеликою величиною перестановочного зусилля, необхідного для переміщення робочого вихідного органу. Нижче розглянуті конструкції і характеристики деяких запірних і запірно-регулюючих пристроїв.

*Клапани електромагнітні двопозиційні типу КЭД* призначені для дистанційного керування потоком рідини з температурою від 1 до 60 °С і тиском від 0,002 до 0,2 МПа. Клапан характеризується підвищеною стійкістю до агресивного середовища завдяки застосуванню таких матеріалів як титан ВТ-1-0 і гума ИРП-1348. Виготовляються у двох виконаннях КЭД-1 (з сигналізацією крайніх положень) і КЭД-2 (сигналізатор відсутній).



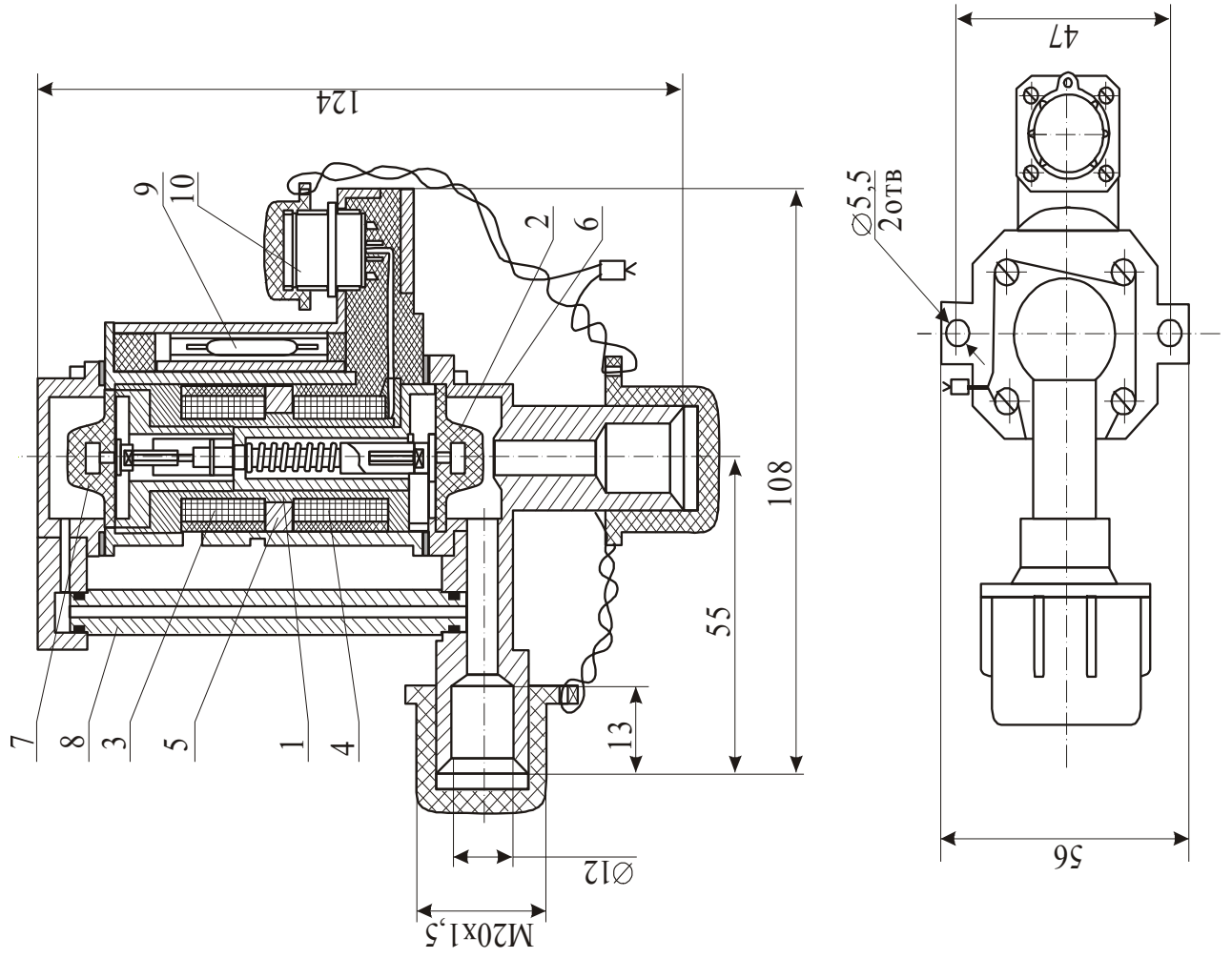
Принцип дії клапана оснований на переміщенні рухливої частини з якорем 1 (див. рис. 5.13) і закріпленої на ній заслінкою 2 з гумовим покриттям за допомогою котушок електромагнітів 3 і 4 та утриманні її у крайніх положеннях магнітним потоком, що утворюється постійними магнітами 5.

Заслінка 2 закриває чи відкриває сопло у корпусі 6. Розвантаження клапану від одnobічної дії робочого середовища здійснюється подачею тиску на заслінку 7 через трубку 8. Контроль стану клапана здійснюється за допомогою геркону 9. При закритому клапані контакти геркону розімкнені, а при відкритому клапані магнітний потік розсіювання навколо корпусу підвищується і замикає контакти. Підвід і відвід робочого середовища відбувається через штуцер корпусу 6 з різьбою  $M20 \times 1,5$ . Герметизація місць ущільнення ніпелів під час монтажу здійснюється по циліндричним поверхням діаметром 12Н11. Електричні зв'язки клапану забезпечуються за допомогою вилки 10 (РС – 19ТВ).

Струм, що споживається при спрацьовуванні і напрузі до  $34\text{ В}$ , не перевищує  $2\text{ А}$ . Вихідні кола сигналізатора (див. рис. 5.13) дозволяють комутувати напругу від  $6$  до  $30\text{ В}$  при максимальному струмі навантаження  $0,2\text{ А}$ . Час відкриття (закриття) клапану – не більше  $0,15\text{ с}$ . Гідравлічний опір клапану при витраті води  $100\text{ л/год}$  – не більше  $300\text{ мм. вод. ст.}$  Припустима негерметичність у затворі клапана при максимальному перепаді тиску  $0,15\text{ МПа}$  – не більше  $0,5\text{ см}^3/\text{хвил}$  по повітрю і  $0,1\text{ см}^3/\text{год}$  по воді. Діаметр умовного проходу клапана складає  $6\text{ мм}$ .

*Клапан відсічний вибухозахищений ОКВ –1* призначений для керування газовим потоком з тиском до  $0,8\text{ МПа}$  і температурою у діапазоні від  $(-50)$  до  $70\text{ }^\circ\text{C}$ . Клапан має маркування вибухозахисту 1ExdIICT6. Конструктивне виконання клапану – нормально закритий (струм відкриває). Пропускна здатність клапану –  $2,5\text{ м}^3/\text{год}$ , діаметр умовного проходу –  $15\text{ мм}$ .

Клапан складається з виконавчого і керуючого пристроїв. Виконавчий пристрій містить корпус 1 (див. рис. 5.14) з соплом С1, у якому розміщений шток 2 з пружиною 3. На штоці встановлена заслінка 31. У початковому стані (рис. 5.14а за відсутності електричного струму на керуючому пристрої) шток займає положення, при якому сопло С1 закрито заслінкою 31 і камера А закрито від камери Б. Камера Б відокремлена від камери В силовою мембраною 4.



Конт.	Коло	
Обмотка 1	1	-27В
	3	
Обмотка 2	8	+27В
	12	
Геркон	17	-27В
	19	
Геркон	2	Сигналізація ввнєжолоп
	18	
Шунт	9	
	11	
Шунт	5	Сигналізація ввнєжолоп
	6	
Шунт	14	
	15	
Шунт	4	Контроль стиковки
	7	

Рис. 5.13. Конструкція (а) і принципова електрична схема (б) клапану КЕД-1.

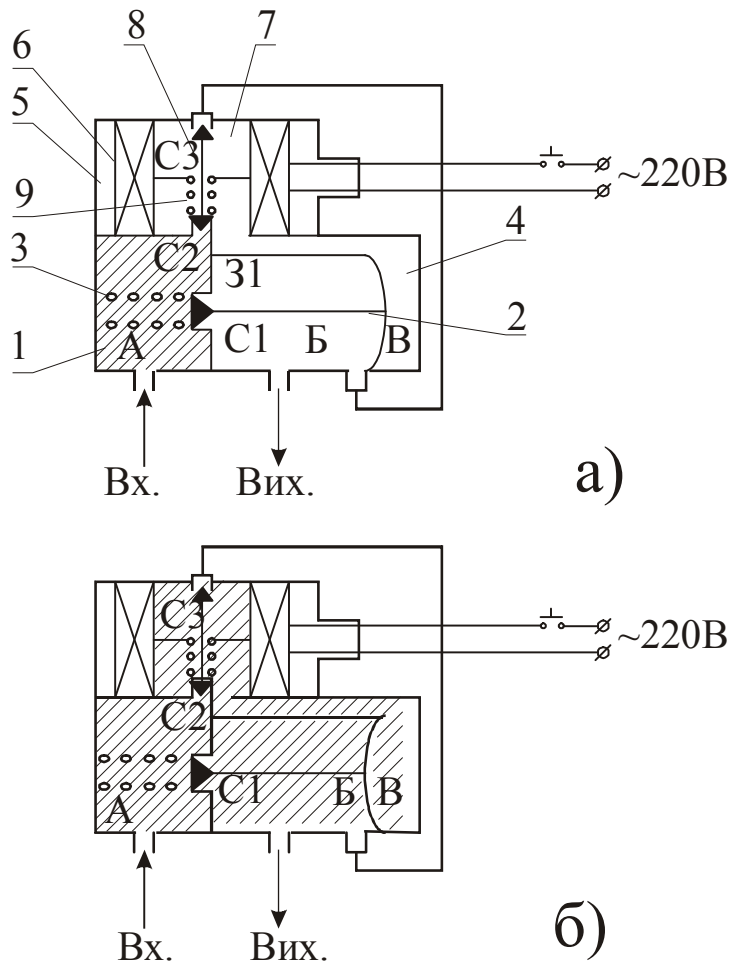


Рис. 5.14. Кінематична схема клапану типу ОКВ-1.

Керуючий пристрій складається з корпусу 5, у якому встановлена котушка 6 з клемною колодкою і сердечник 7 з якорем 8. Якір підтиснутий пружиною 9 і за відсутності електричного сигналу сопло С2 закрито, а сопло С3 з'єднане з виходом камери Б. При надходженні керуючого електричного сигналу (рис. 5.14 б) на котушку 6, якір 8 займає крайнє верхнє положення, сопло С3 закривається, з'єднуючи камеру А з камерою В. Під впливом тиску у камері В шток 2 переміщується у положення, при якому сопло С1 відкривається і камера А з'єднується з камерою Б.

