

**М.В. ЛУКІНЮК, В.П. ЛИСЕНКО, В.Є. ЛУКІН, А.М. ГЛАДКИЙ,
С.А. ШВОРОВ, А.А. РУДЕНСЬКИЙ, А.А. ЗАВЕРТКІН**

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Частина 2

*Рекомендовано Вченою радою Національного університету
біоресурсів і природокористування України як посібник
для студентів вищих закладів освіти, що навчаються
за спеціальністю 151 “Автоматизація та комп’ютерно-
інтегровані технології”*

Київ-2018

УДК 681.2.08(075.8)
ББК 30.10.73

Рекомендовано вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України як посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти, що навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».
(Витяг з протоколу № 4 від 22 листопада 2017 р.)

Р е ц е н з е н т и:

Юрченко О.М., доктор технічних наук, старший науковий співробітник (ІЕД НАН України)

Кисельов В.Б., доктор технічних наук, професор (ТНУ імені В.І. Вернадського)

Коваль В.В., доктор технічних наук, професор (НУБіП України)

Технічні засоби автоматизації (Частина 2) / М.В. Лукінюк, В.П. Лисенко, В.Є. Лукін, А.М. Гладкий, С.А. Шворов, А.А. Руденський, А.А. Заверткін. – Ніжин.: Видавець ПП Лисенко М.М., 2018. – 455 с.

ISBN 978-617-640-360-9

У посібнику розглянуто структуру та принципи побудови технічних засобів автоматизації: вимірювальних перетворювачів (температури, тиску, рівня, кількості та витрати речовин, вологості газів, твердих і сипучих матеріалів, параметрів руху твердих тіл), частина 1, типи і характеристики сучасних первинних перетворювачів та вимірювальних приладів, підсилювачів, логічних елементів, мікроконтролерів, регуляторів, виконавчих механізмів, а також особливостей використання аналогової, цифрової та мікропроцесорної техніки як технічних засобів автоматизації, частина 2.

Навчальний посібник призначено для студентів вищих навчальних закладів освіти, що навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Може бути корисним для науково-педагогічних працівників ВНЗ I-IV рівнів акредитації відповідної галузі знань.

УДК 681.2.08(075.8)
ББК 30.10.73

ISBN 978-617-640-360-9

© М.В. Лукінюк, В.П. Лисенко,
В.Є. Лукін, А.М. Гладкий,
С.А. Шворов, А.А. Руденський,
А.А. Заверткін, 2018.

Список прийнятих скорочень і позначень

АСК – автоматизована система керування
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
ВІС – вимірювальна інформаційна система
ВПП – вимірювач параметрів ґрунтів
ВЧ – висока частота, високочастотний
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ДСП – Державна система приладів і засобів автоматизації
ДТП – диференціально-трансформаторний перетворювач
ДТС – диференціально-трансформаторна система
ЕОМ – електронна обчислювальна машина
ЕП – електронний підсилювач
ЕРС – електрорушійна сила
ЗВ – засіб вимірювання
ЗВТ – засіб вимірювальної техніки
ККД – коефіцієнт корисної дії
КЕОМ – керуюча електронна обчислювальна машина
ММП – магнітомодуляційний перетворювач
МП – мікропроцесор
МПС – мікропроцесорна система
МТ – манометричний термометр
НВЧ – надвисокочастотний
НСХ – номінальна статична характеристика
ОЗб – обмотка збудження
ОК – обмотка керування
ОЯЕ – об'єкт ядерної енергетики
ПВП – первинний вимірювальний перетворювач
ПЗЗ – пристрій зворотного зв'язку
ПЧЕ – пружний чутливий елемент
РД – реверсивний двигун
РП – реостатний перетворювач
СД – синхронний двигун
СЕС – спектральна енергетична світність
СЕЯ – спектральна енергетична яскравість
ТКО – температурний коефіцієнт опору
ТО – термоперетворювач опору
ТП – термоелектричний перетворювач
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ЦВП – цифрові вимірювальні прилади
ЧЕ – чутливий елемент

ВСТУП

Автоматизація являється важливою характерною ознакою сучасного виробництва. Вона сприяє впровадженню нових технологій, забезпечує великі можливості підвищення ефективності виробництва, економії енергетичних і матеріальних ресурсів, підвищення продуктивності праці і поліпшення якості продукції. Основу автоматизованих систем при їх реалізації складають технічні засоби автоматизації.

У посібнику розглядаються технічні засоби автоматизації, призначені для отримання інформації про стан об'єкта, її перетворення і опрацювання, а також для формування керуючих сигналів і здійснення керуючих впливів на об'єкт управління.

Посібник містить великий масив даних про сучасні первинні перетворювачі температури і вологості повітря, ґрунту, зерна провідних вітчизняних та зарубіжних виробників, детальну інформацію про типи, схеми і характеристики підсилювачів електричних сигналів постійного і змінного струму.

Наведено навчальні матеріали про логічні функції, логічні елементи та синтез логічних пристроїв. Розглядаються мікроконтролери сімейства PIC-16, програмовані логічні контролери, їх характеристики, схеми і особливості використання у схемах автоматизації.

Розглядаються регулятори автоматичних систем (неперервні та дискретні), типи та характеристики поширених електронних, мікропроцесорних регуляторів та інтелектуальних реле. Викладено матеріали про пристрої, які безпосередньо діють на регулюючий орган об'єкта відповідно до сигналу управління – виконавчі механізми: електродвигунні, електромагнітні, пневматичні та гідравлічні. Наводиться їх конструкція, характеристики, схеми управління та обґрунтування вибору.

Приведені практичні рекомендації щодо використання розглянутих типів технічних засобів для створення систем автоматизації та контрольні питання для самоконтролю студентами засвоєних знань і умінь.

РОЗДІЛ 8

СУЧАСНІ ПЕРВИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

8.1. Загальні відомості

У наш час паралельно з розвитком інформаційних технологій швидкими темпами створюються і впроваджуються у сільське господарство системи комплексної автоматизації виробничих процесів з використанням нових елементів автоматики. У розділі наведено довідковий матеріал про сучасні первинні перетворювачі вітчизняних та зарубіжних виробників.

Для отримання інформації про значення параметрів, які характеризують хід виконання технологічних процесів, використовується дуже великий комплекс різноманітних електричних і неелектричних первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків). Первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) є головними чутливими органами вимірювальної апаратури і всіх пристроїв систем контролю й управління. Вони забезпечують вимірювання теплоенергетичних, електроенергетичних, механічних величин, а також величин, що характеризують хімічний склад і фізичні властивості.

За видом енергії, яка використовується (контролюється) ПВП поділяють на електричні, пневматичні, гідравлічні.

За видом сприймаючої інформації ПВП можна розділити на датчики температури, вологості, рівня, витрати, тиску, переміщення і так далі.

За принципом роботи електричні ПВП можна розділити на потенціометричні, тензометричні, індуктивні, індукційні, терморезисторні, термоелектричні, сорбційні, ємнісні, фоторезисторні, фотоелектричні, п'єзоелектричні, пірометричні і т. д.

За видом вихідної величини ПВП поділяються на генераторні та параметричні. Якщо вихідною величиною ПВП є напруга, яка генерується цим перетворювачем (без використання додаткових джерел живлення), то він називається генераторним. Якщо вихідною величиною ПВП є параметр електричного кола (опір R , індуктивність L чи ємність C), то він називається параметричним.

На відміну від генераторних параметричні ПВП потребують додаткових джерел живлення.

У залежності від характеру вихідного сигналу первинні перетворювачі бувають із звичайним вихідним сигналом або з уніфікованим. Звичайний вихідний сигнал формується природним шляхом і являє собою напругу, опір, електричну ємність, частоту, зусилля і так далі.

Уніфікований сигнал – це сигнал визначеної фізичної природи, що змінюється у визначених фіксованих межах незалежно від виду і діапазону контрольованої величини. З уніфікованих сигналів найбільш широкого поширення набули електричні сигнали: постійний і змінний струми, напруга і частота, а також пневматичні сигнали. Уніфіковані сигнали отримують із звичайних за допомогою спеціальних перетворювачів.

ПВП з релейним вихідним сигналом (дискретні ПВП) формують вихідний сигнал у вигляді позиційної зміни положення контактів (логічних змінних «0», «1»), яке відбувається при певних значеннях вхідного сигналу.

Нижче наводяться типи і характеристики сучасних первинних перетворювачів таких відомих виробників засобів автоматики як компанії і фірми ПАТ "Тера", Овен, ПП «НВФ «PerMik», Snieder Electric, Honeywell, Heraeus Sensor Technology GmbH, Epcos Inc., Dallas Semiconductor, Omron, Michell Instruments Ltd, General Eastern Instruments, Sencera, E+E Electronik, Maxim, Microchip Technology Inc., Panametrics, Shaw, General Eastern Instruments, Du Pont, Sensirion, Syhitech, Apar, Parallax Inc. та ін.

8.2. Первинні перетворювачі температури

Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, у яких використовуються різні термометричні властивості рідин, газів або твердих тіл. Найбільш поширені фізичні властивості, пристрої для вимірювання температури та орієнтовні межі їх використання наведені у табл. 8.1.

Таблиця 8.1.

Пристрої для вимірювань температури

<i>Термометрична властивість</i>	<i>Назва пристрою</i>	<i>Межі вимірювання, °C</i>	
		<i>нижня</i>	<i>верхня</i>
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри	-190	600
Зміна тиску	Манометричні термометри	-160	600
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору.	-200	500
	Напівпровідникові термометри (термістори, терморезистори).	-90	180
Термоелектричні ефекти (термо-е.р.с.)	Термоелектричні термометри (термопари).	-50	1600
	Термопари спеціальні	1300	2500
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри.	700	6000
	Радіаційні пірометри.	20	3000
	Фотоелектричні пірометри.	600	4000
		1400	2800
	Колірні пірометри		

Термометром називають пристрій або прилад, що служить для вимірювання температури шляхом її перетворення у покази або сигнал, який є відомою функцією температури. Первинним перетворювачем або чутливим елементом термометра називають частину, яка перетворює теплову енергію в інший вид енергії для отримання інформації про температуру.

Розрізняють термометри контактні і безконтактні. Чутливий елемент контактного термометра входить у безпосередній контакт з середовищем вимірювання.

Безконтактний термометр, дія якого основана на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл називають **пірометром**.

Рідинні скляні термометри

Першими були створені і широко використовуються і в теперішній час рідинні термометри. Дія скляних рідинних термометрів основана на різниці коефіцієнтів теплового розширення термометричної речовини та оболонки, у якій вона знаходиться (термометричне скло або кварц). У якості термометричної речовини у скляних термометрах, крім ртуті, застосовуються метиловий чи етиловий спирти, толуол і інші рідини. Температурна точка для повірки термометрів, якщо вона попадає у діапазон вимірювання, потрібна точка води (0,01 °C). Основна перевага скляних рідинних термометрів – простота використання і достатньо висока точність вимірювання.

Біметалеві та дилатометричні перетворювачі

Дія дилатометричних та біметалевих перетворювачів основана на властивості теплового розширення різних твердих тіл. Найпростіший дилатометричний перетворювач складається з двох стрижнів: внутрішнього 1 і зовнішнього 2. Обидва стрижні жорстко закріплені на загальній основі 3, рис. 8.1, *а*. Коефіцієнт лінійного розширення одного з них (зазвичай зовнішнього) у 10 - 20 разів більший (активний елемент), ніж іншого. Його виготовляють з міді, алюмінію, латуні, сталі, нікелю і ін. Для другого стрижня (пасивного елемента) зазвичай використовують інвар (64 % Fe + 36 % Ni) чи кераміку. При зміні температури на ΔT кінці стрижнів переміщуються на відстань Δx , яка пропорційна зміні температури:

$$\Delta x = K \cdot \Delta T,$$

де K – коефіцієнт чутливості, який визначається різницею коефіцієнтів лінійного розширення стрижнів.

Різниця коефіцієнтів лінійного розширення стрижнів залежить від обраних матеріалів. Так, для латуні $\alpha_T = (18 \div 20) \cdot 10^{-6}$ на 1°C, а для інвару – $1,8 \cdot 10^{-6}$ на 1°C.

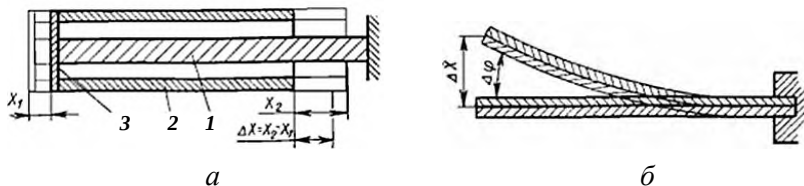


Рис. 8.1. Дилатометричний – *а*, та біметалевий – *б* перетворювачі

У біметалевих термометрах у якості чутливого елемента використовуються пластинки або стрічки, які складаються з двох різнорідних металів, що характеризуються різними коефіцієнтами теплового розширення. Найчастіше використовують мідно-цинковий сплав – латунь (70 %Cu + 30 %Zn) та сплав заліза з нікелем – інвар.

На відміну від дилатометричних, у біметалевих термоелементах пластини з різними коефіцієнтами лінійного розширення зварені між собою (рис. 8.1, б). Тому при зміні температури на ΔT пластина згинається. Відповідне переміщення кінця пластини Δx (при малих кутах) становить:

$$\Delta x = 0.75 K l \Delta T / h,$$

де K – коефіцієнт, обумовлений вибором пари металів, l – довжина пластин, мм; h – товщина пластин, мм.

Біметалеві і дилатометричні перетворювачі використовують переважно в якості термореле та дискретних регуляторів температури.

У приладах і системах вимірювання і контролю температури в основному застосовують такі типи перетворювачів: термометри опору (терморезистори), термоелектричні (термопари), напівпровідникові перетворювачі (термістори), пірометри, тепловізори та ін.

8.2.1. Термоперетворювачі опору

Принцип дії термоперетворювачів опору (ТО) заснований на властивості провідників (або напівпровідників) змінювати свій електричний опір при зміні температури. З провідникових матеріалів широке розповсюдження отримали платина і мідь. Для

вимірювання високих температур (понад 600 °C) використовується вольфрам.

Температурна залежність опору платини в інтервалі температур 0...650 °C описується рівнянням:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2),$$

де R_0 – опір провідника при 0 °C, R_T – опір провідника при температурі T , C , постійна $A = 3,9702 \times 10^{-3}$ 1/K; $B = 5,8893 \times 10^{-7}$ 1/°K². Температурний коефіцієнт опору (ТКО) платини при температурах 0...100 °C складає приблизно 1/273 град⁻¹.

В інтервалі температур 0...-200 °C залежність опору платини від температури має вигляд:

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + C(T-100)^3],$$

де $C = 4,35 \times 10^{-12}$ 1/K³ – сталий коефіцієнт.

Платина навіть при високих температурах у окислювальному середовищі не змінює своїх фізико-хімічних властивостей. Діапазон перетворюваних температур складає -260...+1300 °C.

У перетворювачах температури завдяки невисокій вартості і досить високій стійкості до корозії широко використовується мідь. Залежність електричного опору міді від температури має вигляд:

$$R_T = R_0(1 + \alpha_0 T),$$

де α_0 – ТКО міді, $\alpha_0 = 1/234,7$ 1/K. Діапазон перетворюваних температур складає -50...+180 °C.

ТО відрізняються високою точністю (до 0,1 °C), стабільністю показів, близькістю характеристики до лінійної залежності та взаємозамінністю.

У залежності від матеріалу чутливого елемента термоперетворювачі опору позначають ТСМ – мідні і ТСП – платинові.

Термометри опору ТСМ0618 призначені для вимірювання температури газоподібних, рідких середовищ і твердих тіл у різних галузях в умовах експлуатації: при температурах від мінус 50 до 50

°C і відносній вологості повітря до 98 % при температурі 35 °C.
Характеристики TSM0618 наведені у табл. 8.2.

Таблица 8.2.

Характеристики мідних термометрів опору ТСМ0618

Найменування характеристики	Значення характеристики						
	0618	01	02	03	04	05	06
Номінальна статична характеристика	1x50M; 1x100M; 2x50M; 2x100M	1x50M 1x100M				1x50M 1x100M 2x50M 2x100M	1x50M 1x100M
Клас допуску	A, B, C	B, C					
Діапазон вимірюваних температур, °C	кл. А: -50... 120 кл. В: -50. ...180	-50... 180	-50... 120	-50... 60	-50... 180	-50... 120	
Відхилення опору при 0°C від номінального значення, Ом	Клас А ± 0,05 Клас В ± 0,1 Клас С ± 0,2 6						
Границя допустимої абсолютної похибки, °C	Клас А ±(0,15+0,002t) Клас В ± (0,25+0,0035 t) Клас С ±(0,50+0,0065t)						
Показник теплової інерції, не більше, с	20 40	20 30	20	20	70	8	8
Схема внутрішніх з'єднань	2-х, 3-х, 4-х проводова	3-х, 4-х проводова			2-х	2-х, 3-х, 4-х	3-х, 4-х
Степінь захисту від води і пилу	IP54	IP40	IP00		IP54	IP00	
Довжина занурюваної частини, мм	80...3150	80...500		45	80	22... 80	500... 3000
Діаметр занурюваної частини, мм	8; 10	8	6	6	8; 9	5; 5,7	8;9
Маса, кг	0,25... 1,33	0,14...0 ,35	0,10...0 ,25	0,125	0,080... 0,085	0,003... 0,006	0,025... 0,100
Захисна арматура	Антикорозійна сталь або латунь						
Середній строк служби, років	12						

Сучасні перетворювачі температури виробництва ПАТ "ТЕРА" (Україна) показані на рис. 8.2. Виготовляються занурювальні, повітряні, поверхневі, тонкоплівкові, багатозонні та спеціальні

перетворювачі. Перетворювачі призначені для вимірювання температури від -196 до 800 °С рідких і газоподібних середовищ і твердих тіл у різних галузях.

Характеристики термометрів опору ПАТ "ТЕРА" наведені в табл. 8.3. Чутливі елементи для 50М, 100М, 50П, 100П виготовляються шляхом намотування тонкого мідного або платинового дроту, елементи Pt100 і Pt1000 виконуються методом напилення тонкого шару платини на керамічну підкладку. При цьому повністю зберігаються властивості платини, такі як стійкість до високих температур, термостабільність, практично лінійна температурна залежність опору від температури. Сьогодні ТСП Pt100 і Pt1000 – найбільш поширені датчики температури.

Таблиця 8.3.

Термометри опору ПАТ "ТЕРА"

<i>Тип</i>	<i>НСХ*</i>	<i>Граничне відхилення</i>	<i>Клас допуску</i>	<i>W100= =R₀/R₁₀₀</i>	<i>Д-зон вимірювання, °С</i>	<i>I_{макс}, мА</i>
ТСМ	50М, 100М	± (0,25+0,0035t)	В	1,4280	-50...180	1
ТСП	50П, 100П	± 0,30+0,0050t)	В	1,3910	- 100...600	3
	Pt100, Pt500	± (0,10+0,0017t)	1/3В	1,3850	- 196...750	1; 0,7
	Pt1000, Pt2000	± (0,15+0,0020t)	А		-50...500	0,3

*НСХ – номінальна статична характеристика

У **занурювальних** термометрах опору (50М, 100М, Pt100, Pt1000, Pt500) чутливими елементами можуть бути також термопари і термістори. Занурювальний перетворювач складається з робочої частини, яка виконана із захисної арматури і занурюється у вимірюване середовище, та зовнішньої частини – клемної головки або вихідного кабелю, рис. 8.2. *а, б*. Головка перетворювачів має водозахисне виконання. Матеріал захисної арматури – сталь 12Х18Н10Т або латунь-нікеліровані гільзи (моделі серій 1-15). Матеріал головки – склопластик або алюміній. Штуцер може бути рухомим (моделі 1-3,1-5,1-11), або нерухомим (моделі 1-3н,1-5н).

Термоперетворювачі можуть мати розбірну конструкцію, яка складається із захисної арматури з головкою і змінної термометричної вставки, або зварну нерозбірну конструкцію.

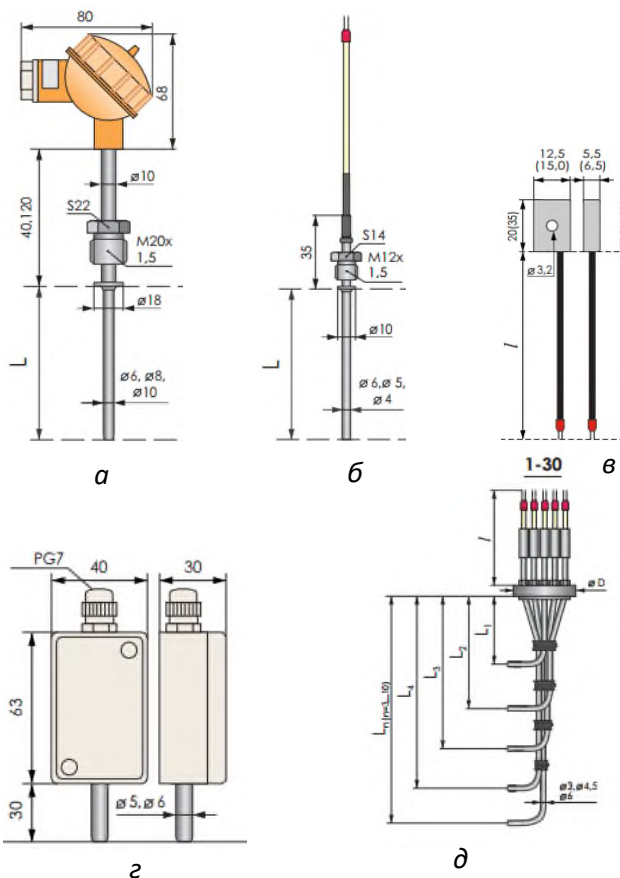


Рис. 8.2. Перетворювачі температури ПАТ "ТЕРА":

а, б – занурювальні; в – поверхневі; г – повітряні; д – багатозонні

Модель 1-13 являє собою кабель з мінеральною ізоляцією і оболонкою з нержавіючої сталі (так званий КТМС) діаметром 1,5 мм з неізованим спаєм і монтажними виходами. Застосування такої конструкції дозволяє виготовити гнучкий датчик довжиною до 3 м і мінімальною інерцією. Модель 1-14 для зручності

кріплення виконана у вигляді гвинта М6 або М8. Термоперетворювачі, рис. 8.2, а, мають вмонтовану в корпус плату перетворення "опір – струм" з уніфікованим виходом. Схема підключення – двопроводова і не вимагає окремого живлення.

Повітряні термоперетворювачі призначені для вимірювання температури як зовнішнього повітря, так і повітря всередині приміщень, вентиляційних шахт і т. п. Залежно від моделі вони виготовлятися з двома типами корпусів: пластикового і алюмінієвого. ПВП моделі 2-10, рис. 8.2, з, являє собою головку з АБС пластика, герметичного вводу для під'єднання кабелю і нержавіючої трубки, на кінці якої знаходиться відкритий платиновий, мідний або термісторний чутливий елемент. Робочий діапазон температур $-40...60\text{ }^{\circ}\text{C}$ для пластикового і $-50...100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для алюмінієвого корпусу. Показник інерції складає $8...10\text{ с}$.

Крім розглянутих, цим підприємством виготовляються **поверхневі** перетворювачі температури типів ТСМ, ТСП, а також ТХА, ТХК, ТМК, ТСТ, призначені для вимірювання температури поверхні твердих тіл у діапазоні робочих температур $-50...1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термоперетворювачі цієї групи відрізняються високою надійністю, малими розмірами, матеріалоемністю, поліпшеними показниками теплової інерції. Вони стійкі до вібрації і зберігають працездатність при вологості до 98 %. Термоперетворювачі рекомендуються для вимірювання температури поверхонь обмоток електродвигунів і генераторів, а також температури поверхонь труб будь-якого діаметра.

Платиновий або мідний чутливий елемент перетворювачів знаходиться в жорсткому алюмінієвому корпусі, покритому високотемпературною емаллю. Спосіб установки перетворювача на поверхню – на клей БФ-2, ЕПК-1 або ін. У моделі 2-8 платиновий або мідний чутливий елемент в алюмінієвому корпусі встановлюється на будь-яку поверхню за допомогою гвинта М3, рис. 8.2, в. Характеристики перетворювача: робочий діапазон вимірювань $-50...150\text{ }^{\circ}\text{C}$, показник теплової інерції не більше 0,5 с, маса не більше 6,5 г.

Багатозонний термоперетворювач (термопідвіска), рис. 8.2, д, застосовується для вимірювання градієнтів температур в ємностях, каналних печах, сушках і т. п. Він виконаний із спеціалізованого термопарного кабелю з оболонкою із нержавіючої сталі або

нікелевого сплаву. В якості чутливих елементів використовуються платиновий термометр опору (ТСП), а також термопари (ТХА) і термістори (ТНН). Термопідвіска з чутливим елементом ТСП (321S, 316S) забезпечує вимірювання температур у діапазоні $-50...500\text{ }^{\circ}\text{C}$, показник інерції $3...8\text{ с}$.

Компанія **Овен (Україна)** випускає терморезистори ДТС (на заміну відомим ТСП, ТСМ). Моделі ХХ4 виготовляються з кабельними виводами, ХХ5 — з комутаційною головкою. Характеристики перетворювачів наведені в табл. 8.4.

Таблиця 8.4.

Характеристики перетворювачів ДТС компанії Овен

Найменування характеристики	Значення характеристики			
	ДТСХХ4		ДТСХХ5	
Номінальна статична характеристика	50М; 100М	50П; 100П; Pt100; Pt500; Pt1000	50М; 100М	50П; 100П; Pt100; Pt500; Pt1000
Діапазон вимірюваних температур, °С	-50...+150	-50...+250	-50...+180	-50...+500
Клас допуску	В; С	А; В; С	В; С	А; В; С
Умовний тиск, МПа	10		10	
Робочий струм, не більше мА	5		5	
Інерційність, не більше с	10...30		10...30	
Чутливі елементи, шт.	1; 2		1; 2	
Схема з'єднання	2-, 3-, 4- проводова			
Ступінь захисту	IP54		IP54	
Матеріал арматури	стал 12Х18Н10Т (мод. 024, 044—184); латунь (мод. 014, 034, 204, 224)		стал 12Х18Н10Т	

Фірма **Heraeus Sensor Technology GmbH (Німеччина)** виготовляє **тонкоплівкові** резистори номіналом 100, 200, 500, 1000 і 2000 Ом, які застосовуються для вимірювання температури, вологості, витрати повітря, рис. 8.3. При виготовленні використовується технологія напилення платини на багатошарову основу, що дозволяє виробляти платинові резистори вкрай малих габаритів з мінімальною витратою платини. При цьому, як уже було сказано, зберігаються такі важливі властивості платини, як стійкість

до високих і низьких температур, термостабільність, малий коефіцієнт розширення, хімічна інертність і практично лінійна температурна залежність опору в широкому діапазоні.

Виготовляються тонкоплівкові платинові резистори наступних серій: С, L, М, М, Н із безкорпусним ЧЕ і з'єднувальними проводами; MR – з тонкоплівковим ЧЕ, укладеним у керамічну капсулу; SMD, SMD FC – із ЧЕ з поверхнями для пайки; TO92 і SOT223 – із ЧЕ, залитим у пластмасовий корпус і ніжкою для монтажу на друкованій платі.

Кожен тип сенсорів має свій температурний діапазон. Серія С – діапазон кріогенних температур: $-196...500$ °С. Номінальний опір датчиків цього типу 100 або 1000 Ом, $TKO = 1,3850$ град $^{-1}$. Серія L – діапазон низьких температур: $-50...+400$ °С. Номінальний опір цих датчиків 100, 500 або 1000 Ом, $TKO = 1,3850$ град $^{-1}$. Серії М (МН) – діапазон середніх температур: $-70...+600$ °С. Номінальний опір датчиків 100, 500, 1000 і 10000 Ом, $TKO = 1,3850$ і $1,3750$ град $^{-1}$.

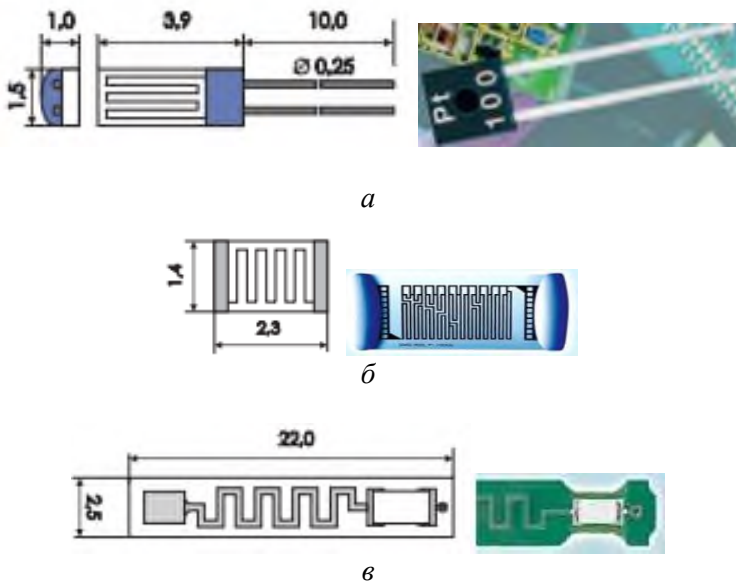


Рис. 8.3. Тонкоплівкові резистори:

а – M416; б – SMD 0805; в – PCB 2225 (розміри наведені у мм)

Діапазон датчиків серій Н (НА, HD, HL) – діапазон високих температур: $-70...+1000$ °С. Номінальний опір 100, 200 або 1000 Ом, $TKO=1,3850$ і $1,3770$ град⁻¹. Основні характеристики терморезисторів наведені у табл. 8.5.

Таблиця 8.5.

**Характеристики тонкоплівкових резисторів
Heraeus Sensor Technology GmbH**

<i>Назва моделі</i>	<i>Діапазон температур, °С</i>	<i>Показник інерції, с</i>	<i>Струм вимірювання, мА</i>
М 222	-70...500	10	0,1...1
М 416	-70...500	10,5	0,3...1
SMD 0603	-50...130	8	0,3
SMD 0805	-50...130	8	0,1...1
PCB 2225	-40...150	5	0,1...1

8.2.2. Термопары

Термопары є найбільш високотемпературними контактними датчиками. Вони діють за принципом термоелектричного ефекту Зеебека. Конструкція перетворювача містить два електроди, виготовлені з різнорідних матеріалів або сплавів, кінці яких з'єднані між собою за допомогою спаїв. При нагріванні одного зі спаїв у колі електродів генерується термо-е.р.с., пропорційна різниці температур спаїв. При різних температурах спаїв T_1 і T_2 між ними виникає термоелектрорушійна сила E :

$$E = \psi (T_1 - T_2),$$

де ψ – коефіцієнт термо-е.р.с.

Значення термо-е.р.с. найбільш поширених матеріалів у парі з платиною при температурі робочого спаю 100 °С та температурі вільних кінців 0 °С наведені в табл. 8.6. Термо-е.р.с. будь-якої пари термоелектродів може бути визначена як алгебраїчна різниця значень їх термо-е.р.с. у парі з платиною.

Таблиця 8.6.

Термо-е.р.с. деяких матеріалів у парі з платиною

<i>Матеріал</i>	<i>Термо-е.р.с., мВ</i>	<i>Матеріал</i>	<i>Термо-е.р.с., мВ</i>
Кремній	+44,8	Паладій	-0,57
Хромель	+2,4	Нікель	-1,2...-1,9
Залізо	+1,8	Алюмель	-1,7
Вольфрам	+0,8	Константан	-3,4
Мідь	+0,76	Копель	-4,5
Золото	+0,75	Молібденіт	-69...-104

Головною перевагою термопар є широкий діапазон вимірювання від -200 до +2500 °С, який безпосередньо залежить від використаних матеріалів. Наприклад, термопари із неблагородних металів забезпечують вимірювання температур до 1100 °С. Термопари із благородних металів (платинова група) – від 1100 до 1600 °С. Якщо необхідно провести заміри ще більш високих температур, використовуються жаростійкі сплави, основою яких є вольфрам.

До переваг термопар відносяться також простота, технологічність, висока відтворюваність результатів, лінійна температурна залежність, надійність і дешевизна. Основні недоліки – досить велика похибка та необхідність компенсації температури холодного спаю.

Для підключення термопари, яка часто розташовується на певній відстані від приладу, використовуються подовжуючі проводи. Для того, щоб не виникало похибки вимірювання через різницю температури вільного кінця термопари та температури точки під'єднання приладу, застосовуються компенсаційні проводи.

Компенсаційні проводи являються, по суті, продовженням вільних кінців термопари і розвивають у з'єднаннях за невеликих температур (до 100-150 °С) термо-е.р.с., рівну термо-е.р.с. термопари. Такі проводи випускаються з жилами перерізом 0,2-2,5 мм², з різною ізоляцією та різним покриттям. Кожному матеріалу жил присвоєно певний колір обмотки або зовнішнього шару

ізоляції. У деяких випадках під ізоляцією в проводі прокладається кольорова пізнавальна нитка.

Термопари типу ТПР, ТВР не потребують компенсації термо-е.р.с. вільних кінців, оскільки нижня межа вимірювання лежить значно вище температури в зоні під'єднання приладу. У виробничих умовах для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців використовують спеціальні електричні схеми.

ПАТ «ТЕРА» виготовляє поверхневі термопари типів ТМК, ТХА, ТХК, занурювальні термопари хромель-алюмель, хромель-копель, залізо-константан (ТЖК) та ін. Характеристики термопар ПАТ «ТЕРА» наведені у табл. 8.7.

Таблиця 8.7.

Термопари ПАТ «ТЕРА»

<i>Тип</i>	<i>Назва</i>	<i>НСХ</i>	<i>Діапазон, °С</i>
ТМК	Термопара мідь-константан	тип Т	-100...260
ТХК	Термопара хромель-копель	тип L	-50...600
ТЖК	Термопара залізо-константан	тип J	-50...600
ТХА	Термопара хромель-алюмель	тип E	-50...1100
ТНН	Термопара нікросил-нісил	тип N	0...1200
ТПП	Термопара платинародій-платина	тип S	0...1300
		тип R	
ТПР	Термопара платинародій-родій	тип B	600...1600

Відомим виробником термопар ТХА, ТЖК, ТХК (НСХ Pt100, Pt500, Pt1000, Pt2000, Pt10000), а також термоперетворювачів опору ТСМ (НСХ 50М, 100М), ТСП (НСХ 50П, 100П), напівпровідникових перетворювачів DS18B20 в Україні є ПП «НВФ «РегМік».

Цим підприємством виготовляються термоперетворювачі:

– **занурювальні** (з кабельними виводами і без них), які застосовуються для вимірювання температури навколишнього середовища, рідких, газоподібних і сипучих хімічно неагресивних середовищ, рис. 8.4, а, б;

- **поверхневі** з малими розмірами і малим показником теплової інерції для вимірювання температури поверхні твердих тіл, рис. 8.4, в;
- **повітряні** з мінімальним показником теплової інерції для вимірювання температури повітря у вентиляційних каналах, сховищах і т.п., рис. 8.4, г;
- **універсальні** з уніфікованими вихідними сигналами 4..20 мА, 0..10 В та інтерфейсом RS485, рис. 8.4, д.

Опір ізоляції названих перетворювачів 100 МОм, ступінь захисту – IP54.

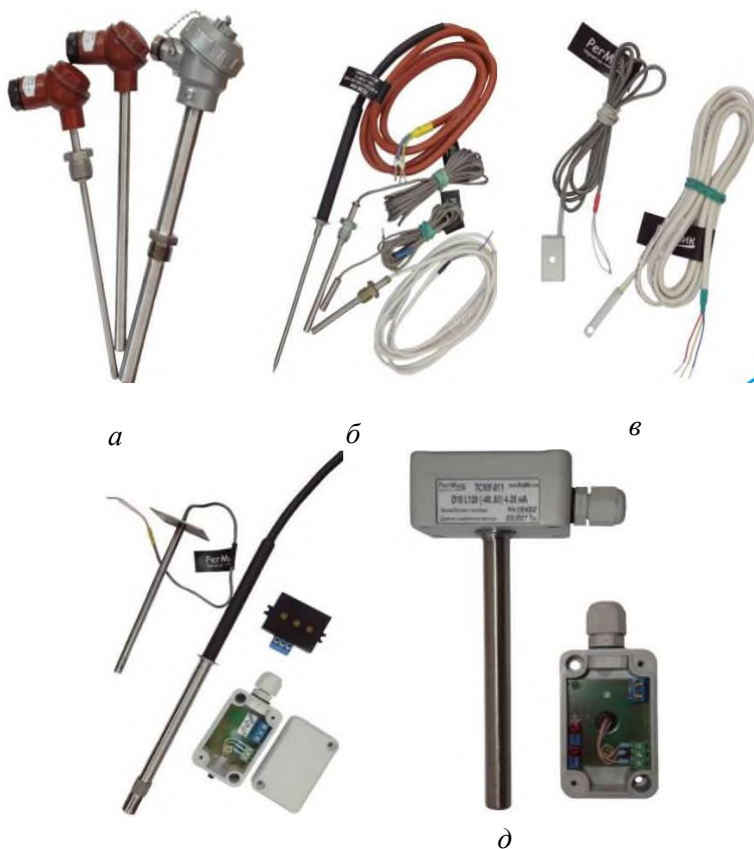


Рис. 8.4. Датчики температури «НВФ «РегМік»

8.2.3. Термістори

Термісторами називають напівпровідникові резистори, активний електричний опір яких залежить від температури. Перший термістор був створений у 1833 р. Майклом Фарадеем, який виявив напівпровідникову поведінку сульфиду срібла. Перший патент (США) на термістор отримав Самуель Рубен у 1930 р.

Вплив температури на електрофізичні параметри напівпровідників, в основному, проявляється у зміні концентрації носіїв заряду, що приводить до відповідної зміни електричної провідності. Температурна залежність опору від температури описується формулою:

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}},$$

де A і B – постійні коефіцієнти. Напівпровідникові резистори, опір яких зі збільшенням температури зростає, називають **позисторами**, (або РТС-термісторами). У термісторів залежність R_T від T є зворотною: зі збільшенням температури їх опір зменшується за експоненціальним законом. Тому їх називають ще НТС-термісторами.

Терморезистори виготовляють у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб, намистинок і тонких пластинок переважно методами порошкової металургії, рис. 8.5. Їхні розміри можуть варіюватися в межах від 1-10 мкм до 1-2 см.

Напівпровідникові терморезистори відрізняються від металевих великими значеннями ТКО, меншими габаритами й інерційністю, а також досить високою чутливістю (на порядок і більше ніж у металевих).

Чутливі елементи для термісторів виготовляються на основі різних оксидів металів MnO , NiO , CoO , CuO . Найбільш поширеними є терморезистори КМТ-1, рис. 8.5, а, КМТ-4, ММТ-1, ММТ-4 та ін. У цих позначеннях перші букви означають тип напівпровідника, з якого виготовлено чутливий елемент (наприклад, КМ – кобальто-марганцевий, ММ – мідно-марганцевий, ТРА-1 – на основі монокристалу синтетичного алмазу). Цифрами умовно позначають тип конструктивного оформлення: КМТ-1, КМТ-4, ММТ-1, ММТ-4 – стержневі; СТ4, ТРА-1 – бусинкові, ПТ,

ПТ-1, ТР – дискові. Характеристики окремих термісторів наведені в табл. 8.8.

Таблиця 8.8.

Основні характеристики термісторів

<i>Тип</i>	<i>Межі номінальних опорів</i>	<i>Допустиме відхилення, %</i>	<i>Постійна "В", К</i>	<i>ТКО при температурі 20 °С, % на 1°С</i>	<i>Діапазон робочих температур, °С</i>	<i>Постійна часу, с</i>	<i>Максимальна потужність, при 20°С</i>
KMT-1	від 22 кОм до 1 Мом	±20	від. 3600 до 7200	від. 4,2 до 6,4	-60...180	85	1000
ММТ-1	від. 22 кОм до 1 Мом	±20	від. 2960 до 4300	від. 2,4 до 5,0	-60...125	85	600
KMT-4	від. 22 кОм до 1 Мом	±20	від. 3600 до 7200	від. 4,2 до 6,4	-60...125	115	650
ММТ-4	від. 22 кОм до 1 Мом	±20	від. 2960 до 4300	від. 2,4 до 5,0	-60...125	115	560
KMT-8	від. 100 Ом до 10 кОм	±10; ±20	від. 3600 до 7200	від. 4,2 до 6,4	-60...70	900	600
ММТ-8	від. 1 Ом до 1 кОм	±10; ±20	від. 2060 до 2920	від. 2,4 до 3,4	-60...70	900	600
СТ4-16	10 кОм...27 кОм	±5; ±10;	2720...3960	3,45...4,45	-60...155	30	150
ПТ, ПТ-2	80 Ом...400 Ом	±20	3800...4100	4,4...4,8	-60...150	-	
ТР-4	1 кОм	±20	1600...1960	1,8...2,2	-60...200	3	70
ТРА-1	0,01...10000 кОм	±5; ±10; ±20	300...2500	0,2...2,3	-200...+350	1	500
СТ6-4Б (позитрон)	100...400 Ом			15	-60...125	40	0,8

Поряд з названими вище перевагами в термісторів є і недоліки. Один з них – це нелінійність характеристик. У робочому діапазоні температур ТКО термістора може змінювати свою величину на кілька порядків, а в межах однієї конфігурації він може відрізнятись майже в два рази. Номінальні значення опорів навіть для одного типу термісторів можуть відрізнятись на 10...20 %, що обмежує їх взаємозамінність. Ще одним недоліком недорогих термометрів цього типу є те, що вони, незважаючи на проведення в процесі

виготовлення штучного старіння, мають низькою часову стабільність і відтворюваність параметрів.

ПАТ "ТЕРА" виготовляє термістори ТСТ для вимірювання температур у діапазоні $-40...120\text{ }^{\circ}\text{C}$ з номінальною статичною характеристикою типу 10k NTC FT003. Основні характеристики термісторів наведені в табл. 8.9.

Таблиця 8.9.

Характеристики термісторів «ТЕРА»

<i>T_{тип}</i>	<i>НСХ</i>	<i>R₂₅, Ом</i>	<i>Граничне відхилення R₂₅, %</i>	<i>B₂₅/B₈₅</i>	<i>Граничне відхилення B₂₅/B₈₅, %</i>
TCT 1-4-10K-NTC	10k NTC FT003	1000	±1	3970K	±1

На рис. 8.5, б, наведено термістор NTC 10K ОНМ компанії **EPICOS Inc.** (Німеччина) з такими основними характеристиками: діапазон робочих температур $-55 - 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, опір – $10\text{ кОм} \pm 5\%$ при температурі $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, відношення $B_{25}/B_{100} - 4300\text{K} \pm 3\%$, потужність 450 мВт , корпус – литий диск.