Зняття електричного сигналу призводить до повернення рухливих частин у початковий стан (рис. 5.14а). Живлення клапану здійснюється змінним струмом напругою 220 В і частотою 50 Гц.

Приєднання зовнішніх трубопровідних комунікацій здійснюється через два отвори з дюймовою різьбою (див. рис. 5.15.).

Клапани газові електромагнітні серії ВН, ВР призначені для використання у системах дистанційного керування газопальникових пристроїв парових і водонагрівальних котлів, теплогенераторів, побутових опалювальних установок та у технологічних трубопровідних системах для керування потоком газу у якості запірно-регулювального органу. Приєднання корпусу клапану до трубопроводу може бути як фланцеве так і муфтове (дюймова різьба). Загальний вигляд клапанів представлений на рис. 5.16.

Деталі клапану виконані з корозійностійких матеріалів (алюміній, нержавіюча сталь, пентаностійка гума). Сідло клапану захищене

від забруднень фільтром, що встановлений на вході клапану. Клапани оснащені штепсельною системою електричного приєднання із умонтованим випрямлячем і контактом заземлення. Для підключення датчиків тиску, контрольних приладів, трубопроводу запалювального пальника та інших елементів у корпусі клапану передбачені патрубки з різьбою  $1/4$  дюйму. Живлення клапанів може здійснюватись як змінним так і постійним струмом напругою  $220, 127, 110$  і  $24$  В.

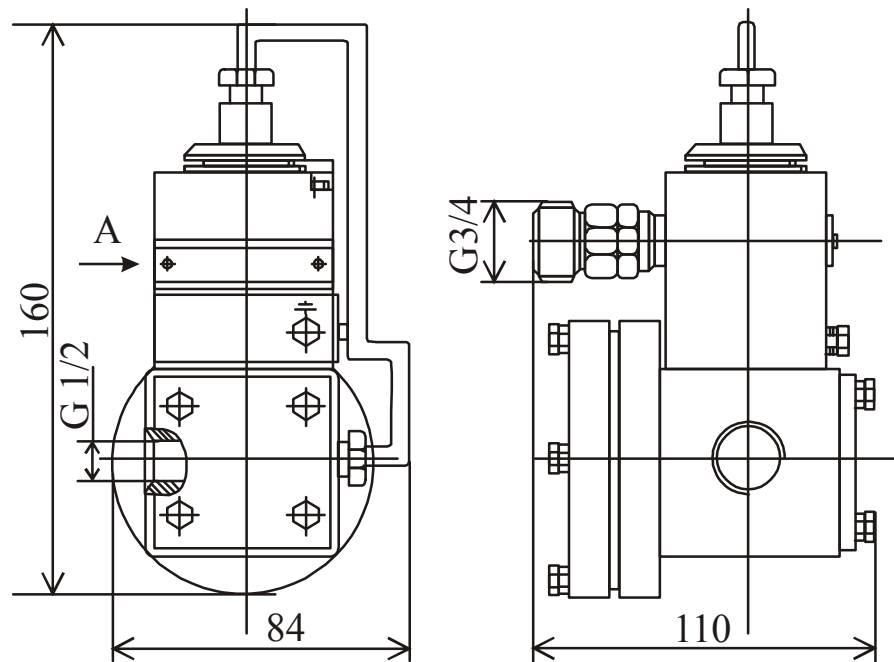


Рис. 5.15. Габаритно-монтажні розміри клапану ОКВ-1.

Час відкриття / закриття клапану не перевищує  $1$  с, допустима частота вмикань складає понад  $300$  год<sup>-1</sup>.

Електромагнітні клапани для рідких середовищ серії ВН призначені для використання у різних пристроях і трубопровідних системах для дистанційного керування потоком рідких середовищ у якості запірно-регулювального органу.

Виконання клапану тільки для муфтового з'єднання з трубопроводом. Застосовується для керування потоків з температурою від  $5$  до  $90$  °С і в'язкістю рідини до  $6$  сСт. Усі інші характеристики ідентичні попереднім клапанам.

**Виконавчі пристрої з електродвигунним (моторним) приводом** використовують, як правило, за відсутності на об'єктах пневматичної мережі. Однообертний електропривод детально був представлений у розділі 5.2.

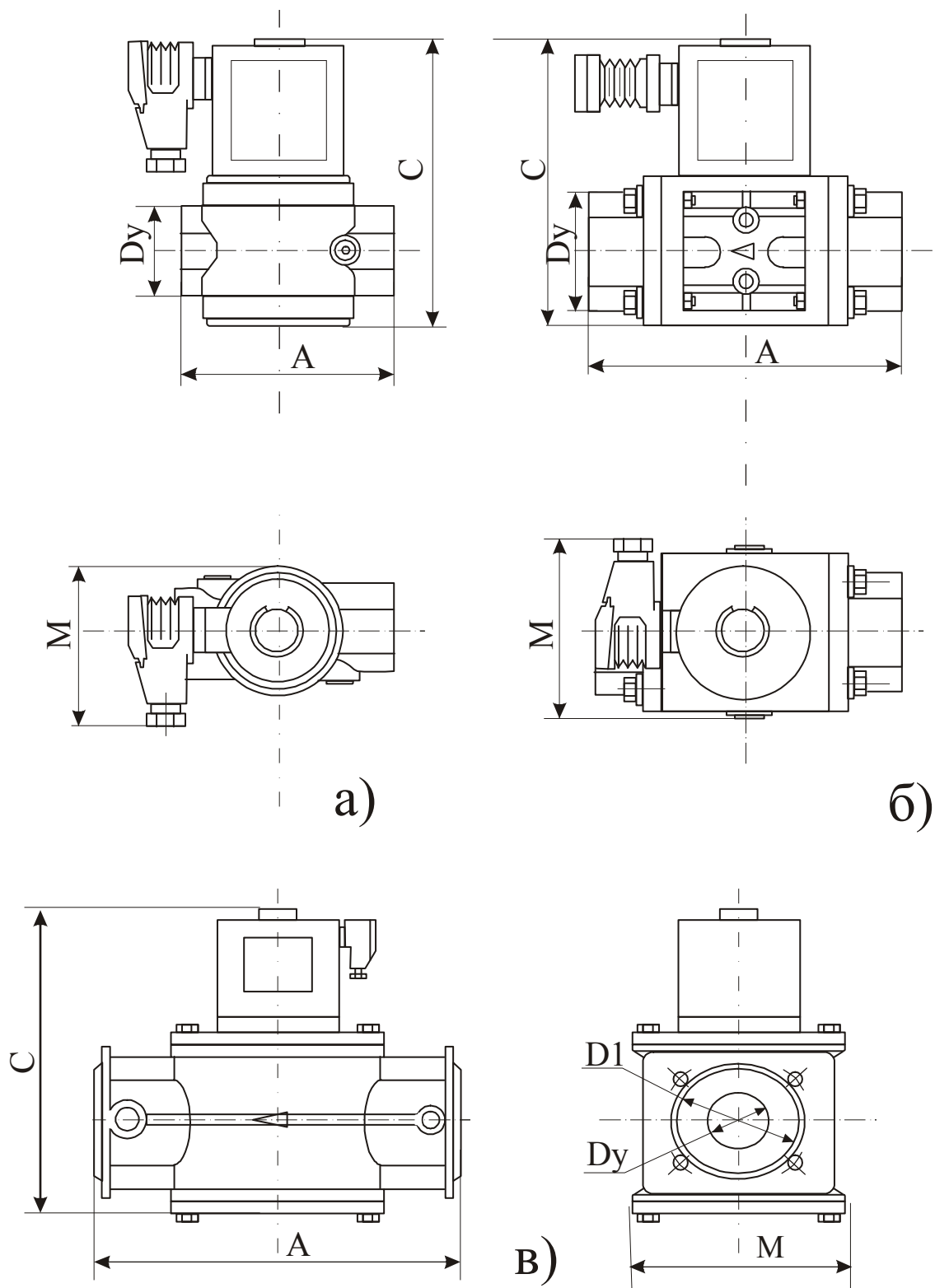


Рис. 5.16. Загальний вигляд електромагнітних газових клапанів: а - тип ВН і ВF (муфтове виконання) для Ду < 1"; б - тип ВН (муфтове виконання) для Ду у межах (1"ч2"); в - тип ВН (фланцеве виконання) для Ду > 2".

Тому далі розглянуті окремі типи, характеристики і конструкція виконавчих пристроїв з багатообертовим електроприводом, що знайшли широке застосування в газовій, хімічній і нафтохімічній промисловості.

*Клапани кутові запірні і запірно-регулюючі відповідно типу АК 23031 і АК28016* з багатообертовим електроприводом призначені для встановлення на трубопроводах з потоками робочого середовища тиском до 40 МПа з температурою від (-50) до 200 °С. При цьому припустимий перепад тисків на регулювальних органах не повинен перевищувати 7 МПа для рідкого і 10 МПа для газоподібного середовища. Коефіцієнт гідравлічного опору запірних клапанів не більше 6. Основне положення клапанів – вертикальне, але за умов густого змащування в електропроводі може бути будь-яким. Приєднання до трубопроводу: фланцеве з лінзовим ущільненням або під приварювання. Матеріал корпусу клапану – сталь 18ХГ чи 12Х18Н10Т.

Клапани з електроприводом типу Б.099.100-02М мають загальнопромислове виконання і вибухозахищене ВЗГ (еЕхеаШВТЗ) з електроприводом типу Б.099.101-02М або ВЧА (еЕхвШст1) з електроприводом типу Б.099.089-02М.

Конструкція клапану наведена на рис. 5.17. Клапан складається з корпусу 1, крізь який при відкритому затворі проходить потік середовища. Затвор забезпечує герметичне перекриття прохідного перерізу вентиля, що складається з сідла, виконаного у корпусі наплавленням, і штоку 2. Ущільнюючі поверхні – конусні і притерті. Зовнішня герметичність забезпечується корпусом сальника 7 з набивним кільцем 3, набивкою 35, втулкою сальника 5 і проміжними кільцями 36. Підтягування сальникової набивки здійснюється за допомогою накидної гайки 10. З'єднання корпусу сальника 7 з корпусом 1 плоске, безпрокладочне, притерте. Потрібна щільність з'єднання досягається затягуванням фланця корпусу 24 і фланцям стійки 23 за допомогою шпильок 9 і гайок 8. Роз'ємна муфта клапану складається з диску 11 і напівмуфти 12, що з забезпечують з'єднання шпинделя 15 зі штоком 2 через п'яту 18 і підп'ятник 13. Електропривід 29 закріплений на стійці 14 за допомогою шпильок 33 і гайок 31 з шайбами 32. Зчленування електроприводу зі шпинделем клапану здійснюється за допомогою кулачкової муфти 25 і шлицевої втулки 16. Муфта обмеження обертового моменту електроприводу може настрюватись в обидва боки обертання.

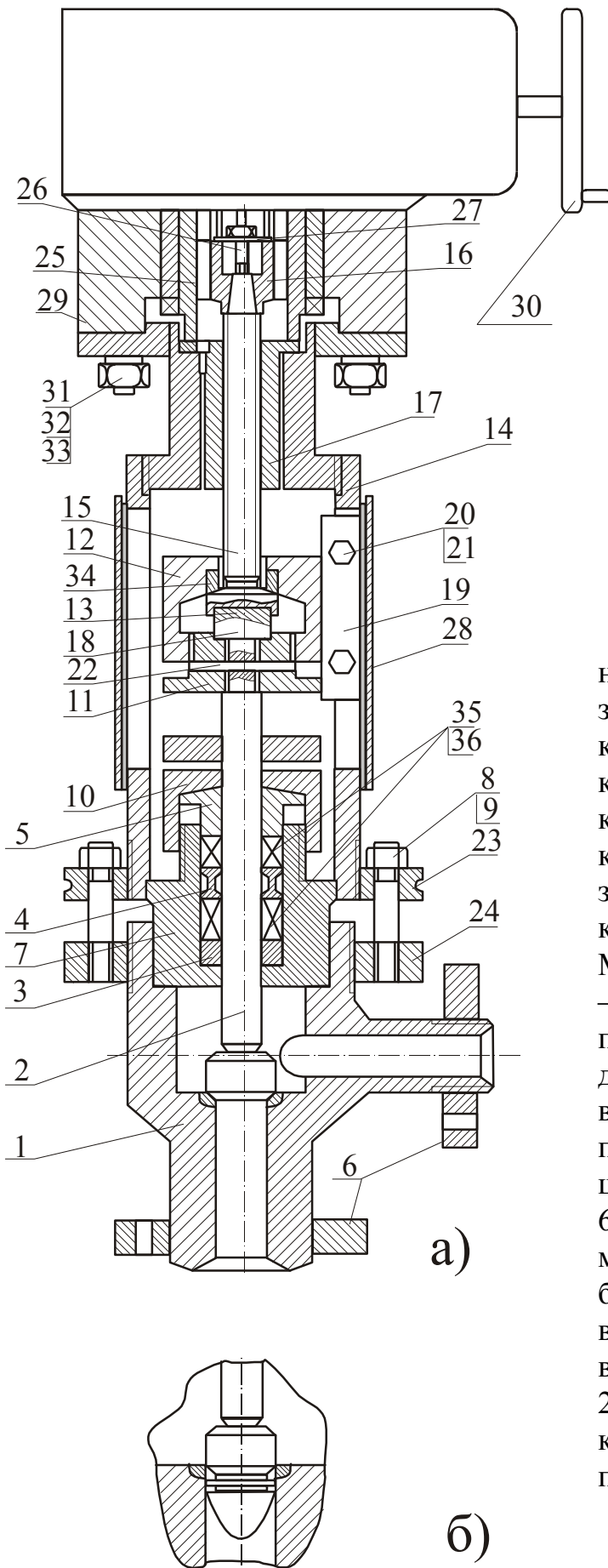


Рис. 5.17 Конструкція запір-ного АК 23031 (а) і вузол затвору запірно-регулюючого АК28016 (б) клапану для Ду 50 фланцевого виконання: 1 – корпус; 2 – шток; 3 – кільце опірне; 4 – кільце; 5 – втулка сальника; 6 – фланець з'єднувальний; 7 – корпус сальника; 8 – гайка М24х2; 9 – шпилька М24х2х140; 10 – гайка накидна; 11 – диск; 12 – напівмуфта; 13 – підп'ятник; 14 – стійка; 15 – шпindel; 16 – втулка шлицева; 17 – втулка різьбова; 18 – п'ята; 19 – планка; 20 – бовт М8х20; 21 – шайба 8,65Г; 22 – штифт 6Пр22х50; 23, 24 – фланець; 25 – муфта, 26 – бовт М8х50; 27 – шайба; 28 – кожух; 29 – електропривод; 30 – маховик ручного керування; 31 – гайка М20; 32 – шайба 20.65Г; 33 – шпилька М20х65; 34 – кільце; 35, 36 – кільця набивні і проміжні

Керування клапану здійснюється електроприводом чи маховиком 30 ручного дублера. При вмиканні електроприводу шпindel 15 угвинчується у втулку 17 чи вигвинчується з неї, надаючи поступальний рух штоку 2. Внаслідок цього затвор закриває чи відкриває прохідний переріз клапану. Напрямок подачі робочого середовища – під затвор.

*Клапани кутові запірні і запірно-регулюючі відповідно типу УФ 23058 і УФ28023 з багатообертовим електроприводом за призначенням, конструкцією і умовами монтажу на трубопровідних мережах ідентичні попереднім, але припустимий перепад тиску на регулювальному органі дещо більший: для рідкого середовища – 8 МПа; для газоподібного середовища – 12 МПа. Коефіцієнт гідравлічного опору клапанів не більше 3. Матеріал корпусу клапану сталь 18ХГ чи 12Х18Н10Т чи 10Х17Н13М3Т. Електропривод може бути у вибухозахищеному виконанні – ВЗГ(еЕхеаПВТЗ).*



## 6. ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 6.1. ФУНКЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Функціональна схема автоматизації визначає об'єм автоматизації технологічної системи і окремого обладнання. Функціональна схема є основним технічним документом проекту автоматизації і становить собою креслення, на якому схематично умовними позначеннями зображені технологічне обладнання, комунікації, органи керування і засоби автоматизації з зазначенням зв'язків між технологічним обладнанням і елементами автоматизації, а також зв'язків поміж окремими елементами автоматизації.

**Зображення технологічного обладнання і комунікацій** на функціональних схемах виконують спрощено і у скороченому вигляді, без показу окремих обладнання і трубопроводів допоміжного призначення, але у відповідності зі схемою, що прийнята у технологічній частині проекту. Контури графічних зображень обладнання і машин, а також співвідношення їх габаритних розмірів повинні, як правило, відповідати дійсним. Припустиме зображення об'єктів керування і у вигляді прямокутників. Біля кожного технологічного обладнання і машини повинно бути найменування чи позиційне позначення (арабськими цифрами). Найменування може бути вписане усередину умовного графічного зображення обладнання. Дозволяється використовувати і буквено – цифрове позначення обладнання (машин), наприклад Т-2, Н-4, А-1, де буква позначає назву обладнання (Т – теплообмінник, Н – насос, А – абсорбер), а цифра – порядковий номер обладнання серед йому подібних. При позначенні обладнання цифрами (чи буквами з цифрами) має бути в схемі представлена специфікація з переліком обладнання і його деякими характеристиками (матеріал, поверхня теплообміну, продуктивність насосу, загальна вага і т. ін.).

Трубопроводи на функціональних схемах відображують суцільною лінією з зазначенням напрямку потоку. Для позначення тієї чи іншої речовини, що проходить по трубопроводу, рекомендується використовувати переривисті лінії з цифрами, які проставляють у розривах цих ліній (див табл. 6.1). Для рідин і газів, не представлених у табл. 6.1, можуть бути використані для позначення і інші циф-

ри, але обов'язково з необхідними поясненнями на схемі цих новостворених умовних позначень. Товщина ліній контурів технологічного обладнання і трубопроводів повинна складати  $0,6 \div 1,5$  мм.

Таблиця 6.1

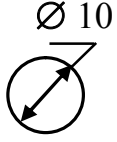
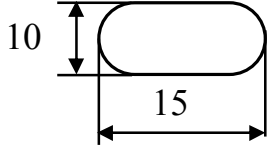
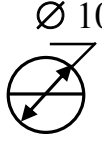
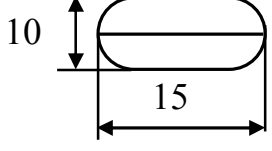
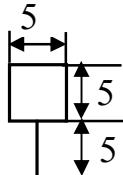
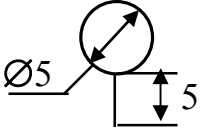
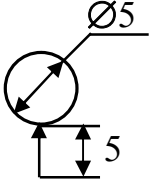
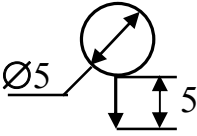
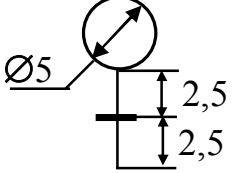
Позначення речовин, що протікають по трубопроводам.

Найменування речовини	Позначення
Вода	— 1 — 1 —
Пара	— 2 — 2 —
Повітря	— 3 — 3 —
Азот	— 4 — 4 —
Кисень	— 5 — 5 —
Інертні гази:	
аргон	— 6 — 6 —
неон	— 7 — 7 —
гелій	— 8 — 8 —
криптон	— 9 — 9 —
ксенон	— 10 — 10 —
Аміак	— 11 — 11 —
Кислота (окислювач)	— 12 — 12 —
Луг	— 13 — 13 —
Масило	— 14 — 14 —
Рідке паливо	— 15 — 15 —
Горючі і вибухонебезпечні гази:	
водень	— 16 — 16 —
ацетилен	— 17 — 17 —
фреон	— 18 — 18 —
метан	— 19 — 19 —
етан	— 20 — 20 —
етилен	— 21 — 21 —
пропан	— 22 — 22 —
пропілен	— 23 — 23 —
бутан	— 24 — 24 —
бутилен	— 25 — 25 —
Протипожежний трубопровід	— 26 — 26 —
Вакуум	— 27 — 27 —

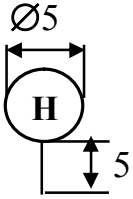
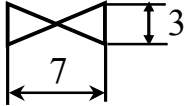
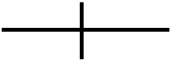

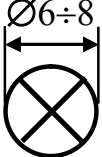
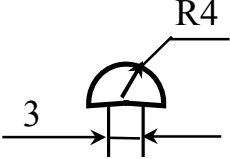
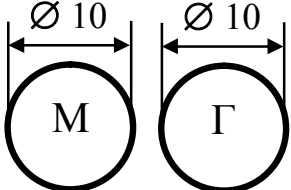
**Зображення приладів і засобів автоматизації** на функціональних схемах здійснюють у відповідності з ДСТУ 21.404-85 і галузевими нормативними документами. Умовні графічні позначення засобів автоматизації та деякої електроапаратури наведені у табл. 6.2.

Таблиця 6.2.

Основні умовні позначення засобів автоматизації  
і окремої електроапаратури.