На ринку контрольно-вимірювальної техніки і засобів автоматизації останнім часом активно просуваються цифрові датчики температури. Такі датчики являють собою мікросхему, що містить у собі напівпровідниковий чутливий елемент і перетворювач його аналогового сигналу у вихідний цифровий сигнал. Одним з провідних виробників цифрових чутливих елементів є фірма **Dallas Semiconductor (США)**. Елементи цієї фірми використовуються ПАТ "ТЕРА" для виробництва цифрових датчиків температури. Основними перевагами цих датчиків є зручна схема підключення, цифровий вихідний сигнал і невисока ціна, а недоліками – слабка завадостійкість.

Фірма **Microchip Technology Inc. (США)** випускає програмовані датчики температури серій TC, TCN та ін. Мікросхема TC620 є програмованим датчиком температури і призначена для управління температурою з можливістю програмування контрольованої температури. В одному корпусі мікросхеми КМОП об'єднані: датчик температури (терморезистор); генератор опорної напруги; два компаратори; тригер. Вона має два логічних виходи "HIGH" та

"LOW", які програмуються зовнішніми резисторами, та додатковий вихід "CONTROL". Він встановлюється, коли температура перевищує запрограмований рівень "HIGH", і скидається, коли температура спадає нижче запрограмованого рівня "LOW".

Мікросхема TC621 забезпечує ті ж вихідні функції за винятком того, що логічні рівні на виходах "LOW" і "HIGH" інвертовані. На відміну від TC620, до TC621 підключається зовнішній терморезистор. Цю мікросхему зручно використовувати для дистанційного контролю температури.

Мікросхеми TC620/TC621 випускаються в корпусах 8-pIN SOIC та 8-pIN PDIP і можуть застосовуватися в залежності від виконання в температурному діапазоні від -40 до +125 °C. Напруга живлення мікросхеми може бути від 4,5 до 18 В.

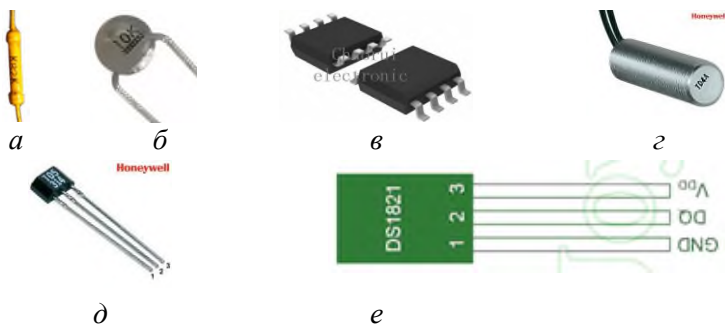


**Рис. 8.5. Датчики температури
KMT-1, NTC 10K OHM, TC74, DS1821, TD4A, TD5A**

Датчик TC74, рис. 8.5, в, являє собою перетворювач температури з послідовним портом, який формує сигнал на виході INT/CMPTTR. Вихід INT/CMPTTR може бути запрограмований як вихід компаратора для роботи термостата, або як вихід запиту переривання від температури. Вбудований АЦП забезпечує перетворення температури у восьмирозрядний двійковий код. Роздільна здатність АЦП – 1 °C, номінальна швидкість перетворення 8 – виборок/с.

Програмований температурний датчик TCN75 формує сигнал на виході INT/CMPTTR тоді, коли зовнішня температура перевищує запрограмоване граничне значення. Максимальна гранична

температура складає 80 °С, гістерезис 5 °С, який також можна програмувати. Зв'язок з TCN75 здійснюється через двопроводову шину, сумісну із стандартним протоколом I²C. Перетворювачі виготовляються в корпусах 8-Pin SOIC, 8-Pin PDIP, 8-MSOP і можуть застосовуватися в температурному діапазоні від -55 до +125 °С.

Компанією **Honeywell (США)** виготовляються мініатюрні датчики температури з швидкісним відгуком та лінійними статичними характеристиками для вимірювання температури рідини (TD4A) та повітря (TD5A), рис. 8.5, з, д. Температурний діапазон вимірювань від -40 до +150 °С, номінальний опір складає 2 кОм при температурі 20 °С. Максимальна напруга живлення постійним струмом 10 В. Для з'єднання використовуються два термінали (TD4A) або три голчастих виводи (TD5A). Точність перетворення складає $\pm 0,7$ °С при температурі 20 °С та $\pm 2,5$ °С у діапазоні вимірювання. Розміри корпусу (мм) 3×8-24 UNF-2A, L=6 (TD4A) та 4,06×3,0; L=15 (TD5A). Перетворювачі дозволяють проводити їх взаємозаміну без перекалібрування.

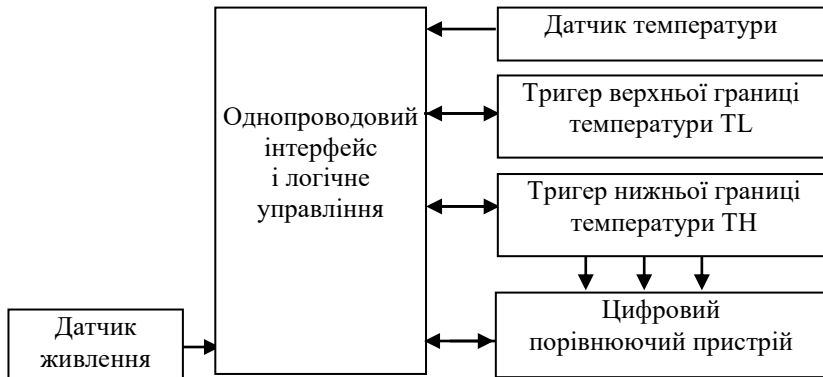


Рис. 8.6. Функціональна схема термостата DS1821

Однією з нових розробок компанії **Dallas Semiconductor (США)**, яку в Україні представляє підприємство IMRAD, м. Київ, є **програмований цифровий термостат DS1821**. Термостат призначений для вимірювання температури, а також для двопозиційного регулювання температури і сигналізації. Зовнішній

вигляд DS1821 і його блок схема показані на рис. 8.5, *е*, і рис. 8.6. Призначення виводів DS1821: 1 (GND) – загальний; 2 (DQ) – вхід/вихід для операцій програмування або вихід термостата при двопозиційному регулюванні й сигналізації; 3 (VDD) – напруга живлення +5 В. Прилад виготовляється в трьох видах корпусів PR35, TO220, 8-pin SOIS.

Термостат може працювати в режимах вимірювання температури, двопозиційного регулювання температури і сигналізації, та в режимі програмування. Зв'язок з DS1821 здійснюється через вихід DQ. При програмуванні використовуються команди, основні функції яких такі. Запис та зчитування температури, запис верхнього TH і нижнього TL порогів температури при двопозиційному регулюванні та сигналізації, початок та кінець перетворень температури, перехід із однопроводового режиму в термостатний і навпаки.

У однопроводовому режимі вивід DQ може бути з'єднаний з мікропроцесором, що дозволяє записати граничні значення температури TH і TL та встановити зону неоднозначності термостата. Ці значення температури визначаються користувачем і запам'ятовуються у довгостроковій пам'яті пристрою.

У режимі вимірювання DS1821 може вимірювати температуру від -55 до +125 °C з дискретністю 1 °C за допомогою вбудованого датчика. Зчитування температури здійснюється у 8-бітовому двійковому коді. Результати вимірювань послідовно передаються по однопроводовому інтерфейсу відповідно до протоколу передачі.

Таблиця 8.10.

Рекомендовані параметри DS1821

<i>Параметр</i>	<i>Символ</i>	<i>Мін., В</i>	<i>Макс., В</i>
Напруга	VDD	2.7	5.5
Виведення даних	DQ	-0.5	5.5
Логічна 1	VIH	2.0	VDD+0.3
Логічний 0	VIL	-0.3	+0.8

У термостатному режимі вивід DQ стає виходом термостата. Цей вивід з відкритим стоком перейде в активне положення, коли температура DS1821 перевищить установлену границю TH, і буде

залишатися активним доти, поки температура не понизиться до запрограмованої нижньої границі TL. У табл. 8.10 наведені рекомендовані параметри постійного струму.

Термостат не потребує додаткових зовнішніх пристроїв, має малу постійну часу (максимальний час перетворення 1 с), невеликі масу та розміри.

В якості напівпровідникових термодатчиків можуть використовуватись також діоди, транзистори та інші напівпровідникові елементи. Їх застосування для вимірювання температури ґрунтується на вольт-амперній характеристиці діода, відомій як рівняння Шоклі або рівняння ідеального діода, а саме:

$$I = I_o [e^{(qV/kT)} - 1],$$

де: I_o – струм насичення (чи струм витоку); q – заряд електрона; V – напруга, що прикладається до діода; k – постійна Больцмана; T – температура, K .

Зміна будь-якої величини, яка викликає зміну приведеного виразу, може бути використана для зміни струму, що протікає через р-п перехід. Так, діод можна використати як перетворювач температури, оскільки струм витоку напівпровідника змінюється в залежності від температури. Значення струму зростає з температурою за експоненціальним законом з коефіцієнтом порядку $10\ \% \cdot K^{-1}$. Струм витоку кремнію складає приблизно 25 нА при температурі 25 °С і збільшується до 6,5 мА при температурі 150 °С.

Однак, діапазон температур, у межах яких можливе таке використання, досить обмежений. Верхня температурна межа застосування визначається температурою теплового пробоя напівпровідника.

Найчастіше для вимірювання температури використовується пряма напруга на р-п переході при майже постійному струмі емітера. Тут існують суттєві переваги: лінійність температурної залежності, широкий діапазон робочих температур, висока стабільність. Зміна прямої напруги складає близько $2,5\ mV \cdot K^{-1}$. При підвищенні температури транзисторів р-п-р типу напруга емітер-база з області позитивних значень переходить у область негативних.

Серед відомих напівпровідникових датчиків: термодіоди Д7А–Д7Ж, термотранзистори МП40, П14, Д237Г та ін. Пропорційна залежність напруги на транзисторах від абсолютної температури дає можливість реалізувати досить точний датчик. Переваги таких датчиків – простота, невеликі похибки і низька вартість. Крім того, ці датчики можна формувати прямо на кремнієвій підкладці. Все це робить напівпровідникові датчики дуже затребуваними. Характеристики перетворювачів температури окремих провідних зарубіжних виробників наведені в табл. 8.11.

Таблиця 8.11.

Характеристики перетворювачів температури

Назва (тип)	Виробник	Вимірювана температура, °C	Похибка	Тип корпусу	Тип вихідного сигналу
AD22100KT	Analog Devices	0 ~ 100	±0.5	TO-92	Voltage
AD592AN	Analog Devices	0 ~ 125	±1.5°C	TO-92	Current
ADT7301ARTZ-500RL7	Analog Devices	-20 ~ 100	±1°C	SOT-23-6, SOT-6	Internal
TMP01ES	Analog Devices	-55 ~ 125	±0.5°C	8-SOIC	Open Collector
LM35CZ/NOP	National Semiconductor	-20 ~ 125	±1°C	TO-92	Voltage
LM26CIM5-ZHA	National Semiconductor	-20 ~ 125	±3°C	SC-74A, SOT-753, SOT-23-5	Active Low/Open Drain, Voltage
LM94022BIM	National Semiconductor	-50 ~ 150	±2.7°C	6-TSSOP, SC-88A, SOT-353, SC-70-5	Push-Pull
DS18S20Z+	Maxim	-55 ~ 125	±0.5°C	SOIC-8-3.9	Digital
DS1631S+	Maxim	-55 ~ 125	±2°C	SOIC-8-5.3	Internal
MAX6576ZUT+T	Maxim	-40 ~ 125	±0.8°C	SOT-23-6, SOT-6	Clock
700-102AAB-B00	HONEYWELL	-70 ~ 500	±0.12%	аналоговий, RTD, 1000	NONE
700-101BAA-B00	HONEYWELL	-70 ~ 500	±0.06%	аналоговий, RTD, 100	NONE
HEL-707-T-0-12-00	HONEYWELL	-75 ~ 540	±0.2%	аналоговий, RTD, 100	NONE
B57301K0103A-001	EPCOS	-30 ~ 110	±2%	см. datasheet	NONE

Продовження таблиці 8.11.					
NTC-K45-1.0(B57045K)	EPCOS	-20 ~ 125	±10%	см. datasheet	NONE
LM335AZ	STMicroelectronics	-40 ~ 100	±1%	TO-92	Voltage
STLM20W87F	STMicroelectronics	-55 ~ 130	±1.5°C	6-TSSOP,SC-88A,SOT-353,SC-70-5	Voltage
TC6501P125VCT	Microchip Technology Inc	0 ~ 125	±0.5°C	см. datasheet	Active Low/Open Drain
MCP9700A-E/TO	Microchip Technology Inc	-40 ~ 125	±1°C	TO-92	Voltage
MCP9509CT-E/OT	Microchip Technology Inc	-40 ~ 125	±0.5°C	SC-74A,SOT-753,SOT-23-5	Open Drain
TMP20AIDCKT	Texas Instruments	-55 ~ 130	±2.5°C	6-TSSOP,SC-88A,SOT-353,SC-70-5	Voltage
TMP103AYFFT	Texas Instruments	-40 ~ 125	±1°C	4-UFPGA,DSBGA	Digital

8.2.4. Безконтактні вимірювачі температури

Температурні вимірювальні перетворювачі можна розділити на розглянуті вище контактні та безконтактні. Безконтактні перетворювачі використовують принцип вимірювання потужності інфрачервоного випромінювання об'єкта і використовуються для вимірювання температури у важкодоступних місцях, високої температури (від 1500 до 3000 °C), температури рухомих, прозорих та ін. об'єктів.

Принцип роботи інфрачервоних (ІЧ) датчиків температури заснований на тому, що будь-яке тіло при температурі, вищій від абсолютного нуля, випромінює електромагнітну енергію. При низьких температурах це випромінювання відбувається в інфрачервоному діапазоні, при високих температурах частина енергії випромінюється вже у видимій частині спектру.

Інфрачервоне випромінювання також називають «тепловим випромінюванням», оскільки інфрачервоне випромінювання від нагрітих предметів сприймається шкірою людини як відчуття тепла. Теплове випромінювання в основному припадає на ділянку спектра

від 0,74 мкм до 1000 мкм. Різні ділянки інфрачервоного спектру використовуються для вимірювання температури в різних діапазонах. Прикладом теплового випромінювання є світло від лампи розжарювання.

Потужність випромінювання безпосередньо пов'язана з температурою об'єкта. Згідно закону Стефана-Больцмана повна об'ємна густина рівноважного випромінювання u і повна випромінювальна здатність S абсолютно чорного тіла пропорційні четвертій степені його температури:

$$u = \alpha T^4; \quad S = \sigma T^4$$

де α – деяка універсальна константа, T – температура абсолютно чорного тіла, S – повна випромінювальна здатність, σ – постійна Стефана-Больцмана $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

При цьому закон Стефана-Больцмана описує загальну кількість випромінюваної енергії. Розподіл енергії по спектру випромінювання описується формулою Планка. Він показує, що навіть при одній температурі, випромінювання складається з безлічі випромінювань, що мають різну довжину хвиль, але при цьому спектр випромінювання має єдиний максимум. Положення (частота) максимуму в спектрі залежить від температури об'єкта і визначається законом зміщення Віна, який можна подати наближеною формулою:

$$\lambda_{\max} \cdot T \approx 3000 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Із формули видно, що при підвищенні температури область випромінювання зміщується в область високих частот.

Т. ч., із законів Стефана-Больцмана і Планка випливає, що чим вища температура тіла, тим більша потужність випромінювання, і тим коротша його довжина хвилі $\lambda_{\max}$. При зміні температури об'єкта потужність теплового випромінювання на заданій частоті (наприклад робочій частоті датчика) змінюється.

Ще одна особливість теплового випромінювання пов'язана із законом Кірхгофа, згідно із яким відношення випромінювальної здатності будь-якого тіла до його поглинальної здатності для даної частоти при даній температурі однакове для всіх тіл і не залежить

від їх форми і хімічної природи. Але для різних температур це відношення різне навіть для одного тіла. Чорне тіло поглинає все падаюче на нього випромінювання, отже, його коефіцієнт випромінювання дорівнює одиниці. У той же час, всі реальні тіла не є чорними, а «сірими» і мають здатність до поглинання меншу одиниці, а отже, і коефіцієнт їх випромінювання також є меншим одиниці.

Ця особливість описується коефіцієнтом випромінювання, який визначається відношенням енергії, випромінюваної об'єктом при заданій температурі, до енергії, випромінюваної абсолютним випромінювачем при тій же температурі. Коефіцієнти випромінювання коливаються в межах від 0,1 до 1,0. Наприклад, для матеріалів: алюміній, золото, вольфрам, метал здатність відбивання буде 70-80 %, а для паперу, води, цегли 10-20 %. Значення коефіцієнта випромінювання (EMS, Emissivity) для деяких матеріалів наведені в табл. 8.12.

Таблиця 8.12.

Значення коефіцієнта випромінювання EMS

<i>Матеріал</i>	<i>Коефіцієнт EMS</i>	<i>Матеріал</i>	<i>Коефіцієнт EMS</i>
Азбестова тканина	0,7	Мідь полірована	0,01
Алюміній полірований	0,05	Мідь окислена	0,65
Алюміній окислений	0,25	Резина	0,93
Бетон	0,54	Папір білий	0,9
Бронза полірована	0,1	Папір чорний	0,94
Бронза пориста	0,55	Скло	0,82
Вода	0,88	Сніг	0,8
Залізо поліроване	0,28	Сталь катана	0,56
Залізо прокат	0,77	Сталь іржава	0,69
Золото поліроване	0,02	Фарфор	0,92
Лід	0,97	Цегла	0,85

Для вимірювання температури використовуються два типи *пірометрів* (див. п. 8.1), принцип дії яких оснований на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Це *радіаційні термометри*, у яких вимірюється потужність (інтенсивність) теплового випромінювання в одній смузі спектру випромінювання, і за результатами цих вимірювань обчислюється значення температури.

Також існують *пірометри спектрального відношення* (колірні), які мають кілька приймачів, що працюють у різних частотних діапазонах спектру. Їх принцип роботи ґрунтується на залежності енергетичної яскравості від температури відразу в декількох областях спектру теплового випромінювання.

Діапазон вимірювань температур безконтактними датчиками складає від $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основні переваги вимірювачів: малий час відгуку (це найшвидкісніші датчики температури), вимірювання без безпосереднього контакту з об'єктом (дистанційні вимірювання), можливість вимірювання температури рухомих об'єктів, вимірювання високих температур, де інфрачервоні датчики заходяться поза конкуренцією, вимірювання у важкодоступних і небезпечних місцях, малі розміри і великий термін служби. Основні їх недоліки: чутливість до забруднення, впливу стороннього світла і світлового фону, а також до зовнішньої температури. Розглянемо більш детально характеристики існуючих безконтактних датчиків.

8.2.5. Пірометричні вимірювачі

Японська компанія **OMRON** виготовляє ІЧ вимірювальні перетворювачі температури серії **D6T** для діапазону температур $5\ldots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Датчики виготовляються у вигляді невеликих друкованих плат розміром $18\times 14\text{ мм}^2$, рис. 8.7, а, на яких встановлено герметичний корпус з самим датчиком, інтерфейсний контролер і роз'єм для підключення. Датчик складається з кремнієвої лінзи, яка фокусує теплове випромінювання на масив чутливих термопарних комірок і спеціалізованої схеми, що здійснює обробку сигналів.

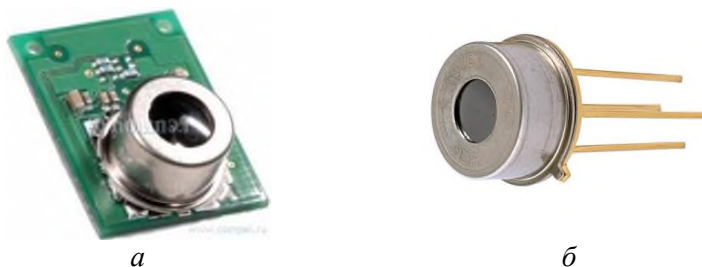


Рис. 8.7. Датчики температури:
а – OMRON D6T-8L-06; б – Thermopiles TS118-3

Чутливі комірки в моделі датчика **D6T-44L-06** виконані у вигляді матриці 4×4 , а в моделі **D6T-8L-06** – у вигляді матриці 1×8 . Матриця формує інформацію про розподіл температури на площині, за яким, наприклад, можна визначити положення об'єкта (або кількох) у контрольованому приміщенні, теплові аномалії обладнання, місця локальних перегрівів. Висока швидкість реакції дозволяє також відслідковувати переміщення об'єктів або зміну їх температури.

Характеристики датчиків: точність вимірювання $\pm 1,5$ °C, вихід цифровий, зв'язок за стандартним протоколом I²C зі швидкістю до 100 Кбіт/с. Напруга живлення 4,5...5,5 В; струм живлення 5 мА. Вага датчика 4,746 г.

Фірма **HL-Planartechnik GmbH (Німеччина)** пропонує сенсори інфрачервоного випромінювання **Thermopiles TS118** моделей 1-5, 10, рис. 8.7, б. Стандартні сенсори виготовляються за схемою «один-елемент-детектор» або «вісім-елементів-рядок». За рахунок зміни оптичних компонентів фільтра і лінзи датчики можуть бути індивідуально налаштовані на певний діапазон спектру (довжину хвилі) випромінювання. Сенсори мають дві пари виходів. На одній парі вимірюється вихідна напруга сенсора, друга пара використовується для під'єднання терморезистора (Nickel RTD або NTC) при контактному вимірюванні температури навколишнього середовища.

Параметри датчика TS118-3 такі. Діапазон робочих температур - 20 + 100 °C. Постійна часу 20 ± 5 с. Поле зору 120°. Фільтр 8-14 μm . Зона амортизатора $0,7 \times 0,7$ мм².

ГСКТБ Інституту фізики НАН України серійно випускає пірометри спектрального відношення (двоколірні) ДПР-1, рис. 8.8, призначені для безконтактного вимірювання температури нагрітих об'єктів (металів, сплавів, скла, пластмас та ін.) у діапазоні від 300 до 3500 °С з точністю ± 5 °С у всьому вимірюваному діапазоні на відстанях від 0,4 до 50 м.



Рис. 8.8. Пірометр ДПР-1

Вимірювання температури об'єктів здійснюється незалежно від їх випромінювальної здатності (значення коефіцієнта EMS). Методика вимірювання базується на використанні залежності від температури відношення енергетичних яскравостей у двох спектральних зонах. Розрахунок цього відношення здійснює мікроконтролер. Дані про температуру навколишнього середовища та аналіз результатів пікового ІЧ детектора заносяться в програму, за якою мікроконтролер забезпечує розрахунок і корекцію результатів вимірювань.

Прилад обладнаний лазерним цілевказівником. Результати вимірювань виводяться на роз'єми в аналоговій формі у вигляді струму від 4 до 20 мА, у цифровій формі – через інтерфейс RC485 або RC232 та індикуються на цифровому дисплеї. Для зв'язку використовується протокол, сумісний з системою команд функціональних модулів серії I-7000 фірми ICP DAS.

Пірометри забезпечують: незалежність результатів вимірювання від стану навколишнього середовища (забруднення сторонніми газами, водними парами, пилом тощо); незалежність точності вимірювання від стану поверхні об'єкта (наявність часткового забруднення оксидами, шлаками і т. ін.); можливість вимірювання

температури рухомих, віброуючих об'єктів. Пірометри сертифіковані й занесені до Державного реєстру України.

Пірометр Testo 845 (Testo SE & Co. KgaA, Німеччина) призначений для точних вимірювань температури на коротких і великих (до 20 м) відстанях, рис. 8.9, *а*. Він оснащений хрестоподібним чотириточковим лазерним цілевказівником і оптикою зі змінною фокусною відстанню від 1:1 до 75:1. При цьому, наприклад, діаметр вимірюваної області складає 1 мм з відстані 70 мм (короткий фокус) або 28 см з відстані 10 м (на довгому фокусі 75:1). Швидкість проведення вимірів становить 10 показань за секунду, точність $\pm 0,75$ °С. При вимірюваннях на дисплеї приладу відображаються максимальне/мінімальне/миттєве значення. Додатково до приладу можна підключити зонд для контактних вимірювань температури поверхні, повітря, рідин і желеподібних середовищ.



Рис. 8.9. Пірометри:

а – testo 845, б – Benetech GM 320-EN-01, МТ4004

Testo 845 має опцію з вбудованим модулем вологості для одночасного вимірювання відносної вологості повітря, поверхневої вологості й розрахунку поверхневої точки роси. При високій (100 мс) швидкості сканування поверхні він дозволяє дистанційно виміряти температуру поверхні (наприклад, стіни), розраховувати точку роси на поверхні й визначити вологі місця. При значеннях відносної вологості й точки роси, які перевищують допустимі,

прилад автоматично подає звуковий сигнал і виводить відповідне повідомлення на дисплей.

Пірометр оснащений такими функціями документування даних:

- вбудованою пам'яттю на 90 вимірювань;
- друком на портативному принтері testo;
- передачею даних на ПК в режимі он-лайн або з пам'яті приладу за допомогою ПЗ Easy Climate.

Технічні характеристики пірометра testo 845 наведені в табл. 8.13.

Таблиця 8.13.

Технічні характеристики пірометрів

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>		
	<i>Testo 845</i>	<i>GM320- EN-01</i>	<i>MT4004</i>
Діапазон ІЧ вимірювань, °C	-35...+950	-50...+330	-33...+220
Діапазон контактних вимірювань, °C	50...+600		
Діапазон вимірювань відносної вологості, %	0...100		
Похибки вимірювань:			
температури ІЧ, °C	±0,75	±1,5	±2
контактним зондом, °C	±2,		
відносної вологості, %	±2		
Швидкодія, с	0,15	1	1
Вбудована пам'ять, кількість вимірів	90		
Оптика	75:1	12:1	
Оптика	1:1		
Робоча температура, °C	-20...+50		0...+50
Розміри, мм	155x58x195	140x85x35	86,5x9,4x14,8
Вага, г	465		40

Пірометр GM320-EN-01 (Benetech, Китай) – це портативний вимірювач пістолетного типу з лазерним показником для вимірювання температури з роздільною здатністю 0,1 °C.

Коефіцієнт теплового випромінювання фіксований – 0,95. Тип візуалізації результатів вимірювань – текстово-цифровий, електроживлення – від батареї 1,5 В типу AAA. Забезпечується автоматичне вимкнення термометра через 20 с. Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 8.13, зовнішній вигляд – на рис. 8.9, б.

Пірометр GM900 (Benetech) є більш досконалим і забезпечує налаштування коефіцієнта теплового випромінювання (EMS) матеріалів у діапазоні від 0,1 до 1 з кроком 0,01. Він має функції лазерного наведення за однією точкою, утримання мішені, вибір MAX/MIN/AVG/DIF, HIGH/LOW, сигналізацію TEMPERATURE ALARM, вбудовану пам'ять на 12 вимірів.

Інфрачервоний термометр DADGET MT4004 (Finder Technology Ltd., Китай). Для безконтактного експрес-аналізу температури об'єктів на виробництві та в побуті може бути корисним мініатюрний портативний інфрачервоний термометр DADGET MT4004, рис. 8.9, в. Він призначений для вимірювання температури предметів і поверхонь, визначення ступеню заморозки або нагрівання продуктів, температури води тощо.

В якості чутливого елемента в термометрі використовується мініатюрний ІЧ-детектор типу TPS333 PERKINELMER, що працює в діапазоні від 5 до 14 мкм. Коефіцієнт випромінювання фіксований – 0,95, роздільна здатність 0,1 °С. Максимальна точність вимірювання досягається при мінімальній відстані від об'єкта.

Прилад живиться від батареї 1,5 В типу LR44, L1154 чи А76. Забезпечується індикація розряджання батареї і автоматичне вимкнення через 15 с. Технічні характеристики пірометра MT4004 наведені в табл. 8.13.

Компанія TROTEC (Німеччина) виготовляє ряд пірометрів для вимірювання високих температур з роздільною здатністю 0,1 °С, зокрема, таких. **BP15**, діапазон вимірювання -30...+260 °С, оптична роздільна здатність 8:1, час відгуку < 1 с; **BP21**, діапазон вимірювання -35...+800 °С (рис. 8.10, табл. 8.14), **TP7**, діапазон вимірювання -50...+1000 °С (рис. 8.10, табл. 8.14), **TP10**, діапазон вимірювання -50...+1850 °С, оптична роздільна здатність 75:1, час відгуку < 150 мс, додаткова можливість вимірювання температури контактним способом термопарою; пірометр з вбудованим гігрометром **BP25** для вимірювання температури, вологості повітря

і точки роси в діапазонах: температура $-50...+260\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість $0...100\text{ }\%$, точка роси $-30...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт теплового випромінювання пірометра $0,95$, час відгуку $< 150\text{ мс}$.



Рис. 8.10. Пірометри TROTEC TP7 і BP21

Пірометри мають функції: макс./мін. температури; звукової сигналізації перевищення встановлених макс./мін. значень; регульований коефіцієнт EMS; зберігання результатів вимірювань; підсвітки дисплея, ввімкнення/вимикання лазера; автоматичного відключення через 10 с. Подвійний лазер автоматично візуалізує розмір області вимірювань у залежності від відстані вимірювання. Прилади відповідають стандартам EN60825-1, EN610006-32001, EN6100020016-1 і вимогам існуючих європейських норм.

На рис. 8.11 показаний пірометричний термометр **DT-8855 (SHENZHEN EVERBEST MASHINERY INDUSTRY, Китай)**, призначений для вимірювання температури поверхні в діапазоні $-50...1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ з роздільною здатністю $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пірометр має вхід для підключення контактного датчика (термопари ТХА) для вимірювання температур в діапазоні $-50...1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ і аналоговий вихід ($1\text{ мВ}/^{\circ}\text{F}$). Для реєстрації результатів вимірювань DT-8855 оснащений опцією бездротового зв'язку з комп'ютером через інтерфейс Wireless USB (433 МГц, до 30 м). Характеристики пірометра наведені в табл. 8.14.



Рис. 8.11. Пірометричний термометр DT-8855

Термометр зберігає результати 20 вимірювань і забезпечує автоматичне вимкнення через 7 с. Живиться пірометр напругою 9 В від батареї Крона.



Рис. 8.12. Пірометр FLUS IR-866 U

Пірометр IR-866U (Flus Technology, Китай) використовується для вимірювання температур від -50 до $+2250$ °C будь-яких полірованих і матових тіл з великих відстаней. Він забезпечує можливість встановлення рівнів тривог при високій і низькій температурі та індикацію максимального, мінімального і диференціального значень температури. Пірометр обладнаний лазерним цілелазівником, підсвіткою дисплея, забезпечує індикацію низького заряду батарейки і автоматичне вимкнення через 20 с. Передбачена можливість передачі результатів вимірювань на ПК через USB-з'єднання. Живлення – 9 В, батарея Крона. Пірометр показаний на рис. 8.12, характеристики наведені в табл. 8.14.

Аналогом даного пірометра є моделі IR-861U, IR-862U, IR-863U та IR-865U, які працюють в менш широкому температурному діапазоні.

Таблиця 8.14.

Характеристики лазерних пірометрів

Параметр Тип	GM 320	GM900	TP7	BP21	DT-8855	Flus IR-866u
Діапазон, °C	-50... +380	-50... +900	-50... +1000	-35... +800	-50... +1050	-50... +2250
Час відгуку, с	0,5	0,5	0,15	0,3	1	0,25
Точність, (%) °C	(1.5)	± 1,5	(1.5)	±2	(1.5)	(±2),±2
Роздільна здатність, °C	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1-1
Оптична роздільна здатність (DS)	12:1	12:1	30:1	12:1	30:1	50:1
Коефіцієнт EMS	0,95	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0
Розміри, мм	175 x 100 x 50	153 x 101 x 43	104x43x 146	160x82x 42	100x56x 230	192x126x 60
Вага, г		147	163	177	290	300

Компанія **Raytek (США)** випускає лінійку інфрачервоних вимірювачів температури в діапазоні від -50 до +3000 °C для управління технологічними процесами. Насамперед, це портативні пірометри різних моделей (Raytek ST20 XB, Raytek ST60 XB, Raytek ST80 XB, Raytek MX2, Raytek MX4+), які дозволяють миттєво вимірювати температуру на відстані й використовуються в процесах діагностики та контролю, рис. 8.13, а.

Один з найбільш поширених – **пірометр Raytek ST25**, забезпечує вимірювання температур у діапазоні від -32 до 535 °C. Точність вимірювання залежить від зовнішньої температури і діапазону вимірювання. При зовнішній температурі 23±5 °C точність вимірювання складає відповідно:

- ±1 %, але не менше ±1 °C в діапазоні -23...510 °C;
- ±1,5 % в діапазоні 510...535 °C;
- ±3 °C в діапазоні -32...-26 °C;

$\pm 2,5$ °C в діапазоні -26...18 °C;

± 2 °C в діапазоні -18...23 °C.

Відтворюваність результатів вимірювання становить $\pm 0,5$ %, але не менше ± 1 °C (в температурному еквіваленті).

Основні технічні характеристики Raytek ST25:

Час відгуку, с	$\leq 0,5$ (95 % показань).
Коефіцієнт випромінювання	0,95(фіксований).
Відстань до об'єкта, см	20 – 60 (номінальна).
Роздільна здатність дисплея, °C	$\pm 0,2$.
Утримання інформації на дисплеї, с	7.
Зовнішня температура, °C	0...50.
Відносна вологість, %	10...90.
Вага, г	360.
Габаритні розміри, мм	205x160x55.
Живлення, В	9, лужна або NiCad батарея.

Пірометр обладнаний цілевказівником з двопроменевим лазером (II клас, система SmartSight), підсвіткою дисплея та світлодіодним ліхтарем для освітлення зони вимірювання (7100 млк).

Серія лінійних сканерів (Raytek MP150, Raytek CS200E, Raytek TIR450E) дозволяє сканувати температурне поле вздовж лінії, забезпечуючи точне вимірювання, контроль і аналіз температури в жорстких умовах у діапазоні температур від 20 до 2000 °C з високою швидкістю сканування, рис. 8.13, б.

Слід назвати також стаціонарні пірометри Raytek серій Compact, Marathon, Thermalert. **Пірометри серії Compact** забезпечують вимірювання температур у діапазоні від -40 до 600 °C. **Raytek серії Marathon** призначені для роботи у важких і небезпечних умовах з діапазоном температур від -40 до 3000 °C, рис. 8.13, в. Серія включає моделі з одно- і двоколірним режимом вимірювання, короткохвильові/низькотемпературні термометри, оптико-волоконні радіаційні термометри. **Пірометри серії Thermalert** з діапазоном вимірюваної температури від -18 до 2000 °C містять повний набір вимірювальних систем – первинний і вторинний перетворювачі, для вимірювання з високою точністю температури рухомих або недоступних для контакту матеріалів.

Завершують цей перелік тепловізори, які компанія Raytek виробляє для легкої промисловості і будівельної галузі серій: GS150/GS150LE, CS200E, EC150, ES150 і TF150, TIP450E.



Рис. 8.13. ІЧ-прилади компанії Raytek:
*а – пірометр, б – лінійний сканер,
в – датчик серії Marathon MM, з – тепловізор.*

8.2.6. Тепловізори

Останнім часом у с/г, як і в інших галузях народного господарства, для дистанційного теплового контролю широко використовуються тепловізори (інфрачервоні камери). **Тепловізор** – це вимірювальний прилад, який працює в інфрачервоній області електромагнітного спектру і "переводить" у видиму область спектру власне теплове випромінювання об'єктів. Він може використовуватися і як прилад для безконтактного вимірювання температури. На відміну від пірометра, який вимірює температуру тільки в одній точці, тепловізор може дистанційно вимірювати температуру на поверхні об'єкта в багатьох точках і за результатами вимірювань формувати теплове зображення об'єкта. Розподіл температури на поверхні об'єкта відображається як кольорова картинка, на якій різним температурам відповідають різні кольори.

Принцип роботи тепловізора аналогічний принципу роботи інфрачервоного датчика температури (див. п. 8.2.4) і полягає в наступному. Всі тіла, температура яких вища за температуру абсолютного нуля, випромінюють електромагнітні хвилі, які ще називають тепловим випромінюванням. Спектральна густина потужності теплового випромінювання (функція Планка) має максимум, положення якого у спектрі випромінювання залежить від

температури тіла. З підвищенням температури максимум випромінювання зміщується в бік коротких довжин хвиль (закон зміщення Віна). Максимум у спектрі випромінювання тіл, нагрітих до температури в діапазоні $-50...+50$ °C знаходиться в середньому інфрачервоному діапазоні (довжина хвиль 7...14 мкм).

Для аналізу теплового випромінювання, як правило, використовуються спеціальні датчики – *болометри*, які являють собою матрицю мініатюрних тонкоплівкових терморезисторів. Зібране і сфокусоване об'єктивом тепловізора інфрачервоне випромінювання нагріває елементи матриці у відповідності з розподілом температури спостережуваного об'єкта. Терморезистивні елементи матриці перетворюють інфрачервоні хвилі в електричні сигнали, які після підсилення перетворюються у відеосигнали. Оскільки звичайне оптичне скло непрозоре для середнього ІЧ діапазону, оптику тепловізорів виготовляють із спеціальних матеріалів, найчастіше з германію.



Рис. 8.14. Тепловізори:

*а – Fluke Ti32; б – FlirE60; в – Dali T8;
г – IR-60; д – Testo 890; е – Pulsar Quantum HD 50S*

Просторова роздільна здатність болометричних матриць сягає 1280x720 точок, температурна роздільна здатність сучасних тепловізорів – сотих часток градуса Цельсія.

Розрізняють тепловізори для спостережень і вимірювальні. Тепловізори для спостережень показують тільки градієнти температур об'єкта. Вимірювальні тепловізори дозволяють виміряти значення температури заданої точки об'єкта з точністю до коефіцієнта випромінювання EMS.

Тепловізори широко застосовуються для оцінки тепловтрат у виробничих і житлових приміщеннях, вимірювання теплоізоляційних властивостей матеріалів, виявлення несправностей мереж різного призначення і, звичайно, в оборонній галузі, медицині та ін. На ринку України представлені наступні моделі тепловізорів.

Компанія **Raytek** пропонує тепловізори для досліджень рухомих і стаціонарних об'єктів, технологічних процесів у різних галузях, зокрема, виробництва електричних систем і їх профілактичного огляду на відстанях до 100 м.

Для управління виробничими процесами призначений тепловізор **ThermoView™ Pi20**. Камери тепловізора виготовляються для двох температурних діапазонів: від -40 до 500 °C і від 200 до 2000 °C. В якості датчика використовується неохолоджена матриця (мікроболометр). Лінза – LENS (MA) з ручним фокусуванням забезпечує горизонтальне поле зору 21,7°, вертикальне – 16,4°. Коригування коефіцієнта випромінювання забезпечується в межах від 0,01 до 1,00. Вага приладу біля 1 кг.

Технічні характеристики тепловізора ThermoView Pi20:

Точність вимірювання, °C	± 2 або ± 2% (від показань).
Діапазон фокусування, см	від 30 до ∞.
Кількість пікселів	320x240.
Відео вихід, повний відеосигнал	NTSC/PAL.
Інтерфейс	Ethernet, RS-232C.
Робоча температура, °C	-15...50.
Відносна вологість, %	< 90(не конденсат).
Живлення, В постійного струму	від +11 до 13.
Розміри (приблизно), мм	65x65x208.

Зовнішній вигляд тепловізора ThermoView™ Pi20 показано на рис. 8.13, з.

Тепловізори Fluke Ti32 (Fluke, США), рис. 8.14, а, табл. 8.15, забезпечують: виявлення за рахунок високої (0,045 °C) теплової чутливості малих відхилень температури, які часто є ознаками можливої несправності; сигналізацію про високу (задану користувачем) температуру; автоматичне вирівнювання (коригування паралаксу) візуального та інфрачервоного зображень. Для виконання спеціальних робіт передбачено додаткові ширококутні теле- і відеооб'єктиви.

Таблиця 8.15.

Основні характеристики тепловізорів

Найменування характеристики	Значення характеристики					
	Ti32	T8	Testo 890	FlirE60	IR-60	HD50S
Ч роздільна здатність	320x240	384x288	620x480	320x240	60x60	384x288
Дисплей, дм	3,7	3,6	4,3	3,5	2,4	OLED
Кут огляду, град	46x34	25x19	42x32	45x34	20x20	11x8,3
Оптичне збільшення, раз			3	4		2,8
Фокусна відстань, м	Smart Focus	>0,5	0,1-0,5	0,5	0,5	>5
Просторова роздільна здатність, м/рад	1,25	1,37	1,15	1,36		
Теплова чутливість (NETD), °C при 30 °C	<045	≤0,06	0,04	0,05	0,15	
Відеокамера	+	+	+	+	+	
Температурний діапазон, °C	-20...+600	-20...+2000	-30...+1200	-20...+650	-20...+300	-25...50
Похибка, °C (%)	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	
Частота кадрів, Гц	9	50	9; 33	60	6	30
Кольорова палітра, кількість	8	11	8		7	
Коефіцієнт випромінювання	0,01 до 1,0	0,01 до 1,0	0,01 до 1,0	0,01 до 1,0	0,1 до 1,0	
Розміри, мм	277x122x170	105x245x230	253x132x111	244x95x140	212x95x62	207x86x59
Маса, г	1050	1000	1630	575	320	430

Для кожного знятого зображення можна записати голосові коментарі, які зберігаються разом із зображеннями. Карта пам'яті SD Memory Card (2 Гб) вміщує не менше 1200 повних інфрачервоних радіометричних зображень (.is2) і пов'язаних з ними

візуальних зображень, звукові анотації для кожного зображення тривалістю 60 с. Дані з карти можна завантажити в комп'ютер через пристрій зчитування USB. Для аналізу даних використовується ПЗ SmartView. Тепловізор є ударостійким при падінні з висоти 2 м, захищений від впливу пилу і води, ступінь захисту – IP54.