Найменування	Позначення
1	2
Первинний вимірювальний перетворювач (датчик) чи прилад, встановлений за місцем	<p>Базове </p> <p>Припустиме </p>
Прилад, встановлений на щиті чи пульті	<p>Базове </p> <p>Припустиме </p>
Виконавчий механізм. Загальне позначення. Положення РО при припиненні подачі енергії до виконавчого механізму не регламентується	<p>Базове </p> <p>Припустиме </p>
<p>Виконавчий механізм, що при припиненні подачі енергії чи керуючого сигналу (наведено припустиме позначення):</p> <p>відкриває РО</p> <p>закриває РО</p> <p>залишає РО у незмінному положенні</p>	<p></p> <p></p> <p></p>

Продовження табл. 6.2

1	2
Виконавчий механізм з додатковим ручним приводом	
Лінія зв'язку. Загальне позначення	—
Регулювальний орган	
Перетинання ліній зв'язку без з'єднання між собою	
Перетинання ліній зв'язку із з'єднанням між собою	
Лампа розжарювання (освітлювальна і сигнальна)	
Дзвоник електричний	
Машина електрична (М – двигун, Г – генератор)	
Примітка: умовні графічні позначення засобів автоматизації мають бути виконані лініями завтовшки 0,5 ÷ 0,6 мм, а горизонтальна розділювальна риса усередині позначення і лінія зв'язку повинні виконуватися лініями завтовшки 0,2 ÷ 0,3 мм.	

У стандарті встановлені два способи побудови умовних позначень за функціональними ознаками, виконуваними засобами автоматизації: спрощений і розгорнутий. Для спрощеного способу побудови достатньо основних умовних позначень, наведених у табл. 6.2, і буквених позначень, представлених у табл. 6.3.

Розгорнутий спосіб побудови умовних графічних позначень може бути виконаний шляхом комбінованого застосування основних (табл. 6.2 і 6.3) і додаткових (табл. 6.4 і 6.5) позначень.

Таблиця 6.3.

Буквені умовні позначення за ДГСТ 21.104-85.

Позначення	Вимірювана величина		Функції, виконувані приладом		
	Основне позначення	Додаткове уточнююче позначення	Відображення інформації	Формування вихідного сигналу	Додаткове призначення
1	2	3	4	5	6
A	+	–	Сигналізація	–	–
B	+	–	–	–	–
1	2	3	4	5	6
C	+	–	–	Регулювання, керування	–
D	Густина	Різниця, перепад	–	–	–
E	Будь-яка електрична величина	–	+	–	–
F	Витрата	Співвідношення, доля, дріб	–	–	–
G	Розмір, положення, переміщення	–	+	–	–
H	Ручне діяння	–	–	–	Верхня межа вимірюваної величини
I	+	–	Показання	–	–
J	+	Автоматичне переключення, обминання	–	–	–
K	Час, часова програма	–	–	+	–

Продовження табл. 6.3

1	2	3	4	5	6
L	Рівень	–	–	–	Нижня межа вимірюваної величини
M	Вологість	–	–	–	–
N	Резервна буква	+	–	–	–
O	Резервна буква	+	–	–	–
P	Тиск, вакуум	–	–	–	–
Q	Якість: склад, концентрація	Інтегрування, підсумування за часом	–	+	–
R	Радіоактивність	–	Реєстрація	–	–
S	Швидкість, частота	–	–	Включення, відключення, переключення, сигналізація	–
T	Температура	–	–	+	–
U	Декілька різних вимірюваних величин	–	–	–	–
V	В'язкість	–	+	–	–
W	Маса	–	–	–	–
X	Резервна буква, що не рекомендується	–	–	–	–

Таблиця 6.4.

Додаткові буквені позначення, що відбивають функціональні признаки приладів за ДГСТ 21.104-85.

Найменування	Позначення
Чутливий елемент (первинне перетворення)	Е
Дистанційна передача (проміжне перетворення)	Т
Станція керування	К
Перетворення, обчислювальні функції	У

Таблиця 6.5.

Додаткові позначення, що застосовують для побудови перетворювачів сигналів і обчислювальних приладів за ДГСТ 21.104-85.

Найменування	Позначення
Рід сигналу: електричний пневматичний гідролічний	Е Р G
Види сигналу: аналоговий дискретний	А D
Операції, виконувані обчислювальним пристроєм: підсумовування множення сигналу на постійний коефіцієнт К зведення сигналу $f$ у степінь $n$ логарифмування диференціювання інтегрування	$\Sigma$ К $f^n$ $lg$ $dx/dt$ $\int$

Складні прилади, що виконують кілька функцій, припускається зображувати декількома окружностями з примиканням одна до одної. Методика побудови графічних умовних позначень для спрощеного і розгорнутого способів є загальною. У верхній частині окружності наносяться буквені позначення вимірюваної величини і функціональної ознаки засобу (приладу) автоматизації. У нижній частині окружності наноситься позиційне позначення (цифрове чи буквено-цифрове), що служить для нумерації комплексу вимірювання чи регулювання (за спрощеним способом побудови умовних позначень)

чи окремих елементів комплексу (за розгорнутим способом побудови умовних позначень).

Порядок розташування буквених позначень у верхній частині (зліва направо) наступний: позначення основної вимірюваної величини; позначення, що уточнює (якщо необхідно) основну вимірювану величину; позначення функціональних ознак приладу. При цьому функціональні ознаки (якщо їх декілька в одному приладі) слід розташовувати у певному порядку, тобто IRCSA. Приклад побудови умовного позначення приладу з функціональними ознаками вимірювання, реєстрації і автоматичного регулювання перепаду тиску наведено на рис. 6.1.

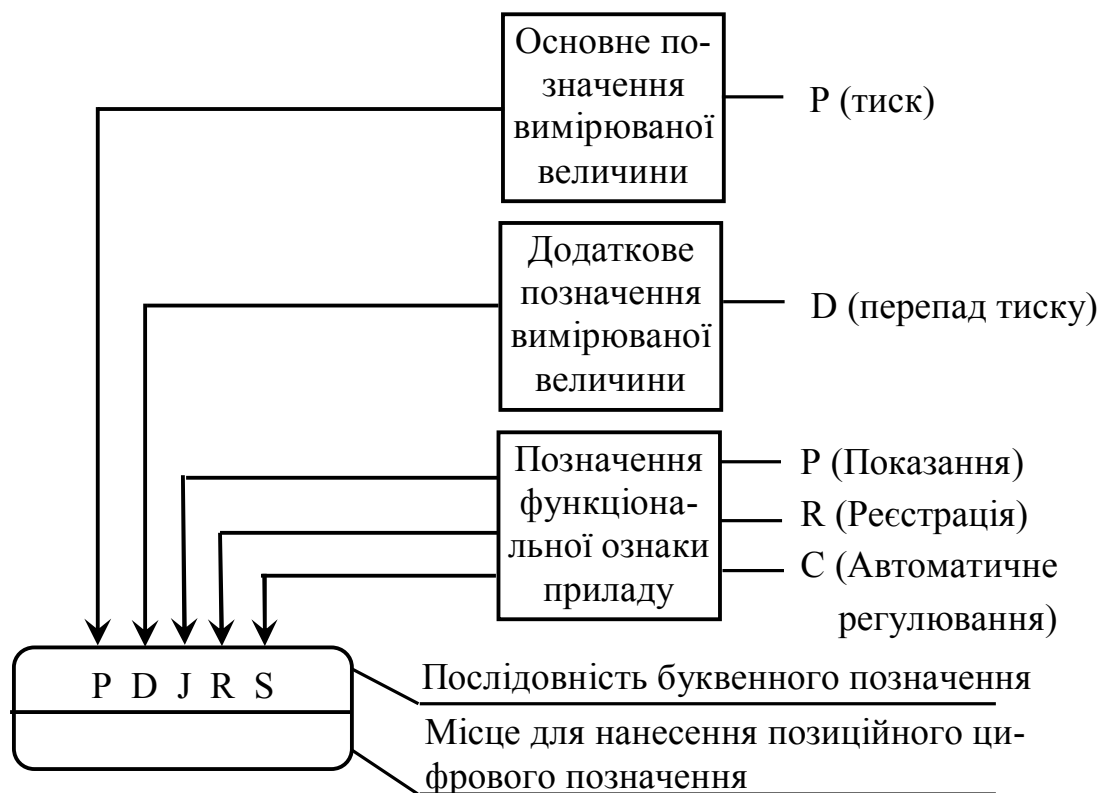


Рис. 6.1. Приклад побудови умовного графічного позначення приладу.

При побудові умовних позначень приладів вказують не всі функціональні ознаки приладу, а лише ті, що використовуються у даній схемі. Так, при позначенні показуючи і самописних приладів (якщо функція показання не використовується) припустимо писати TR, а не TIR.



У випадку побудови умовного позначення сигналізатора тиску, блок сигналізації якого є безшкальним приладом з умонтованим контактним пристроєм і сигнальними лампами, варто писати:

– PS, якщо прилад використовується тільки для дистанційної сигналізації відхилення тиску, включення чи виключення компресора, блокувань і т. п.;

– PA, якщо використовуються тільки сигнальні лампи самого приладу;

– PSA, якщо використовуються обидві вище перелічені функції;

– PC, якщо прилад використовується для позиційного регулювання тиску.

Функціональні зв'язки між технологічним обладнанням і встановленими на ньому первинними перетворювачами, а також із засобами автоматизації, встановленими на щитах і пультах, на схемах показуються тонкими суцільними лініями. При цьому кожний зв'язок позначається однією лінією незалежно від фактичного числа проводів чи труб, що здійснюють цей зв'язок. До умовних позначень приладів і засобів автоматизації для вхідних і вихідних сигналів припускається лінії зв'язку підводити з будь-якого боку, у тому числі і під кутом. Лінії зв'язку мають бути накреслені нанесені по найкоротшій відстані і нанесені з мінімальною кількістю перетинань. До того ж припускається перетинання лініями зв'язку зображень технологічного обладнання і комунікацій. Перетинання лініями зв'язку умовних позначень приладів і засобів автоматизації не припускається.

**Позиційне позначення приладів і засобів автоматизації**, що зображені на функціональних схемах, присвоюється всім без винятку і зберігається в усіх матеріалах проекту. При формуванні умовного позначення приладу у нижній частині окружності, як вже було сказано вище, розташовують позиційне його позначення. Всі елементи одного комплекту, тобто однієї функціональної групи приладів (первинний, проміжний і передавальний перетворювачі, вимірювальний прилад, регулятор, виконавчий пристрій) позначають однією і тією ж цифрою. При цьому цифру 1 присвоюють першому (зліва) комплекту, цифру 2 – другому і т. д.

Щоб відрізнити елементи одного комплекту, поряд з цифрою ставлять буквений індекс: у первинного перетворювача (датчика) – індекс *a*, у передавального перетворювача – *b*, у вимірювального

приладу – *в* і т. д. Таким чином, для одного комплексу повне позначення первинного перетворювача буде *1а*, передавального вимірювального перетворювача – *1б*, вимірювального (вторинного) приладу – *1в* і т. д. При цьому висота цифри дорівнює *3,5 мм*, а висота букви – *2,5 мм*.

У разі цифрового позиційного позначення приладів замість букв використовують цифри: *1-1*, *1-2*, *1-3* і т. д. Не надають позиційних позначень лише відбірним і приймальним пристроям, що постаються разом з приладом (входять у комплект – роздільні чи вирівнювальні посудини, спонукачі витрати, фільтри та холодильники для відбору проб на аналіз і т. ін.).

При визначенні меж кожної функціональної групи варто врахувати наступну обставину: якщо будь-який прилад чи регулятор зв'язаний з декількома датчиками або одержує додаткові впливи по іншим параметрам (наприклад, сигнал, що коректує), то всі елементи схеми, що здійснюють додаткові функції, відносяться до тієї функціональної групи, на яку вони роблять вплив. Зокрема, регулятор співвідношення входить до складу тієї функціональної групи, на яку здійснюється ведучий вплив за незалежним параметром. Те ж відноситься і до прямого цифрового керування, де вхідним ланцюгам контуру регулювання надається та сама позиція.

У системах централізованого контролю із застосуванням обчислювальної техніки, у схемах телевимірювання, у складних схемах автоматичного керування з загальними для різних функціональних груп пристроями всі загальні елементи виносяться в самостійні функціональні групи.

Електроапаратурі на функціональній схемі автоматизації можна присвоювати позначення, прийняте у принципових електричних схемах керування. В окремих випадках, коли позиційне позначення неможливо помістити в окружності, наносять його зовні меж окружності.

**Розробка функціональних схем** може здійснюватись з більшим чи меншим ступенем деталізації. Однак обсяг інформації, що наводиться на схемі, як правило, забезпечує повну уяву про прийняті технічні рішення з автоматизації певного технологічного процесу та можливість складання замовної специфікації на прилади і засоби автоматизації, запірно-регульовальної арматури, щитів і пультів, основних монтажних матеріалів і виробів.

Функціональну схему, як правило, виконують на одному аркуші, на якому зображують засоби автоматизації й апаратуру всіх систем контролю, регулювання, керування і сигналізації, що відноситься до даної технологічної системи (установки). Допоміжні пристрої, такі як редуктори і фільтри для повітря, джерела живлення, сполучні коробки й інші пристрої, а також монтажні елементи на функціональних схемах не показують.

Складні технологічні схеми рекомендується розчленовувати на окремі технологічні вузли і виконувати функціональні схеми цих вузлів у вигляді окремих креслень.

Функціональні схеми автоматизації можуть бути виконані двома способами:

- з умовним зображенням щитів і пультів керування у вигляді прямокутників (як правило, у нижній частині креслення), в межах якого показують встановлені на них засоби автоматизації;

- із зображенням засобів автоматизації на технологічних схемах поблизу відбірних і приймальних пристроїв без побудови прямокутників, що умовно позначають щити, пульти, пункти контролю і керування.

Перший (розгорнутий) спосіб більш детально розкриває рішення з автоматизації, тому їм користуються частіше. Крім того, завдяки його наочності значно полегшується читання схеми і робота з проектними матеріалами. За цим способом прямокутники щитів і пультів розташовують у такій послідовності, щоб при розміщенні у їх межах позначень приладів і засобів автоматизації забезпечувалася простота та ясність схем і мінімум перетинань ліній зв'язку. У кожному прямокутнику з лівої сторони надається його найменування. В прямокутниках також можуть бути вказані номери креслень загальних виглядів щитів і пультів.

Прилади і засоби автоматизації, які розташовані зовні щитів та пультів і не зв'язані безпосередньо з технологічним обладнанням і трубопроводами, умовно показуються у прямокутнику “Прилади місцеві”. У разі побудови складних функціональних схем автоматизації для запобігання великого числа ізломів і перетинань ліній зв'язку їх обривають і нумерують. Номери ліній зв'язку розташовують у горизонтальних рядах. Номери ліній зв'язку нижнього ряду (над верхнім прямокутником “Прилади місцеві”) розташовують у зростаючому порядку, а у верхніх рядів (у технологічного обладнання і трубопроводів) – у будь-якому. Для кращого розуміння технологічної сут-

ності процесів в об'єкті автоматизації і можливості вибору діапазону вимірювання приладів, а також завдання регуляторів на ділянках ліній зв'язку над верхнім прямокутником показують граничні робочі (максимальні і мінімальні) значення технологічних параметрів контролю і регулювання, що відповідають регламентним нормам. Ці значення наводять в одиницях шкали приладів чи у міжнародних одиницях без буквених позначень.

Для роботи з функціональними схемами автоматизації не об'єднано мати пояснювальну записку до проекту, опис креслень і специфікацію на прилади і засоби автоматизації, електроапаратуру і запірно-регулюючу арматуру. Специфікації на прилади, засоби автоматизації, електроапаратуру і запірно-регулюючу арматуру дозволяють з'ясувати: характер взаємодії окремих технічних засобів автоматизації з елементами технологічного обладнання; зв'язок вузлів даної схеми автоматизації між собою і з вузлами інших (можливих) схем.

**Вибір технічних засобів автоматизації** здійснюється з урахуванням умов пожежно- і вибухонебезпечності технологічного процесу, агресивності і токсичності довкілля, параметрів і фізико-хімічних властивостей вимірюваного середовища, дальності передачі сигналів інформації від місця установки пристроїв безпосереднього зв'язку з об'єктом (вимірювальні перетворювачі, допоміжні пристрої, виконавчі пристрої та ін.) до щитів (пультів) керування і контролю, необхідної точності і швидкодії приладів і регуляторів. Системи автоматизації технологічних процесів повинні бути реалізовані на базі серійно виготовлених засобів автоматизації. При цьому слід застосовувати однотипні пристрої і уніфіковані системи, для яких характерна простота сполучення.

## **6.2. ПРИКЛАДИ ПОБУДОВИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ.**

**Випарна установка** – є одним з типових об'єктів хімічної технології. Найважливішим показником ефективності процесу випарювання є концентрація упареного розчину, а метою керування – підтримання певного значення цієї концентрації та стабілізація матеріального і теплового балансів.

Основні елементи найпростішої однокорпусної випарної установки природної циркуляції (див. рис. 6.2) – теплообмінник 1, у якому вихідний розчин нагрівається до температури кипіння, випар-

ний апарат 2 (чи декілька апаратів, з'єднаних послідовно) і бара метричний конденсатор 3.

Рівняння по компонентного матеріального балансу випарної установки по розчиненій речовині і загального матеріального балансу відповідно мають наступний вигляд:

$$M_C \xi_C = M_Y \xi_Y; \quad M_C = M_Y + M_{II}, \quad (6.1)$$

де  $M_C$ ,  $M_Y$  – витрата свіжого і упареного розчинів;  $\xi_C$ ,  $\xi_Y$  – концентрація розчиненої речовини у свіжому і в упареному розчині;  $M_{II}$  – витрата парів розчинника.

Розв'язуючи сумісно рівняння (6.1), отримаємо:

$$\xi_Y = \frac{M_C \xi_C}{M_Y} = \frac{M_C \xi_C}{M_C - M_{II}}. \quad (6.2)$$

У відповідності з рівнянням (6.2) виходить, що для стабілізації концентрації  $\xi_Y$  необхідно підтримувати витрату  $M_C$  на заданому рівні чи змінювати у випадку відхилення цієї концентрації. При цьому зменшення  $M_C$  призводить до зниження швидкості руху розчину по апарату, а отже – до збільшення концентрації  $\xi_Y$ . Те саме можна стверджувати і про витрату  $M_Y$ . Концентрація  $\xi_C$  визначається попередніми технологічними стадіями і її зміна буде достатньо вагомим чинником збурення. Витрата  $M_{II}$  визначається параметрами свіжого розчину, а також режимними параметрами випарного апарату: температурою, тиском, концентрацією розчину та інтенсивністю підводу теплоти

За постійності концентрації  $\xi_Y$  поміж температурою і тиском існує певна залежність. Тому для стабілізації  $\xi_Y$  достатньо підтримувати тільки один з цих параметрів – тиск, який можна регулювати зміною витрати води, що надходить у барометричний конденсатор.

До найбільш сильних збурень відноситься зміна витрати теплоносія (грійуча пара). Це збурення може бути скомпенсоване стабілізацією витрати. Для підтримки матеріального балансу в апараті необхідно забезпечити регулювання рівня шляхом зміни витрати розчину  $M_C$ . Такий спосіб дозволяє стабілізувати рівень у кожному з послідовно діючих випарних апаратів, якщо це багатокорпусна установка. В процесі випарювання контролюються витрати  $M_C$  і  $M_Y$ ,

температури свіжого і упареного розчинів, тиск теплоносія (пари), температури розчину після теплообмінника і у випарному апараті. Сигналізації підлягають відхилення концентрації  $\xi_y$  від заданого значення, припинення подачі свіжого розчину, а також граничні значення рівня у випарному апараті.

Таким чином за результатами аналізу технології процесу визначені основні канали регулювання, параметри контролю і сигналізації, що дозволило виконати розробку функціональної схеми автоматизації однокорпусної випарної установки (рис. 6.2) і скласти специфікацію на прилади і засоби автоматизації до цієї схеми (див. табл. 6.6).

Опис функціональної дії системи автоматизації є невід'ємною складовою пояснювальної записки проектної документації. Цей опис здійснюється з поясненням дії систем контролю, регулювання, сигналізації і блокування наведених на кресленні, по кожному параметру з зазначення елементів, що входять до системи та їх позиційного позначення у відповідності зі специфікацією. Нижче розглянуто приклад опису функціональної дії системи автоматичного регулювання концентрації упареного розчину.

Стабілізація концентрації упареного розчину забезпечується шляхом зміни витрати розчину на виході випарного апарату. Контроль концентрації здійснюється кондуктометричним аналізатором типу КВЧ-5М-1 (поз. 2-1), вимірювальний перетворювач ПІ якого після охолодження розчину до температури не більше  $30^{\circ}\text{C}$  на виході має сигнал постійної напруги, пропорційний величині питомої електричної провідності, а отже і концентрації розчину. Отриманий таким чином сигнал з ПІ надходить до передавального перетворювача ПП, у якому він нормується в уніфікований струмовий сигнал  $0 \div 5 \text{ мА}$ . Далі сигнал прямує одночасно як на вхід вторинного приладу А100 (поз. 1-2), так і на вхід мікропроцесорного регулятора МІНІТЕРМ 400.00 (поз. 2-2).