Тепловізори Testo 890 (Testo SE & Co. KgaA, Німеччина) з германієвою оптикою дозволяють проводити тепловізійну зйомку малорозмірних об'єктів, розташованих на значній відстані, рис. 8.14, д, табл. 8.15. Об'єктивом з кутом зору 42° можна зробити чіткий знімок і провести діагностику великого об'єкту. Технологія SiteRecognition (розпізнавання точок виміру) забезпечує розпізнавання, розподіл та управління об'єктами при повторних або схожих вимірюваннях. Пристрій має спеціальний режим вимірювання вологості за допомогою радіозонда. Майстер панорамних зображень дозволяє створити цілісне зображення об'єкта з його окремих знімків. Функція Sequence Capturing (реєстрація послідовностей знімків) дозволяє спостерігати, документувати і аналізувати стадії теплових процесів, а також здійснювати експорт даних у формат .xls і .mpeg без підключення тепловізора до ПК. SD-карта 2 Гб забезпечує збереження 800-1000 зображень. За допомогою інтерфейсу USB 2.0 термографічні відеозаписи можуть бути передані на ПК.

Тепловізори FLIR E-series (FLIR Systems, США) створені на базі детекторів з чутливістю до 0,05 °С, табл. 8.15, рис. 8.14, б. Зйомка проводиться з частотою 60 Гц, що дозволяє знімати рухомі об'єкти і процеси в режимі реального часу. Через Bluetooth (функція MeterLink) до тепловізора можна підключити гігрометр Extech MO297 або струмовимірювальні кліщі Extech EX845. Функція "Анотація" дозволяє через гарнітуру Bluetooth додавати голосові коментарі, за допомогою тачскрін (сенсорної) клавіатури можна вносити текстові примітки.

Радіометричні зображення зберігаються на SD-карті в форматі JPEG. Наявні композитний, відео- і USB-mini виходи. Програма Instant Report дозволяє створювати звіти в форматі PDF і виводити їх на друк безпосередньо з камери. Завдяки можливості підключення тепловізора по Wi-Fi до мобільних пристроїв, звіт про результати вимірювання можна відправити з iPad, iPhone.

Тепловізори **DALI T-серії (DALI, Данія)**, рис. 8.14, *в*, табл. 8.15, представлені двома моделями – Т4 і Т8. Основні відмінності між цими приладами полягають у роздільній здатності матриць (384х288 у моделі Т8 і 160х120 у моделі Т4) та діапазоні вимірюваних температур -2...+650 °С з можливістю опційного розширення до +1200 °С або +2000 °С в моделі Т8 і -20...+350 °С з можливістю опційного розширення до +650 °С в моделі Т4. Відмінною рисою тепловізорів Т4 і Т8 від попередніх моделей компанії Dali є наявність функції відеозапису. Для запису використовується карта пам'яті Micro SD (8 Гб, максимальна підтримка до 32 Гб). Пристрої забезпечують збереження: ІЧ зображень у форматах JPEG, H.264 з вихідними даними вимірювань; відеозображень у форматах JPEG, H.264, пов'язаними з відповідним ІЧ-зображеннями (кадр у кадрі); текстових анотацій тривалістю до 60 с (вбудований мікрофон або Bluetooth гарнітура). Виходи пристрою: відео PAL/NTSC; аудіо; передача даних; Bluetooth гарнітура; RS-232. Тепловізор має мережевий інтерфейс з функцією установки IP адреси для передачі зображень і відео в режимі реального часу.

IR-60 WALCOM (Тайвань) – тепловізійна камера, яка поєднує функції вимірювання температури поверхні та формування теплового зображення в реальному часі, рис. 8.14, *г*, табл. 8.15. Тепловізор має також відеокамеру і може перетворити теплове зображення на візуальне. Налаштування коефіцієнта випромінювання та компенсація температури фону дає змогу підвищити точність вимірювань температури поверхонь. Маркування гарячих і холодних точок дозволяє знайти найгарячішу та найхолоднішу ділянку теплового зображення. Забезпечена можливість вибору кольорової палітри. Карта пам'яті – mini-SD, формат файлів – bmp. Вартість тепловізора знаходиться в невисокому ціновому сегменті.

Тепловізор **Pulsar Quantum HD 50S (Білорусь)** – тепловізійна камера для проведення розвідувальних і рятувальних операцій, спостереження за дикою природою, орієнтування на місцевості та ін. Модель укомплектована об'єктивом великого діаметру і морозостійким дисплеєм, рис. 8.14, *е*. Тепловізор здатний розпізнавати об'єкти з розмірами, близькими до розмірів людини крізь атмосферні опади, задимленість і чагарники на відстані до

1250 м Всі моделі Quantum HD 50S оснащені аналоговим відеовиходом для підключення зовнішніх пристроїв запису, або виведення зображення на екран. Основні характеристики тепловізора наведені в табл. 8.15.

8.3. Первинні перетворювачі вологості

Кількісна оцінка вмісту води в повітрі, с/г матеріалах і продуктах визначається величинами: вологовмістом, абсолютною і відносною вологістю.

Вологовміст повітря d [кг/кг, або г/кг] дорівнює масі M_n водяної пари (1 кг), яка припадає на одиницю маси (1 кг) сухої частини повітря. Вологовміст визначає відношення густини водяної пари в повітрі до густини власне повітря.

Абсолютна вологість повітря ρ [кг/м³] дорівнює масі водяної пари, що міститься в одиниці об'єму вологого повітря (парогазової суміші). Величина ρ як правило виражається в грамах на 1 м³ вологого повітря [г/м³_{вол.пов.}] і характеризує густину водяної пари.

Відносна вологість повітря R [%] – величина, яка характеризує ступінь насичення повітря водяними парами. Вона дорівнює відношенню парціального тиску водяної пари, що міститься в повітрі, до парціального тиску насиченої водяної пари при одній і тій же температурі і визначається за формулою:

$$R = (p_n/p_n) \cdot 100 \%,$$

де p_n [Па] – парціальний тиск водяної пари в повітрі, p_n [Па] – тиск пари, що знаходиться в рівновазі з рідкою водою при температурі T . Власне p_n – це максимальне значення, яке може приймати парціальний тиск пари p_n при температурі T . При його збільшенні відбувається конденсація пари.

Температура точки роси T_d [°C] – це температура, до якої необхідно охолодити вологе повітря, щоб досягти насичення, зберігаючи постійним вміст (масу) води в процесі охолодження. При температурі точки роси $p_n = p_n$.

Вологість твердих і сипучих матеріалів визначають або вмістом води в кілограмах води на 1 кг абсолютно сухого матеріалу $[1\text{кг}_{\text{води}}/1\text{кг}_{\text{сух.мат.}}] \cdot 100\%$, або вологістю $[1\text{кг}_{\text{води}}/1\text{кг}_{\text{вол. мат.}}] \cdot 100\%$.

Методи вимірювання вологості повітря (газів), речовин і матеріалів досить численні й різноманітні. Найбільш древній і простий метод ґрунтується на властивості волосся змінювати довжину при зміні вологості повітря. Такий перетворювач вологості являє собою звичайне волосся, натягнуте між двома пружинами. Незважаючи на простоту такого датчика і на те, що процес, який лежить в основі вимірювань, не піддається розрахунку, гігрометри з волоссяними датчиками виготовляються у великій кількості.

До методів вимірювання, які умовно відносять до прямих, можна віднести гравіметричний метод, який полягає у виділенні вологи з речовини й роздільному вимірюванні маси вологої речовини і її сухої частини або виділеної вологи. В залежності від способу виділення вологи метод поділяється на випарно-гравіметричний (заснований на випарному способі видалення вологи з твердих речовин), термогравіметричний (заснований на видаленні вологи з речовини шляхом її нагрівання), вакуумно-гравіметричний (заснований на вакуумному способі видалення вологи з речовини).

Широке практичне застосування для вимірювання вологості повітря, газів і деяких матеріалів мають такі основні методи: а) психометричний, заснований на залежності ступеня охолодження чистої води, яка випаровується в газовий простір, від вологості останнього; б) температурно-рівноважний, заснований на залежності різниці пружностей (тиску) водяної пари над насиченим водним розчином гігроскопічної солі і над чистою водою від вологості газу, що контактує з розчином; в) методи, засновані на залежності фізичних гігроскопічних властивостей твердих тіл від вологості повітря (газу), з якими вони перебувають у стані динамічної гіротермічної рівноваги. Основні труднощі при вимірюванні вологості пов'язані з її функціональною залежністю від температури і парціального тиску насичених водяних парів.

Існують й інші методи вимірювання вологості, засновані на безпосередньому вимірюванні тих чи інших фізичних властивостей газів, матеріалів. Кількість таких методів, які застосовуються лише в окремих випадках, досить велика. Представляють певний інтерес методи, що аналізують поглинання влогим газом (матеріалом) ІЧ радіації; поглинання енергії електромагнітних хвиль ВЧ і НВЧ діапазонів; поглинання енергії β -випромінювань; методи, в яких

використовуються вимірювання теплопровідності, густини, швидкості дифузії крізь напівпроникливі перегородки та ін.

Загальну характеристику основних методів вимірювання вологості можна подати у вигляді табл. 8.16.

Таблиця 8.16.

Методи вимірювання вологості

<i>Метод вимірювання</i>		<i>Вимірюваний параметр</i>
<i>Група</i>	<i>Принцип</i>	
Прямі	Гравіметричний (випарно-, термо-, вакуумно-гравіметричні)	Маса, об'єм
Непрямі	Психрометричний	Різниця температур
	Конденсаційний (точка роси)	Температура конденсації пари води
	Сорбційні (кулонометричний, електролітичний)	Електричний струм, температура насичення
Електричні	Резистивний	Електричний опір
	Ємнісний	Ємність, діелектрична проникливість
Електро-магнітні	П'єзосорбційний	Частота коливань
	Геофізичний (георадар)	Діелектрична проникливість
	Надвисокочастотний	Амплітуда, фаза, поляризація
Радіаційні	Нейтронний	Сповільнення нейтронів
Оптичні	Фотометричний, інфрачервоний	Довжина хвилі, інтенсивність світлового потоку

У с/г технологічних процесах найчастіше використовуються вимірювання вологості повітря, ґрунту, зерна, продуктів та матеріалів.

8.4. Вимірювачі вологості повітря

Прилади, призначені для вимірювання вологості повітря, у т. ч. і первинні перетворювачі, називають гігрометрами. Їх можна розділити на дві групи: а) гігрометри, засновані на фізичному законі, який дозволяє безпосередньо визначати вологість; це – психметри, конденсаційні гігрометри, сорбційні (кулонометричні, електролітичні) гігрометри, б) гігрометри, принцип дії яких заснований на вимірюванні властивостей газів, матеріалів, пов'язаних з вологістю, наприклад, імпедансні гігрометри. Названі групи гігрометрів дозволяють визначити один з параметрів вологості, описаних вище. Це такі параметри і гігрометри: а) температура точки роси T_d (°C), яка визначається конденсаційними, сорбційними і електролітичними гігрометрами, а також гігрометрами на основі оксиду алюмінію; б) температура вологого термометра T_e (°C), вимірювана психометрами; в) відносна вологість R (%), що визначається за допомогою гігрометрів на основі зміни опору і ємності. Розглянемо ці групи гігрометрів більш детально.

Психметри

Психметри використовуються для визначення вмісту вологи у повітрі. Їх принцип роботи полягає у визначенні різниці температур двох термометрів: сухого і вологого, який зволожується дистильованою водою. Випаровування води викликає охолодження вологого термометра до температури рівноважного випаровування дистильованої води в повітря T_e , – температури насичення повітря, якщо теплота, необхідна для такого випаровування, надходить тільки з повітря. Температура вологого термометра залежить від вмісту вологи в повітрі.

Абсолютну вологість повітря ρ - кількість водяної пари в 1 м³ повітря при даній температурі і барометричному тиску, можна визначити за формулою:

$$\rho = Q - [a(T_c - T_e)B],$$

де: Q – максимальна вологість при температурі вологого термометра (кількість водяної пари для максимального насичення 1 м³ повітря при заданій температурі, виражена в грамах); B –

барометричний тиск у момент вимірювання; a – психометричний коефіцієнт; T_c і T_v – температура сухого і вологого термометрів.

Відносну вологість повітря вираховують за формулою:

$$R = \frac{P}{Q} \times 100\%.$$

При визначенні відносної вологості за різницею температур сухого і вологого термометрів користуються психометричним графіком, а при визначенні абсолютної вологості користуються психометричними таблицями. У мікропроцесорних вимірювачах вологості психометричні таблиці і графіки подані програмним способом.

Чутливість психометра залежить тільки від чутливості датчиків температури. Основною перевагою цих вимірювачів є висока відтворюваність, простота і невисока вартість. До недоліків можна віднести труднощі вимірювання T_v нижче або поблизу 0°C .

Для прикладу в табл. 8.17 наведені характеристики вітчизняних психометрів **ВІТ-1, ВІТ-2, ВІТ-3 (Склоприлад)** та **ДВТ-04 (ПАТ «Тера»)**. Зовнішній вигляд перетворювача психометричного типу ПАТ «ТЕРА» показаний на рис. 8.15, *а*, ВІТ-2 – на рис. 8.15, *е*.

Тривалий час у вітчизняній практиці використовуються **волосяні гігрометри М-68**. Конструкція вимірювача являє собою круглу металеву коробку, рис. 8.15, *д*, всередині якої знаходиться натягнутий на металеву рамку волос. Зміна довжини волосу передається стрілці, яка показує значення вологості на шкалі. Діапазон вимірювання вологості складає 30-100 %, робоча температура – від $+10$ до $+35^\circ\text{C}$.

Гігрометр М-68 – досить інерційний і повільно реагує на коливання вологості повітря. Він потребує попереднього налаштування (наприклад, за аспіраційним психометром) і подальшого періодичного налаштування.

8.4.1. Конденсаційні гігрометри

Принцип дії конденсаційних гігрометрів заснований на фіксації температури T_d конденсації пари води в газовій фазі – точки роси. Поверхню матеріалу, температура якого вимірюється, поступово охолоджують до появи роси або інею на його поверхні. Потім

процес стабілізують так, щоб між повітрям і краплями роси на поверхні підтримувався рівноважний стан. Виміряна в цьому стані температура являє собою «точку роси» T_d або «точку інею» при мінусових температурах. Починаючи саме від цієї точки роси визначають тиск пари у вологому повітрі.

Таблиця 8.17.

Характеристики вітчизняних психрометрів

Найменування характеристики	Значення характеристики			
	ВІТ-1	ВІТ-2	ВІТ-3	ДВТ-04
Діапазон вимірювання t сухого термометра, °C	0...+25	+15...+40	30...+42	0... +90
Ціна поділки шкали, °C	0,2	0,2	0,2	
Температура вимірювання, °C:	Діапазон вимірювання відносної вологості, (%)			
+5...+25	від 20 до 90			
+20...+23	від 54 до 90			
+23...+26		від 40 до 90		
+26...+40		від 20 до 90		
+25...+42			від 27 до 93	
0... +90				10...100
Термометрична рідина	толуол	толуол	ртуть	-
НСХ				2х100М, 2хPt100, 2хPt1000
Габаритні розміри, мм	290х120х50	290х120х50	290х115х46	80х210х68

Для визначення моменту утворення конденсату та його параметрів застосовують вимірювання інтенсивності світлових потоків, відбитих від чистої конденсуючої поверхні та від поверхні з шаром конденсату у видимій і інфрачервоній областях спектру, та електричних характеристик конденсату (найчастіше поверхневого опору). Типова залежність струму датчика конденсаційного типу при наближенні до точки роси близька до експоненціальної. Для індикації конденсату застосовують також п'єзокварцовий резонатор, включений в схему генератора, частота генерації якого в

момент випадання на поверхню резонатора конденсату різко змінюється.

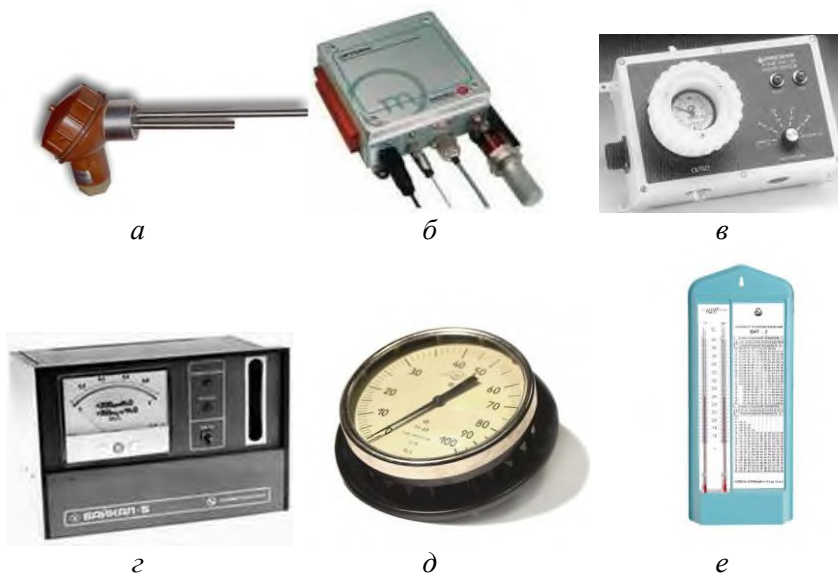


Рис. 8.15. Вимірювачі вологості:

а, е – психрометри ТЕРА і ВИТ-2; б, в – конденсаційні вимірювачі Optidew і SIM-12H DewPro; г – сорбційний гігрометр Байкал-5; д – волосяний гігрометр М-68

До переваг конденсаційного методу відносяться можливість вимірювання вологості в широкому діапазоні концентрацій пари води, температури та тиску аналізованого середовища, а також градуювання датчиків за температурою, а не за вологістю. Основним недоліком методу являється залежність результатів від міри забрудненості поверхні.

На основі конденсаційної технології створений багатофункціональний **аналізатор вологості Optidew фірми "Michell Instruments Ltd." (Великобританія)**, рис. 8.15, б. Він складається з блоку електроніки і датчика, з'єднаних кабелем довжиною до 250 м. Технічні характеристики аналізатора наведені в табл. 8.18.

Таблиця 8.18.

Технічні характеристики гігрометра Optidew

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Охолоджувач	Одноступінчастий або двоступінчастий
Діапазон вимірювань ТТР*, °C; (ЕВВ*, %)	-40...+90; (0,5...100)
Мінімальна ТТР, °C (ЕВВ., %) (при температурі повітря 21 °C)	з охолодженням датчика: -30 (2); (одноступінчасте); -45 (0,5) (двоступінчасте)
Похибка вимірювання, °C	±0,2
Дзеркало	Мідь, покрита золотомісним сплавом
Термопара	Платинова, 4-проводова, 100 Ом
Повторюваність, °C	0,01
Одиниці відображення вологості	°C, °F ТТР; % ЕВВ; г/м³; п/кг; aw; delta (T - ТТР)
Дискретність відображення	0,1°C для ТТР; 0,01 для ppm V; 0,1 м/м³
Аналоговий вихід, мА	0-20; або 4-20
Цифровий вихід	RS-232 (стандарт)
Реле	Задається користувачем: = 2А, 30 В; або ~ 0,5 А, 120 В
Параметри проби: тиск, бар робоча температура, °C рекомендована витрата, л./хв.	0-250 -20...+40 0,1-20
Напруга живлення	90-265 В, 50/60 Гц.
Габаритні розміри, мм блок електроніки датчик	222x200x90 129x45
Клас захисту корпусу	Cermet II: IP65 (базове виконання), IP66

*ТТР – температура точки роси; ЕВВ – еквівалент відносної вологості.

Для передачі інформації про вологість, а також для настройки приладу використовуються аналогові виходи 4-20 мА і цифровий порт. Налаштування реле тривоги дозволяє використовувати прилад для прямого управління вологістю.

У вимірювачах вологості DewPro фірми "General Eastern Instruments" (Німеччина), модифікацій 1111Н, 1311DR, 1311XR, D-2, SIM-12Н, табл. 8.19, використовується конденсаційний метод, заснований на охолодженні розташованого в газовому середовищі

дзеркального датчика. Для вимірювання температури точки роси використовується платиновий термоперетворювач опору.

Таблиця 8.19.

Характеристики конденсаційних гігрометрів DewPro

<i>Tun</i>	Д-зон вимірювань температури точки роси, °C	Гранична абсолютна похибка, °C	Вихідний сигнал, мА	Макс. робочий тиск, кге/см ²	Габаритні розміри (довжина ширина), мм	Маса, кг	Напруга живлення, В	Д-зон темп. навколишнього повітря, °C	Відносна вологість, %	Строк служби, років
1111H	-15 ... +25	± 0,2	опір PRT	15	89x30	0,5		-15 ... +80	80	6
1311DR	-65 ... +25	± 0,2	опір PRT	22	414x223	16	115/ 230	0 ... +35	80	6
1311XR	-80 ... +15	± 0,2	опір PRT	8	483x308,5	26	115/ 230	0 ... +35	80	6
D-2	-35 ... +25	± 0,2	опір PRT	11	102x114	1,8		-25 ... +85	80	6
SIM-12H	-10 ... +75	± 0,2	опір PRT	4,5	219x102	1,8		-25 ... +85	80	6

Модифікації гігрометра відрізняються рівнем охолодження. Перетворювач модифікації 1111H має одноступінчастий елемент Пельтьє, який забезпечує рівень повітряного охолодження -45 °C, перетворювачі D-2 і SIM-12H мають двоступеневу напівпровідникову батарею охолодження, яка забезпечує рівень повітряного охолодження -65 °C. В перетворювачі 1311DR реалізовано чотириступінчасте охолодження, а в модифікації 1311XR – п'ятиступінчасте охолодження дзеркала. Перетворювач D-2 має додаткове оглядове вікно для спостереження за дзеркалом під час роботи. В перетворювачі SIM-12H визначення моменту

випадання конденсату здійснюється за допомогою інфрачервоної оптики. Відтворюваність вимірів складає $\pm 0,05$ °C, гістерезис – відсутній. Зовнішній вигляд перетворювача SIM-12H DewPro показаний на рис. 8.15, в.

8.4.2. Сорбційні гігromетри

Суть сорбційних методів полягає у використанні властивості гігроскопічних речовин поглинати вологу із газового середовища. Кількість води, що поглинається сорбентом, однозначно пов'язана із вологістю газового середовища, яка визначається за масою, кількістю виділеної теплоти, зміною електропровідності або іншими параметрами сорбенту при поглинанні ним вологи.

Кулонометричні перетворювачі вологості

Дія кулонометричних (електролізних) перетворювачів вологості ґрунтується на безперервному поглинанні вологи плівкою гігроскопічної речовини та одночасному її електролітичному розкладанні. У якості сорбційного покриття зазвичай використовують фосфорний ангідрид P_2O_5 , що має дуже високу гігроскопічність, великий питомий опір у сухому вигляді та хорошу електропровідність після сорбції вологи. В такому датчику безперервно відбуваються два процеси: поглинання вологи фосфорним ангідридом з утворенням фосфорної кислоти $2P_2O_5 + H_2O \rightarrow H_2PO_3$ і електроліз, що супроводжується регенерацією фосфорного ангідриду.

Конструкція перетворювача, рис. 8.16, являє собою платинові електроди, розташовані на внутрішній або зовнішній поверхні підкладки. Між електродами наноситься шар сорбенту. У якості сорбційного покриття датчика, окрім п'ятиокису фосфору, використовуються КОН, NaOH, метафосфат калію та кремнієва кислота. Для підвищення стабільності електродів застосовують родієве покриття. Гребінчасті родієві електроди наносять методом вакуумного напилення: товщина електродів 0,1 мкм, ширина та відстань між сусідніми зубцями електродів 50 мкм, напруга на електродах – 30 В. Розміри перетворювача 9x11x0,25 мм. Перетворювач характеризується лінійними залежностями струму від тиску водяної пари.

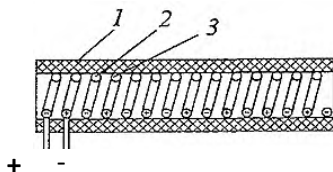


Рис. 8.16. Схема кулонометричного вологоміра:

1 – ізоляційна трубка, всередині якої розташовані платинові електроди – 2, 3, під'єднані до джерела постійного струму

До переваг кулонометричних перетворювачів належать широкі межі вимірювань, робота в широкому діапазоні температур і тисків, взаємозамінність. Цей метод є основним в області вимірювання малих значень вологовмісту. Відомими кулонометричними гігрометрами є Байкал-МК, Байкал-RG, Байкал-5Ц, що призначені для вимірювання об'ємної частки води в повітрі, азоті, вуглекислому газі, водні, інертних газах та їх сумішах.

Гігрометр Байкал-5 (ТОВ "Прилад") призначений для вимірювання об'ємної частки води і абсолютної вологості, рис. 8.15, з. Він використовується в технологічних процесах, пов'язаних з отриманням і осушенням повітря і азоту та ін.

Принцип дії гігрометра заснований на неперервному поглинанні води з точно дозованого потоку газу сорбційною плівкою і одночасному електролітичному розкладанні поглиненої води на водень і кисень. Кількість електроенергії, витраченої на електроліз води, є мірою об'ємної частки води.

Технічні характеристики гігрометра:

Діапазони вимірювань:

об'ємної частки води, ppm 0...200;

абсолютної вологості, мг/м³ 0...150.

Гранична зведена похибка, % ± 4 .

Час реакції, хв. < 5.

Загальна витрата аналізованого газу
(при вхідному тиску 200 кПа), см³/хв. < 1000.

Параметри аналізованого середовища:

температура, °C 5...50;

тиск, кПа 200...1000.

Робочі умови застосування:

температура, °C	5...40;
атмосферний тиск, кПа	96...104.
Живлення, В/Гц	220/50.
Габаритні розміри, мм:	
вимірювального приладу	320x200x185;
вторинного приладу	200x200x300.
Маса, кг відповідно	6,5; 5,5.

Електролітичні вологоміри

Принцип роботи електролітичного сорбційного вологоміра ґрунтується на тому, що тиск пари над насиченим розчином солей (наприклад хлориду літію) нижчий, ніж тиск пари над чистою водою при тій же температурі. Тому, для встановлення тиску насиченої пари p_n воду потрібно охолоджувати, а розчин хлориду літію нагрівати до рівноважної температури T_e , яка вища за точку роси T_d . Враховуючи, що електропровідність кристалічної солі нижча від електропровідності розчину цієї солі в $10^3 \div 10^4$ разів, то нагрівання розчину не викликає труднощів. Насичений сольовий розчин нагрівають до рівноважної температури, при якій встановлюється тиск пари, рівний тиску пари в навколишньому повітрі. Вимірюючи цю температуру можна визначити тиск пари і, отже, температуру точки роси.

Перевагою електролітичного сорбційного гігрометра в порівнянні з конденсаційним є те, що рівноважну температуру отримують шляхом нагрівання датчика, а не його охолодження. Точність гігрометра залежить від точності вимірювання температури, конструкції і режиму використання. Як правило, сумарна похибка вимірювань не перевищує ± 1 °C при швидкостях повітряного потоку $< 0,5$ м/с. При стабільних умовах датчик на основі хлориду літію може забезпечувати відтворюваність порядку $\pm 0,2$ °C.

Електролітичний гігрометр ДВ-1К (КІА, Україна), рис. 8.17, в, складається з підігрівного хлористо-літєвого датчика вологості ДВ-1 (Промприлад, Україна), та датчика ДТ-1 (аналогічні див. у табл. 8.4), який вимірює температуру оточуючого середовища. Опір датчика ДВ-1 підтримуються постійним, а температура рівноваги

служить мірою точки роси. Технічні характеристики перетворювача наведені в табл. 8.20.

Таблиця 8.20.

Технічні характеристики перетворювача ДВ-1К

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Робочий діапазон: відносна вологість, %; температура, °C	Від 30 до 98; Від +5 до +50
Параметри оточуючого середовища: барометричний тиск, мм. рт. ст. швидкість середовища, м/с	650...800; Від 0.1 до 3
Похибка вимірювань, %	±1.5
Напруга живлення, ~ В	Від 20.4 до 26.4
Максимальна потужність підігрівача, Вт	5
Опір термометрів датчика, Ом	100 (при температурі 0°C)
Час встановлення робочого режиму не більше, хв.	40 після змочування розчином LiCl
Термін дії датчика не менше, міс.	3, з одним циклом змочування

8.4.3. Імпедансні вимірювачі вологості

Для визначення вмісту вологості в повітрі (газах) і різних середовищах широко використовуються **сорбційно-імпедансні перетворювачі**, які діють на основі залежності повного опору (імпедансу) вологочутливого шару сорбенту від кількості адсорбованої води. В них використовується явище адсорбції води зовнішньою **поверхнею** тонкого шару матеріалу (*тонкоплівкові ПП*), або явище абсорбції води **тонким шаром** чи певним **об'ємом** капілярно-пористого матеріалу (*товстоплівкові ПП*). В якості сорбентів застосовуються гігроскопічні іоноутворюючі солі (хлористий літій, хлористий кальцій, фтористий берилій і т.п.). Загальний недолік датчиків з такими сорбентами – низька стабільність, особливо при підвищеній вологості, мала чутливість при низьких рівнях вологості і великий гістерезис. Більш поширеними є датчики з органічними полімерними сорбентами, неорганічними сорбентами на основі оксидів металів і змішаними сорбентами (акрилати, полімери метакрилату, поліакрилу міді, кремнійорганічні полімери, які містять аміногрупи, та ін.).

Існує два основних варіанти конструкції таких датчиків: з планарним розташуванням електродів, зазвичай гребінчастої форми, і «сендвіч»-структура, рис. 8.17.

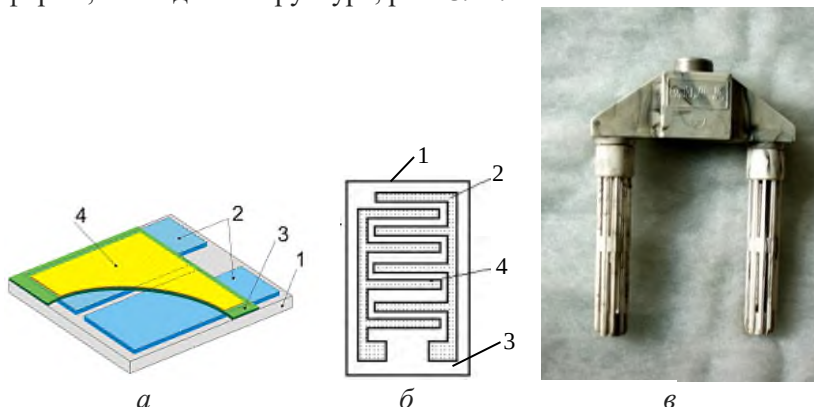


Рис. 8.17. Перетворювачі вологості типу «сендвіч» (а), з гребінчастими електродами (б) та сорбційний ДВ-1К (в):
1 – підкладка; 2, 4 – електроди; 3 – плівка сорбенту

Датчик, який має «сендвіч»-структуру, виготовляється на підкладках з ситалу або полікору. Для електродів використовується нікель з шаром ванадію, в якості чутливого гідрофільного шару – полімерні наноструктурні плівки. На шарі діелектричної плівки формується нанорозмірна вологopрониклива плівка золота, яка виконує роль другого електроду. Постійна часу датчика відносної вологості складає 1-2 с, величина гістерезису – до 2 %.

Імпедансні гігromетри можна розділити на три групи: резистивні, ємнісні на основі полімерних діелектриків та ємнісні на основі оксиду алюмінію.

В **резистивних** перетворювачах використовується залежність між відносною вологістю і електричним опором гігроскопічного середовища. Інтервал зміни опору може охоплювати від частки 1 Ом до 80 МОм. Головна перевага резистивних датчиків полягає в їх взаємозамінюваності, яка складає біля ± 2 %, що дозволяє використовувати для калібрування датчиків резистори, а також їх невисока вартість. Характеристики резистивних перетворювачів компанії Sencera наведені в табл. 8.21.

Таблиця 8.21.

Резистивні і ємнісні перетворювачі компанії Sencera (Тайвань)

Тип датчика	H200M і H300M 	H500M 	H600M 	808H5V5 	Sens 818 
Тип волого-чутливого елемента	Резистивний	Ємнісний	Ємнісний	Ємнісний	Ємнісний
Тип датчика температури	Терморезистор 50 кОм	Терморезистор 50 кОм	Терморезистор 50 кОм		
Діапазон вимірюваної вологості, %	10 – 95	0 – 100	0 – 100	0 – 100	0 – 100
Основна похибка, %	± 5	± 4	± 4	± 4	± 1
Напруга живлення, В	5 ± 5%	5 ± 2%	5 ± 2%	5 ± 5%	12 DC
Діапазон вихідної напруги, В	0 ~ 3.0	0.38 ~ 0.68	0.38 ~ 0.68	0.8 ~ 3.9	
Струм споживання, мА	< 5	<1.5	< 1.5	< 1.2	
Робочий температурний діапазон, °С	0 ... +60	0 ... +50	-20 ... +70	-40 ... +85	-40...60
Розмір, мм	34x22x13	34,5x22x12	34,5x22x12	12,5x8x5	7,6x3,6x10,2

Оскільки опір гігрометра залежить і від вологості, і від температури, то для підвищення точності вимірювань потрібно одночасно контролювати й температуру середовища.

Перетворювачі з **вугільним** вологочутливим елементом виконані з дрібно розмеленого вугілля або газової сажі з гігроскопічною зв'язувальною речовиною (гідроксилетилцелюлоза, ацетилцелюлоза та ін.), нанесених на основу з оргскла або полістиролу. Протилежні грані основи покривають металом, наприклад, сріблом, і вони виконують роль електродів. Вихідним параметром вугільного датчика є його електричний опір. При

підвищенні вологості опір датчика збільшується. Опір датчика також збільшується при підвищенні температури. Стала часу вугільних датчиків невелика: 2–6 с.

Істотною перевагою вугільних датчиків є здатність відновлювати свої характеристики після перебування в атмосфері зі 100 %-ною відносною вологістю. Недоліками – великий гістерезис (до 10 %), залежність показів від температури, недостатня стабільність характеристик.

У гігрометрах з **керамічними** перетворювачами використовується залежність електричного опору пористої кераміки з одного або декількох оксидів металів від вмісту води в навколишньому середовищі. Існують датчики двох типів: з іонною й електронною провідністю. В іонних датчиках зменшення повного опору при збільшенні вологості обумовлено фізичною адсорбцією на поверхні і конденсацією в мікрокапілярах молекул води. В датчиках з електронною провідністю адсорбовані молекули води діють як донорні центри і віддають кераміці електрони.

Керамічні датчики належать до *товстоплівкових*, оскільки товщина вологочутливого шару є більше 10 мкм. В датчиках використовуються кераміки з CoO , Fe_2O_3 . Опір таких датчиків при збільшенні вологості від 30 до 100 % зменшується на 6 порядків.

Основним недоліком керамічних датчиків є дуже високий опір при вологості нижче 30 % ($R \approx 10^8\text{--}10^{10}$ Ом). Знизити опір і підвищити чутливість датчиків дозволяє використання багатокомпонентної кераміки. Японські фірми розробили понад 70 керамічних композицій для датчиків вологості. Такі датчики мають високу чутливість і стабільність та менший опір ($R \approx 10^5 - 10^6$ Ом) при нульовій вологості. Основний недолік керамічних датчиків – складність вимірювання низьких рівнів вологості (менше 1 %).

Загальний недолік датчиків вологості резистивного типу – експоненціальна залежність опору від вологості, що вимагає застосування складних вимірювальних схем.

Ємнісні гігрометри в найпростішому випадку являють собою звичайні конденсатори з повітряним проміжком. Діелектрична проникливість повітря залежить від вологості і її зміна призводить до зміни ємності. Повітряний проміжок може бути замінений діелектриком, діелектрична проникливість якого під впливом вологості суттєво змінюється. Ємнісні перетворювачі мають

практично лінійну характеристику перетворення вологість-ємність і є точнішими за резистивні. Вони характеризуються низьким температурним коефіцієнтом, можливістю роботи при високих температурах (до 200 °С) та помірною стійкістю до хімічних випаровувань. Завдяки повному діапазону і високій точності вимірювань ємнісні датчики широко використовуються в системах автоматичного контролю і управління. Виготовляють ємнісні датчики такі провідні вітчизняні та зарубіжні компанії.

ПАТ "Тера" випускає 6 моделей ємнісних перетворювачів вологості серії ДВ, датчиків вологості і температури ДВТ, в яких використовуються три типи ємнісних чутливих елементів: НІН, SHT21 і SHT25, табл. 8.22. Моделі -01, -02, -08, -09 – занурювальні; -10 – настінні; -06 – переносні. Зовнішній вигляд перетворювачів вологості ПАТ "Тера" показаний на рис. 8.18.



Рис. 8.18. Ємнісні перетворювачі вологості ДВТ-02, ДВ-10 (ПАТ "Тера"), SM-200 (SOFTRON) і DHT22 (E+E Elektronik)

Вихідні сигнали чутливих елементів НІН – 4-20 мА, елементів SHT – 4-20 мА, 0-10 В та інтерфейси RS-485 й I²C. Перетворювачі SHT мають вбудований термісторний датчик температури.

Таблиця 8.22.

Характеристика типів ємнісних перетворювачів вологості ПАТ «Тера»

Тип НСХ	Робочий діапазон, RH, %	Клас точності у діапазонах	Температура експлуатації, °С
ННН	0... 100	0...10 % – 6; 10...89 % – 3; 89...93 % – 4; 93...100 % – 8	0...60
SHT21	0... 100	0...10 % – 6; 10...90 % – 3; 90...100 % – 6	-20...60
SHT25	0... 100	0...10 % – 4; 10...90 % – 2; 90...100 % – 4	-20...60

Виробник **SOFTRON** (Україна) виготовляє на базі датчиків швейцарської фірми Sensirion AG модуль серії SM-200, призначений для вимірювання температури, відносної вологості повітря і точки роси в неагресивному газовому середовищі. Конструкція модуля складається з мікропроцесорної плати, змонтованої в прозорому вологозахищеному корпусі (IP65), рис. 8.18, і сенсорів температури та вологості, змонтованих у повітропроникному фільтрі з пористої бронзи, закріпленому на корпусі модуля.

Технічні характеристики модулів:

Діапазон вимірювання:

Температура, °С
-40...+60 (з датчиком на корпусі);
-40...+120 (з виносним сенсором на кабелі довжиною 2 м).
Вологість, %
0..100.

Похибка вимірювань, °С:

SM-200.A1 ± 0,5 ± 4,5 % (при 25 °С);

SM-200.A2 ± 0,3 ± 2,0 % (при 25 °С).

Напруга живлення, В 8..30 (постійний струм).

Струм, мА не більше 20 (при напрузі 12 В).

Габарити, мм 58x64x35.

Вага, кг 0,15.

В модулях використовується сенсор типу SHT20/SHT21, див. табл. 9.22, 9.27. Він являє собою мікросхему, в якій об'єднані два сенсорних елемента, АЦП, схема калібрування і цифровий інтерфейс. Кожен сенсор індивідуально калібрується виробником і формує вихідний сигнал у цифровій формі.

Прилад SM-200 застосовується в якості веденого пристрою (Slave) в промислових мережах з протоколом Modbus й інтерфейсом RS-485.

Умови експлуатації модулів:

Температура, °C	-40...+60 (корпус модуля); -40...+120 (виносний сенсор).
Вологість, %	0..100.

Перетворювач вологості повітря DHT австрійського виробника **E+E Elektronik**, рис. 8.18, складається з ємнісного датчика вологості, термістора і АЦП. Управління датчиком здійснюється від контролера Arduino, або від іншого мікропроцесорного пристрою. Для підключення до мікроконтролера служить 3-штировий інтерфейс. Переваги перетворювача – висока точність, відтворюваність даних, стійкість до негативного впливу навколишнього середовища.

Датчик DHT11 використовується для вимірювання та передачі на контролер у вигляді цифрового сигналу показань температури і вологості навколишнього середовища.

Характеристики DHT11:

Діапазон вимірювання вологості, %	20 – 80 з точністю 5 %;
Діапазон вимірювання температури, °C	0 – 50 з точністю 2 %;
Частота опитування датчика, Гц	1 (< 1 разу за 1 с);
Напруга живлення, В	3 ... 5,5;
Габарити, мм	32x14;
Вага, г	8.

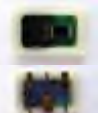
Живлення датчика здійснюється від контролера Arduino, або від іншого керуючого мікропроцесорного пристрою чи зовнішнього джерела живлення.

Характеристики та зовнішній вигляд інших ємнісних перетворювачів компанії **Sencera** наведені в табл. 8.21.

Ємнісні ПП вологості Honeywell призначені для вимірювання відносної вологості повітря від 0 до 100 %. Вони мають багатошаровий чутливий елемент у вигляді двох плоских платинових пластин, простір між якими заповнений діелектричним полімером. Інтенсивний полімер забезпечує широкий діапазон робочих температур, високу хімічну стійкість до агресивних рідин та їх парів. Вихідний сигнал датчиків 1,0...4,0 В, що забезпечує пряме підключення до АЦП мікроконтролера. Характеристики та зображення ємнісних перетворювачів Honeywell приведені в табл. 8.23.

Таблиця 8.23.

**Характеристики ємнісних перетворювачів вологості
Honeywell**

Назва	Діапазон RH, %	Постійна часу, с	$T_{роб}, ^\circ C$	$U_{ж}, В$	$I_{ж}, мкА$	Вбудований термо-датчик	Зовнішній вигляд
НН-4602-А	0 ... 100	50	-40... +85	4,0... 5,8	200	100 кОм, NTC	
НН-4602-С	0 ... 100	50	-40... +85	4,0... 5,8	200	1 кОм, платин.	
НН-4000-001	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4000-003	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4010-001	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4020-002	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4030-001	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4030-003	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4031-001	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4031-003	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4100-001	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	
НН-4101-001	0 ... 100	15	-40... +85	4,0... 5,8	200	немає	

Слід відмітити, що перетворювачі Honeywell являють собою інтегровані прилади, які містять також схеми перетворення, підсилення і лінеаризації сигналів.

Найбільшого поширення набули імпедансні датчики з вологочутливим шаром оксиду алюмінію. Гігрометр **на основі оксиду алюмінію** має конструкцію з двох електродів, рис. 8.19, А. Перший електрод являє собою алюмінієву пластинку, на яку методом анодного осадження нанесено тонкий шар оксиду алюмінію. В якості другого електроду використовується вологoprоникний шар металу. Тут можуть бути використані алюміній, мідь, золото, срібло, платина, паладій, ніхром. Цей електрод не повинен закривати пористий шар оксиду алюмінію. Площа адсорбції оксиду алюмінію становить $\sim 0,2 \text{ м}^2$ на 1 см^2 ефективної площі. Імпеданс перетворювача змінюється в залежності від відносної вологості навколишнього середовища.