Вторинний прилад забезпечує реєстрацію величини концентрації, а також завдяки умонтованому контактному пристрою сигналізацію у випадку зменшення її величини нижче заданої. Мікропроцесорний регулятор у разі появи сигналу розбіжності на вході здійснює перетворення її величини за ПІ – законом регулювання у режимі “автоматичне” у вихідний струмів сигнал  $0 \div 5 \text{ мА}$ . Далі цей струмовий сигнал надходить на електропневматичний перетворювач типу МТМ 810 (поз. 2-3), пневматичний вихідний сигнал  $0,02 \div 0,1 \text{ МПа}$

якого впливає на мембранний привод виконавчого пристрою ПОУ-7 (поз. 2-4). Якщо концентрація прийняла значення нижче заданого, то регулятор відпрацьовує сигнал діяння, що призводить до зменшення величини витрати упареного розчину, а отже і підвищенню концентрації до заданої величини. Одночасно регулятор забезпечує цифровий інтерфейсний зв'язок кільця з ПЕОМ верхнього рівня керування за протоколом RS 232C. По каналу інтерфейсного зв'язку здійснюється вивід на мнемосхему (монітор) параметра концентрації і параметрів настроювання ( $k_P$ ,  $T_I$ ), а у разі необхідності може здійснюватись і зміна завдання та параметрів настроювання по командах з ПЕОМ. Живлення регулятора напругою 24 В постійного струму відбувається від джерела групового живлення ПЗ00.4, яке одночасно забезпечує живлення усіх чотирьох мікропроцесорних регуляторів. Сигнал  $0 \div 5$  мА подається на вхід регулятора через пристрій узгодження ВП05М, що входить до комплекту постачання.

**Вакуум-фільтр барабанний** (див. рис. 6.3) застосовується для фільтрування рідких неоднорідних систем з метою отримання осадку заданої вологості, що і є основним показником ефективності процесу. В реальних умовах на фільтрування надходять чисельні збурення у вигляді зміни гранулометричного складу твердої речовини, початкової концентрації його у суспензії, в'язкості рідкої фази і т. п. Найбільш сильним збуренням є зміна подачі суспензії. Зокрема, підвищення її витрати призводить до вимивання частини осадку і підвищенню його вологості, зменшення витрати порушує рівномірність шару осадку і викликає небажану вібрацію барабану. Пристрої регулювання в процесі фільтрування, як правило, повинні забезпечувати стабілізацію певної продуктивності по осадку. Ця продуктивність для визначеного типу фільтра може бути представлена у вигляді наступного рівняння:

$$V_T = K \sqrt{\frac{\Delta P [\xi_{TC} / (1 - \xi_{TC} \cdot \xi_{PO})] n l}{\alpha \eta}}, \quad (6.3)$$

де  $K$  – постійний коефіцієнт;  $\Delta P$  – різниця тисків до і після фільтрувальної тканини;  $\xi_{TC}$  – маса твердих частинок на одиницю об'єму рідини суспензії на вході;  $\xi_{PO}$  – об'єм рідини в осадку на одиницю маси твердих частинок;  $n$  – частота обертів барабану;  $l$  – частина барабану, що занурена у рідину (визначається рівнем суспензії у ванні);  $\eta$  – кінематична в'язкість рідини;  $\alpha$  – середній питомий опір осадку.





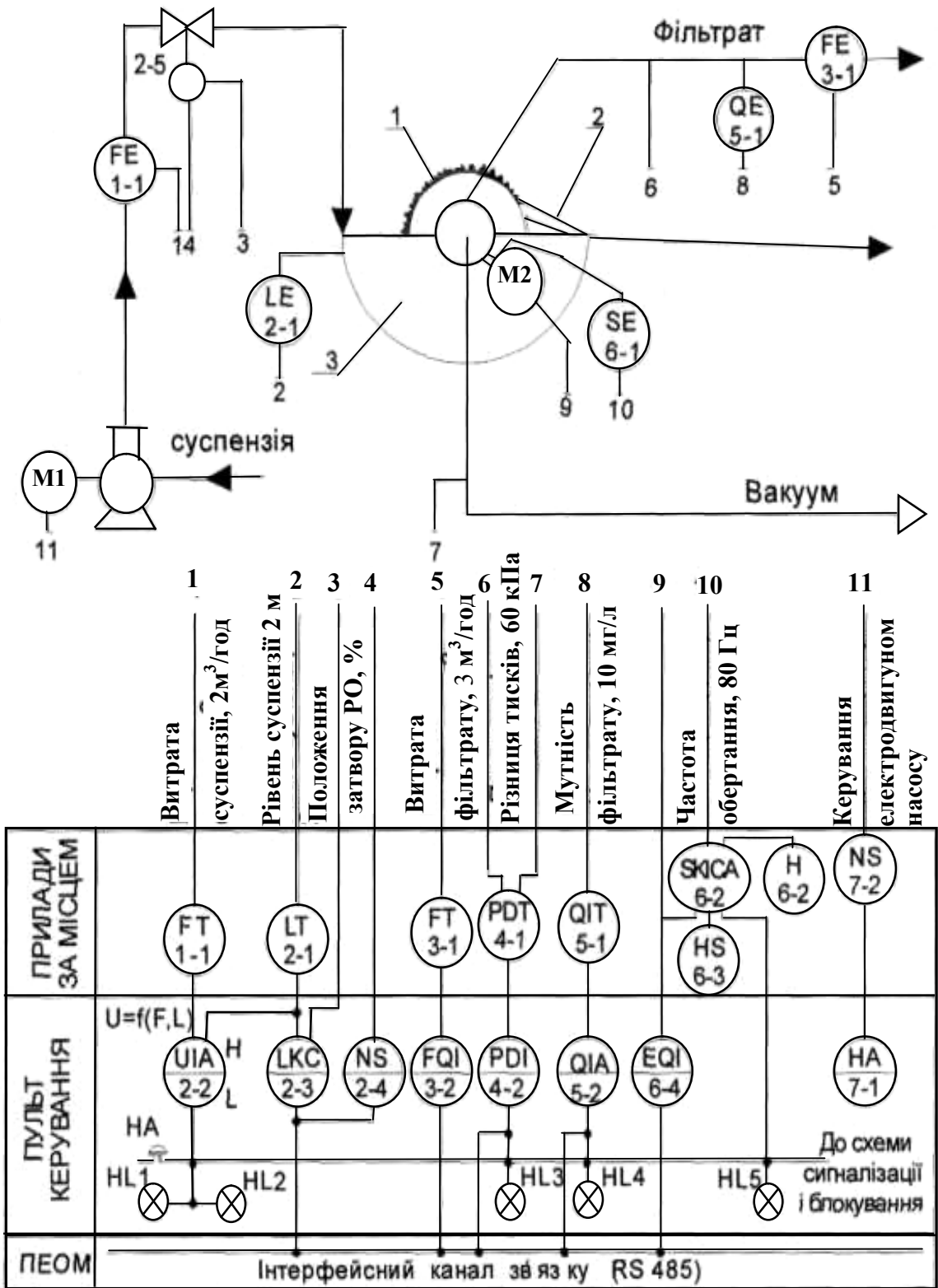


Рис. 6.3. Функціональна схема автоматизації барабанного вакуум-фільтра: 1 – барабан; 2 – ніж; 3 – ванна суспензії.

Аналіз рівняння (6.3) показує, що продуктивність  $V_T$  пропорційна  $(\Delta P n l)^{0,5}$ . Якщо параметри  $\Delta P$  і  $n$  в процесі експлуатації залишаються постійними, то єдиним параметром, що підлягає стабілізації, є  $l$ , тобто рівень суспензії у ванні. Регулюючим діянням у цьому випадку буде зміна витрати суспензії.

Товщина осадку є найважливішим параметром, збільшення якої призводить до значного підвищення вологості осадку. Тому необхідна стабілізація цього параметра, яка може бути забезпечена зміною швидкості обертання барабану.

Для попередження небезпеки, що пов'язана з проривом фільтрувальної тканини, необхідно встановлювати датчики мутності фільтрату, а також пристрої сигналізації і блокування (захисту). Крім того, на вакуум-фільтрі встановлюють також систему сигналізації і захисту від перевантаження електродвигуна барабану. Контролю підлягають витрати суспензії і фільтрату, рівень рідини у ванні, перепад тиску до і після фільтрувальної тканини, мутність фільтрату, споживча потужність електродвигуна барабану.

Функціональна схема автоматизації барабанного вакуум-фільтру у відповідності із специфікацією на прилади і засоби автоматизації (табл. 6.7) представлена на рис. 6.3, у якій основним параметром регулювання є швидкість обертання барабану. Стабілізація цієї швидкості досягається шляхом зміни частоти живлення асинхронного електродвигуна М2. У якості датчика зворотного зв'язку за швидкістю використовується індуктивний перетворювач типу ІА (поз. 6-1) з металевою крильчаткою на валу електродвигуна. Кількість імпульсів, що формується датчиком, пропорційна дійсній швидкості обертання. Далі в контролері перетворювача частоти типу 8200 Vektor (поз. 6-2) обчислюється розбіжність поміж заданою і реальною частотою і формується за ПД – законом сигнал керування, що спрямований на усунення розбіжності. Перетворювач частоти – багатофункціональний пристрій, що додатково до функції регулювання забезпечує захист електродвигуна від перевантаження, пуск і зупинення електродвигуна. Підключення живлення трифазної напруги здійснюється за допомогою вимикача типу 7GS (поз. 6-3). Візуальний контроль основних електричних параметрів мережі електродвигуна (напруга, струм, потужність, кількість електроенергії, частота мережі та ін.) здійснюється цифровим мультиметром типу DMK (поз. 6-4) з інтерфейсним виходом.

Таблиця 6.6.