Рис. 8.19. Вимірювачі вологості:

А – структура перетворювача вологості на основі плівки Al_2O_3 :

**1 – корпус; 2 – тонка плівка золота; 3 – пориста плівка Al_2O_3 ;
4 – шар Al; 5 – металева підкладка; 6 – виводи;**

Б – п'єзосорбційний аналізатор вологості АМЕТЕК (США)

Перетворювачі на основі оксиду алюмінію відносяться до *тонкоплівкових*. Товщина плівки оксиду визначає чутливість датчика і його швидкодію. При товщині плівки близько декількох мікрометрів діапазон вимірювання вологості складає від 20 до 100 %. Зменшення товщини плівки на порядок збільшує швидкодію датчика і робить його чутливим до вмісту води менше 1 %. При товщині оксидного покриття менше 0,3 мкм зміна імпедансу

залежить тільки від парціального тиску водяної пари і не залежить від температури. Це дозволяє вимірювати абсолютну вологість.

Відомі перетворювачі на основі анодованого оксиду алюмінію фірм Panametrics (США) і Shaw (Великобританія). **Датчик вологості GE Panametrics TF Probe**, табл. 8.24, вимірює вміст вологи в газах і неводних рідинах у широкому діапазоні – від слідових кількостей до значень вологості навколишнього середовища. Датчик використовується спільно з аналізаторами вологості Moisture Image Series.

Таблиця 8.24.

Характеристики перетворювача GE Panametrics TF Probe

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Температура точки роси/інею, °C	Повний діапазон калібрування: від -110 до 60
Діапазон вимірювання імпедансу	Від 50 кОм до 2 МОм при 77 Гц
Похибка, °C:	± 2 в межах від -65 до 60 °C; ± 3 в межах від -110 до -66 °C
Відтворюваність, °C	± 0,5 в межах від -65 до +60°C; ± 1,0 в межах від -110 до -66°C
Робоча температура, °C	Від -110 до 70
Робочий тиск	Від 5 мкм рт. ст. до 345 бар
Постійна часу, с	Менше 5-ти при 63 % стрибкоподібній зміні вологості в обох напрямках (зволоження і осушення)
Вбудований датчик температури	Нелінійний термістор з негативним температурним коефіцієнтом
Робочий діапазон, °C	Від -30 до +70
Гранична похибка, °C	±0,5
Постійна часу, с	10 у нерухомому повітрі при 63 % стрибкоподібній зміні температури в обох напрямках
Вбудований датчик тиску	Твердотільний/п'єзорезисторний
Діапазони вимірювання, бар	Від 3 до 345 в межах: 3 – 21; 4 – 35; 7 – 69; 21 – 207 бар; 35 – 345 бар
Похибка, %	±0.1 від діапазону вимірювання
TF Probe на основі оксиду алюмінію	

Крім вологовмісту датчики серії TF вимірюють також тиск і температуру. Термістор з негативним температурним коефіцієнтом забезпечує можливість вимірювання температур у межах від -30 до +70 °С. Перетворювач тиску, що включає в себе п'ять твердотільних п'єзорезистивних чутливих елементів, дозволяє вимірювати тиск до 345 бар.

Датчики серії **MISP, Panametrics**, призначені для безпосередньої установки в технологічному обладнанні. Вони можуть вимірювати вміст вологи від рівня вологості навколишнього середовища до ррb рівня. Датчики можуть бути відкалібровані в діапазоні температур точки роси/замерзання від +60 до -110 °С, що відповідає концентрації від 200,000 до 0,001 ppmv у газах при атмосферному тиску.

Крім того, датчик забезпечує можливість вимірювання температури в межах від -30 до +70 °С з похибкою $\pm 0,5$ °С та тиск у діапазоні від 0 до 34,6 МПа з відносною похибкою $\pm 0,5$ %.

Діапазон робочих температур вимірювача лежить у межах від -110 до 70 °С, а тиск – у діапазоні від вакууму до 34,6 МПа. Мінімальне значення швидкості потоку не обмежено. Датчики можуть бути розташовані на відстані до 1,6 км від аналізатора і з'єднуються з ним за допомогою кабелю типу "звитої пари".

Довгострокова стабільність забезпечується мікропроцесором, який здійснює контроль електронних елементів і компенсацію можливих змін їх характеристик. Калібрувальні дані зберігаються в незалежній пам'яті EEPROM.

У вимірювальних перетворювачах вологості DewPro фірми **General Eastern Instruments (Німеччина)** модифікацій ММУ30, ММУ31, ММУ35, ММУ245 використовується тонкоплівковий оксидно-алюмінієвий сенсор, а модифікацій ММР30 – силіконовий полімерний сенсор, табл. 8.25.

Перетворювачі використовуються для вимірювання вологості в системах осушення повітря, вологості газів при атмосферному тиску або під тиском у газопроводі. Вбудований керуючий мікропроцесорний контролер формує результати вимірювань вологості в одиницях температури точки роси, °С, або в одиницях абсолютної вологості (ppm). Технічні характеристики перетворювачів вологості DewPro наведені в табл. 8.25.

Таблиця 8.25.

Характеристики перетворювачів вологості DewPro

<i>Тип</i>	<i>Д-зон вимірювань точки роси, °С</i>	<i>Гранична абсолютна похибка, °С</i>	<i>Вихідний сигнал, мА</i>	<i>Д-зон вимірювань температури, °С</i>	<i>Макс. робочий тиск, кгс/см²</i>	<i>Габаритні розміри, мм</i>	<i>Маса, кг</i>	<i>Напруга живлення, В</i>	<i>Діапазон температур навколишнього повітря, °С</i>	<i>Відносна вологість, %</i>
ММУ31	-90...+20	± 2	4-20		120	264,2 х 112,8	1,5	24	0...+60	50
ММУ35	-90...+10	± 2	4-20		10	144х 30	0,25	24	-40...+50	50
ММУ245	-100...+20	± 2			10		3,2	6	0...+60	80
ММР30	-15...+85	± 1	4-20	-20...+40	17	168,1 х 112,8	2	24	0...+60	80

8.4.4. П'єзосорбційні гігрометри

Принцип роботи п'єзосорбційних перетворювачів вологи заснований на зміні амплітуди та частоти коливань п'єзоелемента (кварцового резонатора) при адсорбції вологи його поверхнею або гігроскопічною плівкою, нанесеною на його поверхню. В результаті процесів сорбції або десорбції водяної пари збільшується або зменшується маса гігроскопічного покриття і, як наслідок, змінюється частота коливань п'єзосорбційного елемента. В усталеному режимі частота коливань є мірою вологості навколишнього середовища.

Більш поширеними є перетворювачі з плівкою, яка наноситься на металізовану поверхню кварцу. Такий перетворювач є поєднанням сорбційного вологочутливого елемента з п'єзокварцовим перетворювачем. Таким шляхом досягають високої чутливості (визначення зміни маси на рівні 10^{-11}) і зниження нижньої межі вимірювань.

Крім того, до переваг методу слід віднести можливість визначення вологості в широкому діапазоні, швидкодію, легкість перетворення частотного виходу в цифрову форму. При використанні високоефективних сорбентів, таких, як цеоліт, силікагель, сульфований полістирол, п'єзосорбційний метод може бути застосований для вимірювання мікроконцентрацій вологи в газах.

Провідні позиції в області розробки і виготовлення датчиків вологості п'єзосорбційного типу належать фірмі **DuPont (США)**. Поріг чутливості п'єзосорбційного аналізатора вологості однієї з останніх моделей складає 0,02 ppm, повний діапазон вимірювання вологості від 0 до 20 000 ppm.

З часом, підрозділ DuPont Instruments, що займалися аналізаторами вологості, перейшли до компанії "**АМЕТЕК**" (США), яка є сьогодні чи не єдиним виробником подібного устаткування. Аналізатори вологості АМЕТЕК відзначаються високою чутливістю і точністю в широкому діапазоні вимірювань, швидким відгуком, вбудованими засобами калібрування, простотою обслуговування.

Принцип роботи аналізаторів **АМЕТЕК** наступний. Проба газу розділяється на два потоки, один з яких (опорний), проходить через осушувач (вбудований або зовнішній) на основі молекулярних сит, а інший (вимірюваний) надходить безпосередньо в термостатичну комірку при температурі 60 °С. Система клапанів періодично перемикає потоки, так що опорний і вимірюваний газ по чергово подаються в комірку на час 30 с.

Чутливим елементом комірки є кварцовий кристал зі спеціальним покриттям, що адсорбує воду. Зміна частоти генератора Δf пропорційна зміні його маси ΔM за рахунок адсорбції води:

$$\Delta f \sim (f_0)^2 \cdot \Delta M / A,$$

де f_0 - власна частота коливань, A – площа поверхні покриття.

При вимірюваннях вологості частота кварцового генератора, власна частота якого дорівнює 8,98 МГц, порівнюється з частотою стандартного генератора і т. ч. точно вимірюється зміна частоти коливань, пов'язана з адсорбцією води. Теоретично зміні маси

кристалу всього лише на 10^{-10} г відповідає зміна частоти на 1 Гц, що забезпечує високу чутливість методу.

Почерговий принцип проходження через комірку аналізованого і опорного газів забезпечує швидкий відгук у всьому діапазоні вимірювання, як при збільшенні, так і зменшенні вологості. Крім того, використання в якості опорного того ж вимірюваного, але осушеного газу, забезпечує незалежність результатів вимірювання від складу газу та мінімізує вплив домішок.

Принцип чергування забезпечує також можливість ввімкнення в вимірювальну схему вбудованого генератора вологості, який може бути використаний для перевірки правильності показань, або для калібрування аналізатора. За допомогою такого генератора опорний газ насичується відомою кількістю води і по черзі подається в комірку аналізу разом з потоком генератора вологості. При цьому покази приладу порівнюються з паспортними даними генератора вологості.

Аналізатори вологості газів АМТЕК виготовляються в декількох модифікаціях для різних застосувань: вимірювання вологості чистих газів, у т. ч. і технологічних (модель 5800, рис. 8.19, Б), аналізу ультрарештчастих газів для електронної промисловості або для сертифікації продукції виробників чистих газів і сумішей (модель 5900), аналізу вологості природного газу (модель 5812) та ін.

Технічні характеристики аналізатора АМТЕК 2850:

Діапазон вимірювання, ppm	0,1 ... 1000;
Чутливість, ppm	0.02;
Допустима похибка, ppm	$\pm 0,05$ (0,1 ... 1 ppm); $\pm 5\%$ (1 ... 100 ppm);
Час відгуку (63%), хв.	не більше 5;
Вбудований генератор вологості, ppm	1;
Габарити, мм	32x132x381;
Маса, кг	17;
Споживана потужність, кВт	03.

Аналізатор АМТЕК моделі 2850 може також використовуватись для масових вимірів: від моніторингу якості повітря до аналізу газів на установках розділення повітря.

На завершення відмітимо, що вибір вимірювача вологості того чи іншого типу здійснюється у відповідності до технічного завдання на вимірювання. Характеристики перетворювачів вологості провідних виробників, таких як APAR SENSIRION (Швейцарія), SYHITECH (Китай), TDK (Японія) та ін., наведені в табл. 8.26.

Таблиця 8.26.

Характеристики перетворювачів вологості

Назва (тип)	Виробник	Рівень вологості, % RH	Робоча температура, °C	Похибка, % RH	Постійна часу, с	Напруга живлення, В	Вихід	Тип корпусу
AR250	APAR	0 ~ 100	-10 ~ 60	±3	10	12DC	NONE	58x64x 35 мм
SHT10	SENSIRION	0 ~ 100	-40 ~ 125	±0,5	8	2.3 ~ 5.5	NONE	SMD4
SHT71	SENSIRION	0 ~ 100	-40 ~ 125	±0,5	8	2.3 ~ 5.5	NONE	SIL4
SY-HS-220	SYHITECH	30 ~ 90	0 ~ 60	±5	NONE	5DC	NONE	30x43x 10 мм
SY-HS-230	SYHITECH	10 ~ 90	0 ~ 60	±5	NONE	5DC	NONE	18x25x 9 мм
CHS-GSS	TDK	20 ~ 85	0 ~ 50	±5	60	4.75 ~ 5.25	Linear Voltage	NONE
CHS-UPS	TDK	5 ~ 95	0 ~ 50	±3	60	4.75 ~ 5.25	Linear Voltage	NONE
HUMIDITY-SENS-E	Vishay	10 ~ 90	0 ~ 85	NONE	5	15	Capacitance	SIP
HS1101-LF	Measurement Specialties Inc.	1 ~ 99	-40 ~ 140	±2	3	10	Capacitance	SIP
HM1520-LF	Measurement Specialties Inc.	0 ~ 100	-40 ~ 60	±5	10	4.75 ~ 5.25	NONE	NONE
27920	Parallax Inc.	1 ~ 99	-40 ~ 100	±5	5	5 ~ 10	Capacitance	SIP

Порівняльні характеристики вимірювальних перетворювачів вологості різних типів наведені в табл. 8.27.

Таблиця 8.27.

Порівняльні характеристики перетворювачів вологості

<i>Активний матеріал</i>	<i>Терморезистивний полімер</i>	<i>Терморезистивний пластик</i>	<i>Однорідний термопластик</i>	<i>Однорідний триоксид алюмінію</i>	<i>Хлорид-літійова плівка</i>	<i>Психрометр</i>
Підкладка	керамічна або кремнієва	полістирол або майлар	ні	ні	керамічна	ні
Параметр, що змінюється	ємність	ємність	опір	опір	провідність	температура
Д-н вимірювання, % RH	0...100	0...100	20...100	2...90	15...< 100	20...100
Точність, %	±1,0... ±5,0	±3,0... ±5,0	±3,0... ±10,0	±1,0... ±5,0	±1,0... ±5,0	±3,0... ±4,0
Взаємозамінюваність, %RH	±2,0... ±10,0	±2,0... ±20,0	±5,0... ±25,0	погана	±30... ±1 0,0	відмінна
Гістерезис, %	< 1,0...3,0	2,0...5,0	3,0...6,0	< 2	дуже високий	високий
Лінійність, %	±1,0	±2,0	погана	погана	дуже погана	погана
Час відгуку	15...60 с	15...90 с	2...5 хв.	3...5 хв.	2...5 хв.	2...5 хв.
Д-н робочих температур, °C	40...185	25...100	10...40	10...75	-	0...100

8.5. Вимірювачі вологості ґрунту

Одним із основних природних засобів виробництва продовольства є ґрунт, а одними з його головних фізичних властивостей, які впливають на родючість, є вологість і температура. Без наявності необхідної кількості води в ґрунті і відповідної температури с/г культури або не проростають, або не забезпечують потрібної врожайності.

Поточна інформація про вологість і температуру ґрунту в системі вирощування с/г культур необхідна, в першу чергу, для прийняття оперативних рішень щодо обробітку ґрунту, доцільності і строків сівби (посадки), норм і строків поливу, внесення добрив тощо.

Розробка та застосування автоматизованих систем для отримання інформації про стан ґрунту є однією з найбільш актуальних технічних задач с/г виробництва. Найбільш оперативно отримати інформацію про вологість і температуру ґрунту можна за допомогою штучних супутників, але існуючі системи забезпечують отримання інформації тільки щодо поверхні або кількох сантиметрів верхнього шару ґрунту.

Подальший розвиток вимірювальних систем безпосередньо пов'язаний з розробками нових методів вимірювання, у т. ч. дистанційних, та створення новітніх датчиків вологості ґрунту.

Сьогодні для вимірювання вологості ґрунту використовуються прямі, непрямі і дистанційні методи. До прямих відносяться методи, направлені на безпосереднє визначення вмісту води в ґрунті. Це термо-ваговий і хімічний методи. Термо-ваговий метод (ТВ-метод) визначення вологості ґрунту прийнято вважати еталонним.

До непрямих відносяться методи, які ґрунтуються на вимірюванні електричних і неелектричних величин, залежних від вологості ґрунту.

Дистанційними вважають методи, які базуються на вимірюванні електромагнітного випромінювання в різних частотних діапазонах (радіотеплового, короткохвильового, гамма випромінювання). Перелік основних методів вимірювання вологості ґрунту наведено в табл. 8.28. Розглянемо найбільш поширені з них.

Таблиця 8.28.

Методи вимірювання вологості ґрунту

<i>Метод вимірювання</i>		<i>Вимірювальний параметр</i>
<i>Група</i>	<i>Принцип</i>	
Прямі	Термо-ваговий	Маса, об'єм
Непрямі	Тензометричний	Тиск у порах
Електричні	Електричні вимірювання	Електричний опір
Електромагнітні	Ємнісний (вологомір)	Діелектрична проникливість
	Геофізичний (георадар)	Діелектрична проникливість
	Надвисокочастотний	Амплітуда, фаза, поляризація
Радіаційні	Нейтронний	Сповільнення нейтронів
Оптичні	Фотометричний, інфрачервоний	Довжина хвилі, інтенсивність поглинання

8.5.1. Термо-вагові (термогравіметричні) аналізатори вологості

Вологість матеріалу – це виражене у відсотках значення відношення маси води до маси конкретного матеріалу, а відношення маси вологи, що міститься у вимірюваній речовині, до її маси у вологому стані називається відносною вологістю матеріалу (див. п. 8.3).

Найбільш поширеним методом вимірювання вологості ґрунту є термо-ваговий. Цей метод ґрунтується на визначенні маси води та маси сухого ґрунту. Проби ґрунту відбирають з окремих шарів на глибині від 5 до 100-150 см використовуючи спеціальний бур і поміщають в алюмінієві бокси об'ємом приблизно 60 см³. У лабораторії зразки ґрунту нагрівають до температури 105 °С, яку підтримують до повного висихання і отримання сталої ваги проби. Процес може тривати декілька годин. Вологість ґрунту визначають

як відношення маси втраченої води до маси сухого ґрунту у відсотках за формулою:

$$W = (m_1 - m_0)/(m_0 - m) \cdot 100 \%,$$

де: m_0 – маса висушеного ґрунту разом з бюксою; m_1 – маса вологого ґрунту разом з бюксою; m – маса порожньої бюкси.

Для відбору ґрунтових проб використовуються бури АМ-26, АМ-16, бур Скіпського. Бури АМ-26 і АМ-16 відрізняються тим, що АМ-26 має менший діаметр бурового циліндра-пробовідбірника, що полегшує ручне буріння ґрунту. Бур Скіпського дозволяє відбирати проби ґрунту сталого об'єму з непорушеною структурою і крім вологості визначати об'ємну масу ґрунту.

ТВ-метод дозволяє з досить високою точністю визначати вологість окремого зразка ґрунту, тому його часто використовують для градування вологомірів.

До недоліків методу слід віднести необхідність відбору великої кількості зразків при дослідженнях залежностей вмісту води в ґрунті від часу та координат та велику тривалість процесу вимірювань.

Розглянемо характеристики найбільш поширених сучасних вологомірів, які реалізують розглянутий метод.

Аналізатор вологості ADGS200/IR (AXIS, Польща) застосовується в лабораторіях і на виробництві як для визначення кількості вологи, що міститься в досліджуваних речовинах, так і для їх зважування. Складається вологомір з двох частин: лабораторних ваг (3 клас точності) й потужних інфрачервоних ламп, які розташовані над вагами для сушіння зразків. Кількість вологи в речовинах визначають термогравіметричним методом шляхом зважування зразків до сушіння і після нього.

Аналізатор має текстове меню, забезпечує виведення графіка вологості на дисплей і підключення до принтера або комп'ютера через інтерфейс RS-232. Зовнішній вигляд аналізатора вологості ADGS200/IR показаний на рис. 8.20.

Основні технічні характеристики ADGS200/IR :

- клас точності – 3;
- найбільша границя зважування – 200 г;
- найменша границя зважування – 0,02 г;
- дискретність – 0,001 г;
- режими завершення вимірів – за часом/автоматично/вручну;
- максимальна температура сушіння – 160 °С;
- кількість режимів роботи – 6;
- підсвічування індикатора;
- габаритні розміри – 235х345х200 мм.



Рис. 8.20. Аналізатори вологості ADGS200/IR, Sartorius MA100, Евлас 2М, KERN DBS60-3

Аналізатори вологості Sartorius (Німеччина) дозволяють отримувати інформацію про вміст води в багатьох речовинах: твердих, монолітних, сипучих, пастоподібних матеріалах, водних суспензіях, неводних рідинах та ін. Прилади виготовляються в трьох модифікаціях МА35, МА100, МА150. Зовнішній вигляд аналізатора вологості МА100 показаний на рис. 8.20.

Залежно від моделі аналізатори комплектуються різними інфрачервоними випромінювачами: керамічним нагрівальним елементом, галогенною лампою, кварцовим (CQR) нагрівачем, закритим випромінювачем ТЕН.

Вологомір забезпечує можливість вибору одного з трьох варіантів закінчення сушки: до постійної ваги (автоматичний режим); закінчення сушіння при зміні маси від 1 до 20 мг за 24 с (напівавтоматичний режим); заданого часу 0,1 - 99 хв.

Одночасне виконання аналізатором функцій зважування і сушіння дозволяє скоротити час вимірювання до 15 хв., у той час як їх окреме виконання зазвичай триває декілька годин.

Технічні характеристики МА100:

– маса проби, г	0,1 ... 100;
– температура сушіння, °С:	
кварцовий нагрівач	30 ... 220;
керамічний, галогенний нагрівач	30 ... 180;
– маса проби, г	0,1 ... 100;
– час сушіння	6 с... 999 хв.;
– діапазон вимірювання вологості, %	0,02 ... 99,98;
– дискретність зчитування, %	0,001; 0,01;
– дискретність зчитування маси, г	0,1;
– роздільна здатність, г	0,0001; 0,001;

Аналізатор вологості Евлас 2М (Sibagropribor) призначений для експресного визначення масової частки вологи в ґрунті, продукції с/г і продуктах її переробки, кондитерських виробках, хімікатах, будівельних і фармацевтичних матеріалах та ін. Вологомір може бути відградуваний на потрібний матеріал чи продукт.

Індикація результатів проводиться в цифровій формі з допустимою похибкою відлікового пристрою 0,01 %. Тривалість

одного вимірювання залежить від вологості досліджуваного зразка і маси проби. Час прогріву і встановлення робочого режиму вологоміра – не більше 30 хв. Час неперервної роботи – не менше 8 год. Зовнішній вигляд аналізатора вологості показаний на рис. 8.20.

Технічні характеристики аналізатора Евлас 2М:

Діапазон вимірювання вологості, 0%	від 0 до 100.
Маса проби, г	від 2 до 10.
Межа абсолютної похибки, %	не більше $\pm 0,2$.
Межа зважування, г	10.
Межа абсолютної похибки зважування, мг	не більше $\pm 5,0$.
Діапазон установки температур, °C	від 70 до 160.
Дискретність установки температури, °C	1.
Споживана потужність, ВА	не більше 370.
Габаритні розміри, мм	185x230x320).
Маса, кг	6,3.

Аналізатор вологості KERN DBS60-3 (Німеччина)

Прилад працює на основі термогравіметричного методу і сушить зразок до постійної маси, поки вся волога не вийде із зразка, а його вага перестане змінюватися. За рахунок своєї універсальності прилад використовується в багатьох галузях: аграрній, фармацевтичній, харчовій, ювелірній та ін. Зовнішній вигляд аналізатора вологості показаний на рис. 8.20.

Технічні характеристики аналізатора вологості DBS 60-3:

Діапазон вимірювання вологості, %	0...100.
Точність вимірювання, г/%	0,001/0,01.
Діапазон зважування, г	60.
Відтворюваність при зважуванні, %:	
2 г	0,15;
10 г	0,02.
Сухий залишок, %	100 – 0.
Діапазон температур, °C	50 - 200 (з кроком 1 °C).
Габаритні розміри, мм	202x336x157.
Вага, кг	4,2.

У вологомірі використовується галогенна кварцова лампа потужністю 400 Вт, яка розрахована на 2000 год. роботи. Температура висушування – до 200 градусів Цельсія. Аналізатор відображає процес вимірювання на екрані в реальному масштабі часу: % випаруваної маси, % вологості, % сухого залишку, масу, яка випарувалася, в г. Можливі режими сушіння: стандартний; ступеневий; ощадливий; прискорений.

Застосування термогравіметричних аналізаторів для визначення вологості ґрунту обмежується кількістю і вагою проб та тривалістю вимірювань. Вони дозволяють визначати вологість однієї проби вагою від одиниць до ста грамів. А, наприклад, при гідрометеорологічних дослідженнях одного окремо взятого поля відбирають півсотні і більше проб. Тому такі аналізатори найчастіше використовують для градування вологомірів. А для вимірювання вологості ґрунту застосовуються інші більш швидкісні методи, найбільш поширені з яких розглядаються далі.

8.5.2. Тензіометричні вологоміри

Тензіометричний метод вимірювання відноситься до неелектричних методів і ґрунтується на властивості ненасиченого вологою ґрунту всмоктувати воду. Всмоктуюча сила ненасиченого вологою ґрунту залежить від вологості ґрунту. Вимірюють цю силу первинними перетворювачами тиску, наприклад, пористим керамічним фільтром. При висиханні ґрунту його вологість зменшується, а всмоктуюча сила зростає. Діапазон розрідження складає від 0 до 9 м водяного стовпа (88-90 кПа). При більших розрідженнях керамічний фільтр стає повітропроникним. За всмоктуючим тиском при відповідному градуванні визначають вологовміст ґрунту.

Загальний вигляд **тензіометричного вологоміра** показаний на рис. 8.21. Він складається з керамічного фільтру 1, водної камери 2, електронного датчика тиску 3, блоку обробки та індикації 4.

Принцип роботи тензіометра ґрунтується на властивості керамічного зонда пропускати воду і не пропускати повітря. При дотиканні стінок зонда, пори якого насичені водою, з ненасиченим ґрунтом, вода з водної камери тензіометра під дією капілярно-сорбційних сил переміщується в ґрунт до досягнення рівноваги між потенціалом води у водній камері тензіометра і потенціалом води в

грунті. При підвищенні вмісту води в ґрунті, навпаки – вода з ґрунту надходить у водну камеру тензіометра. Ці зміни тензіометричного тиску вимірюються датчиком 3.

Аналоговий сигнал датчика тиску 3 за допомогою аналогово-цифрового перетворювача перетворюється в цифрову форму і обробляється мікроконтролером блоку 4. Після обробки за відповідним алгоритмом результати вимірювання вологості відображаються на індикаторі.

Технічні характеристики тензіометра:

Діапазон вимірювання тиску, кПа

від 0 до 85-90.

Діапазон вологості, %

від найменшої до 60-70
(повної вологомісткості).

Довжина (висота) водної камери, м

від 0,10 до 1,00 і більше.

Вага тензіометра (з водою), кг:

0,72;

Діапазон робочих температур, °C

від 2 до 50.

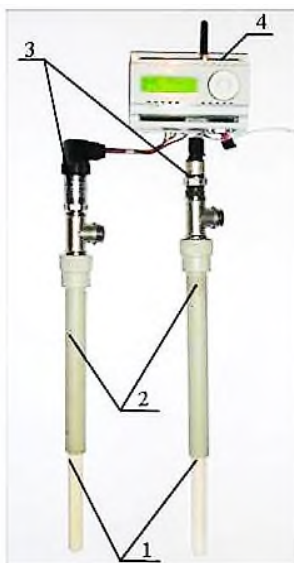


Рис. 8.21. Тензіометричні вологоміри

Тензіометри використовують для дослідження енергетичного стану води в ґрунті й управління водним режимом кореневого шару ґрунту при зрошенні.

Тензіометри Акватек серій Т, ТМ, ТS для оперативного вимірювання і контролю вологості ґрунту виготовляє компанія Акватек (Україна). Тензіометри вимірюють капілярний потенціал ґрунтової води (тензіометричний тиск), який є прямим енергетичним показником, що визначає стан, умови рівноваги і руху води в системі "ґрунт-рослина-приземний шар атмосфери", а також її доступність для рослин.

Моделі Акватек ТМ10...ТМ50, рис. 8.21, мають керамічний зонд довжиною 5 см, клас точності $\pm 1,7\%$. Моделі ТS30...ТS100 мають керамічний зонд довжиною 10 см. Завдяки вакууметру діаметром 100 мм модель ТS дозволяє визначати вологість з більшою точністю ($\pm 1\%$). Діаметр водної камери вимірювачів 20 мм, робоча глибина установки зонда від 10 до 100 см. Тензіометри можуть використовуватись як у відкритому, так і в закритому ґрунті.

8.5.3. Нейтронний вимірювач вологості

Принцип дії вимірювача заснований на здатності атомів водню уповільнювати рух швидких нейтронів. Ґрунтова вода, як відомо, складається з двох атомів водню і одного атому кисню. Атоми водню, що містяться в ґрунтовій воді, уповільнюють рух швидких нейтронів, переводячи їх у ранг повільних нейтронів. Для вимірювання води застосовується металевий зонд діаметром близько 40 мм, який містить джерело швидких нейтронів і детектор повільних нейтронів. Зонд занурюють у ґрунт і швидкі нейтрони внаслідок пружних зіткнень з атомами водню в ґрунті втрачають свою кінетичну енергію. При цьому, рівень уповільнення швидких нейтронів є пропорційним кількості атомів водню, основним джерелом яких є ґрунтова вода. Повільні нейтрони оточують зонд і потрапляють на детектор. Сигнал з виходу детектора по кабелю подається на систему реєстрації.

Переваги вимірювача – можливість оцінки кількості води у великих ґрунтових об'ємах, швидкість вимірювань, здатність вимірювати вологість ґрунту протягом тривалого періоду часу.

Недоліками є необхідність роботи з радіоактивними джерелами, необхідність калібрування приладу, висока вартість, неточність вимірювань поблизу поверхні ґрунту.

Нейтронний вологомір ВНП-1. У складі приладу – цифровий вимірювальний блок з РКІ-індикатором і датчик, розташований в одному корпусі разом із джерелом швидких нейтронів, рис. 8.22. При вимірюваннях датчик приладу занурюється в ґрунт і проводиться визначення енергії нейтронів, уповільнених атомами водню. На базі отриманих даних визначається вміст води в ґрунті.

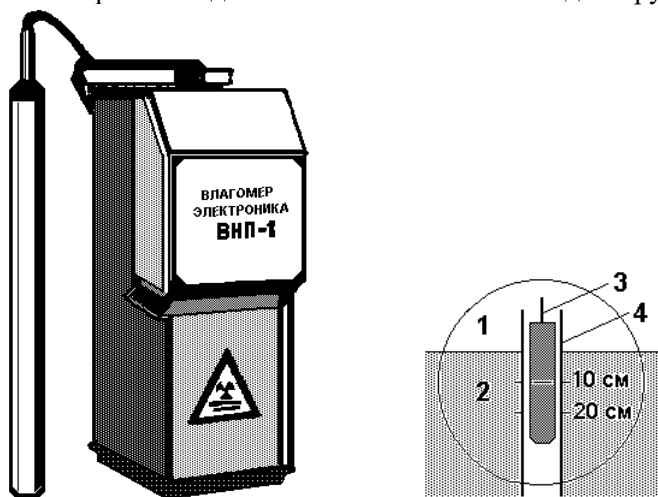


Рис. 8.22. Вологомір ВНП-1 та його датчик у ґрунті:

1 – повітря, 2 – ґрунт, 3 – датчик-зонд приладу, 4 – обсадна труба

Технічні характеристики ВНП-1: діапазон вимірювання вологості – $0,05-0,5 \text{ г/см}^3$ (або 5-50 %), похибка вимірювання – $0,025 \text{ г/см}^3$ (або 2,5 %). Загальна маса комплекту без обсадних труб 5 кг.

Похибки вимірювання вологості ґрунту обумовлені тим, що атоми водню входять не тільки до складу води, але й до складу органічної частини ґрунту (гумусу, перегнилих і не перегнилих решток рослин, органічних добрив та мікрофлори), яка може досягати 20 відсотків від всієї маси ґрунту. На результати вимірювання також впливають щільність, температура, механічний і хімічний складу ґрунту.

Крім того, на глибинах до 20 см сфера дії вологоміра включає не тільки ґрунт, але й повітря, хоча концентрація атомів водню в одиниці об'єму повітря значно нижча, ніж у ґрунті (див. рис. 8.22). Ще одним недоліком приладу є потреба закладання на полях обсадних труб для розташування датчиків.

8.5.4. Вологоміри на основі електричних методів вимірювання вологості

Електричні методи вимірювання вологості ґрунтуються на залежності електропровідності досліджуваних матеріалів (ґрунту) від вмісту в них води. Серед відомих нині методів найпоширенішим є **кондуктометричний метод**.

При кондуктометричному методі вологовміст оцінюється за результатами вимірювання електричного опору чи провідності вологого матеріалу при постійному струмі, або змінному струмі певної частоти. Як правило, кондуктометричний метод застосовується для визначення вологості від 2 до 30 %. У діапазоні 0-2 % його використання обмежене проблемами вимірювання з достатньою точністю великих (10^{11} – 10^{12} Ом) опорів. При вологовмісті більшому за 30%, метод забезпечує невисоку чутливість через степеневу залежність опору від вологості.

На результати вимірювання істотно впливають змінний хімічний та соловий склад досліджуваного матеріалу, температура, наявність домішок тощо. Окрім того, під час вимірювань на постійному струмі спостерігається поляризація електродів, яка залежить від хімічного складу зразка. Зі збільшенням вологовмісту вплив поляризації зростає. Для зменшення впливу поляризації використовують вимірювання при змінному струмі з частотою до 2–3 кГц.

Вимірювання вологості на низьких і високих частотах ґрунтується на залежності електричного опору чи електропровідності від вологості досліджуваного матеріалу. Цю залежність можна встановити, наприклад, за ТВ-методом і вивести формулу для визначення вологості будь-якого матеріалу. Однак пряме застосування таких вимірювань для ґрунту неможливе, оскільки на результати вимірювань опору чи електропровідності на будь-якій частоті впливають, практично, однаково різні параметри ґрунту: вологість, температура, щільність, хімічний і механічний

склад. Крім того, різниця між результатами вимірювань на будь-яких двох частотах у межах від 100 Гц до 2 МГц є незначною.

Найбільшою перевагою кондуктометричного методу є простота схеми та конструкції вимірювального приладу, що обумовлює їх невисоку вартість. До переваг можна також віднести широкий діапазон, високу точність і оперативність вимірювань.

До недоліків, які обмежують його застосування, відносяться складна підготовка проб вимірюваного матеріалу, нижня границя діапазону вимірювання ($\sim 5\%$) і мала (до 30 мм) глибина вимірювання.

Розглянемо вологоміри, побудовані на кондуктометричному методі вимірювання.

Вимірювач параметрів ґрунтів ВПГ-1 (УкрНДГМІ) відноситься до електричних вологомірів, в якому використано принцип вимірювання комплексної електропровідності при змінному струмі низької частоти (до 10 кГц). У комплект приладу входять вимірювальний блок на базі мікроамперметра, датчик-свердло і з'єднувальний кабель між ними. Датчик виконаний у формі двох металевих електродів, виготовлених у вигляді двох напівгвинтів, які скріплені між собою ізолятором, рис. 8.23. Основні його технічні дані такі: діапазон вимірювання вологості ґрунту 2...40 % від сухої маси ґрунту; діапазон вимірювання температури ґрунту $-0...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; середньоквадратичне відхилення від даних ТВ-методу 2,5 %.



Рис. 8.23. Чутливий до вологості і температури елемент датчика ВПГ-1

Для вимірювань вологості ґрунту була розроблена спеціальна методика градуювання на даному ґрунті і визначення градуювальних коефіцієнтів. Також передбачена компенсація температурної похибки шляхом введення поправок на температуру, виміряну тим же ВПП-1 на тій же глибині.

У 2001-2002 рр. в Українському науково-дослідному гідрометеорологічному інституті було створено **вимірювач вологості і температури ґрунту ВПП-4ц**, рис. 8.24. Вимірювач призначений для вимірювання вологості і температури безпосередньо в польових умовах без відбору ґрунтових зразків. Для вимірювання вологості ґрунту застосовано метод вимірювання комплексної електропровідності ґрунту, який є більш чутливим до ємнісної складової комплексної електропровідності ґрунту. Характеристики вимірювача наведені в табл. 8.29.

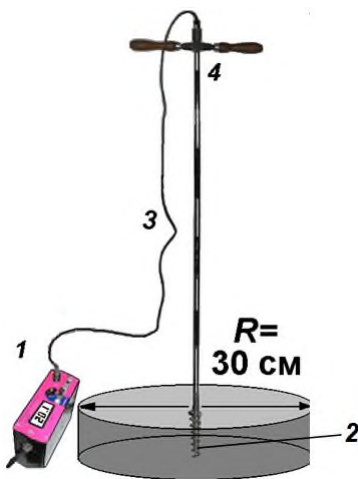


Рис. 8.24. Вимірювач параметрів ґрунтів ВПП-4ц:

- 1 – цифровий вимірювальний блок;
- 2 – чутливий елемент (у збільшеному вигляді див. рис. 8.23);
- 3 – з'єднувальний провід; 4 – датчик вологості ґрунту

В умовах невизначеності фізико-хімічних параметрів ґрунтів вологомір потребує градуювання, яке зводиться до одержання деякого комплексного електричного параметра (оберненого

коефіцієнта комплексної електропровідності) для даного типу ґрунту за даними вимірювань ТВ-методом на різних глибинах від 10 до 100-150 см пошарово через кожні 10 см. Для території Київської області, електричні параметри ґрунтів якої на даний час найбільш вивчені, складена карта обернених коефіцієнтів електропровідності в залежності від типу ґрунту і його хіміко-механічного складу. Вона дозволяє застосовувати прилад ВПГ-4ц без попереднього градування.

Таблиця 8.29.

Характеристики вимірювача вологості і температури ґрунту ВПГ-4ц

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення</i>
Діапазон вимірювання параметрів ґрунту:	
температури, °С	-15 ... +35
вологості, (%)	2 ... 40
загальних запасів води в шарі 10 см, мм	3 ... 60
Параметри досліджуваного ґрунту:	
товщина шару, см	10
глибина вимірювання, см	0...150
Середньоквадратична похибка вимірювання:	
температури	± 1,0 °С (2,5 %)
вологості, %	± 1,5
загальних запасів води в шарі 10 см, %	±3
Напруга живлення, В	9

Перетворювач вологості ґрунту DT171A використовується для управління процесом зрошення. Датчик вологості ґрунту включає датчик вологості WATERMARK, адаптер Fourier (Fourier Systems) та BNC-конектор – кабель типу «алігатор», рис. 8.25. Датчик **WATERMARK** (США) складається з двох концентричних електродів, вставлених в еталонний гранульований матричний (в'язкий) матеріал. В'язкий матеріал з електродами, обгорнений захисною синтетичною мембраною, розташовується в корпусі з нержавіючої сталі. Датчик щільно занурюється в ґрунт і набуває рівноважного стану з вологим ґрунтом.

Перетворювач вимірює електричний опір вологого ґрунту і перетворює його у відкалібровані показання всмоктуючого тиску

грунту в сантибарах. Він забезпечує вимірювання вологості ґрунту в діапазоні від 0 до 200 сантибар (сбар) з точністю $\pm 2\%$. Роздільна здатність складає 0,05 сбар. Діапазон робочих температур 0-40 °С. Стандартну інтерпретацію показань вологості ґрунту в сантибарах представляє наведена нижче табл. 8.30.



Рис. 8.25. Датчик вологості ґрунту DT171A:
датчик вологості WATERMARK; адаптер Fourier; BNC-
конектор

Перетворювач може застосовуватись з реєстраторами даних Nova 5000, MultiLogPRO або TriLink та програмним забезпеченням MultiLab.

Таблиця 8.30.

Вологість (сбар) і стан ґрунту

<i>Вологість ґрунту (сбар)</i>	<i>Стан ґрунту</i>
0-10	Насичений ґрунт. Знаходиться в такому стані 1-2 дні після зрошення.
10-20	Ґрунт є достатньо вологим (окрім грубозернистих пісків, які висихають при такому діапазоні значень).
30-60	Звичайний діапазон значень для зрошення або поливу (окрім ґрунтів з щільної глини). Зрошення проводять при верхніх показниках цього діапазону в холодному вологому кліматі та ґрунтів, що мають високу вологоутримуючу здатність.
60-100	Звичайний діапазон значень для зрошення ґрунтів з щільної глини.
100-200	Ґрунт стає небезпечно сухим для виробництва.

Перетворювач вологості ґрунту корпорації Sutron (США) являє собою датчик електричного опору, призначений для контролю вологості ґрунту (рис. 8.26). Як і перетворювач DT171A він являє собою циліндр, в якому основна стінка є напівпроникною (пропускає тільки воду), а в середині (циліндра) знаходяться два ізольовані електричні електроди і речовина, яка всмоктує вологу з ґрунту. Коли внутрішня всмоктувальна сила датчика більша, ніж сила у ґрунті, він всмоктує воду, і навпаки, датчик віддає воду, коли всмоктувальна сила ґрунту більша, ніж сила датчика.

Т. ч., між осмосом всередині датчика і осмосом ґрунту завжди існує динамічна рівновага. Діапазон осмотичних сил знаходиться в межах від 10 до 200 сантибар, а виміряний електричний опір – в межах від 500 до 30000 Ом.

Недоліками такого типу датчиків є велика інерційність. Окрім того, датчик – сорбційний, і його всмоктуюча здатність з часом може змінюватись, а з нею і його градуювальні параметри. Внутрішній наповнювач датчика може хімічно взаємодіяти з ґрунтом, а це, в свою чергу, призведе до змін його електричних градуювальних параметрів.



Рис. 8.26. Датчик вологості ґрунту корпорації Sutron

Один із простих і недорогих сенсорів, **FC-28**, який може використовуватись в автоматичних системах керування вологістю ґрунту, показаний на рис. 8.27.

Він зібраний на мікросхемі LM393, має окремий чутливий елемент, настройку чутливості й працює в комплекті з мікроконтролером Arduino. Напруга живлення 3-5 В, струм 35 мА. Чутливий елемент датчика FC-28 вставляється в ґрунт. Між двома електродами чутливого елемента створюється невелика різниця напруг. Якщо ґрунт сухий, його опір великий і струм датчика буде

малим. Якщо земля волога, її опір менший і струм датчика буде більшим.



Рис. 8.27. Датчик вологості ґрунту FC-28

Датчик має два виходи: аналоговий і цифровий. За результуючим аналоговим вихідним сигналом можна судити про ступінь вологості ґрунту (для 10-бітного АЦП): 0-300 – сухий ґрунт; 300-700 – вологий ґрунт; > 700 – датчик у воді. Цифровий сигнал призначений для автоматичного управління навантаженням. Його можна налаштувати на задану вологість ґрунту (порогове значення). Поріг вологості виставляється змінним резистором. Якщо вологість ґрунту вища за порогову, то датчик видає сигнал низького рівня (0), а якщо нижча від порогової – то високого рівня (1).

8.5.5. Вологоміри на основі електромагнітних методів вимірювання вологості

Електромагнітні методи вимірювання вологості ґрунтуються на різниці значень діелектричної проникливості твердої основи, повітря і води. Тому їх ще називають діелькометричними (діелектричними) методами.

Діелькометричний метод визначення вологості передбачає оцінку вологовмісту за результатами вимірювання діелектричної проникливості та тангенса кута діелектричних втрат вологих матеріалів та речовин у широкому діапазоні частот – від звукових до надвисоких частот.

Діелектрична проникливість речовини характеризує поляризацію діелектриків під впливом зовнішнього електричного поля. Вона показує, у скільки разів сила взаємодії між зарядами у вакуумі

перевищує силу взаємодії між тими ж зарядами в даному середовищі. Діелектрична проникливість води є майже сталою величиною (близько 80), тоді як діелектрична проникливість сухого ґрунту становить 3-12. Отже, діелектрична проникливість ґрунту є дуже чутливою до об'ємної вологості ґрунту. Наприклад, зміни вмісту води в ґрунті від 20 до 21,8 % відповідає зміна діелектричної проникливості ґрунту від 3 до 5.

Слід зазначити, що діелектрична проникливість та діелектричні втрати залежать не тільки від вологовмісту, але і від частоти змінного електричного поля, температури, густини тощо.

Порівняно з кондуктометричним, діелькометричний метод має такі переваги: меншу чутливість до температури матеріалу, можливість компенсації впливу втрат (до $\tan\delta=100$), незначний вплив на результати вимірювання нерівномірного розподілу вологи по об'єму досліджуваної речовини, більшу швидкодію та вищу точність вимірювань.

Недоліком методу є необхідність калібрування вимірювальних приладів

На практиці вимірювання діелектричної проникливості ґрунту здійснюють шляхом визначення опору між двома електродами, розміщеними в ґрунті, або вимірюванням ємності конденсатора, який утворюється вологим ґрунтом між двома обкладинками. Сенсори такого типу компактні, мають невелику вартість та можуть застосовуватись в автоматизованих системах вимірювання вологості ґрунту. Розглянемо характеристики існуючих вологомірів.

Цифровий вологомір МГ-44, розроблений харківськими вченими, застосовується для вимірювання вологості ґрунту (чорнозем, глина, суглинок, пісок), а також інших матеріалів, наприклад, зернові культури, цемент, бетон та ін. Користувач може самостійно додавати нові матеріали (калібрування) в пам'ять приладу (до 99 шт.). Вимірювання проводяться за допомогою чутливого радіочастотного датчика, рис. 8.28, а.



а



б



в



г



д



е

Рис. 8.28. Вимірювачі вологості ґрунту:

а – МГ-44; б – AQUATERR M-350; в – MS-350A; г – SM3002B;
 д – RIXEN MTR-731; е – комбінований вимірювач ZD-06

Датчик випромінює електромагнітну хвилю високої частоти, поширення якої залежить від діелектричної проникливості

середовища. При збільшенні вмісту води в речовині при незмінній температурі його діелектрична проникливість збільшується. Залежно від значення діелектричної проникності частина випромінюваної датчиком хвилі при поширенні поглинається, а частина відбивається в напрямку датчика. Порівнюючи амплітуди падаючої і відбитої хвиль мікропроцесор обчислює коефіцієнт відбивання і на його основі визначає вміст вологи в речовині. Значення вологості і назва речовини відображається на рідкокристалічному дисплеї

Вологомір ґрунту МГ-44 комплектується щупом довжиною 0,5 м, яка за потребою може бути змінена в більшу або меншу сторону. Покази приладу не залежать від зміни температури ґрунту і його солоності. Електронна корекція калібрувальної характеристики в межах $\pm 5\%$ з кроком 0,1 % є незалежною для кожного каналу.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірюваної вологості, %	0-100.
Точність, %	1.
Довжина вимірювальних електродів, мм	60.
Діаметр електродів, мм	3.

Портативний вологомір AQUATERR M-350 (AQUATERR, США) призначений для експрес-вимірювання вологості ґрунту. Його принцип дії заснований на високочастотному вимірюванні ємнісного опору. Датчик вологості, довжина якого становить 10 см, знаходиться на кінці електрода із нержавіючої сталі, довжиною 75 см, рис. 8.28, б. Це дозволяє вимірювати вологість в окремих ґрунтових горизонтах і визначити водопроникність ґрунту в будь-якій точці поля на глибині від 10 до 75 см.

Результати вимірювання вологості ґрунту у відсотках відображаються на РК-дисплеї. Є також і кольорова аналогова шкала, яка служить для індикації значення вологості.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірювання вологості, %	0 – 100.
Точність вимірювання, %	1,5.
Датчик	ємнісний.
Довжина зонда, см	76.
Діаметр зонда, см	1,25.
Загальна довжина приладу, см	91.
Живлення, В	9, батарея.
Вага, кг	2,3.

На результати вимірювання впливає щільність ґрунту. Чим більша щільність ґрунту, тим менший вміст повітря в ньому. Пухкий ґрунт всмоктує повітря і його вміст у ґрунті більший. Температура, рН, розчинні солі і вільні іони металів у ґрунті практично не впливають на точність вологоміра.

Вологомір MS-350A (Китай) являє собою цифровий прилад для вимірювання вологості ґрунту, піску, цементу, сипучих матеріалів з виносним датчиком вологості.

У приладі використовується високочастотний метод вимірювання шляхом випромінювання електромагнітного поля безпосередньо в шар досліджуваного матеріалу. Для цього вологомір оснащений виносним датчиком-щупом, який занурюється в шар досліджуваної речовини, рис. 8.28, в. У кінці щупа вмонтована вставка з діелектричного матеріалу, яка забезпечує замикання електричного кола через аналізовану речовину.

Технічні характеристики MS-350A:

Діапазон вимірювання вологості, %	0 – 60.
Точність вимірювання, %	± 0,5
Роздільна здатність, %	0,1.
Дисплей	4-розрядний LCD.
Розміри вимірювального блоку, мм	140×60×22.
Довжина щупа, см	30.
Діаметр щупа, мм	6.
Вага (без елементів живлення), г	120.

Вимірювач розраховує показник вологості за відгуком ВЧ сигналу з урахуванням обраного калібрування. Кількість калібрувань для різних матеріалів – 20.

MS-350A оснащений також калібруванням нуля, автоматичною температурною компенсацією і підсвічуванням екрану. Він працює від стандартних елементів живлення AAA (4 шт), має функцію автовідключення і сигналізатор низького заряду батареї.

Умови експлуатації вологоміра: температура навколишнього середовища від 0 до +60 °C, вологість від 5 до 85 % RH.

Датчик вологості ґрунту і температури SONBEST SM3002B (Китай) позиціонується як детектор вологи с/г угідь і призначений для тривалого використання як на поверхні ґрунту, так і глибоко в ґрунті. Він забезпечує вимірювання і передачу на відстань по двопроводовій лінії інформації про вологість і температуру ґрунту, рис. 8.28, г. Передавання проводиться за допомогою загальних інтерфейсів. Також датчик дозволяє контролювати відповідний вміст води в ґрунті для нормального росту окремих культур, наприклад, у діапазоні 12-20 %.

Принцип роботи датчика полягає у вимірювання діелектричної проникливості ґрунту на частоті 100 МГц.

Технічні характеристики

Діапазон вимірювання, %:

Вологості 0 ~ 100;

точність, %: 3 (у діапазоні 0 ~ 50 %).

Температури, °C -30...+70;

точність, °C ±0,5.

Час вимірювання, с 2.

Час відгуку, с 1.

Вихідний сигнал: 4 ~ 20 мА (за замовчуванням)/0 ~ 5 В.
RS-485 (MODBUS-RTU протокол).

Напруга живлення: 12 ~ 24 В DC.

Робочий струм, мА 60.

Габарити, мм 80x50x20.

Діаметр зонда, мм 3,5.

Датчик може підключатися безпосередньо в режимі он-лайн до різних інструментів відображення інформації. По інтерфейсу RS-485

за протоколом MODBUS-RTU може працювати з ПК чи обмінюватись даними в мережі Ethernet.

На ринку вимірювачів вологості України представлені різні аналогічні датчики для автоматичних систем поливу ґрунту: RIXEN, GARDENA, DEVI, Toro, комбіновані прилади: вологомір ґрунту/pH-метр ZD-06, pH-метр/вологомір/електронний термометр PH-300 та ін. Технічні характеристики перетворювачів RIXEN та ZD-06 наведені в табл. 8.31, зовнішній вигляд – на рис. 8.28, д, е.

Таблиця 8.31.

Технічні характеристики перетворювачів RIXEN та ZD-06

Найменування характеристики	Значення характеристики		
	MTR-731	MTR-732	ZD-06
Діапазон вимірювання: вологості, %	Абсолютна вологість 6,0 ~ 56,0	Абсолютна вологість: 6,0~56,0	Відносна вологість 10 ~ 80
температури, °C		-40 ~ 60	
рівня PH			від 3 до 8 PH
Точність вимірювання:			
вологості, %	±2 (при 25 °C)	±2 (при 25 °C)	
температури, °C		±0,4	
кислотності, pH			± 0.3
Стабільність, %	Не гірша ніж 1/рік		
Температурна компенсація, %/°C	±0,02		
Час відгуку, с	~ 3		
Вихід, mA			
Вологість:	4 ~ 20, двофазний	4 ~ 20, двофазний	
Температура, mA: (В DC):		4 ~ 20 (двофазний); (0 ~ 2)	
Блок живлення, В	12 ~ 40 DC, > 120 mA		
Робоча температура, °C	-40 ~ 60		
Вага, г	190		
Габарити, мм:			
прилад	φ=90, h=54;		
електрод	φ=8, l=150		
			φ=50, h =410; l=300

Дієлькометричний метод застосовується в георадіолокації для дистанційних вимірювань. Основним параметром, за яким визначають властивості матеріалу георадіолокаційні системи, являється його діелектрична проникливість.

На рис. 8.29 показаний **радіолокатор для визначення вологості ґрунту**, який суміщає в одному корпусі вимірювач і датчик. Передавач вологоміра працює на частотах: 200, 400, 600, 800 і 1000 МГц. Вимірювання виконуються з поверхні ґрунту за допомогою двох невеликих (7,5 см) антен.



Рис. 8.29. Радіолокатор для визначення вологості ґрунту

Георадарні технології дозволяють оперативно отримувати неперервну інформацію про фізичні властивості ґрунтів в режимі реального часу. Недоліком такого типу приладів є те, що ними можна визначити вологість лише у верхньому шарі ґрунту на глибині до 10 см. Існують також обмеження, пов'язані зі складністю інтерпретації даних георадарного зондування. Такий же недолік мають і аерокосмічні прилади.

НВЧ-метод ґрунтується на визначенні вологості за параметрами відбитих електромагнітних хвиль, або хвиль, які пройшли крізь досліджуваний матеріал. Як інформативний параметр використовуються амплітуда, фаза або кут повороту площини поляризації лінійно-поляризованої електромагнітної хвилі. НВЧ-метод характеризується великою чутливістю, точністю та можливістю безконтактних вимірювань. Безперечною перевагою методу є незначна чутливість до фізико-хімічних властивостей досліджуваних речовин та матеріалів, що дає змогу аналізувати середовища з великими активними втратами. Вплив на результати вимірювання гранулометричного складу і структури досліджуваної речовини, фазового складу води, інших чинників у НВЧ-вологомірах зведено до мінімуму.

Розробником **надвисокочастотного вологоміра ґрунтових зразків СВП-5** є Білоруський державний аграрний технічний університет. Прилад призначений для експресного визначення вологості ґрунтів. Його принцип дії заснований на вимірюванні

ослаблення електромагнітної енергії надвисокочастотного поля вологими зразками ґрунтів. За твердженням розробника, вимірювання в частотному діапазоні 10 ГГц дозволили виключити вплив хімічного складу ґрунтів на результат вимірювання вологості.

Недоліком СВП-5 є те, що він потребує відбору ґрунтових зразків ґрунтовим буром і не є репрезентативним для окремого поля.

Високочастотний вологомір FIZEPR-SW100.11 знаходить широке застосування в с/г (ґрунт, зерно, торф), будівельній індустрії (бетон, пісок, щебінь), нафтохімічному і паливному виробництві. Прилад не потребує попереднього градування і працювати з різноманітними матеріалами дрібних і великих фракцій.

Система вимірювання включає з'єднані між собою зонд (датчик) і блок електроніки. Конструктивно зонд виконаний у вигляді циліндричного корпусу з двома стрижнями, рис. 8.30. Довжина зонда датчика узгоджується. Зонд більшої довжини дає вищу точність результатів, оскільки охоплює більший обсяг продукту. Типова довжина обмежена 220 мм.

Прилад працює в метровому радіодіапазоні і використовує метод визначення вологості за діелектричною проникливістю матеріалу, від якої залежить швидкість радіохвиль і ступінь поглинання енергії випромінюваних сенсором радіоімпульсів.

Технічні характеристики FIZEPR-SW100.11:

Діапазон вимірювання вологості, %	0 ~ 100.
Точність (залежно від діапазону), %	0,3... 5.
Робоча температура, °С:	
зонда (сенсора),	до +335.
електронного блоку, °С	-20...+80.
Живлення, В	18...36.

Зондування обсягу продукту відбувається кожну секунду. Після цього за результатами 5 зондувань обчислюється середнє значення діелектричної проникливості. База усереднення може бути змінена програмно. За розрахунковими даними діелектричної проникливості обчислюється вологовміст матеріалу. Комунікаційні

інтерфейси вимірювача: RS-485 (Modbus RTU) і аналоговий вихід 4 ~ 20 мА.

На думку фахівців, НВЧ-метод є найбільш ефективним безконтактним методом вимірювання вологості ґрунту, що забезпечує найвищу точність і мінімальний час вимірювання.

В основу **оптичних методів** покладено вимірювання вибіркового поглинання вологим ґрунтом електромагнітного випромінювання визначеної довжини хвилі або випромінювання, відбитого від поверхні ґрунту.

Інфрачервоний метод вологометрії засновано на тому, що в спектрі з довжиною хвилі 0,8–6,1 мкм вода має ряд досить сильних смуг поглинання різної інтенсивності ($\lambda = 1,94$ мкм і $\lambda = 2,48$ мкм).

На рис. 8.30 показаний зовнішній вигляд **інфрачервоного вологоміра IRMM-106**.



Рис. 8.30. Вологоміри НВЧ SW100.11 та ІЧ IRMM-106

У промисловості застосовуються інфрачервоні вологоміри типу ВКИ-1, ВСМИ-1, АНАКОН, що вимірюють вологість матеріалу в потоці на конвеєрі. Вимірювальна головка приладів встановлюється над стрічкою. Для компенсації впливу інших фізико-хімічних властивостей матеріалу використовується додаткове джерело інфрачервоного випромінювання.

Перевагами ІЧ-методів є: висока чутливість і точність вимірювання вологості та можливість разом з вологою визначати інші компоненти речовини.

Головним недоліком методу є можливість отримання інформації про вологість лише на поверхні ґрунту. Оскільки властивості поверхні матеріалу при висиханні значно змінюються, то

результати вимірювань на поверхні відрізняються від глибинних. У порівнянні із надвисокочастотним ІЧ-метод є також більш чутливим до розмірів частинок.

8.6. Вологість зерна

Вологість зерна – один з найбільш важливих показників його якості, який визначає здатність зерна до тривалого зберігання та впливає на його кількість, оскільки вага зерна в значній мірі залежить від його вологості. Тому вологість зерна постійно контролюється при збиранні, транспортуванні, в зерносховищах і елеваторах, а також перед помелом. Після збирання врожаю відбувається дозрівання зернових культур, яке може тривати близько 1 – 2 місяців. У цей період зерно посилено дихає, зволожується, в ньому відбуваються фізіологічні і фізико-хімічні процеси, що потребує особливої уваги до температурно-вологісних параметрів зерна і умов зберігання.

У зерні з підвищеною вологістю інтенсивність дихання різко зростає. Зерно набухає, починаються процеси вегетації, зерно проростає. Активно розвиваються шкідники та мікроорганізми. Все це призводить до інтенсивного утворення тепла, відомого як процес самонагрівання зерна. При цьому спостерігаються значні втрати якості та маси зерна в розмірі 0,2 % сухої речовини за добу. При підвищенні температури зерна до 55-60 °C можливе загальне псування партії.

При охолодженні зерна і зниженні його температури до 10 °C інтенсивність дихання, біохімічних процесів та розвиток шкідників відбуваються дуже повільно.

Рівень вологості, при якому в зерні виникає вільна волога, а також різко збільшується інтенсивність дихання, називають критичним. Її величини різні для кожного виду зернової культури. Для зерна пшениці, жита, ячменю, рису та гречки вона знаходиться на рівні 14,5 – 15,5 %, у зернобобових культур 15 – 16 %, для кукурудзи та вівса 13,5 – 14,5 %. Нормативи рівня вологості для зернових і фуражних культур наведені в табл. 8.32.

Таблиця 8.32.

Нормативи вологості зернових культур

<i>Назва культури</i>	<i>Діапазон гранично допустимих значень вологості, %</i>
Пшениця	14 – 15
Овес	14 – 14,5
Гречка	14 – 15
Кукурудза	13 – 14,5
Соняшник	6 – 8
Просо	13 – 14
Ріпак	6 – 8
Льон	13 – 14,5
Сіно	10 – 12,5
Рис	13,5 – 14,5
Горох	15,5 – 17
Квасоля	15,5 – 17

У сухому зерні біохімічні процеси майже повністю припиняються, а вплив факторів, що призводять до псування врожаю, стає мінімальним. Таке зерно може довго зберігатися, практично не втрачаючи маси. При вологості, меншій гранично допустимих значень, табл. 8.32, зернові культури можна зберігати розсипом на підлозі, насипом висотою 2-3 м або в мішках. Відповідно до технічних умов ДСТУ 3768: 2010 вологість зерна пшениці не повинна перевищувати 14 %.

У зв'язку з надзвичайною важливістю показника вологості зерна активно розвиваються методи вимірювання, розробки і виробництво нових вимірювальних приладів для визначення вологості зерна в лабораторних і виробничих умовах.

8.6.1. Методи визначення вологості зерна

Існуючі методи визначення вологості зерна можуть бути поділені на дві основні групи: прямі, які дозволяють безпосередньо визначити кількість води в зразках, і непрямі, за якими вологість визначається шляхом вимірювання функціонально залежних від вологості фізичних величин.

До прямих відносяться методи, які дозволяють видалити із досліджуваного зразка воду і виміряти її кількість. Це такі методи: гравіметричний, екстракційний, дистиляційний, хімічний, титрування. Розглянемо ці методи.

Гравіметричний (термогравіметричний) метод заснований на тепловому (вакуумно-тепловому) видаленні вологи із досліджуваного зразка, вимірюванні маси зразка до і після його висушування і подальшому розрахунку масової частки вологи. Гравіметричний метод є нормативним методом визначення вологості зерна, що регламентується стандартом ДСТУ ГОСТ 29144: 2009 (ISO 711-85). Цей стандарт використовується у міжнародній практиці при експорті та імпорті зернової продукції.

Значення вологості визначається за різницею мас двох бюксів із зерном до висушування і після. Вологість визначають у відсотках за формулою:

$$W = (b-c) \cdot 100 / (b-a),$$

де a – маса бюкси з кришкою, b – маса бюкси з кришкою і пробойою зерна до висушування, c – маса бюкси з кришкою і пробойою зерна після висушування, г.

При попередній просушці зерна, яке має вологість більшу, ніж 17 %, його вологість визначається за формулою:

$$W = 100 - (m_3 - m_4) / (m_1 - m_2),$$

де m_1 – це маса проби меленого зерна до висушування, m_2 – після висушування, m_3 – маса проби цілого зерна до висушування, m_4 – після висушування. Розбіжність результатів між пробами з двох бюксів допускається не більше 0,2 % для зернових культур, і не більше 0,7 % для кукурудзи і бобових.

Основною перевагою гравіметричного методу є висока точність вимірювання вологості аж до 0,005 %, основним недоліком – тривалість вимірювань і ціна (див. п.8.5.1). Метод потребує значних витрат часу, ресурсів, дотримання лабораторних умов і не годиться для оперативних вимірювань у польових умовах, складських і виробничих приміщеннях.

Екстракційний метод полягає у видаленні води із досліджуваного зразка водопоглинаючою рідиною (спиртом, гліцерином й ін.) і вимірюванні функціонально залежних від вологості зразка показників отриманого екстракту (таких, як густина, коефіцієнт заломлення, коефіцієнт поглинання і т.п.).

Зокрема, використовується екстракція зерна метанолом з подальшим дослідженням спектру поглинання випромінювання в діапазоні хвиль 1,8-2,0 мкм. Вміст води визначається за величиною поглинання випромінювання з довжиною хвилі 1,93 мкм (див. п. 8.5.5). Поправку на фонове поглинання визначають на хвилях $\sim 1,8$ мкм, які водою не поглинаються. Вміст води визначають за градувальним графіком поглинання випромінювання розчинами метанолу з відомим вмістом води. Похибки методу пов'язані з наявністю суспендованих частинок у метанольному екстракті та відмінністю температур у робочій і порівняльній кюветах.

Дистиляційним називають метод, суть якого полягає у перегонці води із досліджуваного зразка і визначенні її кількості. Перегонку проводять використовуючи органічну рідину, яка не змішується з водою (толуол, ксилол, бензол, трихлоретилен й ін.). При кип'ятінні зразка з двома незмішуваними рідинами утворюються пари, парціальний тиск яких нижчий, ніж тиск пари кожної окремої рідини. Це дозволяє здійснювати перегін води із зразка і за її кількістю визначати його вологість. Недоліком методу є невисока точність, витрати органічної рідини і необхідність неперервного спостереження за кожною перегонкою.

Хімічні методи ґрунтуються на взаємодії хімічного реагенту з водою, яка міститься у зразку. Так, використовується взаємодія з водою карбиду кальцію, при якій виділяється ацетилен. За об'ємом виділеного ацетилену визначають вологість зразка.

Метод титрування оснований на змішуванні розчину досліджуваної речовини з розчином відомої концентрації (титрованого розчину) до встановлення еквівалентних співвідношень (точки еквівалентності) і визначенні вологості за кількістю використаного титрованого розчину.

Метод титрування розробив німецький хімік К.Фішер (1935 р.), який запропонував реагент (реактив Фішера), що складається з спирту (ROH), основи (B), оксиду сірки (SO₂) і йоду (I₂). При титруванні використовується реакція окислення-відновлення за участю йоду і двоокису сірки. За наявності води йод окислює SO₂, при цьому один моль I₂ взаємодіє з 1 молекул H₂O, що дозволяє за кількістю використаного реагенту визначити кількість води в зразку.

У даний час використовуються два варіанти методу: кулонометричний і волюметричний (об'ємний). При **кулонометричному методі** основна частина комірки титрування заповнюється анодним розчином (реактивом Фішера), в який поміщається досліджуваний зразок. В анодний розчин занурюється також катодна частина. Анодна і катодна частини розділяються іон-проникливою мембраною. При протіканні струму на аноді електролітично утворюється йод, який окислює двоокис сірки, використовуючи наявну в зразку воду.

Точка еквівалентності, як правило, визначається біпотенціометричним методом за допомогою додаткових контрольних платинових електродів у анодному розчині, між якими пропускається постійний струм. У точці еквівалентності при відсутності води з'являється надлишок I_2 , що призводить до різкого падіння напруги між електродами. Сумарний заряд, який пішов на виділення йоду, пропорційний вмісту води в зразку.

Кулонометричні титратори за методом Карла Фішера дозволяють проводити швидко і точно титрування зразків з низьким вмістом води від 1 ppm (1 мг/кг) до 5 %.

У **волюметричному методі** контролюється кількість титранту, який додається в зразок за допомогою поршневої бюретки. Точка еквівалентності визначається біпотенціометричним методом. Кількість води в зразку розраховується за об'ємом використаного реагенту Фішера.

Волюметричні титратори за методом Карла Фішера мають широку сферу застосування і використовуються для швидкого і точного вимірювання вмісту води в широкому діапазоні: від 100 ppm (100 мг/кг) до 100 %.

До непрямих методів належать електрометричні методи, засновані на залежності електропровідності або діелектричної проникливості досліджуваного зразка від вологості (див. п. 8.5.4, 8.5.5).

Залежність електричної провідності від вологості використовується в **кондуктометричному методі**. Зерно, яке в сухому стані є діелектриком, при зволоженні стає провідником. Питомий опір вологого зерна змінюється в залежності від вмісту вологи в досить широкому діапазоні. В найбільш важливому для

контролю діапазоні вологості 5-17 %, окремо взяте зерно має опір порядку десятка МОм, а проби зерна – порядку сотні МОм.

Перевага методу – висока швидкість вимірювання. Недолік – невисока точність вимірювання, обумовлена похибкою вимірювання великих значень (десятки-сотні МОм) опору. Виміряти опір у сотні МОм з малою похибкою технічно непросто і, відповідно, складно отримати точне значення вологості. Крім того, показники електропровідності залежать від декількох факторів: температури зерна, простору між зернами, наявності домішок, хімічного складу культури та ін.

Діелькометричний метод визначення вологості зерна ґрунтується на залежності діелектричної проникливості досліджуваного зразка від вологості. Зерно в сухому вигляді має діелектричну проникливість до 10 безрозмірних одиниць, а діелектрична проникливість води – близько 81. За виміряною діелектричною проникливістю зразка можна визначити вміст води в зерні.

Одним з різновидів діелькометричних вологомірів є ємнісні. **Ємнісні вологоміри** дозволяють проводити контроль вологості за величиною електричної ємності конденсатора, між обкладинками якого знаходиться зерно. Вимірювана ємність є функцією діелектричної проникливості і відповідно вологості контрольованого матеріалу.

Від діелектричної проникливості матеріалу залежать параметри електромагнітних коливань, які поширюються в ньому (амплітуда, фаза, швидкість та ін.). При використанні високочастотних електричних коливань (з частотою 3-30 МГц) вологість можна визначити за величиною затухання коливань при поширенні через шар матеріалу.

Залежності параметрів електромагнітних хвиль від вологості матеріалу, зокрема, швидкості поширення від діелектричної проникливості, **використовуються у НВЧ вологомірах**. Чим більша діелектрична проникливість, тим повільніше поширюється радіосигнал. Вимірюючи час проходження радіохвилі через матеріал, і знаючи товщину матеріалу, можна обчислити його діелектричну проникливість і, відповідно, вологість.

Покази діелькометричних (ємнісних) датчиків і однопараметричних НВЧ-вологомірів суттєво залежать від

властивостей зерна. Тому після кожної зміни одного сорту зерна на інший, або після зміни складу помольної партії вони потребують нового калібрування.

Відомі й інші методи визначення вологості. На ринку контрольно-вимірювальних приладів представлена велика кількість різних вимірювачів вологості зерна, насіння, кормів, харчових продуктів та інших матеріалів. Розглянемо вологоміри провідних вітчизняних та зарубіжних виробників і їх основні характеристики.

8.6.2. Гравіметричні аналізатори вологості зерна

Компанія **RADWAG (Польща)** виготовляє **аналізатори вологості MA серії R**, принцип роботи яких оснований на гравіметричному методі. При вимірюванні досліджуваній зразок зважують (ця функція вбудована в аналізатор) і нагрівають до температури 160 °C (за необхідності температура може сягати 250 °C). Нагрівання здійснюється інфрачервоним випромінювачем, що забезпечує рівномірний розподіл термічної енергії.

При висушуванні волога випаровується з досліджуваного зразка і його вага зменшується. Значення вологості визначається за різницею мас зразка до і після висушування. Результат вимірювання відображається на дисплеї, рис. 8.31, в одному з двох можливих варіантів – вміст води в зразку або маса сухого залишку.



Рис. 8.31. Аналізатори RADWAG MA110.R та OHAUS MB23

Аналізатори RADWAG використовуються в харчовій, фармакологічній, легкій, деревообробній, паливно-енергетичній промисловостях. Технічні характеристики аналізаторів вологості серій MA50R, MA110.R, MA210.R наведені в табл. 8.33.

Таблиця 8.33.

**Технічні характеристики аналізаторів вмісту вологості
RADWAG серій MA50R, MA110.R, MA210, MA 50/1.R**

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>			
	<i>50.R</i>	<i>110.R</i>	<i>210.R</i>	<i>50/1.R</i>
Максимальне навантаження, г	50	110	210	50
Дискретність зважування, г	0,001			0,0001
Мінімальне навантаження, г	0,02			0,002
Дискретність визначення вологості, %	0,001			0,0001
Точність виставлення температури, °C	1			
Діапазон температури висушування, °C	50-160			
Інтервал між вимірюваннями, с	1-59			
Максимальний час висушування, хв.	110			
Відображення на дисплеї	Час висушування – маса (вологість, %); – температура висушування			
Діаметр одноразової тарілки, мм	90			
Температура експлуатації, °C	+5 – +30			
Маса брутто, кг	8,5			
Індикатор	рідкокристалічний			
Кількість баз даних	6			
Клас точності згідно з ГОСТ 24104-88	4	3	2	
Клас точності згідно з ДСТУ EN 45501	II			I
Максимальна температура висушування, °C	базова – 160, до 250 (за замовленням)			

Аналізатор вологості OHAUS MB23 (Ohaus Corporation, США) функціонує на основі методу гравіметричного аналізу і є високоточним лабораторним приладом для визначення вологості, температури і ваги зразків. Аналіз проводиться шляхом нагрівання нелетучих зразків матеріалів джерелом теплового випромінювання, яким в OHAUS MB 23 є інфрачервона лампа. Принцип аналізу полягає у вимірюванні втрати маси досліджуваного зразка вбудованими електронними вагами при висушуванні.

Аналізатор використовується при дослідженні зернофуражних культур, заготівлі лікарських трав (квіткових кошиків, стебел, листків, пилку) та корму для тварин і птиці, у фармацевтичній, хімічній, харчовій й інших галузях господарської діяльності.

Основні характеристики вологоміра ОНАУС MB 23:

Температурний діапазон, °C	50...60 (з кроком 5).
Відносна похибка, %	0,01
Дискретність показань вологості, г/%	0,01/ 0,1.
Найбільша границя зважування, г	110.
Найменша границя зважування, г	5.
Клас точності	2.
Повторюваність, %:	
при масі зразка 3 г	0,2;
при масі зразка 10 г	0,05.
Інтерфейс	RS-232.
Розмір платформи/діаметр чаші, мм	90.
Габаритні розміри, мм	170x130x280.
Вага, кг	2,3.

Зовнішній вигляд аналізатора показаний на рис. 8.31. РК дисплей аналізатора забезпечує відображення: % вологості/твердого залишку/маси/температури/часу. Аналізатор обладнаний таймером на 1-99 хв. з інтервалом 30 с.

Допустимі діапазони вологості та температури навколишнього середовища: температури – від 10 до 40 °C; відносної вологості – від 15 до 80 %.

Аналізатор ОНАУС MB 23 укомплектований:

1. Консоллю керування процесом вимірювання вологості.
2. Набором для калібрування температури сушки.
3. Набором для калібрування маси досліджуваного зразка.
4. Портативним принтером SF40A.

Прилад внесено у Державний реєстр засобів вимірювальної техніки України.

Повітряно-теплова установка АВТУ-1 (НВП "Агроприлад") призначена для вимірювань масової частки вологи в зерні, зернопродуктах і насінні олійних культур за стандартизованими методиками на конкретну речовину (продукт).

Принцип дії установки полягає у вимірюванні маси зразка аналізованої речовини до і після її висушування з подальшим розрахунком значень масової частки вологи. Зовнішній вигляд установки показаний на рис. 8.32.



Рис. 8.32. Установка АВТУ-1 та електросушильні шафи СЕШ-ЗМ і СЕШ-ЗМУ

До складу установки входять: сушильна камера з терморегулятором, приводом обертання бюкс з пробями матеріалу, мікропроцесорним терморегулятором і блоком вентилявання, що забезпечує рівномірність сушки; ваги лабораторні. Технічні характеристики установки наведені в табл. 8.34.

Мікропроцесорна система управління температурними режимами забезпечує автоматичне встановлення і підтримання заданих температур, часу проведення вимірювань, а також звукову сигналізацію після закінчення процесу вимірювання. Вбудоване програмне забезпечення виконано на базі контролера Atmega 8 фірми Atmel.

Таблиця 8.34.

Метрологічні і технічні характеристики АВТУ-1

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Діапазон вимірювання вологості (масової частки вологи), %	від 5 до 45
Межі абсолютної похибки, %	$\pm 0,5$
Межа допустимого середнього квадратичного відхилення випадкової складової абсолютної похибки, %	0,08
Діапазон робочих температур, °C	від 105 до 150
Фіксовані значення температур, °C	105, 120, 130, 150
Похибка встановлення і підтримання температури, °C	$<2,0$
Час відновлення температури після завантаження бокс з вимірюваним продуктом, хв.	<10
Швидкість обертання столу, об/хв.	>2
Споживана потужність, В·А	<1200
Габаритні розміри, мм	$410 \times 370 \times 480$
Маса, кг	10
Умови експлуатації: температура навколишнього повітря, °C відносна вологість повітря, %	20 ± 5 <90

На підприємствах хлібопродуктової галузі використовують електросушильні шафи СЕШ-1, СЕШ-3, СЕШ-3М, СЕШ-3МУ. Шафа сушильна **СЕШ-3М (ТОВ "ОЛИС", Україна)**, рис. 8.32, призначена для сушки зерна, зернопродуктів, насіння бобових і олійних культур, а також інших вологомістких речовин при визначенні вологості.

Принцип дії шафи заснований на рівномірному висушуванні проби за допомогою повітряного потоку, що створюється нагрівальними елементами, відцентровим вентилятором і обертаним столом з пробами. Відмінною особливістю даної моделі є наявність електронного регулятора температури (ПД-регулятора ТК-4К). Електронний регулятор дозволяє встановлювати температуру в двох режимах 105 і 130 °C з точністю 0,5 °C. Технічні

характеристики сушильних шаф СЕШ-3М, СЕШ-3МУ наведені в табл. 8.35.

Таблиця 8.35.

Технічні характеристики сушильної шафи СЕШ-3М

Найменування характеристики	Значення характеристики	
	СЕШ-3М	СЕШ-3МУ
Робоча температура сушильної камери, °С	105; 130	105; 130
Середня тривалість розігріву шафи, хв.	15	10
Допустиме відхилення температури в опорній точці, °С	± 2	± 2
Місткість обертового столу, кількість бюкс	до 10	8
Швидкість обертання столу, об/хв.	5 ± 2	5 ± 2
Електроживлення, В/Гц	220/50	220/50
Габаритні розміри, см:		
сушильної шафи	49,5 x 36	52x36x36
охолоджувача	23 x 36	
Маса, кг	20	23

8.6.3. Титратори вологи

Автоматичні титратори вологи за Карлом Фішером серії **Titration Compact** фірми «Mettler Toedo AG» (Швейцарія) призначені для вимірювання масової частки води в твердих речовинах і рідинах, які не взаємодіють з реактивом Фішера. Вони являють собою автоматичні вимірювачі й забезпечують обробку та реєстрацію вихідної інформації.

Областю застосування титраторів є підприємства харчової, фармацевтичної, хімічної, нафтохімічної промисловості, хіміко-аналітичні лабораторії підприємств і науково-дослідних інститутів. Титратори використовуються також у лабораторіях, які здійснюють державний і виробничий контроль технологічних процесів, безпеки і якості продукції та сировини, питної води, об'єктів довкілля.

Титратори Compact моделей G10S, G20S використовуються для вимірювання вмісту іонів і речовин у водних і неводних розчинах, у харчових продуктах, лікарських препаратах і різних органічних

сполуках у діапазонах: рН – від 0 до 14, масової частки речовини в пробі – від 0,0001 до 100 %.

Титратори Compact моделей V10S, V20S, V30S, C10S, C20S, C30S призначені для вимірювання вмісту води в твердих речовинах та в газах і рідинах, які не взаємодіють з реактивом Фішера.

Титратори складаються з основного блоку, блоку подачі або генерації реагентів і блоку зливу реагентів, рис. 8.33. Основний блок здійснює вибір методу титрування, управління процесом титрування, відображення результатів, зберігання інформації, управління зовнішніми пристроями і виведення інформації на принтер або комп'ютер.



Рис. 8.33. Титратори Compact та АТП-02

Принцип дії титраторів заснований на хімічній реакції води з йодом і двоокисом сірки в присутності основи та спирту (див. п. 8.6.1). Вода і йод реагують один з одним у пропорції 1:1. При волюметричному методі визначення (моделі V20 і V30) йодовмісний титрант додається у вологий зразок, а при кулонометричному методі (моделі C20, C30) йод електролітично генерується в анодному розчині. По мірі використання води із зразка у хімічній реакції в розчині з'являється надлишок йоду, який визначається подвійним платиновим електродом. Кінцева точка

титрування фіксується за допомогою бі-вольтамперометричної індикації.

В моделях V20, V30 кількість води визначається за обсягом реактиву Карла Фішера, витраченого на досягнення кінцевої точки. В моделях C20, C30 кількість води визначається шляхом вимірювання загального споживання електроенергії, витраченої на досягнення кінцевої точки. В моделях C20 і C30 генерація йоду може здійснюватися як за допомогою генеруючого електроду з діафрагмою (C20Г, C300), так і за допомогою бездіафрагменного генеруючого електроду (C20Х, C30Х). Основні технічні характеристики титраторів наведені в табл. 8.36.

Таблиця 8.36.

Технічні характеристики титраторів Titration Compact

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>	
	<i>C20/C30</i>	<i>V20/V30</i>
Діапазон вимірювань маси води, мг	0,01 – 100	0,1 – 500
Межі відносної похибки, %	± 3,0	± 3,0
Граничне СКВ випадкової складової похибки, %	1,5	1,5
Місткість бюретки, см ³		1, 5, 10, 20
Напруга живлення, В	100–240 ± 10%	100–240 ± 10%
Частота напруги живлення, Гц	50 – 60	50 – 60
Середній строк служби, років	10	10
Габаритні розміри, мм	210x340x312	210x333x320
Маса, кг	3,3	4,2
Умови експлуатації:		
температура повітря, °С	Від 10 до 30	Від 20 до 80
відносна вологість, %	Від 5 до 40	Від 20 до 80.

Управління титратором здійснюється за допомогою кольорового сенсорного екрану. Передача даних на принтер може здійснюватися через вбудований інтерфейс USB або RS-232, зв'язок з комп'ютером – через вбудований інтерфейс RS-232 або Ethernet. Додатково титратори оснащені інтерфейсом TTL для управління зовнішніми пристроями.

Титратори мають вбудовану пам'ять. Дані з пам'яті можуть бути виведені на дисплей, записані на карту пам'яті USB, або відправлені

на ПК. До титраторів можна підключити аналітичні ваги, сушильну піч DO308 і автоматичний дозатор зразків Stromboli.

Титратор автоматичний потенціометричний АТП-02 (ТОВ "НПО АКВИЛОН") призначений для вимірювання концентрації іонів і речовин у розчинах в автоматичному режимі різними методами титрування (потенціометричного титрування; кислотно-основного титрування та ін.). Методи кислотного та лужного числа, загальної кислотності дозволяють також визначати кислотні і лужні числа, вміст S, Cl, Pb та інших речовин у мінеральних і харчових оліях, нафтопродуктах і інших продуктах. Титратор дозволяє також вимірювати ЕРС електродних систем та інших джерел постійного струму, температуру розчинів, а також може бути використаний як дозатор високої точності.

Механічна частина титратора виготовляється німецькою компанією SCHOTT, а керуюча електроніка і програмне забезпечення – компанією Аквілон. Зовнішній вигляд титратора показано на рис. 8.33, схема титратора представлена на рис. 8.34.

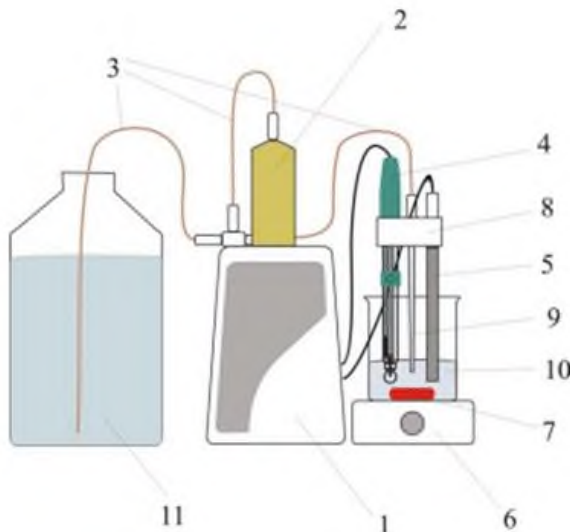


Рис. 8.34. Схема автоматичного потенціометричного титратора АТП-02

Титратор складається з блоку титрування (1), бюретки (2), рідинного тракту (3), комбінованого електрода для рН-метрії (4),

термометра опору (5), магнітної мішалки (6), якоря магнітної мішалки (7) і штатива (8). Електрод, термометр і носик рідинного тракту (9) занурені у стакан із досліджуваним зразком (10). Титрант знаходиться у бутлі (11).

Мінімальна порція титранту, яка може бути додана в розчин, становить 0,02 мл. Точність відліку об'єму титранту становить 0,001 мл. Технічні характеристики титратора АТП-02 наведені в табл. 8.37.

Управління титратором здійснюється з персонального комп'ютера за допомогою програмного забезпечення Titrate в середовищі WindowsXP. Залежно від розв'язуваної задачі програма Titrate може працювати в двох режимах: "Аналізатор" і "Дослідник".

Таблиця 8.37.

Технічні характеристики титратора АТП-02

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Макс. об'єм дозуючого пристрою, мл	20; 50
Дискретність відліку обсягу титранту, мл	0,001
Основна відносна похибка дозування, %	1,0
Діапазон вимірів: напруги, мВ величини рН (рХ), од. рН (рХ) температури, °С	від -2000 до 2000 від -20 до 20 від 0 до 100
Основна абсолютна похибка вимірювання: напруги, мВ величини рН (рХ) для одновалентних і двовалентних іонів відповідно, од. рН (рХ) температури, °С	1,0 0,01; 0,02 1,0
Споживана потужність (без ПК), ВА	40,0
Електроживлення, В/Гц	220±22/50
Габаритні розміри, мм	210х220х310
Маса, не більше, кг	5

Програмний комплекс Titrate – 5.0 для аналізатора постачається в декількох видах комплектацій, що мають різний рівень функціональних можливостей:

- базова комплектація Titrate-Base 5.0 (поставляється стандартно);

- розширена комплектація Titrate-5.0 Deluxe (опція).