## Специфікація на прилади і засоби автоматизації.

Позиційне по- значення	Найменуван- ня параметра контролю чи регулювання	Грани- чне значен- ня па- раметра	Місце уста- новки	Найменування і характе- ристика приладу чи засобу автоматизації	Тип, мо- дель, моди- фіка- ція	Підприємство - виготовник	Кількість по проекту	Вартість, грн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-1, 2-1	Контроль ві- дповідно концентрації вихідного і упареного розчину	20 %об 35 %об	Трубопровід (вимірюва- льний пере- творювач). Пульт керу- вання (пе- редавальний перетворю- вач)	Аналізатор рідини конду- кторметричний проточно- го типу в комплекті. Діапазон вимірювання 5 ÷ 100 См/м. Кл. точності 1,5	КВЧ- 5М-1	АТ “ЩПК”, м. Харків	2	3518×2
1-2			Пульт керу- вання	Показуючий і реєструю- чий вторинний прилад з релейним виходом. Кл. точності 0,5	А100. Мод. 2225	ЗАТ “Промис- лова група “Метран”, м. Челябінськ	1	2685
2-2	Регулювання концентрації упареного розчину	35 % об	Пульт керу- вання	Регулятор мікропроцесор- ний	МІНІ- ТЕРМ 400.00	ВАТ “МЗТА”, м. Москва	1	817

## Продовження табл. 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-3	Регулювання витрати пари	2 т/год	Пульт керування	Перетворювач електропневматичний	МТМ 810	НВП "Мікро-терм", м. Северодонецьк	1	910
2-4			Трубопровід	Пневматичний виконавчий пристрій одно сидельний з мембранним приводом: Ду = 20 мм, Ру = 6,4 МПа	ПОУ-7.706.08.02.НО	АТ "Конотопський арматурний завод", Сумська обл.	1	2450
3-1			Трубопровід	Діафрагма вимірвальна камерна в комплекті з вирівнювальними конденсаційними посудинами	ДКС 0,6-40-I-a/б-9	ВАТ "Промприлад", м. Івано-Франківськ	1	885
3-2			Шафа за місцем	Тензоперетворювач перепаду тиску (виконання 02) з верхню межею вимірювання 40 кПа. Кл. точності 0,25	Сафір Мод. 2420	ЗАТ "СП Манометр", м. Харків	1	1650
3-3			Пульт керування	Регулятор мікропроцесорний	МІНІ-ТЕРМ 400.00	ВАТ "МЗТА", м. Москва	1	817
3-4			Пульт керування	Перетворювач електропневматичний	МТМ 810	НВП "Мікро-терм", м. Северодонецьк	1	910

Продовження табл. 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3-5			Трубопровід	Пневматичний виконавчий пристрій двосідельний з мембранним приводом: Ду = 40 мм, Ру = 1,6 МПа	25ч 38нж (НЗ)	АТ "Арма-гус", м. Гусь-Хрустальний	1	2820
4-1	Контроль витрати вихідного розчину	4 т/год	Трубопровід	Діафрагма вимірювальна безкамерна в комплекті	ДБС 0,6-50- II-а/б	ВАТ "Промприлад", м. Івано-Франківськ	1	539
4-2			Шафа за місцем	Тензоперетворювач перепаду тиску (виконання 05) з верхню межею вимірювання 63 кПа. Кл. точності 0,25	Сафір Мод. 2440	ЗАТ "СП Манометр", м. Харків	1	1780
5-1	Контроль витрати упареного розчину	2 т/год	Трубопровід	Діафрагма вимірювальна безкамерна в комплекті	ДБС 0,6-40- II-а/б	ВАТ "Промприлад", м. Івано-Франківськ	1	510
5-2			Шафа за місцем	Тензоперетворювач перепаду тиску (виконання 05) з верхню межею вимірювання 40 кПа. Кл. точності 0,25	Сафір Мод. 2440	ЗАТ "СП Манометр", м. Харків	1	1780
6-1	Контроль витрати води	3 т/год	Трубопровід	Діафрагма вимірювальна безкамерна в комплекті	ДБС 0,6-40- I-а/б	ВАТ "Промприлад", м. Івано-Франківськ	1	510

Продовження табл. 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6-2			Шафа за місцем	Тензоперетворювач перепаду тиску (виконання 02) з верхньою межею вимірювання 40 кПа. Кл. точності 0,25	Сафір Мод. 2420	ЗАТ "СП Манометр", м. Харків	1	1650
6-3	Контроль витрати води, вихідного і упареного розчину	3 т/год 4 т/год 2 т/год	Пульт керування	Показуючий і реєструючий вторинний прилад з релейним виходом. Кл. точності 0,5	A100H Мод. 2326	ЗАТ "Промислова група "Метран", м. Челябінськ	1	3876
7-1	Контроль тиску пари	0,35 МПа	Трубопровід	Тензоперетворювач тиску з верхньою межею вимірювання 0,4 МПа. Кл. точності 0,5	МТ 100P Мод. 11029	ЗАТ "СП Манометр", м. Харків	1	848
8-1	Регулювання тиску випарювання	80 кПа	Випарний апарат	Тензоперетворювач тиску з верхньою межею вимірювання 100 кПа. Кл. точності 0,5	МТ 100PR Мод. 14125	ЗАТ "СП Манометр", м. Харків	1	1199
8-2			Пульт керування	Регулятор мікропроцесорний	МІНІ-ТЕРМ 400.00	ВАТ "МЗТА", м. Москва	1	817
8-3			Пульт керування	Перетворювач електропневматичний	МТМ 810	НВП "Мікро-терм", м. Северодонецьк	1	910

Продовження табл. 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8-4			Трубопровід	Пневматичний виконавчий пристрій двосідельний з мембранним приводом: Ду = 40 мм, Ру = 1,6 МПа	25ч 37нж (НО)	АТ "Арма-гус", м. Гусь-Хрустальний	1	2820
8-5	Контроль тиску пари і тиску у випарному апараті	0,35 МПа, 80 кПа	Пульт керування	Показуючий і реєструючий вторинний прилад. Кл. точності 0,5	A100 Мод. 2225	ЗАТ "Промислова група "Метран", м. Челябінськ	1	2685
9-1, 9-2	Контроль температури розчину вихідного і к випарному апараті	40 °С 90 °С	Трубопровід Випарний апарат	Термоперетворювач опору з уніфікованим струмовим вихідним сигналом. Діапазон вимірювання 0 ÷ 200 °С, кл. точності 0,5	ТСМУ - 0288	НВО "Ефект-ротермія", м. Луцьк	2	267×2
9-3			Пульт керування	Показуючий і реєструючий вторинний прилад. Кл. точності 0,5	A100 Мод. 2225	ЗАТ "Промислова група "Метран", м. Челябінськ	1	2685
10-1	Регулювання рівня у випарному апараті	1000 мм	Випарний апарат. Шафа за місцем	Дифманометричний рівнемір (виконання 05) в комплекті з вирівнювальною посудиною. Верхня межа вимірювання 160 кПа, кл. точності 0,25	Сафір Мод. 2440	ЗАТ "СП Манометр", м. Харків	1	2090

Продовження табл. 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10-2			Пульт керування	Регулятор мікропроцесорний	МІНІ-ТЕРМ 400.00	ВАТ “МЗТА”, м. Москва	1	817
10-3			Пульт керування	Перетворювач електропневматичний	МТМ 810	НВП “Мікротерм”, м. Северодонецьк	1	910
10-4			Трубопровід	Пневматичний виконавчий пристрій діафрагмовий емальований з мембранним приводом: Ду = 50 мм, Р <sub>у</sub> = 0,4 МПа	25ч 35эм (НЗ)	АТ “Кролевецький арматурний завод”, Сумська обл.	1	3210

Таблиця 6.7.

## Специфікація на прилади і засоби автоматизації.

Позиційне позначення	Найменування параметра контролю чи регулювання	Граничне значення параметра	Місце установки	Найменування і характеристика приладу чи засобу автоматизації	Тип, модель, модифікація	Підприємство - виготовник	Кількість по проекту	Вартість, грн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-1	Контроль витрати суспензії	5 м <sup>3</sup> /год	Трубопровід	Вихровий електромагнітний перетворювач. Діапазон вимірювання 0,4 ÷ 10 м <sup>3</sup> /год. Кл. точності 1,5	ВЭПС-25-ПБ-3	ЗАТ “Промсервіс”, м. Димитровград	1	5880



Продовження табл. 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-1	Регулювання рівня у ванні	2000 мм	Стійка біля ванни	Тензоперетворювач тиску (виконання 02) з мембранним роздільником. Верхня межа вимірювання 25 кПа. Кл. точності 0,25	Сафір Мод. 2140	ЗАТ “СП Манометр”, м. Харків	1	1183
2-2	Контроль витрати суспензії і рівня у ванні	5 м <sup>3</sup> /год, 2000 мм	Пульт керування	Лінійний шкальний індикатор з двопозиційним сигналізатором (контактний пристрій). Кл. точності 1	МТМ 300С-Г	НВП “Мікротерм”, м. Северодонецьк	1	520
2-3	Регулювання рівня у ванні	2000 мм		Мікропроцесорний регулятор	МІНІ-ТЕРМ 400.31	ВАТ “МЗТА”, м. Москва	1	817
2-4				Підсилювач трипозиційний	У 300		1	418
2-5	Регулювання рівня у ванні	2000 мм	Трубопровід	Засувка шлангова фланцева: Ду = 25, Ру = 0,6 МПа	33а 903р	АТ “Знамя труда”, м. Санкт-Петербург	1	2758
3-1	Контроль витрати фільтрату	3 м <sup>3</sup> /год	Трубопровід	Вихровий електромагнітний перетворювач. Діапазон вимірювання 0,3 ÷ 8 м <sup>3</sup> /год. Кл. точності 1,5	ВЭПС-20-ПБ-3	ЗАТ “Промсервіс”, м. Дмитровград	1	5680
3-2			Пульт керування	Прилад контролю цифровий з інтегратором. Кл. точності 0,1	МТМ 310И	НВП “Мікротерм”, м. Северодонецьк	1	1250

Продовження табл. 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4-1	Контроль різниці тисків до і після фільтрувальної тканини	60 кПа	Стійка біля ванни	Тензоперетворювач різниці тисків (виконання 01). Верхня межа вимірювання 100 кПа. Кл. точності 0,2	Сафір Мод. 2430	ЗАТ “СП Манометр”, м. Харків	1	1742
4-2			Пульт керування	Прилад контролю цифровий з контактним виходом. Кл. точності 0,1	МТМ 310С	НВП “Мікротерм”, м. Северодонецьк	1	1145
5-1	Контроль мутності фільтрату	10 мг/л	Шафа навісна за місцем	Аналізатор мутності води в комплекті з фотометричною ячейкою і вимірювальним блоком. Діапазон вимірювання 2,5 ÷ 25 мг/л. Кл. точності 1,5	ММ - 07	НВП “Оріон”, м. Харків	1	2870
5-2			Пульт керування	Прилад контролю цифровий з контактним виходом. Кл. точності 0,1	МТМ 310С	НВП “Мікротерм”, м. Северодонецьк	1	1145
6-1	Регулювання швидкості (частоти) обертання барабану	80 Гц	Стійка біля електродвигуна	Індукційний датчик з металевою крильчаткою, що встановлена на валу редуктора	ІА30 DSN 22NO	Фірма “Lenze”, Німеччина	1	240