Програмний комплекс Titrate-Base 5.0 забезпечує виконання наступних основних функцій.

Три методи титрування:

- 1) пряме титрування;
- 2) титрування до заданої точки в рН;
- 3) титрування до заданої точки в мВ.

Чотири режими автоматичних вимірювань:

- 1) визначення еквівалентної точки з дискретною подачею титранта в пробу;
- 2) вимірювання до заданої точки в рН або мВ з дискретною подачею титранта в пробу;
- 3) визначення еквівалентної точки з неперервною подачею титранта в пробу;
- 4) ручний режим вимірювання.

Калібрування робочого електрода в одиницях рН.

У комплексі наявні сервісні підпрограми, зокрема:

- промивка титратора;
- вимірювання рН проби;
- вимірювання потенціалу проби;
- дозування розчину в комірку;

Крім названих програмних комплексів Titrate поставляються цільові спеціальні програми, зокрема, програмний комплекс "Titrate корми" для вимірювання вмісту натрію і хлориду натрію в комбікормах і комбікормовій сировині, комплекс "Titrate-5.0 Хлориди" для вимірювання хлористих солей в нафті і нафтопродуктах, комплекс "Titrate-5.0 Сірка" для вимірювання H_2S і меркаптанової сірки в нафті і нафтопродуктах.

8.6.4. Портативні вимірювачі вологості зерна

Розглянемо існуючі вимірювачі вологості, які використовуються для оперативних вимірювань вологості зернової і насінної продукції в лабораторних та польових умовах. Відомими є вимірювачі вологості зерна **Wile, Farmex MT-PRO** компанії **Farmcomp** (Фінляндія). Вимірювач вологості зерна **Wile 55** дозволяє оперативно вимірювати вологість 16 різних культур:

пшениця, ячмінь, жито, овес, рис, кукурудза, насіння соняшника, ріпак, сорго, гірчиця, горох, звичайні і соєві боби, льон, гірчиця, нут.



Рис. 8.33. Вимірювачі вологості зерна Wile, Farmex MT-PRO, ВСП-100, Riceter F508, PM-450

Робота вимірювача Wile 55 ґрунтується на дієлькометричному методі. При вимірюванні проба культури набирається мірною чашкою (близько 90 см³) і висипається в комірку вимірювального приладу. За допомогою кришки здійснюється стискання зерна для усунення неоднорідностей і зменшення впливу зовнішніх факторів на результати вимірювання. Тривалість процесу вимірювання складає 20-30 с. Точність вимірювання знаходиться в межах від 0,5 до 1,5 %. Вологомір автоматично компенсує різницю між зовнішньою температурою і температурою зерна у вимірювальній камері. Забезпечена можливість внесення поправок до заводських вимірювальних шкал для кожної культури в межах ± 4 %. Результат вимірювання кількості води в процентному відношенні до загальної маси зразка відображається на РК-дисплеї приладу, рис. 8.33. Технічні характеристики вимірювачів вологості зерна Wile 55, Wile 65, Wile 78 наведені в табл. 8.38.

Вологомір Wile 200 має більш широкі функції. Він вимірює вологість, об'ємну вагу і температуру зразка в діапазоні температур 5-45 °С та забезпечує виконання функції компенсації температури і об'ємної ваги. При необхідності на кожен вид зерна можна встановити індивідуальну поправку в межах ± 10 %. За результатами послідовності вимірів вологомір автоматично розраховує їх середнє значення. Технічні характеристики Wile 200 наведені в табл. 8.38.

Таблиця 8.38.

Технічні характеристики вимірювачів вологості зерна Wile

Найменування характеристики	Значення характеристики			
	Wile 55	Wile 65	Wile 78	Wile 200
Кількість культур	16	16	>20	
Діапазон вимірювання, % Зерно і насіння Олійні культури	8-35 5-25	8-35	3 – 40 (різних культур)	8-25 5-20
Точність, %	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5
Діапазон вимірювання, °C				5 – 45
Настройка користувачем	так	так	так	так
Зовнішній датчик температури W 651	ні	так	ні	ні
Живлення приладу	батарея 6F22 (Крона)			4 батареї AA (LR6)

Farmex MT-PRO – нова модель вологоміра компанії Farmcomp, яка створена на базі вологомірів Wile. Вимірювач аналізує культури: пшеницю, жито, ячмінь, овес, гречку, просо, сорго, кукурудзу, сояшник, горох, сою, рапс, льон, гірчицю, пшеничну муку, рис в лущинні та ін. Технічні характеристики MT-Pro наведені в табл. 8.39, зовнішній вигляд показано на рис. 8.33.

Таблиця 8.39.

Технічні характеристики MT- Pro

Найменування характеристики	Значення характеристики
Діапазон вимірюваної вологості зернових культур, %	8-35
Діапазон вимірюваної вологості олійних культур, %	5-25
Точність вимірювань, %	±0,5
Габаритні розміри, см	18x10x7,5
Маса, кг	0,7

Вологомір МТ-Pro, як і попередні моделі цієї компанії, забезпечує: введення поправок калібрування користувачем; можливість усереднення результатів вимірів; підсвічування дисплея при проведенні вимірювань у темну пору доби. Два елементи живлення забезпечують незалежність точності вимірювання від рівня заряду батареї.

Вологомір зерна і насіння ВСП-100 (Україна) за конструкцією і функціональними можливостями є аналогом американського вологоміра Grain Master і фінського Wile 65, рис. 8.33. Тип чутливого елемента – ємнісний. ВСП-100 призначений для оперативного вимірювання відносної вологості пшениці, проса, вівса, ячменю, жита, кукурудзи, гречки, гороху, сої, насіння соняшнику та ін. с/г культур, харчових продуктів і різних сипучих матеріалів: тирси, стружки, борошна, мелених макаронів, сухого молока, гірчиці. Можливе калібрування вимірювача для інших продуктів. Пам'ять мікропроцесора може містити 99 різних калібрувальних характеристик. Технічні характеристики ВСП-100 наведені в табл. 8.40.

Таблиця 8.40.

Технічні характеристики ВСП-100

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Діапазон вимірювання відносної вологості зерна пшениці, %	2 – 40 (до 50 % і більше, в залежності від культури).
Межа абсолютної похибки, %	± 0,8 (для 90 % вимірювань)
Час встановлення робочого режиму, с	10
Час вимірювання, с.	5
Маса вимірюваного матеріалу, г	<50
Живлення, В	+ 9 (крона або зовнішнє джерело)
Розміри, мм	180x75x75
Вага, кг	0,8
Температура зерна, С	+5 – +35
Температура зовнішнього повітря, С	від +1 до +40

Користувач самостійно може вносити в пам'ять вологоміра калібрувальні точки для будь-якого матеріалу, при цьому мікропроцесор самостійно вибудовує градувальну криву. Корекція градувальної характеристики проводиться з кроком 0,1

% в межах ± 5 %. Конструкція вимірювальної кювети забезпечує постійну щільність вимірюваної речовини. При вимірюваннях на РК-дисплеї відображаються назва продукту і його вологість.

Вологомір зерна РМ-450 (Kett, Японія) дозволяє вимірювати вологість 28-ми культур, таких як: пшениця, ячмінь, кукурудза, соя, рапс, жито, овес, сорго, соняшник, гречка, рис та ін. За потребою набір вимірюваних зернових та інших культур може бути змінений.

Вимірювач призначений для оперативного вимірювання вологості і не потребує попереднього подрібнення вимірюваного матеріалу. Для вимірювання вологості зерна достатньо відібрати в чашку пробу, засипати зерно в камеру приладу і отримати результат на дисплеї у відсотках, рис. 8.33. Прилад укомплектований вбудованими вагами, що дозволяє підвищити достовірність результатів вимірювання. Технічні характеристики вологоміра РМ-450 наведені в табл. 8.41.

Вологомір зерна Riceter F508 компанії Kett забезпечує вимірювання вологості 10 культур у діапазонах:

- Пшениця, ячмінь, овес: 9-30 %;
- Сорго: 9-26 %;
- Ріпак: 6-22 %;
- Коріандр: 6-19 %;
- Соя: 9-20 %;
- Соняшник: 5-20 %;
- Горох: 10-20 %;
- Шліфований рис: 9-20 %.

Особливістю вологоміра є дуже малий обсяг зразка культури, необхідного для проведення вимірювань. Вологомір Riceter F508, як і вологомір РМ-450, забезпечує: автоматичне усереднення результатів послідовності вимірів (до 9); можливість налаштування градувань за результатами власних вимірювань; підсвічування дисплея. Технічні характеристики вологоміра Riceter F508 наведені в табл. 8.41, зовнішній вигляд на рис. 8.33.

Таблиця 8.41.

Технічні характеристики вологомірів Kett

Найменування характеристик	Значення характеристики	
	PM-450	Riceter F508
Метод вимірювання	Діелектричний (50 МГц)	Резистивний
Вимірювані продукти	Зерно, насіння, дрібні предмети	Зерно, насіння
Діапазон вимірювання, %	1–40 (залежно від зразка)	5–30
Об'єм проби, мл	240	1 колос пшениці
Температура експлуатації, °C	0–40	
Точність, %, не більше	±0,5 при вологості менше 20 %	±0,5
Корекція	За масою: вбудовані ваги За температурою: термістор	Різниці температур зерна і датчика приладу
Інші функції	Усереднення, авт. вимкнення	Усереднення, авт. вимкнення
Дисплей	Цифровий LCD	Цифровий LCD
Живлення, В	1,5 (батареї AA)	1,5 (батареї AA)
Споживання, мВт	240	
Габарити, мм	125x205x215	94x164x65
Вага, кг	1,3	1,3

Вологоміри зерна AGROLINE (Данія) застосовуються для експрес-аналізу вологості зерна в лабораторних та польових умовах. Принцип роботи вологомірів ґрунтується на вимірюваннях ємності заповненого зразком конденсатора на високій частоті. Прилади універсальні й можуть працювати з багатьма видами зерна, насіння трав і борошна. Запрограмовані калібрування на: овес, пшеницю, ячмінь, жито, конюшину, сорго, кукурудзу, рапс, горох, сояшник, сою, гречку, рис, просо, льон, борошно пшеничне, кострицю червону, кострицю лучну, манку та ін. залежно від типу моделі. Можливе градування приладів на інші культури і харчову сировину.

Для вимірювання вологості проба за допомогою мірної ємності засипається в прилад і стискається кришкою пресу, яка закручується до тих пір, поки індикатор тиску не встановиться на рівні з верхньою поверхнею кришки. Показання вмісту води у відсотках відображаються на електронному дисплеї, рис. 8.34.



Рис. 8.34. Вологоміри зерна AGROLINE: FARMPOINT, SUPERPOINT, SUPERPRO, FARMPRO

Технічні характеристики вологомірів AGROLINE наведені в табл. 8.42.

Таблиця 8.42.

Технічні характеристики вологомірів AGROLINE

Найменування характеристики	Значення характеристики			
	FARMPOINT	SUPERPOINT	SUPERPRO	FARMPRO
Діапазон вимірювання, %	від 8 до 45	від 8 до 45	від 5 до 50	від 5 до 50
Роздільна здатність, %	0,1	0,1	0,1	0,1
Точність, %	± 0,5	± 0,5	± 0,25	± 0,25
Відтворюваність, %	0,2	0,2	0,1	0,1
Кількість калібрувань, шт.	20	20	19	19
Температурна компенсація, °C		0 – 50	0 – 50	0 – 45
Час вимірювання, с		10	20	20
Умови експлуатації, °C	0 – 50	0 – 50	0 – 50	0 – 50
Розміри, см	21×7,5×7,5	21×13×8	21×13×8	21×7,5×10
Вага, кг	0,6	0,75	1,1	0,95
Живлення, В	9, крона	9, крона	9, крона	9, крона

Вологоміри забезпечують усереднення результатів послідовності вимірів, автоматичну температурну компенсацію, підсвічування дисплею.

Вологомір зерна GAC 500XT (DICKEY-john® Corp., США) призначений для визначення вологості, температури, щільності зернових культур, включаючи хлібні злаки, насіння олійних культур, трав і рослин, боби й інші сипучі продукти. В пам'яті приладу знаходиться до 16 калібрувань. Встановити інші калібрування можна з веб-сайту компанії Dickey-john (більше 450 калібрувань зерна та інших продуктів). Вологомір може використовуватись у полі, зерноосховищі, на виробничих чи переробних підприємствах.

В основу роботи приладу покладено дієлькометричний метод вимірювання. При вимірюваннях враховуються температура і натура зразка, а перед кожним вимірюванням проводиться комп'ютерна самоперевірка, яка підвищує точність. Технічні характеристики вологоміра GAC 500XT наведені в табл. 8.43, зовнішній вигляд – на рис. 8.35.



Рис. 8.35. Вологоміри GAC 500XT, МГ4.01 "Колос", Draminski GMM

Завантаження зразка напівавтоматичне і не потребує попереднього зважування проби. Результати вимірювання вологості, натури і температури виводяться на рідиннокристалічний дисплей.

Таблиця 8.43.

Технічні характеристики вологоміра ГАС 500ХТ

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Вимірювані параметри	Вологість, температура, натура
Діапазон вимірювання вологості, %	5-45
Робочий діапазон, °С	5-45
Температура зразка, °С	0-50
Компенсація температури, %	Автоматична, від 20
Точність вимірювання, %	0,3
Збіжність вимірювань, %	0,2
Вид проби	Ціле зерно, насіння
Маса проби, г	250
Число калібрувань, шт.	16, що перепрограмовуються
Мови, шт.	10 (вибирає оператор)
Дисплей/пікс.	РКІ/128 × 64
Живлення, В	6 (блок живлення)
Температура експлуатації, °С	5-45
Вологість при експлуатації, %	5-95
Габарити, мм	35,0x26,53x34,5
Вага, кг	5,78

Вологомір МГ4 «Колос» (УКРМАШПРОМ, Україна) призначений для визначення вологості зернових, зернобобових та бобових культур у процесі збирання, зберігання і переробки. Він має базові градувальні залежності на 11 зернових культур: пшениця двох сортів, ячмінь, жито, кукурудза, овес, рапс, гречка, просо, рис, горох.

Метод вимірювання вологості зерна – дієлькометричний, який полягає у визначенні повного опору первинного ємнісного перетворювача, завантаженого певною кількістю (дозою) зерна.

Прилад оснащений функціями: введення до 50 додаткових градувальних залежностей для зернових культур та інших

матеріалів; уточнення базових градувань; автоматичною термокомпенсацією результатів вимірювань; енергонезалежною пам'яттю. Технічні характеристики вологоміра МГ4 «Колос» наведені в табл. 8.44.

Вологомір МГ4.01 «Колос» має вбудовані ваги, функцію визначення натури зерна, режим передачі даних на ПК, годинник реального часу, пам'ять для збереження архівної інформації. Технічні характеристики вологоміра МГ4.01 «Колос» наведені в табл. 8.44, зовнішній вигляд – на рис. 8.35.

Таблиця 8.44.

Технічні характеристики вологомірів «Колос»

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>	
	МГ4	МГ4.01
Діапазон вимірювання вологості, %		
зерно	8 – 35	8 – 35
насіння	4 – 25	
Похибка вимірювання, %		
у діапазоні від 4 % до 16 %	±1,0	±0,8
у діапазоні від 16 % до 25 %	±1,5	±1,2
у діапазоні від 25 % до 35 %	±2,5	±2
Діапазон вимірювання натури (об'ємної маси), г/л		350 – 900
Гранична похибка при вимірюванні натури, г/л		± 20
Похибка вимірювання натури, %		± 5
Живлення, В	3, (AALR6)	3, (AALR6)
Споживаний струм, мА	35	45
Габарити, см	16x12x20	16x12x20
Вага, кг	1,7	1,7

Вимірювачі вологості зерна DRAMINSKI (Польща) призначені для експресного вимірювання масової частки вологи с/г культур: зернових, зернобобових, олійних, насіння 30 видів рослин. За потребою можна вводити калібрування для насіння ще 51 виду рослин.

Вологоміри виготовляються в шести модифікаціях: Twist Grain, GMDM (Grain Moisture Meter model plus), GMM pro (Grain Moisture Meter pro), Grain Master – для вимірювання вологості зернових, зернобобових, олійних культур; GMM (Grain Moisture Meter) – для вимірювання вологості зернових, зернобобових, олійних культур і насіння трав; НММ (Hay moisture Meter) – для вимірювання вологості сіна і соломи.

Вологомір моделі Draminski GMM pro запрограмований для вимірювання вологості наступних зернових культур: ріпак, пшениця звичайна, пшениця високоякісна, кукурудза, ярий ячмінь, тритикале, жито. Передбачена можливість введення калібрувань ще для 6 видів зерна.

Вологомір Draminski GMM дозволяє вимірювати вологість насіння понад 60 різних видів рослин. Він має широкий перелік калібрувань, а також можливість додавати власні калібрувальні криві для вибраних видів зерна.

Конструктивно вологоміри модифікацій: GMM, GMDM, GMM pro виконані у вигляді моноблока з вбудованим ємнісним датчиком, рис. 8.35. Ці вологоміри реалізують діелькометричний метод вимірювань. У вологомірах модифікацій Twist Grain, Grain Master, НММ використовується кондуктометричний метод вимірювання.

На лицьовій панелі вологомірів кожної модифікації розташовані мембранна клавіатура і алфавітно-цифровий РК-дисплей, який показує назву сорту, вологість у відсотках, а також температуру зерна. Живлення вологомірів модифікації GMDM здійснюється від вбудованого акумулятора, інших модифікацій – від батареї.

Модифікації вологомірів GMDM, GMM pro мають вбудовані електронні ваги і термочутливий елемент та забезпечують автоматичне введення поправок, які враховують масу і температуру проби. Заповнення датчика зразком матеріалу здійснюється з використанням спеціального дозатора. Вологоміри модифікації GMDM мають додаткову опцію вимірювання насипної щільності вимірюваного матеріалу.

Вологоміри Draminski дозволяють користувачеві самостійно калібрувати прилад і вносити зміни в запрограмовані калібрувальні криві. У випадках, коли прилад завищує або занижує результати для конкретного виду зерна на одне і теж значення у всьому діапазоні вимірювань, користувач має можливість ввести коефіцієнт

поправки для компенсації цієї різниці. Технічні характеристики вимірювачів Draminski наведені в табл. 8.45.

Таблиця 8.45.

Технічні характеристики вологомірів Draminski

Найменування характеристики	Значення характеристики		
	GMM	GMM Pro	GMDM
Діапазон вимірювань масової частки вологи (вологості), %			
зернових культур	9 – 35	9 – 25	9 – 30
зернобобових культур	9 – 35	9 – 25	30 9 – 30
олійних культур	4 – 25	4 – 25	4 – 25
насіння трав	4 – 18		
Межі абсолютної похибки при вимірюванні вологи, %:			
у діапазоні від 4 до 18 %	± 1,0	± 1,0	± 1,0
у діапазоні від 18 до 35 %	± 1,5	± 1,5	± 1,5
Час одиничного вимірювання, с, не більше	30	30	30
Умови експлуатації:			
температура навколишнього повітря, °C	від 5 до 35		
відносна вологість, % не більше	85		
Процесор серії	80C32X2-UM		
Живлення, В	9, батарея	9, батарея	акумулятор
Габаритні розміри, см	25×16×11,5	25×16×11,5	19×15×12,5
Маса, кг	0,92	1,75	2,00

Вологомір SUPER CHTM2 (Asonic, Польща) застосовується для експрес-аналізу вологості зерна, насіння овочевих культур, насіння квітів та інших сипучих матеріалів у лабораторних та польових умовах. Вимірювач має калібрування на 56 культур, таких як: жито, пшениця, ячмінь, овес, рапс, кукурудза, горох, квасоля, гречка, гірчиця, просо, люцерна, шрот (солод), гарбуз, шпинат, морква, петрушка, редиска, крес-салат, салат-латук, буряк, соняшник, цикорій, фенхель, паприка, помідор, капуста, селера, огірок, жоржина, айстра, стокротки, братки, фіалка, сокирки, конюшина, а також на інші матеріали і продукти: тирса (сосна, ялиця, ялина, бук, дуб, модрина), борошно (пшеничне, житнє,

кукурудзяне), висівки пшениці, жита, манна крупа, локшина, сухе молоко, кава, зелена кава, рис, корм, приправи та ін. Передбачено індивідуальне налаштування заводських калібрувань. Стиснення вимірюваного зразка здійснюється без участі оператора.

Технічні характеристики вологоміра SUPER CHTM2:

Точність, %	±0,4.
Роздільна здатність, %	±0,1.
Корисний об'єм вимірювальної камери, мл	150.
Розміри, мм	61x190x104.
Вага, г	700.
Живлення (батарея), В	від 1,2 до 1,6.

Зовнішній вигляд вологоміра показаний на рис. 8.36.



Рис. 8.36. Вологоміри Asonic SUPER CHTM2, Agratronix MT-16, AG-MAC Plus

Назва культури і результати вимірювань виводяться вибраною мовою на графічний дисплей. Вологомір може бути укомплектований модулем Bluetooth. Конструкція вологоміра є стійкою до пилу та вібрацій.

Вологомір MT-16 (Agratronix, США) призначений для оперативного вимірювання вологості 16 культур (пшениця, ячмінь, жито, овес, рис, кукурудза, соняшник, ріпак, сорго, гірчиця, горох, боби, соя, льон, гірчиця, нут) у польових та лабораторних умовах. Метод вимірювання вологості – ємнісний. Інформація про код

калібрування кожної культури приведена на бічній панелі вологоміра. Передбачена можливість внесення поправок у заводські калібрування на ± 4 % для кожної шкали. Прилад забезпечує автоматичну компенсацію різниці температур вологоміра і проби зерна та автоматичне усереднення до 99 результатів вимірювань. Зовнішній вигляд вологоміра показаний на рис. 8.36.

Технічні характеристики МТ-16:

- діапазон вимірювання вологості, %:
(у залежності від досліджуваного зерна) від 5 до 40;
- температурний діапазон, °C від 0 до 45;
- точність, %
(у заданому діапазоні вологості для зерна) $\pm 0,5$;
- роздільна здатність, % вологості 0,1;
- живлення (батарея), В 9 В.

Вологомір Agratronix AG-MAC Plus (рис. 8.36) забезпечує вимірювання вологості 20 сортів зерна, зокрема: ячмінь, кукурудза, овес, ріпак, жито, сафлор, сорго, соя, соняшник, тритикале, пшениця твердих сортів (червонозерна яра і озима пшениця), м'яка червона озима пшениця. Прилад також вимірює вагу зерна. Комунікаційний порт – USB.

Технічні характеристики AG-MAC Plus:

- діапазон вимірювання вологості, %
(у залежності від досліджуваного зерна) від 6 до 45;
- точність, %
(у заданому діапазоні вологості для зерна) $\pm 0,3$;
- діапазон вимірювання температури, °C: від 5 до 45;
- роздільна здатність, % вологості 0,1.

Вологомір зерна LDS-1G (Qingdao Toky Instruments Co., Ltd, China) позиціонується як портативно-лабораторний вимірювач, що дозволяє проводити вимірювання вологості зерна в польових і лабораторних умовах. У програму приладу внесено 20 калібрувань зернових і олійних культур, насіння, макухи, корму для тварин.

Зовнішній вигляд вологоміра показаний на рис. 8.37. Вологомір складається з вимірювальної камери з двома електродами. Один електрод розташований в центрі камери, роль другого електрода виконують стінки камери. Вимірювання вологості зерна проводиться методом дослідження впливу зразка продукту на параметри високочастотного випромінювання.



Рис. 8.37. Вологоміри зерна LDS-1G та DIGITAL

Вологомір LDS-1G оснащений вбудованим вагами. Результати зважування проби використовуються при розрахунку натури зерна в г/л. Цей показник може бути використаний для непрямой оцінки якості зерна, крупності зернівок, а також для розрахунку обсягу завантаження при перевезеннях.

За допомогою терморезистора, розташованого на стінці камери, проводиться вимірювання температури зерна. Завдяки цьому отримане значення вологості коригується на поточну температуру зразка зернової продукції.

Вимірювач вологості управляється за допомогою 5 кнопок: ON/OFF, Breed, Enter, стрілок вгору і вниз. Результати вимірювання, а також поточні настройки відображаються на дисплеї з підсвічуванням. Технічні характеристики вологоміра наведені в табл. 8.46,

Таблиця 8.46.

**Технічні характеристики вологомірів зерна
LDS-1G та DIGITAL**

Найменування характеристики	Значення характеристики	
	LDS-1G	DIGITAL
Діапазон вимірювання, %		
зернових	3 – 35	8-35
олійних		5-25
Точність, %		
у діапазоні від 5 до 20 %	±0,5	±0,5
у діапазоні від 20 до 35 %		±1,5
Повторюваність, %	±0,2	
Робоче середовище, °C	0 – 40	
Калібрування, к-сть сортів	20	24
Температурна компенсація	Автомат.	Автомат.
Вимірювання температури	+	+
Вимірювання ваги	Автомат.	
Усереднення результатів	+	(до 99)
Підсвітка	+	+
Дисплей	4-розрядний LCD	LCD
Час вимірювання, с	5 – 7	30
Живлення, В	6, (4xAAA)	9, батарея
Мережевий адаптер 220 В	+	+
Габарити, мм	360x430x240	18x80x65
Вага (брутто), кг	0,790 (3,8)	0,65

Вологомір зерна Digital (China) призначений для експрес-вимірювання вологості зернових, зернобобових та олійних культур, а також продуктів їх переробки та насіння можна застосовувати вологомір Digital. Перелік вимірюваних культур і відповідні їм номери шкал вимірювання наведені на наклейці збоку приладу, табл. 8.47.

Таблиця 8.47.

Культури, вимірювані Digital

<i>№</i>	<i>Культура</i>	<i>№</i>	<i>Культура</i>	<i>№</i>	<i>Культура</i>
P1	Рапс	P9	Овес чорний	P17	Кунжут
P2	Пшениця	P10	Тв. сорти пшениці	P18	Насіння бавовни
P3	Ячмінь весняний	P11	Люпин	P19	Бавовна
P4	Боби садові	P12	Рис	P20	Рапс (в. м.)
P5	Кукурудза	P13	Сорго	P21	Арахіс
P6	Ячмінь зимовий	P14	Соєві боби	P22	Насіння гарбуза
P7	Овес	P15	Соняшник	P23	Кавове зерно
P8	Гречка	P16	Кукурудза (вис. волог.)	P24	Редька

Вологомір проводить вимірювання вологості цільного зерна. Вміст вологи відображається на LCD-дисплеї у відсотках, рис. 8.37. Digital оснащений також функцією внесення поправки до шкали вимірювання користувачем з урахуванням результату, отриманого стандартним методом. Технічні характеристики вологоміра наведені в табл. 8.46.

Вологомір зерна "Дніпро-3К (НПК "Мотом", Україна) призначений для експресного визначення вологості зерна (пшениці, ячменю, жита, гречки, проса, вівса, кукурудзи, гороху, соняшнику, ріпаку та сої) під час збирання, заготівлі і переробки. Він може використовуватися на елеваторах, заготівельних підприємствах, млинах, підприємствах хлібної промисловості.

У вологомірі передбачені режими коригування калібрувальних характеристик і побудови характеристик користувачами за результатами власних вимірювань. Технічні характеристики вологоміра наведені в табл. 8.48, зовнішній вигляд – на рис. 8.38.



Рис. 8.38. Вологоміри зерна Дніпро-3К, Фермер +, Варіант-14 моно

Вологомір зернових культур Фермер+, (НПК АРС-Теплоконтроль, Україна) – це малогабаритний переносний вимірювач, рис. 8.38, призначений для експрес-аналізу вологості 14 зернових і олійних культур: пшениця, ячмінь, жито, овес, гречка, просо, кукурудза, горох, соняшник, ріпак, соя, гірчиця, мак і люцерна. Фракція проб – немелена. Відображення результатів визначення вологості – цифрове, в абсолютних одиницях. Індикатори приладу захищені світлофільтром, а кнопки управління – захисною плівкою. З метою раціонального використання батареї живлення передбачено ручне і автоматичне її відключення. Технічні характеристики вологоміра наведені в табл. 8.48.

Вологомір Варіант-14 моно (компанія «Варіант», Україна) – малогабаритний портативний прилад, рис. 8.38, призначений для експресного визначення вологості однієї зернової або олійної культури, яка програмується в його пам'яті. Вибір культури виконує користувач при купівлі приладу. При вимірюваннях використовується немелена фракція проби. Вологомір виконаний на SMD-компонентах і містить досконалий мікропроцесор. Результати вимірювання вологості відображаються в абсолютних одиницях у цифровій формі. Передбачені контроль розряду батареї і автоматичне відключення живлення після закінчення вимірювань. Вимірювач поєднує в собі мінімальну вартість, простоту і

надійність при експлуатації. Технічні характеристики вологоміра наведені в табл. 8.48.

Таблиця 8.48.

Технічні характеристики вологомірів

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>		
	Дніпро-3К	Фермер +	Варіант-14 моно
Діапазон вимірювання, %			
для зернових культур	6-40	5 – 38	5 - 38
для зернобобових і кукурудзи	6-40		
для продуктів переробки	9-16		
Допустимі значення абсолютної похибки у діапазоні вимірювання:, %			
від 8 до 17%	±1.0	0,5 – 1,2	0,5 - 1,2
від 17 до 35%	±1.5		
від 35 до 40%	±2.5		
Випадкова складова похибки, %	±0.2		
Температура зерна, °С	від 8 до 35		
Маса проби в залежності від культури, г	(200 – 400) ±1	60	
Тривалість вимірювання, с, не більше	180	30	30
Діапазон робочих температур, °С	від 8 до 40		
Відносна вологість, %	80 при 25 °С		
Живлення, В/Гц	220/50		
Потужність, Вт	100		
Габарити, см	15x21x47	10x6,7x3,3	10x6,7x3,3
Вага, кг	5	0,3	0,3

Вологомір Варіант-14 має розширені відносно розглянутого Варіант-14 моно функції і дозволяє проводити експресне визначення вологості 13 культур. Це: пшениця, ячмінь, жито, овес, гречка, просо, кукурудза, горох, соняшник, ріпак, соя, гірчиця та люцерна.

Як і вологомір Варіант-14 моно, він виконаний на SMD-компонентах, містить сучасний мікропроцесор, має можливість

уточнення градуювальних характеристик і відрізняється надійністю при експлуатації і простотою управління.

Портативні вологоміри зерна Walcom (Китай) модифікацій **TK25G**, **7825G**, **MD7822** призначені для оперативного контролю вологості зернових і фуражних культур під час збору врожаю, його зберігання та переробки. Вологоміри створені на основі кондуктометричного методу вимірювання. Конструкція вимірювача містить щуп у вигляді двох подовжених електродів, рис. 8.39. Це дозволяє виконувати вимірювання шляхом безпосереднього занурення щупа в шар зерна і проводити дослідження його вологості в різних точках і на різній глибині за місцем його зберігання без відбору проб.



Рис. 8.39. Вологоміри Walcom: TK25G, 7825G, MD7822

Вологомір TK25G аналізує рівень вмісту води в наступних зернових культурах: пшениці, ячмені, вівсі, також соняшнику, кукурудзі, а також у фуражних культурах: сіні, льоні. Він обладнаний системою автоматичного калібрування за температурою, що підвищує точність вимірювання.

Прилад MD7822 відкалібрований під такі види зернових, як пшениця, кукурудза, рис, рис-падді. Крім вологості прилад вимірює температуру зерна. Функція компенсації температури зерна забезпечує отримання більш точних результатів вимірювань. LCD дисплей вологоміра має підсвітку. Результати вимірювань зберігаються в пам'яті приладу.

Вологомір 7825G розрахований на вимірювання вологості 36 зернових і бобових культур, зокрема, пшениці, ячменю, жита, кукурудзи, вівса, рапсу, гречки, проса, рису, гороху, сої, кави,

какао-бобів, арахісу, борошна та ін. Передбачена автоматична компенсація температури в діапазоні 0-50 °С. Прилад обладнаний триколірною світловою індикацією, яка має такі значення: зелений колір – сухе середовище, жовтий – проміжний стан, червоний – вологе середовище. Технічні характеристики вологомірів Walcom наведені в табл. 8.49.

Таблиця 8.49.

Характеристики вологомірів Walcom

Найменування характеристики	Значення характеристики		
	TK25G	MD7825G	MD7822
Діапазон вимірювання вологості, %	7 – 28	6 – 30	2 – 30
Максимальна похибка, %		±0,5 RH	±1 RH+0,5
Компенсація температури	Калібрування	+	+
Роздільна здатність, %	0,1	0,1	0,5
Діапазон вимірювання температури, °С	0-60		-10 – +60
Макс. похибка, °С			±2
Роздільна здатність, °С			1
Робоча температура, °С	0-60	0-50	
Живлення, батареї, шт./В	4/1,5	4/1,5	4/1,5
Габарити, мм			
індикаторного блоку	460x75x35	165x62x26	174x73x38
щупа		368x44x25	365x43x25
Вага, г	203 (без батарей)	320 (з батареєю)	

Вологомір зерна МИВ-1Ш (штанговий) (ТОВ "НПП Акустика", Україна), рис. 8.40, призначений для експрес-контролю вологості зернових і олійних культур без розмелювання (пшениця, соняшник, ячмінь, гречка, кукурудза, жито, ріпак, соя, просо, горох), а також пшеничного борошна і висівки. Прилад рекомендується для вимірювання вологості зерна на токах, складах, заготпунктах, для перевірки насінневого матеріалу і т. п. Принцип роботи приладу ґрунтується на кондуктометричному методі вимірювання. Вологомір виготовляється зі штангами довжиною 1;

1,5; 2 м і не потребує використання пробовідбірника при контролі стану зерна на глибині.



Рис. 8.40. Вологоміри зерна МИВ-1Ш, МИВ-1К

Назва досліджуваної культури і результати вимірювання відображаються на РК-дисплеї приладу. Вологомір оснащений датчиком температури і забезпечує автоматичну температурну компенсацію результатів вимірювання вологості. Технічні характеристики вологомірів МИВ-1 наведені в табл. 8.50.

Таблиця 8.50.

Технічні характеристики вологомірів МИВ-1

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>	
Діапазон вимірювання вологості, %:	<i>МИВ-1Ш</i>	<i>МИВ-1К</i>
зернових	від 10 до 35	від 10 до 35
олійних	від 5 до 35	від 5 до 35
продуктів переробки	від 10 до 16	
Гранична похибка вимірювання, %, не більше:		
зернових, у діапазоні вимірювання:		
від 10 % до 17 %	1,5	1,5
від 17 % до 35 %	2,5	2,5
олійних, у діапазоні вимірювання:		
від 5 % до 12 %	1,5	1,5
від 12 % до 20 %	2,5	2,5
більше 20 %	не нормується	не нормується

Продовження таблиці 8.50

Кількість культур	12	10
Робоча температура, °С		Від 0 до + 40
Фактична похибка вимірювання, %	0,5 – 1	0,5 – 1
Глибина занурення датчиків, м	2,5	–
Маса, кг	1,35 (зі штангою 1м)	1,25
Напруга живлення, В	9 (крона, 6F22МА)	9, (крона, 6F22МА)

Вимірювач вологості МИВ-1К відрізняється від вимірювача МИВ-1Ш конструкцією датчика, що виконаний у формі ковша, в який набирається проба зерна, рис. 8.40.

8.6.5. Вологоміри спеціального призначення

Для автоматичного вимірювання вологості матеріалів під час технологічного процесу (на конвеєрних лініях, транспортерах, у бункерах тощо) використовуються вологоміри, принцип роботи яких полягає у вимірюванні параметрів випромінювання НВЧ або ІЧ діапазонів при їх поширенні в досліджуваному матеріалі (див. п. 8.6.1). Розглянемо найбільш відомі потокові вологоміри.

Серія **НВЧ вологомірів МІКРОРАДАР (ТОВ "ВО УКРСПЕЦКОМПЛЕКТ")** призначена для безконтактного і контактного (в залежності від виконання) автоматичного вимірювання вологості твердих, сипучих і пластичних матеріалів у потоці на конвеєрі чи в бункері безпосередньо під час технологічного процесу. Зокрема, мікрорадари моделей 113, 113А (рис. 8.41), 133.2, 113.2Р, 113С-2, 113NN – застосовуються для вимірювання вологості зерна та деяких інших матеріалів, модель 113 К-1 – торфу, ґрунту, глиняного бруса, глиняної шихти, сухого і гранульованого жому.

Принцип дії вологомірів заснований на вимірюванні величини ослаблення НВЧ коливань вологим матеріалом і перерахунку цієї величини в цифровий код, відповідний вологості матеріалу.

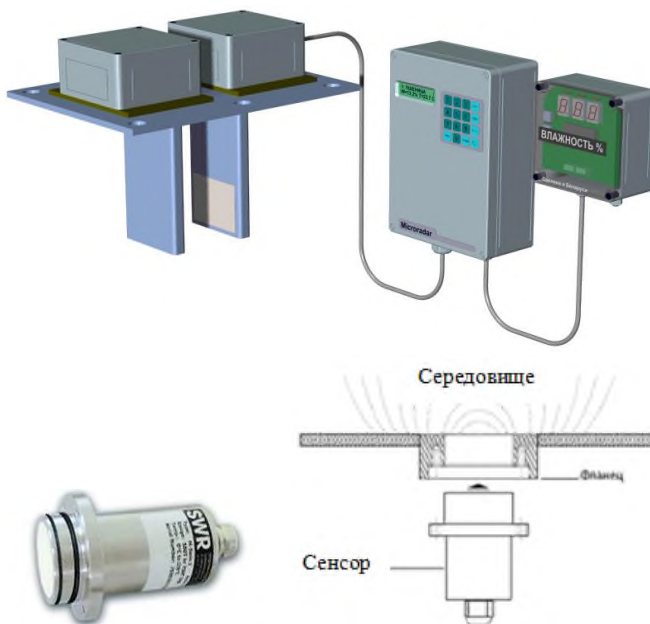


Рис. 8.41. Вологоміри зерна Мікрорадар-113А та М-Sens 2

Вологомір складається з блоку сенсорів (БС) і блоку управління та контролю (БУ). Крім цього, вологомір може комплектуватися виносним блоком індикації (БІ). БС складається з генератора, датчика наявності матеріалу і датчика температури. Генератор НВЧ коливань і передавальна антена розміщуються в блоці БС. У детекторному блоці знаходиться приймальна антена і детектор НВЧ коливань. У вологомірі використовується програмне забезпечення «МастерЛаб» (для градування) і «МікроТрен» (для зв'язку з ПК).

Вологомір забезпечує:

- вимірювання вологості і температури контрольованого матеріалу;
- температурну корекцію результату вимірювання вологості;
- релейний вихід типу «сухий контакт» достовірності показань;
- функціонування за системою «старт-стоп» (при спрацьовуванні кінцевого вимикача).

Вихід інформації про вологість (за вибором): струмовий 0...5 мА; 0...20 мА чи 4...20 мА; або у вигляді напруги (відповідно до струму) 0...0,625 В; 0...2,5 В чи 0,5...2,5 В. Також наявний вихід про значення вологості і температури через інтерфейс RS-485.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірюваної вологості, % (за сукупністю, приладами всіх модифікацій)	від 0 до 90.
Максимальна відносна похибка, %	< 1.
Температура контролюваного матеріалу, °С	від +5 до +95.
Ціна поділки РКІ, %:	
БУ	0,01;
БІ	0,1.
Максимальна напруга реле, В	= 60, ~ 125.
Максимальний струм реле, А	1,0.
Опір навантаження виходу напруги, кОм	> 1.
Час встановлення робочого режиму, хв.	< 20.
Довжина лінії зв'язку БУ – БС, м	25.
Довжина лінії зв'язку БУ – БІ, м	< 300.
Габаритні розміри БУ, мм	255×180×90.
Маса БУ, кг	< 1,0.
Габаритні розміри БІ, мм	130×130×75.
Маса БІ, кг	< 0,5.
Габаритні розміри БС, мм	250×290×320.
Виконання корпусів блоків	IP54.

Вологомір живиться змінним струмом напругою 220 (+22...-33) В чи 110 (+11...-16) В, або постійним струмом 24 ± 3 В. Споживана потужність не більше 50 ВА.

НВЧ-вогомір М-Sens 2 (SWR Engineering, Німеччина) – це датчик, спеціально розроблений для неперервних або дискретних вимірювань вологості під час технологічних процесів, рис. 8.41. Датчик М-Sens 2 може використовуватися при он-лайн вимірюваннях вологості різних видів сипучих матеріалів, порошків, грануляторів тощо, у т. ч. зерна, насіння, муки, цукру, сухого молока та ін.

Вимірювальна система складається з: сенсорів (від 1 до 3), кожен з 2-метровим з'єднувальним кабелем; модуля обробки; монтажною коробки для з'єднання сенсора(ів) і модуля обробки.

Принцип дії поточного вологоміра M-Sens 2 полягає у вимірюванні напруженості високочастотного поля і цифровій обробці результатів. Оскільки поверхнева і капілярна вологість матеріалу сильно впливають на характеристики розповсюдження НВЧ коливань, то вологість може бути виміряна з високою роздільною здатністю.

Технічні дані сенсора:

Діапазон вимірювань, %	0...85.
Абсолютна похибка, %	0,1.
Час відгуку, с	0,1.
Робоча температура, °C	0...80.
Споживана потужність, Вт	0,6.
Вага, кг	1.

Технічні дані модуля обробки:

Вихідний сигнал:

Струм, мА ($R_n < 700 \Omega$)	0...20.
Напруга, В ($R_n > 2 \text{ k}\Omega$)	0...10.
Цифрові входи	2.
Інтерфейс	RS-232, RS-485.
Кросування кабелю	0,2-2,5 мм ² [AWG 24-14].
Збереження інформації	флеш-пам'ять.
Робоча температура, °C	-10...+45.
Напруга живлення, В	110/230 АС (50 Гц); 24 DC.
Споживана потужність, Вт	20.
Габарити, мм	258x237x174.
Вага, кг	2,5.
Категорія захисту	IP65.

Калібрування вологоміру проводиться оператором шляхом введення відомого «опорного» значення вологості. Коливання вимірюваного значення, викликані зміною об'ємної густини матеріалу, усуваються шляхом спеціальної фільтрації. Датчик забезпечений функціями автоматичної компенсації зміни температури

навколишнього середовища і сигналізації про граничне значення вологості (реле, 250 В АС, 1 А).