Продовження табл. 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6-2			Шафа навісна електромонтажна	Перетворювач частоти Lenze 8200 Vektor в комплекті з пультом керування і модулем вх/вих "Standart", мережним дроселем і здавачем частоти	F82EV 223K4 B201	Фірма "Lenze", Німеччина	1	13780
6-3				Вимикач навантаження на три полюси з ручкою на передню панель	7GS 100MB	Фірма "Lovato electric", Італія	1	182
6-4	Контроль потужності, струму, частоти мережі і кількості електроенергії		Пульт керування	Аналізатор параметрів мережі (цифровий мультиметр). Кл. точності 0,5	DMK 40	Фірма "Lovato electric", Італія	1	2180
7-1	Керування електродвигуном насосу		Пульт керування	Модульна кнопка керування з індикатором вмикання	PDL 11A	Фірма "Terasaki Europe Ltd.", Шотландія	1	62
7-2			Шафа навісна електромонтажна	Контактор мініатюрний для кола керування АС	11BF 16.10	Фірма "Lovato electric", Італія	1	123

---

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб. Кн. 1. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд – во стандартов, 1990. – 428 с.
2. Промислові засоби автоматизації. Частина 1. Вимірювальні пристрої: Навч. посібник / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; За заг. ред. А.К. Бабіченка. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2001. 470 с.
3. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии: Учебное пособие для вузов. Изд. 3-е, перераб. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.
4. Наладка средств измерений и систем технологического контроля: Справочное пособие / А.С. Клюев, Л.М. Пин, Е.И. Коломиец, С.А. Клюев; Под ред. А.С. Клюева. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 400 с.
5. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
6. Плотников В.М., Подрешетников В.А., Тетеревятников Л.Н. Приборы и средства учета природного газа и конденсата. – М.: Недра, 1989. – 238 с.
7. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская, В.А. Бек и др.; Под ред. В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение; Ленингр. отд-ние. 1987. – 847 с.
8. Маркин Н.С., Ершов В.С. Метрология. Введение в специальность. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 208 с.
9. Автоматическое управление в химической промышленности. Учебник для вузов / Е.Г. Дудников, А.В. Казаков, Ю.Н. Софиева и др.; Под ред. Е.Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
10. Шкатов Е.Ф. Технологические измерения и КИП на предприятиях химической промышленности. Учебное пособие для техникумов. – М.: Химия, 1986. – 320 с.
11. Кремлевский П.П. Теплоэнергетические и химико-технологические приборы и регуляторы. – Л.: Машиностроение, 1968. – 212 с.
12. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. – М.: Химия, 1982. – 296 с.

13. Кассандрова О.М., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970. – 104 с.
14. Промислові засоби автоматизації. Частина 2. Регулювальні і виконавчі пристрої: Навч. посібник / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; За ред. А.К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХП», 2003. – 658 с.
15. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
16. Монтаж средств измерений и автоматизации: Справочник / К.А. Алексеев, В.С. Антипин, А.Л. Ганашек и др.; Под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 488 с.
17. Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности: Учебник для техникумов. – М.: Химия, 1985. 352 с.
18. Казаков А.В., Кулаков М.В., Мелюшев Ю.К. Основы автоматики и автоматизации химических производств: Учебное пособие для вузов. М.: – Машиностроение, 1970. – 376 с.
19. Дианов В.Г. Автоматизация производственных процессов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: Учебное пособие. – М.: Химия, 1968. – 327 с.
20. Широкий Д.К., Куриленко О.Д. Расчет параметров промышленных систем регулирования. Справочное пособие. – К.: Техніка, 1972. – 232 с.
21. Проектування систем автоматизації технологічних процесів: Навч. посібник / В.І. Тошинський, М.О. Подустов, І.І. Литвиненко та ін. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – 412 с.
22. Романенко В.Д., Игнатенко Б.В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микро ЭВМ: Учебное пособие. – К.: Вища шк., 1990. – 334 с.
23. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – Л.: Машиностроение, 1975. – 776 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Основні відомості про вимірювання і вимірювальні пристрої ( <i>А.К. Бабіченко, Ю.А. Бабіченко</i> ).....	8
1.1. Вимірювання фізичних величин.....	8
Фізична величина (8). Методи вимірювань (10). Умови вимірювань (12).	
1.2. Засоби вимірювань.....	13
Міра (13). Вимірювальний прилад (14). Вимірювальний перетворювач (16). Вимірювальна установка (16). Вимірювальна система (17). Зразкові засоби вимірювань і еталони (17).	
1.3. Похибки вимірювань і засобів вимірювання.....	18
Способи виразу похибок вимірювання (19). Основна і додаткова похибки (21). Статична і динамічна похибки (21). Систематична похибка (21). Випадкова похибка (26).	
1.4. Оцінка випадкових і систематичних похибок вимірювання..	27
Основні положення теорії похибок вимірювання (27). Функції розподілу (28). Числові характеристики розподілу випадкових величин (31). Нормальний закон розподілу (35). Закон розподілу Стюдента (41). Виключення грубих помилок (44). Критерії узгодження (46). Обчислення довірчих границь похибки результатів вимірювань (58). Клас точності засобів вимірювань (60).	
1.5. Обробка результатів вимірювань.....	63
Визначення показників точності прямих однократних вимірювань (64). Визначення показників точності прямих багатократних вимірювань (65). Визначення показників точності нерівноточних вимірювань (69).	
2. Технологічні вимірювання і засоби автоматичного контролю ( <i>А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.І. Вельма</i> ).....	72
2.1. Загальні відомості.....	72
2.2. Вимірювання тиску.....	74
Деформаційні прилади тиску (75). Електричні прилади тиску (85). Вибір, установка і експлуатація приладів тиску (89).	
2.3. Вимірювання рівня.....	92

Буйкові рівнеміри (95). Поплавкові рівнеміри (100). Дифманометричні і гідростатичні рівнеміри (103). Електричні рівнеміри (106). Ультразвукові рівнеміри (112).	
2.4. Вимірювання кількості і витрати.....	117
Об'ємні лічильники (118). Швидкісні турбінні лічильники (128). Витратоміри змінного перепаду тиску (132). Витратоміри постійного перепаду тиску (148). Ультразвукові витратоміри (155). Електромагнітні витратоміри (163). Вихрові витратоміри (170). Витратоміри динамічного тиску (175). Лічильники теплової енергії (177).	
2.5. Вимірювання температури.....	183
Термометри розширення (184). Манометричні термометри (185). Термоелектричні термометри (186). Термоперетворювачі опору (191). Пірометри випромінювання (196).	
2.6. Вимірювання складу і показників якості речовин.....	203
Термомагнітні газоаналізатори (204). Термокондуктометричні газоаналізатори (213). Термохімічні газоаналізатори (217). Електрохімічні газоаналізатори (221). Абсорбційно - спектральні аналізатори (229). Атомно - абсорбційні спектрометри (243). Кондуктометричні аналізатори рідини (244). Потенціометричні іонами ірні аналізатори рідини (259). Хроматографічні аналізатори (271).	
2.7. Перетворювачі сигналів.....	278
Нормуючі вимірювальні перетворювачі (278). Узгоджуючі перетворювачі (280). Інтерфейсні перетворювачі (284).	
2.8. Вторинні прилади.....	287
Мілівольтметри (288). Потенціометри (289). Врівноважені мости (290). Логометри (292). Прилади із струмовим входним сигналом (293). Прилади з диференціально – трансформаторною схемою (294). Пневматичні вимірювальні прилади (295).	
3. Елементи теорії автоматичного регулювання ( <i>А.К. Бабіченко, Ю.А. Бабіченко</i> ).....	298
3.1. Класифікація автоматичних систем регулювання.....	298
За принципом регулювання (298). За кількістю параметрів, що регулюються (300). За кількістю контурів регулювання (300). За призначенням алгоритму зміни діяння завданням (300). За характером сигналів регулювання (301). За принципом дії (302). За характером математичних співвідношень (303).	

3.2. Задачі аналізу і синтезу систем автоматичного регулювання.....	303
Перехідні процеси (304). Якість перехідного процесу (306).	
3.3. Об'єкти регулювання та їх основні властивості.....	307
Метод математичного моделювання (308). Класифікація об'єктів регулювання (309).	
3.4. Аналітичний метод визначення характеристик об'єктів регулювання.....	314
Метод лінеаризації (315). Операційний метод розв'язання (316). Передаточні функції (319). Приклади визначення передаточних функцій (321).	
3.5. Експериментальний метод визначення характеристик об'єктів регулювання .....	336
Проведення експерименту (336). Апроксимуюча модель перехідної характеристики (339).	
3.6. Сталість систем автоматичного регулювання.....	348
Закони регулювання (348). Прямий аналіз АСР на сталість (352). Необхідні і достатні умови сталості (355). Вибір типу регулятора (357). Визначення параметрів настроювання регулятора (366).	
4. Мікропроцесорні засоби регулювання ( <i>А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, М.О. Подустов</i> ).....	372
4.1. Загальні відомості.....	372
4.2. Комплекси мікропроцесорних приладів серії МИНИТЕРМ.....	380
Комплекс приладів МИНИТЕРМ 400 (380). Комплекс приладів МИНИТЕРМ 450 (394).	
4.3. Комплекс мікропроцесорних регуляторів серії РТЭ.....	396
4.4. Мікропроцесорні регулятори серії МК та МТР.....	401
4.5. Комплекс мікропроцесорних приладів серії ПРОТАР.....	404
4.6. Комплекс мікропроцесорних приладів Р-130.....	406
Склад мікроконтролера (408). Бібліотека алгоритмів мікроконтролера (417). Виконання функціональних схем (438). Приклади побудови автоматичних систем регулювання (439).	
5. Виконавчі пристрої ( <i>А.К. Бабіченко В.І. Вельма</i> ).....	446
5.1. Загальні відомості .....	446
Виконавчі механізми (446). Регулюючі органи (448).	



	515
5.2. Електродвигунні виконавчі механізми.....	453
Склад електричних виконавчих механізмів (453). Механізми виконавчі однооборотні (455). Електричні виконавчі механізми прямоходні (455). Електричні багатооборотні виконавчі механізми (456).	
5.3. Пневматичні виконавчі механізми.....	459
Мембранні виконавчі механізми (459). Пневмодвигунні поворотні виконавчі механізми (461).	
5.4. Промислова регулююча арматура.....	463
Виконавчі пристрої з пневматичним приводом (464). Виконавчі пристрої з електромагнітним приводом (474). Виконавчі пристрої з електродвигунним (моторним) приводом (478).	
6. Основи проектування систем автоматизації ( <i>А.К. Бабіченко, О.І. Зайцев</i> ) .....	483
6.1. Функціональні схеми автоматизації.....	483
Зображення технологічного обладнання і комунікацій (483). Зображення приладів і засобів автоматизації (484). Позиційне позначення приладів і засобів автоматизації (491). Розробка функціональних схем (492). Вибір технічних засобів автоматизації (494).	
6.2. Приклади розробки функціональних схем автоматизації типових об'єктів хімічної технології.....	494
Випарна установка (494). Вакуум-фільтр барабанний (497).	
Список літератури.....	510