Вологомір Spectra-Quad (TMS & RutterCo., Нідерланди) призначений для вимірювання вологості різних матеріалів і сипучих середовищ (у т. ч. концентратів і мінеральних добрив) на конвеєрній стрічці, в бункері і т. д., рис. 8.42. Вологомір працює за принципом аналізу поглинання випромінювання інфрачервоної ділянки спектру. Вміст води в матеріалі визначається за величиною інтенсивності поглинання ІЧ-випромінювання певної довжини хвилі, яка пропорційна вологості.

Вологомір складається з вимірювального блоку, який містить датчик, фокусуюче дзеркало, колесо з оптичними фільтрами, що обертається, кварцово-галогенне джерело інфрачервоного випромінювання та блоку управління і реєстрації з РК-дисплеєм.

Випромінювання джерела проходить через обертові ІЧ фільтри. Оптичні фільтри поділяють світловий потік на вимірювальний і опорний промені. Виділений фільтром вимірювальний промінь направляється на досліджуваний зразок і частково ним поглинається, а частково відбивається. Відбитий від зразка вимірювальний промінь і опорний промінь фокусуються на датчику і перетворюються в електричні сигнали. Відношення рівнів вимірювального і опорного сигналів пропорційне величині контрольованої вологості.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірювань, %	0...95.
Точність, %	±0,1.
Робоча температура, °C	0...+50.
Виходи:	
струм, мА	4...20.
інтерфейс	RS-232.

Додаткові оптичні канали (внутрішні промені) компенсують нестабільності оптичних і електронних компонентів. У вологомірі використовується запатентована технологія Quadra-Beam, яка ще більше стабілізує покази вимірювача, захищаючи від можливих змін всередині приладу протягом усього терміну служби.

Вологомір FLIR MR160 (FLIR Systems, Естонія) – це перший тепловізійний вологомір. Він оснащений вбудованою тепловізійною камерою Lepton 80×60 і є вимірювачем, який наочно показує проблемну область, де необхідно проводити ІК-дослідження, рис. 8.42.



Рис. 8.42. Вологоміри Spectra-Quad і FLIR MR160

Завдяки технології IGM (Infrared Guided Measurement) він дозволяє швидко знаходити і локалізувати вологі ділянки. Наведення вологоміру здійснюється за допомогою лазерного покажчика з перехресним візором.

Крім вбудованого безконтактного датчика вологомір містить і зовнішній контактний щуп, що дозволяє виконувати не тільки безконтактні, але і контактні вимірювання. FLIR MR160 забезпечує відображення ІК-зображень і даних про вологість на екрані одночасно.

Тип екрану – кольоровий TFT-дисплей 2,3", 64 000 кольорів. Роздільна здатність дисплея QVGA 320×240 пікселів. Формат збереження зображення з накладеними результатами вимірювань – BMP, максимальна кількість збережених зображень – 9999.

Перегляд зображень і створення звітів проводиться за допомогою програмного забезпечення FLIR Tools. Технічні характеристики вологоміра наведені в табл. 8.51.

Таблиця 8.51.

Технічні характеристики вологоміра FLIR MR160

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Тепловізійна камера	
Датчик	FLIR Lepton, відеоконвертер, мікроболометр
Затвор	Автоматична компенсація неоднорідностей
Роздільна здатність ІК-зображення, пікселів	4800 (80×60)
Спектральна чутливість, мкм	8 – 14
Чутливість, мК	< 150
Поле обзору (Ш×В), град	51×38
Частота оновлення зображення, Гц	9
Теплова палітра	Холодна
Дистанція фокусування, см	≥ 10
Вимірювання вологості	
Діапазон контактного вимірювання вологості (зі щупом), %	Від 0 до 100
Точність (середньозважена похибка), %	±5
Групи контактів для вимірювання вологості (групи матеріалів), шт.	9
Діапазон безконтактного вимірювання (без щупа), %	Від 0 до 100 (відносно вимірювання)
Крок вимірювання, %	0,1
Час відгуку, мс	
Безконтактне вимірювання	100
Контактне вимірювання	750
Живлення, В	3,7 (акумулятор, 3000 мАгод.
Заряджання	Порт мікро-USB, зарядний пристрій

Контрольні запитання

1. Вимірювання яких величин забезпечують первинні вимірювальні перетворювачі?
2. За якими ознаками класифікують первинні вимірювальні перетворювачі?
3. Якими бувають первинні перетворювачі в залежності від характеру вихідного сигналу?
4. Що таке уніфікований сигнал?
5. Який пристрій називають термометром?
6. На основі якої залежності діють термоперетворювачі опору?
7. Для вимірювання яких температур використовуються термопари?
8. Поясніть принцип роботи термістора.
9. Назвіть безконтактні вимірювачі температури.
10. Який пристрій називають пірометром?
11. Поясніть принцип роботи тепловізора.
12. Які типи сучасних перетворювачів температури виготовляються ПАТ "ТЕРА"?
13. Для чого застосовується багатозонний термоперетворювач (термопідвіска)?
14. У чому полягає особливість вимірювання температури ІЧ термометром?
15. Поясніть важливість значення вологості ґрунту при вирощуванні с/г культур.
16. На чому ґрунтується дія кулонометричних (електролізних) перетворювачів вологості?
17. На основі якої залежності діють сорбційно-імпедансні перетворювачі вологості?
18. Які методи використовуються для вимірювання вологості ґрунту?
19. Поясніть суть термогравіметричного методу вимірювання вологості матеріалів.
20. На чому заснований принцип роботи п'єзосорбційних перетворювачів вологості?
21. Які методи використовуються на практиці для вимірювання діелектричної проникливості ґрунту?
22. Поясніть важливість значення вологості зерна при зберіганні.

23. Які методи використовуються для вимірювання вологості зерна?

24. Назвіть прямі методи вимірювання вологості зерна.

25. Назвіть непрямі методи вимірювання вологості зерна.

26. Який метод вимірювання вологості зерна використовується при калібруванні вимірювачів вологості?

27. Назвіть вимірювачі вологості зерна, які працюють на основі термогравіметричного методу.

28. Назвіть вимірювачі вологості зерна, які працюють на основі дієлькометричного методу.

29. Поясніть суть дієлькометричного методу вимірювання вологості матеріалів.

30. Назвіть вимірювачі вологості зерна, які працюють на основі НВЧ-методу.

31. Поясніть суть НВЧ-методу вимірювання вологості матеріалів.

32. Назвіть вимірювачі вологості зерна, які працюють на основі кондуктометричного методу.

33. Поясніть суть кондуктометричного методу вимірювання вологості матеріалів

34. Назвіть типи вологомірів, які використовуються для експрес-аналізу вологості зерна.

35. Назвіть типи спеціальних вологомірів та їх призначення.

РОЗДІЛ 9 ПІДСИЛЮВАЧІ

9.1. Загальні відомості

Регулятори прямої дії, у яких регулюючий орган об'єкта управління переміщається зусиллям вимірювального пристрою без використання допоміжного джерела енергії, прості і надійні в роботі. Однак, вони можуть застосовуватися тільки тоді, коли потужність вимірювального пристрою достатня для впливу на регулюючий орган [23]. Значно частіше застосовуються регулятори непрямої дії, у яких невеликий за потужністю сигнал вимірювального пристрою використовується для управління енергією, що надходить від додаткового джерела до виконавчого механізму. Пристрій, у якому здійснюється зміна кількості енергії, що надходить до виконавчого механізму, під дією вихідного сигналу вимірювального пристрою називають підсилюючим пристроєм, чи просто підсилювачем.

У сучасних системах автоматики для управління виконавчими механізмами потрібні сигнали, потужність яких у багато разів перевищує вихідну потужність сигналу датчика. Так, вихідна потужність сигналів датчиків звичайно складає $10^{-6} \dots 10^{-3}$ Вт, а необхідна потужність сигналів управління виконавчими механізмами – величину, порядку сотні Вт, а іноді і декількох кВт. Прагнення ж одержати необхідну потужність вихідного сигналу датчика, як правило, пов'язане з погіршенням його характеристик, обумовлених збільшенням порогу чутливості і зони нечутливості, що в більшості випадків неприпустимо. Тому, між датчиком і виконавчим механізмом включають підсилюючі пристрої, які дозволяють приводити у дію виконавчий механізм без погіршення характеристик системи управління.

Будь-який підсилювач складається з активного підсилюючого елементу, джерела живлення та пасивних кіл [16]. Підсилювач можна розглядати як активний чотириполюсник (рис. 9.1), до вхідних затискачів (1, 2) якого приєднується джерело вхідного сигналу у вигляді джерела напруги (рис. 9.1, а) або джерела струму (рис. 9.1, б). Зовнішнє навантаження R_n , яке споживає енергію підсиленого сигналу, приєднується до виходу підсилювача (затискачі 3, 4). Джерело вхідного сигналу навантажується вхідним опором підсилювача $R_{вх}$, на якому виділяється потужність вхідного сигналу.

Цей сигнал керує енергією джерела живлення значно більшого рівня потужності. Т. ч., використання активного керуючого елемента (наприклад, транзистора) та більш потужного джерела живлення дає можливість підсилювати потужність вхідного сигналу.

Як правило, один вхідний (2) та один вихідний (4) затискачі еквіпотенціальні, тому що з'єднані із спільною шиною, яка зветься «землею» або корпусом.

Для вхідного кола підсилювача з джерелом напруги (рис. 9.1, а) можна записати

$$U_{\text{вх}} = E_{\text{д}} \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{д}}}. \quad (9.1)$$

З (9.1) випливає, що спад напруги на внутрішньому опорі $R_{\text{д}}$ джерела вхідного сигналу буде незначним, тобто $U_{\text{вх}} \approx E_{\text{д}}$, якщо виконується умова $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{д}}$.

Для вхідного кола підсилювача (рис. 9.1, б) маємо

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{д}} \frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{д}}}. \quad (9.2)$$

Якщо $R_{\text{д}} \gg R_{\text{вх}}$, то весь струм джерела вхідного сигналу відгалужується у вхідний опір підсилювача. Отже, при великому вхідному опорі підсилювача керування у навантаженні здійснюється джерелом напруги, а при малому $R_{\text{вх}}$ – джерелом струму.

Вихідне коло підсилювача також може бути джерелом напруги $KU_{\text{вх}}$ (рис. 9.1, а), або джерелом струму $KI_{\text{вх}}$ (рис. 9.1, б) з внутрішнім опором $R_{\text{вих}}$. Ці джерела відображають властивості підсилювача, які характеризуються коефіцієнтом передачі (підсилення) $K_{\text{п}}$, що у першому випадку є коефіцієнтом підсилення напруги, а у другому – струму.

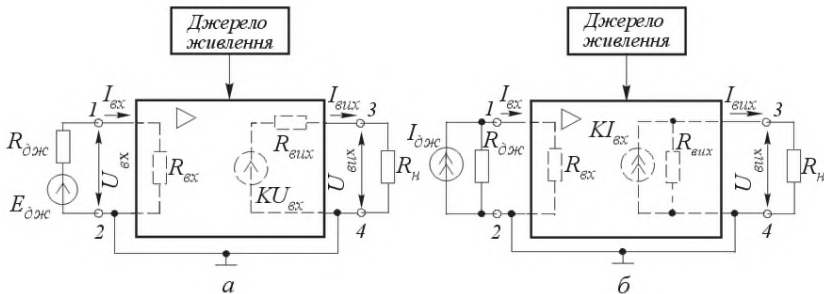


Рис. 9.1. Схема підсилювача

а – з джерелом напруги, б – з джерелом струму.

9.1.1. Класифікація підсилювачів

Залежно від виду енергії, що отримується від допоміжного джерела живлення, розрізняють електричні, пневматичні, гідравлічні, механічні і інші підсилювачі.

Останнім часом широке застосування знаходять електронні підсилювачі, оскільки вони мають високу чутливість та добре поєднуються з електричними виконавчими пристроями [16].

Всі електронні підсилювачі підвищують потужність. Але у ряді випадків основним показником є підсилення напруги або струму. Тому підсилювачі поділяють на підсилювачі напруги, струму та потужності. Підсилювач напруги забезпечує на навантаженні задане значення вихідної напруги. У такому режимі підсилювач працює, якщо виконуються умови $R_{вх} \gg R_d$ та $R_H \gg R_{вих}$, що забезпечує відносно великі зміни напруги на навантаженні при невеликих змінах струму у вхідному та вихідному колах. У режимі підсилення струму необхідно виконання умов $R_{вх} \ll R_d$ та $R_H \ll R_{вих}$, щоб у вихідному колі при малих значеннях напруги протікав струм заданого значення. Для підсилювача потужності умови узгодження вхідного кола з джерелом вхідного сигналу та вихідного кола з навантаженням для передавання максимальної потужності мають вигляд $R_{вх} \approx R_H$ та $R_H \approx R_{вих}$.

За характером зміни в часі підсилюваного сигналу розрізняють підсилювачі постійного та змінного струму. Підсилювачі постійного струму працюють при нижній частоті $f_H = 0$. А підсилювачі змінного струму поділяються на підсилювачі низької та високої частоти.

Структура підсилювача визначається смугою частот робочого діапазону. За цією ознакою підсилювачі поділяють на вузькосмугові, для яких характерно відношення $f_{\text{в}} / f_{\text{н}} < 1,1$ (підсилення у дуже вузькому діапазоні частот), та широкосмугові з $f_{\text{в}} / f_{\text{н}}$, яке досягає 100 і більше.

Залежно від форми підсилюваних сигналів розрізняють підсилювачі гармонічних (синусоїдних) та імпульсних сигналів. Оскільки імпульсні сигнали, наприклад, прямокутної форми, мають широкий спектр частот, імпульсні підсилювачі відносяться до класу широкосмугових. Якщо підсилення одного каскаду недостатньо, то як навантаження $R_{\text{н}}$ використовується вхідне коло другого підсилювального каскаду, вихід якого приєднується до входу третього каскаду і т. д. Підсилювач, що має кілька ступенів підсилення, називають багатокаскадним. За способом зв'язку між каскадами розрізняють підсилювачі з ємнісним, трансформаторним та гальванічним зв'язком.

Трансформаторний зв'язок використовується лише у кінцевих каскадах підсилення потужності для узгодження підсилювача з навантаженням.

За типом навантаження підсилювачі можна розділити на резистивні (аперіодичні) та резонансні (вибіркові).

Дедалі більше у підсилювальній техніці використовують операційні підсилювачі у інтегральному виконанні. Такі підсилювачі здебільшого підсилюють напругу і використовуються для підсилення сигналів як постійного, так і змінного струму в широкому діапазоні частот.

Роботу кожного підсилювача можна характеризувати різними експлуатаційними, кількісними та якісними показниками (вихідними параметрами).

9.1.2. Основні характеристики

Коефіцієнт підсилення. Коефіцієнтом підсилення називається відношення вихідної величини (напруги, струму, потужності), яка характеризує рівень сигналу, до вхідної величини (напруги, струму, потужності). Чисельно він показує, наскільки сигнал на виході більше, ніж на вході.

Якщо розглядати підсилювач як чотириполюсник, який має комплексний коефіцієнт підсилення, то можна записати:

$$\underline{K} = \frac{\dot{A}_{\text{вих}}}{\dot{A}_{\text{вх}}} = \frac{A_{\text{вих}} e^{j\varphi_{\text{вих}}}}{A_{\text{вх}} e^{j\varphi_{\text{вх}}}} = \frac{A_{\text{вих}}}{A_{\text{вх}}} e^{j(\varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}})} = K e^{j\varphi}, \quad (9.3)$$

де $K = \frac{A_{\text{вих}}}{A_{\text{вх}}}$ – модуль коефіцієнта підсилення ; $\varphi = \varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}}$ – фазовий зсув між вхідною та вихідною напругою або між вхідним та вихідним струмом.

Згідно з призначенням підсилювача розрізняють коефіцієнти підсилення за напругою $\underline{K}_U$, за струмом $\underline{K}_I$ і за потужністю K_P :

$$\underline{K}_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}; \quad \underline{K}_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}}; \quad K_P = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (9.4)$$

Загальний коефіцієнт багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення окремих каскадів:

$$\underline{K} = \underline{K}_1 \cdot \underline{K}_2 \cdot \dots \cdot \underline{K}_n = \prod_{i=1}^n \underline{K}_i. \quad (9.5)$$

Часто коефіцієнт підсилення виражають не у відносних, а у логарифмічних одиницях, тобто використовують не саме відносне число K , а його логарифм. Доцільність такого підходу обумовлена тим, що органи почуття людини сприймають зростання сили зовнішніх подразнень не за законом прямої пропорційності, а значно повільніше.

Ріст суб'єктивного сприйняття, як виявилось, відбувається наближено пропорційно сигналу, що фактично сприймається,

$$\frac{S}{S_0} = \text{Alg}\left(\frac{U}{U_0}\right), \quad (9.6)$$

де s – суб'єктивне сприйняття підсиленого сигналу; S_0 – те ж початкового сигналу; U – фактична амплітуда підсиленого сигналу; U_0 – те ж початкового сигналу; A – коефіцієнт пропорційності.

Зараз прийняті два види логарифмічних одиниць: децибели та непері. Коефіцієнт підсилення за потужністю у децибелах визначається формулою:

$$K_{P(\text{дБ})} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} \right) = 10 \lg K_P, \quad (9.7)$$

звідки

$$K_P = 10^{0,1 K_{P(\text{дБ})}}. \quad (9.8)$$

При $K_{P(\text{дБ})} = 1 \text{ дБ}$ маємо $K_P = 10^{0,1} \approx 1,26$, тобто при коефіцієнті підсилення $K_{P(\text{дБ})} = 1 \text{ дБ}$ потужність підсилюється у 1,26 разів.

Враховуючи, що потужність P пропорційна U^2 або I^2 , коефіцієнти підсилення за напругою (струмом) визначаються формулою:

$$K_{\text{дБ}} = 20 \lg K = 20 \lg (U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}). \quad (9.9)$$

Яким буде коефіцієнт підсилення K у відносних одиницях, якщо у децибелах він дорівнює одиниці? Поклавши у (9.9) $K_{\text{дБ}} = 1$, одержимо $1 = 20 \lg K$; $\lg K = 1/20 = 0,05$, звідки $K = 10^{0,05} = 1,12$.

Отже, якщо коефіцієнт підсилення дорівнює одному децибелу, то напруга на виході більша, ніж на вході, в 1,12 разів.

З (9.9) виходить також, що у загальному випадку $\lg K = K_{\text{дБ}} / 20 = 0,05 K_{\text{дБ}}$, звідки:

$$K = 10^{0,05 K_{\text{дБ}}}. \quad (9.10)$$

Коефіцієнт підсилення за потужністю у неперах визначається за формулою:

$$K_{P(\text{Нп})} = 0,5 \ln K_P, \quad (9.11)$$

звідки

$$K_P = e^{2K_{P(\text{Нп})}}. \quad (9.12)$$

Якщо $K_{P(\text{Нп})} = 1 \text{ Нп}$, то $K_P = e^2 \approx 7,4$, тобто при коефіцієнті підсилення $K_{P(\text{Нп})} = 1 \text{ Нп}$ потужність підсилюється у 7,4 рази.

Коефіцієнт підсилення за напругою (струмом) у неперах визначається за формулою:

$$K_{\text{Нп}} = \ln K, \quad (9.13)$$

звідки

$$K = \exp K_{\text{Нп}}, \quad (9.14)$$

де $\exp(e)$ – основа натуральних логарифмів ($e \approx 2,72$).

Якщо $K_{\text{Нп}} = 1$, то $K = e \approx 2,72$. Отже, коефіцієнт підсилення $K_{\text{Нп}} = 1 \text{ Нп}$ відповідає підсиленню напруги (струму) у 2,72 рази.

Використання логарифмічних одиниць зручно ще й тим, що при цьому загальний коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача дорівнює:

$$K_{\text{дБ}} = K_{1\text{дБ}} + K_{2\text{дБ}} + \dots + K_{n\text{дБ}} = \sum_{i=1}^n K_{i\text{дБ}}. \quad (9.15)$$

Коефіцієнти підсилення одного й того ж підсилювача у децибелах і неперах зв'язані між собою співвідношенням:

$$\frac{K_{\text{дБ}}}{K_{\text{Нп}}} = \frac{20 \lg K}{\ln K} = \frac{20 \lg K}{2,3 \lg K} \approx 8,7. \quad (9.16)$$

Очевидно, що

$$\frac{K_{\text{Нп}}}{K_{\text{дБ}}} = \frac{1}{8,7} = 0,115. \quad (9.17)$$

Основним якісним показником підсилювача є точність відтворення форми сигналу, що підсилюється. В ідеальному підсилювачі крива зміни напруги на виході повинна точно повторювати форму кривої зміни напруги на вході. При цьому допускається деякий зсув у часі Δt між вхідною ($U_{\text{вх}}$) та вихідною ($U_{\text{вих}}$) напругами, який дорівнює часу проходження сигналу через підсилювач. Умова неспотвореного підсилення може бути записана у вигляді:

$$U_{\text{вих}}(t) = KU_{\text{вх}}(t - \Delta t). \quad (9.18)$$

Відхилення форми вихідного сигналу від форми вхідного сигналу називають спотвореннями. Спотворення бувають лінійними та нелінійними. Обидва види спотворень змінюють форму вихідного сигналу, але причини їх появи та методи компенсації різні.

Нелінійні спотворення. Нелінійні спотворення полягають у тому, що при підсиленні сигналу синусоїдної форми вихідний сигнал не є синусоїдним. У вихідному сигналі крім основної гармоніки, що має частоту вхідного сигналу, з'являється ряд вищих гармонік з кратними частотами, які спотворюють форму синусоїдального сигналу. Нелінійні спотворення виникають через наявність у підсилювачі елементів з нелінійними ВАХ. Нелінійність ВАХ обумовлена наявністю нелінійних ділянок на характеристиках (вхідних та вихідних) транзисторів, а також нелінійністю кривих намагнічування осердь трансформаторів зв'язку і т. д.

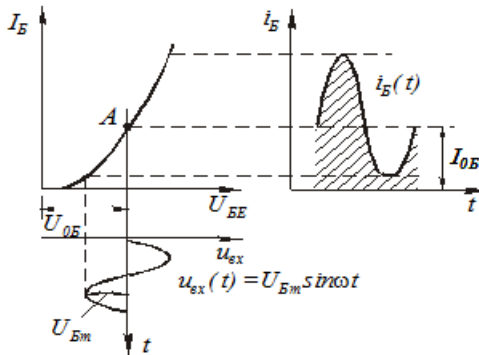


**Рис. 9.2. Графік нелінійних спотворень
вхідної характеристики БТ з СЕ**

Приклад виникнення нелінійних спотворень при роботі транзистора з СЕ на нелінійній ділянці вхідної характеристики показаний на рис. 9.2. З графіка видно, що при подачі на базу напруги синусоїдальної форми вихідний струм бази відрізняється від синусоїди (крива несиметрична відносно рівня I_{0B}).

Нелінійні спотворення пов'язані лише з амплітудою вхідного сигналу і не пов'язані з його частотою. У багатокаскадних підсилювачах найбільші нелінійні спотворення звичайно виникають у кінцевих каскадах, на вхід яких надходять сигнали з великою амплітудою. Чим більша потужність, яку видає підсилювач, тим більший коефіцієнт нелінійних спотворень. Про наявність нелінійних спотворень при підсиленні сигналу будь-якої форми з відомою амплітудою можна судити за ступенем відхилення *амплітудної характеристики підсилювача* – залежності $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ – від прямої лінії на деякій частоті (рис. 9.3). Амплітудна характеристика непридатна для кількісної оцінки і дозволяє лише приблизно визначити межі лінійності підсилення. У робочому діапазоні амплітуд вхідного сигналу $U_{\text{вх min}} - U_{\text{вх max}}$ амплітудна характеристика прямолінійна (відрізок а-б), а кут її нахилу задається коефіцієнтом підсилення на даній частоті.

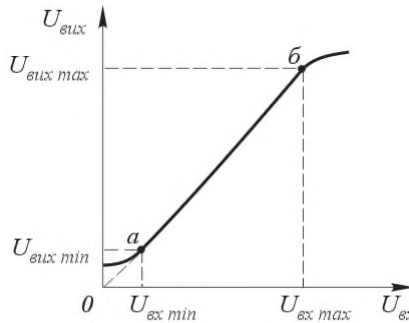


Рис. 9.3. Амплітудна характеристика підсилювача

Якщо вхідна напруга не перевищує значення $U_{\text{вх min}}$, то напруга на виході підсилювача $U_{\text{вих min}}$ визначається напругою його власних шумів, які глушать корисний вхідний сигнал. Шуми підсилювача залежать, в основному, від шумів його активних та пасивних елементів. Їх причиною є пульсації напруги джерела живлення, теплові процеси, а також неоднорідність структури матеріалу елементів і нестабільність електричних процесів у часі.

Лінійні спотворення обумовлені в основному залежністю від частоти коефіцієнта передачі струму h_{21E} (або h_{21B}) та реактивних опорів ємностей та індуктивностей, які є у схемі підсилювача. Рівень лінійних спотворень не залежить від амплітуди підсилюваного сигналу, а залежить тільки від його частоти. Якщо на вхід підсилювача, коефіцієнт підсилення якого без урахування реактивних елементів дорівнює K_0 , подати сигнал $U_{\text{вх m}} \cos \omega t$, то амплітуда вихідного сигналу не буде дорівнювати очікуваній величині $K_0 U_{\text{вх m}}$. Крім того, вихідний сигнал зсувається за фазою відносно вхідного. У реальному підсилювачі вихідна напруга дорівнює:

$$U_{\text{вих m}} = K U_{\text{вх m}} \cos(\omega t + \varphi),$$

де K – коефіцієнт підсилення з урахуванням реактивних елементів;
 φ – кут зсуву фаз між вихідним та вхідним сигналами.

Сигнали із складним спектром та спектральні складові різних частот будуть підсилюватись неоднаково. Різними будуть і кути зсуву фаз. Неоднакове підсилення складових різних частот та різні їх фазові зсуви на виході підсилювача називають частотними та фазовими спотвореннями.

При підсиленні гармонічних коливань основними характеристиками підсилювача є **амплітудно-частотна (АЧХ) та фазочастотна (ФЧХ) характеристики**. АЧХ являє собою графік залежності модуля коефіцієнта підсилення K від частоти f [$K = F(f)$].

Частотні спотворення, які вносить підсилювач на частоті f , визначає *коефіцієнт частотних спотворень* M , що дорівнює відношенню модулів коефіцієнтів підсилення на середній K_0 і даній робочій частотах:

$$M = \frac{K_0}{K}.$$

Як правило, коефіцієнт частотних спотворень знаходять на граничних частотах $f_{в\text{ гр}}$ та $f_{н\text{ гр}}$ умовної смуги пропускання підсилювача, яка являє собою діапазон частот $\Delta f = f_{в\text{ гр}} - f_{н\text{ гр}}$, у межах якого зміна модуля коефіцієнта підсилення не перевищує заданої величини $M_n = K_0/K_n$; $M_e = K_0/K_e$.

У різних типів підсилювачів величини M_n та M_e можуть бути як більші, так і менші від одиниці, тому що коефіцієнт підсилення на деяких частотах може бути або більшим, або меншим від коефіцієнта підсилення на середніх частотах. Відповідно і АЧХ буде мати ділянки зростання або спадання.

Фазові спотворення не впливають на спектральний склад та співвідношення амплітуд гармонічних складових сигналу, а викликають зміну його форми, обумовлену різними фазовими зсувами окремих складових сигналу після проходження через підсилювач, тобто нерівномірністю ФЧХ підсилюючого пристрою.

Вхідний та вихідний опори – важливі параметри підсилюючих пристроїв. Їх значення потрібно враховувати при узгодженні підсилюючого пристрою як з джерелом вхідного сигналу

(датчиком), так і з навантаженням. У загальному вигляді значення вхідного та вихідного опорів має комплексний характер і є функцією частоти. Остання залежність особливо важлива у випадку неперіодичного вхідного сигналу підсилюючого пристрою.

Вхідний та вихідний опори визначаються виразами:

$$z_{\text{вх}}(\omega) = U_{\text{вх}}(\omega) / I_{\text{вх}}(\omega) \quad \text{при } R_{\text{н}} = \text{const}; \quad (9.19)$$

$$z_{\text{вих}}(\omega) = [U_{\text{вих х}}(\omega) - U_{\text{вих}}(\omega)] / I_{\text{вих}}(\omega). \quad (9.20)$$

Часто на практиці цікавляться тільки активними складовими вхідного та вихідного опорів. У цьому випадку для них справедливі наступні вирази

$$R_{\text{вх}} = (U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}) \quad \text{при } R_{\text{н}} = \text{const};$$

$$R_{\text{вих}} = (U_{\text{вих х}} - U_{\text{вих}}) / I_{\text{вих}} = U_{\text{вих х}} / I_{\text{вих к}},$$

де $U_{\text{вих х}}$ – напруга холостого ходу на виході підсилювача ($R_{\text{н}} = \infty$);
 $I_{\text{вих}}$ – струм короткого замикання ($R_{\text{н}} = 0$).

Вихідна потужність підсилювача – це та частина потужності, яка може бути виділена у навантажувальному пристрої. У випадку активного навантаження вона дорівнює

$$P_{\text{вих}} = I_{\text{вих н}}^2 R_{\text{н}} = U_{\text{вих}}^2 G_{\text{н}},$$

де $G_{\text{н}} = 1 / R_{\text{н}}$ – провідність навантажувального пристрою.

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = P_{\text{вих}} / P_{\text{заг}},$$

де $P_{\text{заг}}$ – потужність, що споживається всіма колами підсилювача від усіх джерел живлення; $P_{\text{вих}}$ – корисна вихідна потужність підсилювача.

Перехідні характеристики являють собою залежність від часу миттєвого значення вихідної напруги або струму підсилювача при стрибкоподібній зміні відповідного входного параметра з нульовою тривалістю фронту. Ці характеристики використовують для визначення динамічних властивостей пристрою. Типовий вид перехідної характеристики підсилювача приведений на рис. 9.4. За даною характеристикою підсилювача визначають два параметри: тривалість фронту $t_{\text{ф}}$ та перерегулювання вихідної напруги $\Delta U_{\text{вих}}$. Обидва параметри визначаються відносно нового усталеного значення вихідної напруги $U_{\text{вих уст}}$.

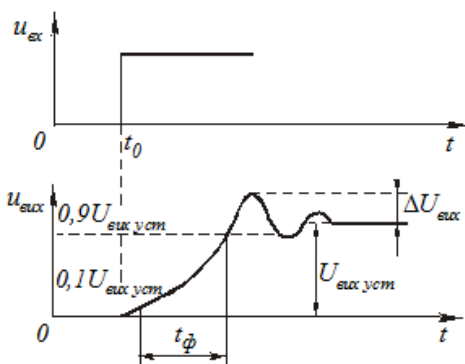


Рис. 9.4. Перехідна характеристика підсилювача

9.1.3. Зворотний зв'язок у підсилювачах

Зворотним зв'язком (ЗЗ) у підсилювачах називають явище передачі сигналу з вихідного кола у вхідне. Кола, по яких подається сигнал зворотного зв'язку, називають колами зворотного зв'язку. Структурна схема підсилювача із зворотним зв'язком наведена на рис. 9.5. Вихідний сигнал підсилювача (у вигляді напруги $u_{\text{вих}}$ або струму $i_{\text{вих}}$) через коло зворотного зв'язку β частково або повністю подається до схеми порівняння, де відбувається віднімання

(або додавання) вхідного сигналу $u_{\text{вх}}$ або $i_{\text{вх}}$ та сигналу ЗЗ $u_{\text{ЗЗ}}$ або $i_{\text{ЗЗ}}$. У результаті на вхід підсилювача надходить сигнал, який дорівнює різниці або сумі вхідного сигналу та сигналу зворотного зв'язку [16]. Залежно від цього розрізняють відповідно негативний та позитивний зворотні зв'язки.

Замкнутий контур, утворений під'єднанням до підсилювача кола зворотного зв'язку, називають петлею зворотного зв'язку.

Місцевим зворотним зв'язком (місцевою петлею зворотного зв'язку) прийнято називати такий ЗЗ, який охоплює окремі каскади або частини підсилювача, а загальним зворотним зв'язком – такий ЗЗ, який охоплює весь підсилювач.

Усі види зворотного зв'язку дуже змінюють властивості підсилюючого пристрою, тому вони широко використовуються для керованої зміни його параметрів.

Зворотний зв'язок називається від'ємним, якщо фази вхідного сигналу підсилювача і сигналу зворотного зв'язку відрізняються на кут π . У цьому випадку для структурної схеми підсилювача зі зворотним зв'язком (рис. 9.5) можна записати:

$$u_{\text{вих}} = K_0 u_{\text{вх сум}} ;$$

$$u_{\text{вх сум}} = u_{\text{вх 0}} - u_{\text{ЗЗ}} = u_{\text{вх 0}} - \beta u_{\text{вих}} ,$$

де β – коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку.

Тоді:

$$K_{\text{НЗ}} = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх 0}} = K_0 / (1 + \beta K_0) . \quad (9.21)$$

Введення від'ємного зворотного зв'язку зменшує коефіцієнт підсилення підсилювача. Це проявляється у зменшенні кута нахилу його передаточної характеристики (рис. 9.6).

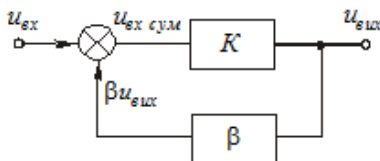


Рис. 9.5. Структурна схема підсилювача зі зворотним зв'язком

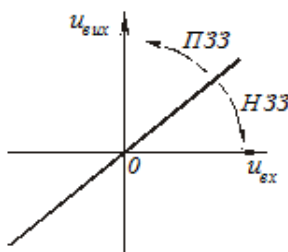


Рис. 9.6. Передаточна характеристика підсилювача зі зворотним зв'язком

Зворотний зв'язок називається додатним, якщо фаза вхідного сигналу підсилювача і сигналу зворотного зв'язку співпадають. У цьому випадку для структурної схеми (рис. 9.5) можна записати:

$$u_{\text{вх сум}} = u_{\text{вх 0}} + \beta u_{\text{вих}}$$

Звідси:

$$K_{\text{ПЗЗ}} = u_{\text{вих}} / u_{\text{вх 0}} = K_0 / (1 - \beta K_0) \quad (9.22)$$

Отриманий вираз показує, що введення у підсилювач додатного зворотного зв'язку збільшує коефіцієнт підсилення. Це означає збільшення кута нахилу передаточної характеристики підсилювача (рис. 9.6). При $\beta = 1/K_0$ $K_{\text{ПЗЗ}} = \infty$. При подальшому збільшенні β , $K_{\text{ПЗЗ}}$ стане негативним, і на передавальній характеристиці підсилювача виникне ділянка з від'ємним кутом нахилу. При цьому передавальна характеристика перестась бути однозначною, а на виході підсилювача виникають коливання навіть за відсутності вхідного сигналу. За рахунок існуючих малих шумових флуктуацій

підсилювач самозбуджується, перетворюючись у генератор електричних коливань. Для підсилювача такий режим роботи є неприпустимим.

9.2. Напівпровідникові підсилювачі

9.2.1. Підсилювач на біполярному транзисторі за схемою із спільним емітером

Усі схемотехнічні різновиди каскадів, які використовують схему вмикання біполярного транзистора з спільним емітером, можуть бути приведені до однієї схеми, наведеної на рис. 9.7. [16]. Навантаження у схемі вмикається двома способами: у якості навантажувального елемента використовується резистор R_K (рис. 9.7, а, б), ввімкнений у колекторне коло транзистора; або використовується додатковий навантажувальний елемент (резистор R_n рис. 9.7, в), який вмикається паралельно до виводів колектора та емітера транзистора VT .

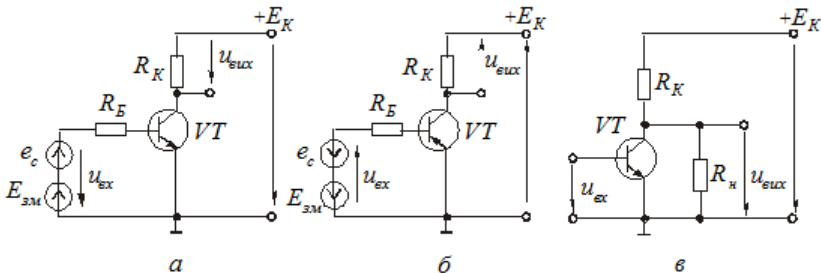


Рис. 9.7. Схема вмикання БТ з спільним емітером:

*а, б – навантажувальний елемент ввімкнений у колекторне коло транзистора,
в – додатковий навантажувальний елемент, який вмикається паралельно до виводів колектора та емітера транзистора*

Резистор R_B є баластним і призначений для лінеаризації вхідної характеристики каскаду. Відомо, що вхідний опір транзистора, особливо у початковій частині його ВАХ, має суттєво нелінійний характер, тому однакові прирости вхідної напруги спричиняють різні прирости вхідного i_B , а, отже, і вихідного i_K струмів:

$$i_K = i_B h_{21E} = h_{21E} u_{BX} / R_{BX}, \quad (9.23)$$

де h_{21E} - коефіцієнт передачі струму в схемі з спільним емітером; R_{BX} – вхідний опір транзистора, значення якого залежить від u_{BX} ; $u_{BX} = u_C + U_{3M}$ – сумарна вхідна напруга каскаду; u_C – керуюча складова вхідної напруги (сигнал керування); U_{3M} – постійна складова вхідної напруги.

Вихідна напруга для схеми рис. 9.7, а, б визначається як:

$$u_{ВХ} = i_K R_K, \quad (9.24)$$

а для схеми рис. 9.7, в:

$$u_{ВХ} = \frac{E_K - i_K R_K}{1 + R_K / R_H}. \quad (9.25)$$

Слід відмітити, що якщо нас цікавить тільки змінна складова вихідного сигналу, то для обох випадків можна скористатись виразом (9.24). При цьому у випадку використання додаткового навантажувального резистора у вираз (9.24) замість R_K потрібно підставити $R'_K = R_K R_H / (R_K + R_H)$. Зауважимо, що при побудові лінії навантаження за змінним струмом вважають опір конденсатора $x_C = 1/(\omega C) = 0$.

Якщо вираз (9.23) підставити у (9.24) або (9.25), то стає очевидним, що непостійність R_{BX} , обумовлена зміною вхідної напруги і, отже, режиму роботи транзистора, призводить до зміни коефіцієнта пропорційності між вхідною та вихідною напругами каскаду. Передавальна характеристика каскаду за напругою набуває суттєво нелінійного характеру, що ускладнює його практичне використання.

Для лінеаризації передавальної характеристики послідовно з емітерним переходом транзистора вмикають баластний резистор R_B , опір якого обирається з умови $R_B \gg R_{BX}$. При цьому вираз (9.23) приймає вигляд:

$$i_K = i_B h_{21E} = h_{21E} u_{BX} / (R_B + R_{BX}) \approx h_{21E} u_{BX} / R_B. \quad (9.26)$$

Слід відмітити, що введення у схему підсилювача резистора R_B зменшує коефіцієнт підсилення каскаду і це зменшення тим більше, чим точніше виконується нерівність $R_B \gg R_{вх}$. Причина цього полягає у тому, що зі збільшенням R_B менша частина вхідної напруги прикладається безпосередньо до емітерного переходу транзистора.

У вхідному колі каскаду діє два джерела напруги: u_c – напруга, яку потрібно підсилити, та $U_{зм}$ – постійна напруга, яка забезпечує потрібний режим роботи каскаду за постійним струмом.

У схемах, рис. 9.7, зміни колекторного струму транзистора залежать не лише від змін струму бази, а й від змін напруги на колекторі:

$$U_{KE} = E_K - I_K R_K, \quad (9.27)$$

яка, у свою чергу, визначається змінами як базового, так і колекторного струмів. Т. ч., одночасно змінюються всі струми і напруги в транзисторі. Такий режим роботи транзистора називають динамічним, а характеристики, що визначають зв'язок між струмами і напругами транзистора при наявності опору навантаження, динамічними характеристиками.

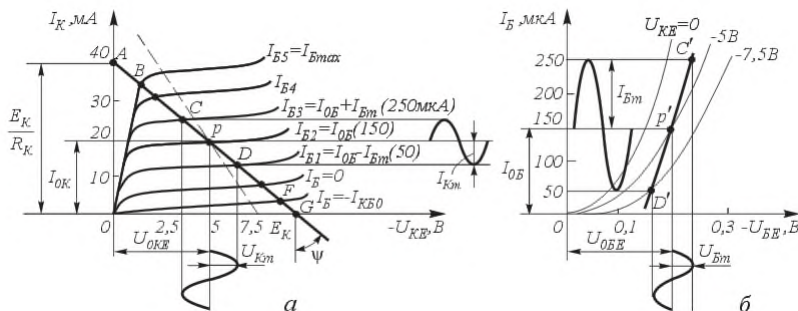


Рис. 9.8. Динамічні характеристики БТ з спільним емітером:

а – вихідна, б – вхідна

Визначимо параметри підсилювача (рис. 9.7, а). Коефіцієнт підсилення каскаду дорівнює відношенню приростів вихідної та вхідної напруги:

$$K = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}} .$$

Використовуючи h параметри транзистора і припускаючи, що $h_{12E} = h_{22E} = 0$ (відсутній внутрішній зворотний зв'язок і нескінченний вихідний опір), знайдемо:

$$\Delta U_{\text{вих}} = \Delta U_{\text{КЕ}} = h_{21E} \Delta I_{\text{Б}} R_{\text{К}} ;$$

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{БЕ}} = \Delta I_{\text{Б}} R_{\text{вх}} .$$

Отже,

$$K = h_{21E} R_{\text{К}} / R_{\text{вх}} . \quad (9.28)$$

Отриманий вираз не враховує наявності у вхідному колі каскаду баластного резистора $R_{\text{Б}}$. Цей резистор, як вже відмічалось, утворює з вхідним опором транзистора додатковий подільник напруги, який зменшує загальний коефіцієнт підсилення каскаду. З урахуванням цього загальний коефіцієнт підсилення каскаду, який являє собою коефіцієнт підсилення каскаду за постійним струмом K_0 , дорівнює:

$$K_0 = K \cdot K_{\text{под}} = h_{21E} R_{\text{К}} / (R_{\text{Б}} + R_{\text{вх}}) , \quad (9.29)$$

де $K_{\text{под}} = R_{\text{вх}} / (R_{\text{Б}} + R_{\text{вх}})$ – коефіцієнт передачі вхідного подільника напруги.

Для вхідного та вихідного опорів каскаду, рис. 9.7, а можна записати наступні вирази:

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{Б}} + R_{\text{вх}} \approx R_{\text{Б}} ; \quad (9.30)$$

$$R_{\text{вих}} = R_{\text{вих т}} = 1/h_{22E} , \quad (9.31)$$

де $R_{\text{вих т}}$ – вихідний опір транзистора.

Якщо зовнішнє навантаження вмикається до виходу підсилюючого каскаду так, як показано на рис. 9.7, в, то вираз для

вихідного опору каскаду зміниться. З урахуванням того, що джерело E_K є ідеалізованим джерелом напруги:

$$R_{\text{вих}} = R_{\text{вих Т}} R_K / (R_{\text{вих Т}} + R_K) \approx R_K. \quad (9.32)$$

У залежності від значення і знаку напруги зміщення $U_{\text{зм}}$ та напруги сигналу u_c у схемі транзисторного каскаду, наведеного на рис. 9.7, а, можливі декілька принципово різних режимів його роботи, що називаються *класами підсилення*.

Клас підсилення А. Режим роботи транзисторного каскаду, при якому струм у вихідному колі транзистора тече на протязі всього періоду зміни напруги вхідного сигналу, називається режимом підсилення класу А.

Клас підсилення А характеризується тим, що форма вихідного сигналу $u_{\text{вих}}$ повторює форму вхідного сигналу $u_{\text{вх}}$ за рахунок роботи транзистора в активній області без заходу в область насичення та відсічки. При цьому транзистор працює в лінійній області, що пояснює мінімальне нелінійне спотворення підсилюваного сигналу. В той же час робота підсилювача у класі А характеризується низьким ККД, який теоретично не може перевищувати 0,5.

У зв'язку з цим режим підсилення А використовують лише в малопотужних каскадах (попередніх підсилювачах), для яких, як правило, важливо забезпечити малий коефіцієнт нелінійних спотворень, а значення ККД не відіграє вирішальної ролі.

Клас підсилення В. Режим роботи транзисторного каскаду, при якому струм у вихідному колі транзистора тече тільки на протязі півперіоду зміни напруги вхідного сигналу, називається режимом підсилення класу В.

Клас підсилення В має місце при зміщенні точки спокою p на нижню ділянку лінії навантаження R_K , як показано на рис. 9.9.

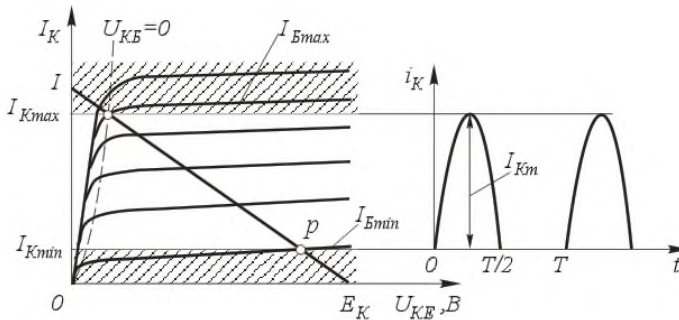


Рис. 9.9. Вихідна динамічна характеристика БТ з спільним емітером

Це сприяє граничному зниженню струму $I_{0Б}$, що обумовлює суттєве покращення енергетичних показників каскаду за рахунок значного (у порівнянні з режимом класу А) зниження розсіюваної в транзисторі в режимі спокою потужності. Тому клас В переважно використовується у підсилювачах середньої та великої потужності. У цьому режимі значення ККД каскаду можна довести до 0,7 і більше (при розсіюваній у транзисторі потужності, меншій 0,25 від максимуму корисної потужності в навантажувальному пристрої). Разом з тим, у класі В забезпечується підсилення лише одного додатного (від'ємного) півперіоду підсилюваного сигналу $u_{вх}$, і тому вихідний струм i_K має переривчастий характер.

Для підсилення як додатного, так і від'ємного півперіоду вхідного сигналу застосовують двотактні підсилювачі, що працюють у класі підсилення В (рис. 9.10, а). Тут при додатному півперіоді вхідного сигналу відкритий транзистор $VT1$ ($n-p-n$ -типу), а при від'ємному – транзистор $VT2$ ($p-n-p$ -типу). У навантаження з опором R_H надходить підсилений сигнал обох півперіодів. Як правило, двотактні підсилювачі виготовляють у вигляді ІС, на одному кристалі напівпровідника, що дозволяє забезпечувати ідентичність параметрів транзисторів $VT1$ та $VT2$.

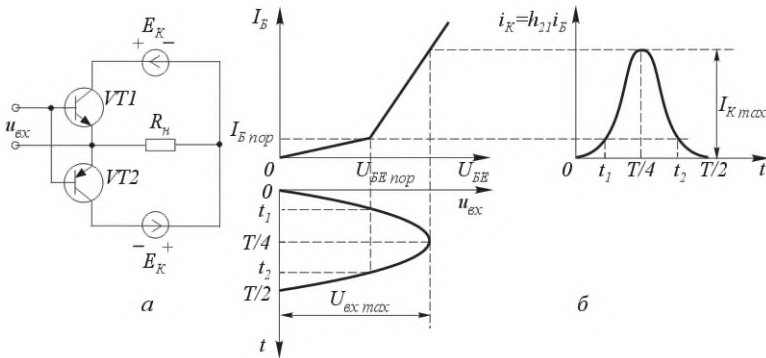


Рис. 9.10. Двотактний підсилювач:

а – схема двотактного підсилювача,

б – вхідна динамічна характеристика

Основним недоліком підсилювачів, які працюють в класі В, є значні нелінійні спотворення вихідної напруги. Тому клас підсилення В практично не використовується в підсилювачах.

Клас підсилення АВ. Режим роботи транзисторного каскаду, при якому струм у вихідному колі транзистора протікає більше половини періоду напруги вхідного сигналу, називається режимом підсилення класу АВ.

Такий режим роботи знайшов широке застосування при побудові вихідних каскадів підсилювачів потужності, тому що при високому ККД вони забезпечують одержання невеликих спотворень вихідного сигналу.

9.2.2. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі за схемою із спільним витоком

Схемотехнічні рішення, які застосовуються при побудові каскадів на польових транзисторах, багато в чому подібні з рішеннями для біполярних транзисторів. Існуючі особливості пов'язані з відмінністю власних властивостей цих приладів [16].

Як відмічалось раніше, при побудові аналогових підсилювачів на польових транзисторах найбільше розповсюдження одержала схема каскаду з спільним витоком. При цьому в ній, як правило,

застосовуються або польові транзистори з керуючим р-п-переходом, або мдн-транзистори з вбудованим каналом.

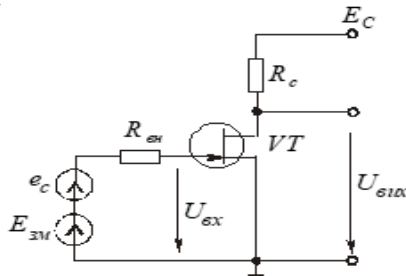


Рис. 9.11. Схема каскаду на польовому транзисторі з керуючим р-п-переходом та каналом n-типу

На рис. 9.11. приведена типова схема каскаду на польовому транзисторі з керуючим р-п-переходом та каналом n-типу.

У цій схемі, змінюючи напругу джерела зміщення $E_{зм}$ можна забезпечити роботу в будь-якому з класів підсилення. Проте, найбільш часто ця схема використовується в режимі класу А при побудові вихідних каскадів підсилювачів. Пояснюється це наступними перевагами польового транзистора перед біполярним:

- більший вхідний опір, що спрощує його погодження з високоомним джерелом сигналу;
- менший коефіцієнт шуму, що надає йому переваги при підсиленні малих сигналів;
- вища температурна стабільність режимів спокою.

Разом з тим, каскади на польових транзисторах зазвичай забезпечують менший коефіцієнт підсилення за напругою.

У польовому транзисторі з керуючим переходом полярності напруг, які прикладені до його стоку та затвору, повинні бути протилежними. Тому для режиму постійного струму на практиці широко використовується введення в каскад послідовного від'ємного ЗЗ за струмом навантаження. Схема такого каскаду наведена на рис. 9.12. Її особливістю, крім резистора R_B , є вмикання паралельно з вхідними входами додаткового резистора R_3 . Цей резистор забезпечує гальванічний зв'язок затвору з спільною шиною, що необхідно для замикавання кола зміщення. Крім цього він стабілізує

вхідний опір каскаду. Опір резистора R_3 обирається меншим власного вхідного опору транзистора $R_3 \leq 1 \text{ МОм}$.

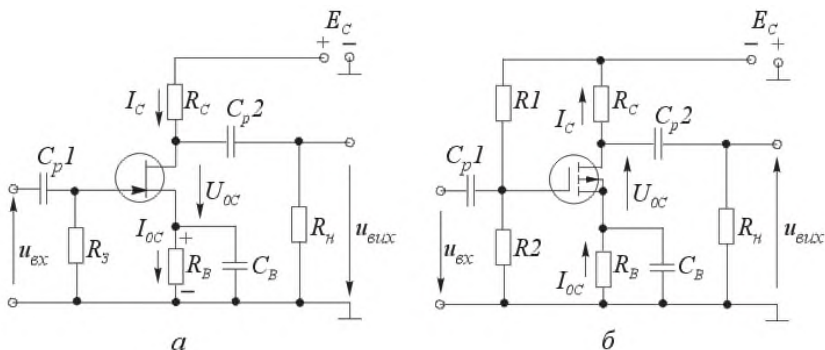


Рис. 9.12. Схеми каскаду:

а – на польовому транзисторі з керуючим р-п-переходом та каналом n-типу з послідовним від'ємним ЗЗ за струмом навантаження;

б – на польових МОН-транзисторах зі зміщенням у вигляді резистивного подільника

У схемі, що розглядається, резистор R_B виконує подвійну роль. По-перше, як було сказано вище, він забезпечує початкове зміщення робочої точки каскаду і, по-друге, вводить у нього послідовний від'ємний ЗЗ за струмом навантаження, що призводить до зменшення коефіцієнта підсилення каскаду та стабілізує положення його робочої точки.

Питання стабілізації положення робочої точки каскаду потребує більш детального розгляду. Як було показано, при зміні температури навколишнього середовища на струм стоку польового транзистора I_{OC} діють два протилежних фактори: збільшення опору напівпровідникового матеріалу, що зменшує величину I_{OC} , та зменшення товщини р-п-переходу, що збільшує значення I_{OC} . У результаті дії цих двох протилежних факторів на передавальні характеристики транзистора можна знайти точку, в якій струм стоку не залежить від температури навколишнього середовища. Якщо напругу U_{3M} вибрати так, щоб транзистор працював у цій точці, то температурна стабілізація каскаду не потрібна. На жаль, такий вибір

з точки зору вимог до каскаду не завжди можливий і польовий транзистор працює, як правило, при великих струмах стоку.

Для сучасних приладів температурний дрейф струму стоку складає порядку $0,6\%/^{\circ}\text{C}$. До того ж він негативний, що виключає в каскадах додатний ЗЗ за температурою, властивий біполярним транзисторам. Тому при роботі в малих діапазонах зміни температури навколишнього середовища можна цілком обійтись без кіл термостабілізації.

Автоматичне зміщення в підсилюючих каскадах на польових мон-транзисторах, у яких полярність напруги на стоці та затворі однакова, здійснити неможливо. В цьому випадку напруга зміщення U_{03B} на затвор подається від джерела стокового живлення E_C через резистивний подільник $R1, R2$ (рис. 9.12, б), як і в підсилюючих каскадах на біполярних транзисторах. При цьому подільник повинен бути високоомним, щоб суттєво не зменшувати величину вхідного опору каскаду.

9.3. Підсилювачі постійного струму. Підсилювачі постійного струму прямого підсилення

Підсилювачі постійного струму призначені для підсилення електричних сигналів у діапазоні частот від 0 до верхньої робочої частоти f_B .

Підсилювач постійного струму здатний підсилювати вхідний сигнал без зміни співвідношення його постійної та змінної складових. Це досягається вилученням з підсилювача елементів, які перешкоджають передачі дуже повільних змін вхідної напруги або струму, тобто конденсаторів або трансформаторів зв'язку. Тому для з'єднання окремих каскадів підсилення в цьому випадку застосовується гальванічний зв'язок: зв'язок за допомогою елементів, які забезпечують двосторонню передачу повільних змін сигналу (напруги або струму) [16].

9.3.1. Підсилювачі з безпосереднім зв'язком

В окремому випадку (за відсутності будь-яких додаткових елементів) гальванічний зв'язок перетворюється в безпосередній. Частотна характеристика підсилювача з безпосереднім зв'язком, яка показана на рис. 9.13. штриховою лінією, має нижню границю

частоти $f_n = 0$. Отже, такий підсилювач повинен відтворювати всі частоти, починаючи з нуля. В області верхніх частот коефіцієнт підсилення буде зменшуватися з тих же причин, що і в підсилювачі з резистивно-ємнісним зв'язком.

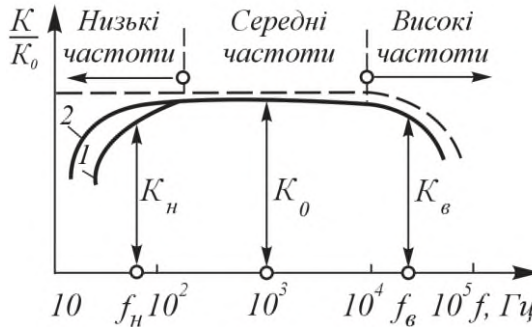


Рис. 9.13. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача

Проте відсутність у колах зв'язку реактивних елементів створює труднощі при забезпеченні початкових режимів роботи окремих каскадів, не розв'язаних за постійною складовою струму, що взаємно впливають один на одного. Тому через підсилювач одночасно можуть проходити корисний сигнал і сигнал завади, обумовлений зміною початкового режиму роботи транзистора каскаду ($U_{0КЕ}, I_{0К}$) під впливом різних дестабілізуючих факторів, наприклад, змін напруги джерела живлення, температури.

Як корисний сигнал, так і сигнал завади можуть мати однаковий або близький характер зміни з часом. Через те, що на виході підсилювача такі сигнали підсумовуються і розрізнити їх неможливо, уявлення про справжню величину підсиленого корисного сигналу може виявитись помилковим. Т. ч., на виході підсилювача виникають зміни підсиленого сигналу, не пов'язані зі зміною вхідного сигналу, а обумовлені внутрішніми процесами в підсилювачі. Ці зміни зветься дрейфом нуля підсилювача.

Величина дрейфу оцінюється величиною зміни рівня вихідної напруги від мінімального до максимального $U_{др\max} - U_{др\min}$ при незмінній величині корисного вхідного сигналу ($U_{вх} = \text{const}$). Для якісної оцінки різних підсилювачів за величиною дрейфу

користуються поняттям дрейфу нуля, зведеного до входу підсилювача:

$$d = (U_{\text{др max}} - U_{\text{др min}}) / K_U. \quad (9.33)$$

Основними засобами зниження дрейфу нуля є: хороша стабілізація джерел живлення підсилювачів; застосування від'ємного ЗЗ; використання елементів з нелінійною залежністю параметрів від температури для компенсації температурного дрейфу; застосування підсилювачів з *проміжним перетворенням і балансних*.

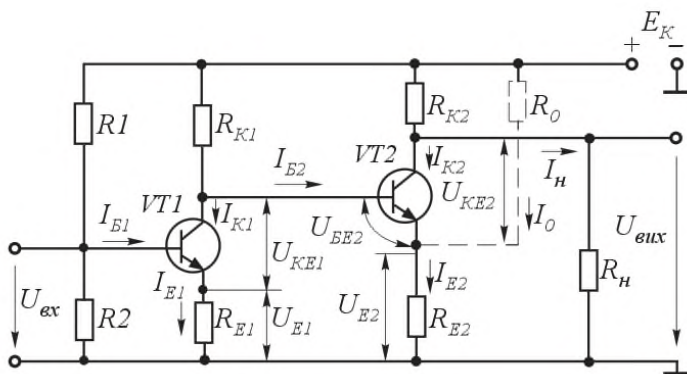


Рис. 9.14. Схема двокаскадного підсилювача з безпосереднім зв'язком

Схема двокаскадного підсилювача з безпосереднім зв'язком колектора транзистора VT1 з базою транзистора VT2 наведена на рис. 9.14. Зміщення на базу транзистора VT1 подається від подільника напруги на резисторах R1, R2. При даній полярності джерела живлення E_K на колекторі транзистора встановлюється відповідно до початкового режиму відносно високий позитивний потенціал, який прикладається до бази транзистора VT2. Рівень цього потенціалу звичайно значно перевищує потрібну напругу зміщення на базі транзистора VT2. Тому, якщо її не компенсувати, то струми I_{B2} і I_{K2} зростуть настільки, що транзистор VT2 може перейти в режим насичення.

Компенсація колекторної напруги U_{KE1} в наведеній схемі здійснюється напругою на резисторі R_{E2} , яка має зустрічний напрямок, і яка задається такої величини, щоб:

$$U_{E2} = U_{E1} + U_{KE1} - U_{BE2}, \quad (9.34)$$

де U_{BE2} – необхідна напруга зміщення на базі транзистора VT2, що забезпечує потрібну величину базового струму $I_{B2} = U_{BE2}/R_{B2}$. У свою чергу, струм I_{B2} забезпечує початковий режим роботи другого каскаду. При цьому в режимі узгодження величини опорів у колах колекторів визначаються співвідношеннями:

$$R_{K1} = \frac{E_K - U_{KE1} - U_{E1}}{I_{K1} + I_{B2}}; R_{K2} = \frac{E_K - U_{KE2} - U_{E2}}{I_{K2} + I_H}. \quad (9.35)$$

Оскільки у цій схемі існують глибокі від’ємні зворотні зв’язки як за початковою складовою струму колектора, так і за складовою струму за рахунок підсилюваного сигналу (застосування шунтуючих конденсаторів тут принципово неможливо), то основні параметри підсилювача слабо залежать від зміни параметрів транзисторів. Проте дрейф нуля в підсилювачі звичайно великий.

Коефіцієнт підсилення двокаскадного підсилювача в розглянутому випадку визначається формулою:

$$K_U = K_{U1} K_{U2},$$

у якій коефіцієнти підсилення окремих каскадів можна знайти з рівності:

$$K_{U1,2} = h_{21E} R_K / R_{Bx} = R_K I_E / \varphi_T.$$

При цьому, для каскаду на транзисторі VT1 $R_K = R_{K1}$; $R_{Bx1} = R_{E1}(h_{21E} + 1) + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$; для другого каскаду $R_{Bx2} \approx h_{21E} R_{E2}$, а опір навантаження колекторного струму R_K визначається паралельним з’єднанням R_{K2} і R_H .

Розглянутий метод узгодження (див. вираз (9.34)) призводить до того, що глибина місцевого послідовного від'ємного ЗЗ за струмом у кожному наступному каскаді буде більшою, ніж у попередньому. Тому коефіцієнт підсилення кожного наступного каскаду буде менший, ніж попереднього. На практиці, якщо таких послідовно зв'язаних каскадів більше трьох, то коефіцієнт підсилення наступних каскадів наближається до одиниці.

Усунути даний недолік можливо, якщо використовувати у емітерних колах транзисторів нелінійні елементи, спад напруги на яких не залежить від їх опору. В ролі таких елементів у підсилювачах постійного струму часто використовують стабілітрони (рис. 9.15).

Застосування стабілітронів повністю не вирішує проблему узгодження режимів як при постійному, так і при змінному струмах. Дійсно, оскільки напруга емітерного елемента (резистора або стабілітрона) в кожному наступному каскаді повинна бути більшою, ніж у попередньому, то відповідно зменшується можливе максимальне значення амплітуди вихідного сигналу каскаду. Проте, за принципом роботи амплітуда сигналу в кожному наступному каскаді підсилювача повинна бути більшою, ніж у попередньому. Тому проектування на цьому принципі підсилювачів з числом каскадів більшим трьох, як правило, недоцільне.

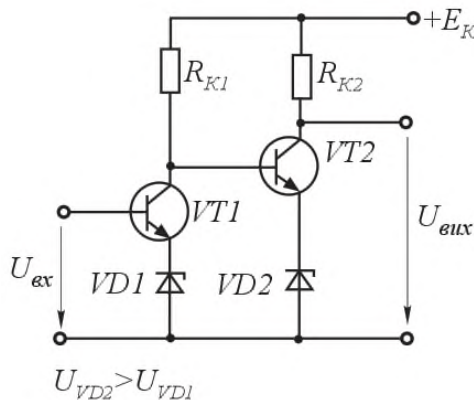


Рис. 9.15. Схема підсилювача постійного струму зі стабілітронами в емітерних колах транзисторів

Отже, підсилювачі постійного струму, в яких використаний цей метод узгодження режимів, мають цілком визначену межу коефіцієнта підсилення. До того ж, розглянуті підсилювачі мають такі недоліки:

1. На вході підсилювача присутня деяка постійна напруга, необхідна для завдання режиму спокою транзистора першого каскаду. Приєднання джерела входної напруги з кінцевим вихідним опором змінює режим роботи цього каскаду за постійним струмом. Цю зміну у випадку постійності вихідного опору джерела вхідного сигналу можна компенсувати зміною резисторів R_1 і R_2 . Проте, якщо вихідний опір джерела сигналу не залишається постійним, його зміни будуть сприйматися підсилювачем як вхідний сигнал. Крім того, існують джерела сигналів (датчики), подача на які постійної напруги неприпустима.

2. За відсутності вхідного сигналу на виході підсилювача присутня деяка постійна напруга, обумовлена режимом спокою вихідного транзистора підсилювача.

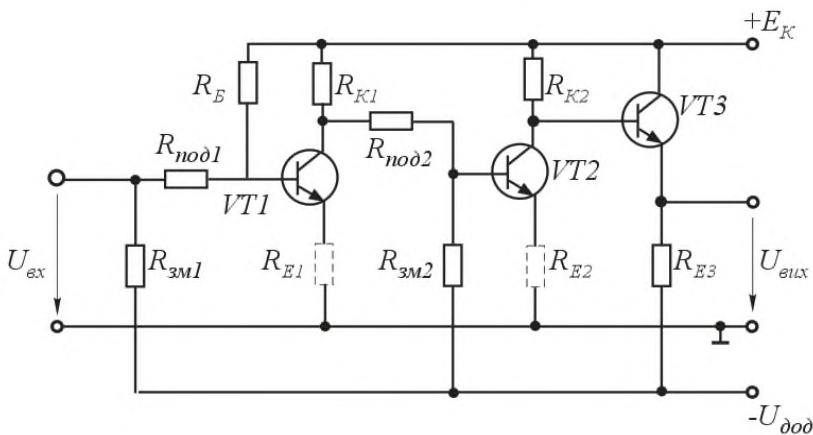


Рис. 9.16. Схема підсилювача постійного струму зі схемами зсуву

Усунути постійні складові на вході і виході підсилювача можна, використовуючи в ньому так звані схеми зсуву. Приклад такої схеми наведений на рис. 9.16. Ідея технічного рішення полягає в наступному. Якщо деякий подільник напруги приєднаний до двох послідовно з'єднаних джерел живлення, то опори його резисторів

завжди можна підібрати такими, що відносно середньої точки джерел живлення напруга на виході подільника буде рівною нулю. Стосовно підсилювача постійного струму реалізація даної ідеї потребує введення в пристрій додаткового джерела живлення, полярність якого протилежна полярності основного джерела живлення, і використання для міжкаскадного зв'язку резистивних подільників напруги.

Даний метод дозволяє виконати узгодження режимів каскадів підсилювача як за постійним, так і за змінним струмами. Проте введення у вхідне коло підсилювача і між його каскадами додаткових подільників напруги зменшує сумарний коефіцієнт підсилення пристрою і ускладнює схему підсилювача. Крім того, в такому підсилювачі залишається невирішеною проблема мінімізації дрейфу нуля вихідної напруги.

Величина дрейфу одиничного каскаду може бути зменшена введенням у нього кола від'ємного ЗЗ (емітерні резистори, які показані на рис. 9.16 штриховою лінією). Проте, це призводить до зменшення коефіцієнта підсилення підсилювача, що не завжди бажано.

Зменшити вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів на дрейф вихідної напруги підсилювача можна або компенсуючи виникаючий дрейф у кожному, особливо першому, каскаді підсилювача, або виключаючи шлях передачі виникаючої напруги дрейфу на вихід підсилювача.

Практичною реалізацією першого способу зменшення дрейфу підсилювача, а саме компенсації дрейфової складової в кожному каскаді, є використання при його побудові диференціальних каскадів підсилення.

При побудові багатокаскадного підсилювача не виникає проблеми узгодження режимів окремих каскадів за постійним струмом, до того ж в цьому випадку допускається безпосередній зв'язок між окремими каскадами. Це дозволяє будувати з використанням диференціальних каскадів багатокаскадні підсилювачі з дуже великим підсиленням.

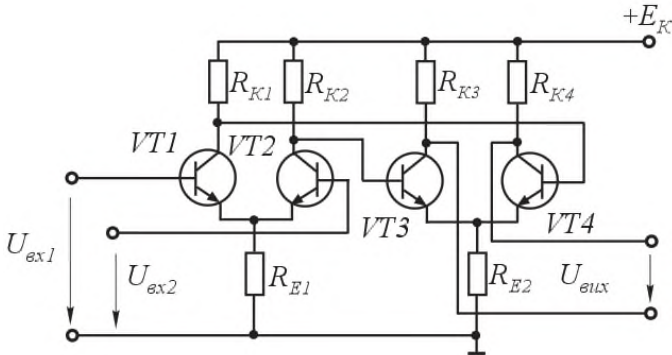


Рис. 9.17. Схема двокаскадного підсилювача постійного струму з двома диференціальними каскадами підсилення

На рис. 9.17 наведена схема двокаскадного підсилювача постійного струму, виконана з використанням двох диференціальних каскадів підсилення. Зі схеми видно, що, хоча для напруги на емітерних резисторах R_E справедливий вираз (9.34), збільшення U_{RE} не призводить до зниження коефіцієнта підсилення наступних каскадів. Тому диференціальний підсилювач є зараз основою для проектування багатокаскадних підсилювачів постійного струму, особливо при використанні гібридної і напівпровідникової технології.

9.3.2. Диференціальні підсилювачі

Диференціальні каскади відносять до балансних (мостових) схем підсилювачів постійного струму. Їх застосовують для зниження дрейфу нуля, який викликається зміною напруги живлення і температури навколишнього середовища. Диференціальні каскади мають два входи і підсилюють різницю напруг, яка прикладена між ними [16].

Важливою обставиною при проектуванні балансних схем є можливість побудови багатокаскадних підсилювачів без застосування роздільних реактивних елементів (конденсаторів, трансформаторів). Це обумовило широке використання балансних схем при створенні інтегральних підсилювачів різного призначення,

у т. ч. і операційних, які застосовуються для підсилення сигналів у широкому діапазоні частот, аж до частоти $f = 0$.

За структурою такий каскад, по суті, складається з двох каскадів, у яких використовується один спільний емітерний резистор (рис. 9.18, а). Елементи схеми утворюють міст (рис. 9.18, б), двома плечима якого є внутрішні опори транзисторів $VT1$ (R_{VT1}) і $VT2$ (R_{VT2}), а двома іншими – резистори R_{K1} і R_{K2} . До однієї діагоналі моста приєднана напруга джерела живлення E_K , а до другої – опір зовнішнього навантаження R_H .

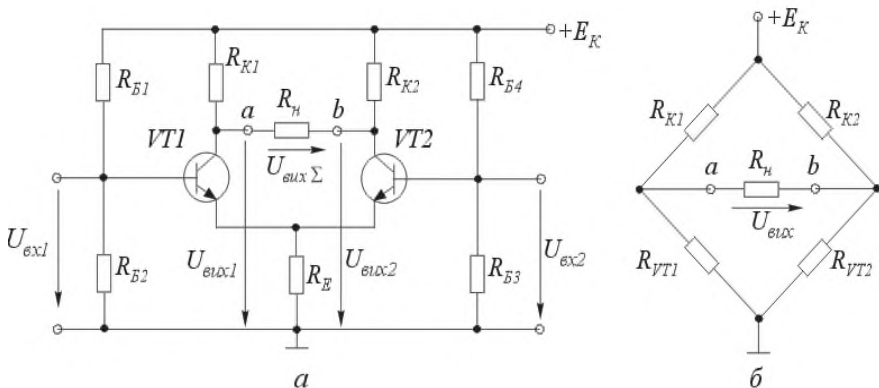


Рис. 9.18. Схеми: а – диференціального каскаду, б – диференціального моста.

Умова балансу моста, тобто умова, при якій його вихідна напруга буде дорівнювати нулю:

$$U_a = E_K R_{VT1} / (R_{VT1} + R_{K1}) = U_e = E_K R_{VT2} / (R_{VT2} + R_{K2}),$$

або:

$$R_{VT1} R_{K2} = R_{VT2} R_{K1}. \quad (9.36)$$

Порушення умови (9.36) призводить до розбалансу моста і появи вихідної напруги, пропорційної виниклому розбалансу. Такий розбаланс може бути викликаний, наприклад, зміною внутрішніх опорів транзисторів R_{VT1} і R_{VT2} , які, в свою чергу, залежать від вхідних напруг $U_{вх1}$ і $U_{вх2}$.

Якщо елементи схеми, рис. 3.64, будуть повністю ідентичними, вихідна напруга при дії будь-яких дестабілізуючих факторів буде залишатися постійною. Дійсно, для вихідної напруги каскаду справедливий вираз:

$$U_{\text{вих}} = f_a - f_b = E_K \left(\frac{R_{VT1}}{R_{VT1} + R_{K1}} - \frac{R_{VT2}}{R_{VT2} + R_{K2}} \right). \quad (9.37)$$

Якщо міст збалансований, тобто виконується умова (9.36), то будь-які зміни напруги живлення не викличуть змін вихідної напруги. Вихідна напруга може бути визначена і через колекторні струми транзисторів:

$$U_{\text{вих}} = \Delta I_{K1} R_{K1} - \Delta I_{K2} R_{K2}.$$

Якщо параметри транзисторів ідентичні, то зміна температури навколишнього середовища призведе до однакових змін струмів обох транзисторів. В результаті абсолютне значення вихідної напруги залишиться незмінним.

Слід звернути увагу, що диференціальний підсилювач (ДП) має по два входи і виходи, тобто на нього можна подавати і знімати симетричні прирости сигналів. Тому для вихідної напруги можна записати:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вих1}} - U_{\text{вих2}} = -K_1 U_{\text{вх1}} - (-K_2 U_{\text{вх2}}),$$

де K_1 ; K_2 – коефіцієнти підсилення каскаду відповідно на транзисторі $VT1$ і $VT2$.

У загальному випадку:

$$U_{\text{вх1}} = -U_{\text{вх2}}; U_{\text{вих}} = U_{\text{вих1}} - U_{\text{вих2}} = 2U_{\text{вих1}}.$$

Використовуючи останній вираз, отримаємо:

$$U_{\text{вих}} = -U_{\text{вх}} (K_1 + K_2)/2 = -U_{\text{вх}} K_{\text{ДП}}, \quad (9.38)$$

де $K_{\text{ДП}} = (K_1 + K_2)/2$ – коефіцієнт підсилення ДП.

Якщо ДП розглядати як два каскади, виконані за схемою з спільним емітером, то для кожного з них можна записати:

$$K_U = (U_{\text{вих}}/2)/(U_{\text{вх}}/2) = R_K h_{21E} / (h_{11E} + h_{21E} R_E).$$

Вплив послідовного від'ємного ЗЗ за струмом на коефіцієнт підсилення за напругою відображає $h_{21E} R_E$. Для ДП прирости напруги на його входах мають протилежні знаки. Тому прирости як колекторного, так і емітерного струмів також мають протилежні знаки. Зміни колекторних потенціалів обох транзисторів, викликані протилежними за знаком приростами колекторних струмів, що протікають через різні резистори, приводять до появи вихідної напруги:

$$\Delta U_{\text{вих}} = \Delta I_{K1} R_{K1} - (-\Delta I_{K2} R_{K2}) = R_K (\Delta I_{K1} + \Delta I_{K2}).$$

На спільному емітерному резисторі зміна емітерних струмів викликає приріст:

$$\Delta U_E = R_E (\Delta I_{E1} - \Delta I_{E2}).$$

Якщо параметри обох половин ДП однакові, то $|\Delta I_{E1}| = |\Delta I_{E2}|$ і $\Delta U_E = 0$. Т. ч., відсутність приросту напруги на емітерному резисторі свідчить про те, що у повністю симетричному диференціальному каскаді як за постійним, так і за змінним струмами дія від'ємного ЗЗ відсутня. Тому, для коефіцієнта підсилення за напругою справедливий раніше одержаний для каскаду з спільним емітером без зворотного зв'язку вираз:

$$K_{\text{дп}} = h_{21E} R_K / h_{11E}. \quad (9.39)$$

Т. ч., коефіцієнт підсилення за напругою ДП при однаковій температурній стабільності завжди більший, ніж у каскаду на одному транзисторі.

9.3.3. Підсилювачі постійного струму з перетворенням

Для підсилення слабких сигналів постійного струму (менших 1 мВ) часто застосовують підсилювачі постійного струму (ППС) з перетворенням, оскільки ППС прямого підсилення для цього непридатні через великий дрейф нуля. Під дрейфом нуля розуміють повільну зміну вихідної напруги за випадковим законом при відсутності зміни вхідного сигналу [16].

У підсилювача змінного струму проблема дрейфу нуля відсутня в силу самого принципу його роботи (наявність у схемі роздільних конденсаторів). Як відомо, постійна складова на вхідна підсилювача подається від зовнішнього джерела, а дрейфова з'являється в самому підсилювачі. Т. ч., якщо на вході підсилювача змінного струму постійну складову вхідного сигналу перетворити в змінну, а на виході виконати зворотне перетворення, то у вихідній напрузі дрейфові складові будуть повністю відсутні.

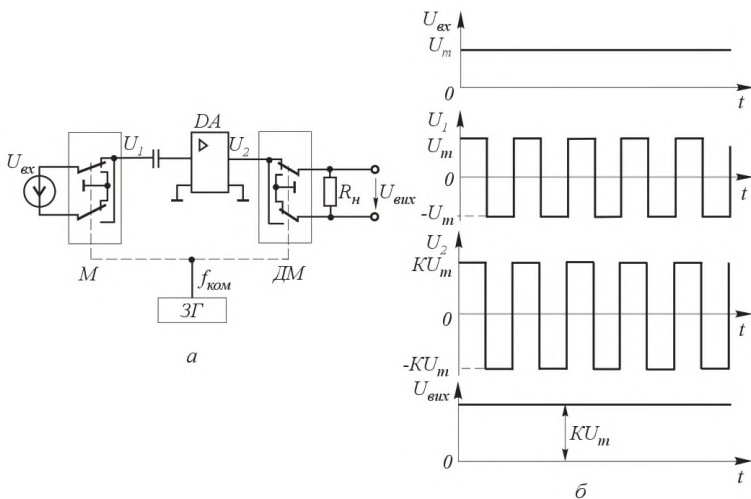


Рис. 9.19. Підсилювач постійного струму:

*а – схема підсилювача постійного струму з перетворенням,
б – часові діаграми підсилювача постійного струму*

На рис. 9.19, а, б наведена схема підсилювача постійного струму, що реалізує даний принцип, і часові діаграми, які пояснюють його роботу відповідно.

Вхідний сигнал підсилювача подається на модулятор М, призначений для перетворення постійної напруги в змінну. Модулятор являє собою два перемикачі, які змінюють полярність приєднання вихідної напруги джерела сигналу до входу підсилювача з частотою зовнішнього задаючого генератора ЗГ. Змінна напруга U_1 з виходу модулятора подається на вхід підсилювача змінного струму ДА з коефіцієнтом підсилення K . Підсилена змінна напруга U_1 з виходу підсилювача надходить на вхід демодулятора ДМ. Він виконує зворотнє перетворення змінного струму в постійний. Для правильного відновлення початкового сигналу ДМ повинен працювати синхронно і синфазно з модулятором М. З виходу ДМ підсилена напруга постійного струму подається на навантаження.

Т. ч., у розглянутій структурі дрейф, обумовлений зміною параметрів підсилювача, внаслідок дії різних дестабілізуючих факторів повністю усунений. Похибки, виникаючі на виході, обумовлені тільки точністю перетворення постійного струму в змінний і повністю визначаються параметрами модулятора.

Підсилювачі постійного струму, побудовані за цим принципом, називають М – ДМ підсилювачами постійного струму або підсилювачами постійного струму з подвійним перетворенням.

У ППС застосовують модулятори, що забезпечують перетворення сигналу постійного струму в змінну напругу, частота якої дорівнює частоті опорної напруги, амплітуда пропорційна величині вхідного сигналу, а фаза (полярність імпульсів) може змінюватись на 180° при зміні полярності вхідного сигналу.

Принципова схема модулятора представлена рис. 9.20 [23]. Основним елементом такого модулятора є переривач. У модуляторах із транзисторними переривачами транзистор використовується як насичений ключ. При цьому застосовується інверсне (зворотнє) включення транзистора, при якому емітер виконує роль колектора, а колектор – роль емітера. При такому «переверненому» включенні транзистора напруга на базу подається відносно колектора, рис. 9.20, А.

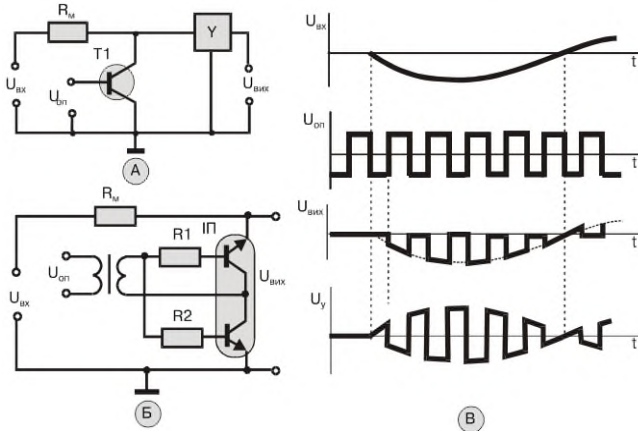


Рис. 9.20. Принципові схеми модуляторів-переривачів:
а – найпростішого; б – інтегрального;
в – часові діаграми

Під дією опорних імпульсів, транзистор (ключ) періодично відкривається і закривається. Вхідний сигнал U_{BX} проходить на вихід модулятора, коли ключ закритий, і майже цілком виділяється на резисторі R_M коли транзистор насичений (відкритий). При цьому $U_{BHX}=0$. Слід зазначити, що ключ нормально працює (відкривається і закривається) при будь-якій полярності U_{BX} , якщо його величина не перевищує амплітуду замикаючих опорних імпульсів, тобто: $U_{BX} < U_{оп}$.

Т. ч., у результаті переривання сигналу на час замикання ключа (відкриття транзистора) на вихід модулятора поступають імпульси, у яких огинаюча повторює вхідний сигнал, а полярність відповідає полярності вхідного сигналу (рис. 9.20, В). Постійна складова у підсиленних імпульсах відсутня, тому що підсилювач змінного струму не пропускає її на вихід схеми. Зміна фази підсилених імпульсів на 180° (у точці t_1) відповідає зміні полярності U_{BX} . Під фазовим зсувом імпульсів розуміють їх відносний часовий зсув $\Delta t/T$, виражений у градусах:

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ. \quad (9.40)$$

Коли ключ розмикають, через R_M протікає сума зворотного струму р-п переходу і струмів витоку – залишковий струм розімкнутого ключа. При замкнутому ключі на виході модулятора виявляється деяка залишкова напруга на переходах насиченого транзистора.

Залишкові струм і напругу називають залишковими параметрами. Їхня зміна при зміні температури, струму транзистора з часом вносить похибку в перетворення напруги, тому залишкові параметри повинні бути якнайменшими. Через несиметрію р-п переходів транзистор при інверсному включенні і малих струмах колектора має менші залишкові параметри, ніж при прямому включенні. Тому, у переривачах малих струмів використовують інверсне включення транзисторів.

Для зменшення залишкових параметрів застосовують зустрічне включення ідентичних транзисторів. На рис. 9.20, Б наведена схема модулятора, у якому для замикання виходу застосовується інтегральний переривач. У ньому транзистори включені зустрічно і мають практично ідентичні характеристики. Завдяки цьому залишкові струми і напруги частково компенсуються, що дозволяє перетворювати малі сигнали $\sim 100...200$ мкВ. Для забезпечення однакових базових струмів у кола баз включені опори R_1 і R_2 . У ключах із зустрічним включенням транзисторів виконувати умову $U_{BX} < U_{OP}$ не потрібно.

До недоліків даної структури можна віднести:

- наявність у вихідній напрузі підсилювача змінної складової струму, частота якої дорівнює частоті задаючого генератора. Це обумовлено неідеальністю роботи модулятора і демодулятора. Усунення цієї складової потребує встановлення на виході підсилювача додаткового фільтра;

- недостатньо широку смугу пропускання підсилювача. Причина цього, по-перше, в тому, що для правильного відновлення початкового сигналу частота роботи модулятора і демодулятора повинна як мінімум у 2 рази перевищувати максимальне значення частоти вхідного сигналу; по-друге, в необхідності встановлення на виході пристрою подавляючого фільтра на частоті задаючого генератора.

9.3.4. Операційні підсилювачі

У класичній електроніці до класу операційних підсилювачів (ОП) відносили багатокаскадні високоякісні підсилювачі постійного струму з від'ємним зворотнім зв'язком, які використовували в аналоговій обчислювальній техніці для виконання операцій алгебраїчного додавання, віднімання, множення, ділення, диференціювання, інтегрування, логарифмування та ін. Це і зумовило їх назву – операційні (розв'язуючі) підсилювачі [16].

Такі ОП тепер використовують не лише для виконання математичних операцій, а й для підсилення, перетворення, формування і обробки електричних сигналів.

Інтегральні ОП будують за схемою підсилення з безпосереднім зв'язком між окремими каскадами з диференціальним входом і біполярним по відношенню до амплітуди підсилювального сигналу виходом. Це забезпечує нульові потенціали на вході і виході ОП при відсутності керуючих сигналів на його вході. Тому такі підсилювачі легко з'єднувати послідовно при безпосередньому зв'язку між каскадами, а також досить просто охопити будь-якими колами зворотного зв'язку.

Операційний підсилювач – це аналогова інтегральна схема, яка має, як мінімум, п'ять виводів (рис. 9.21). Два виводи ОП використовуються в якості вхідних, один вивід є вихідним, два інших виводи використовуються для з'єднання з джерелом живлення ОП.

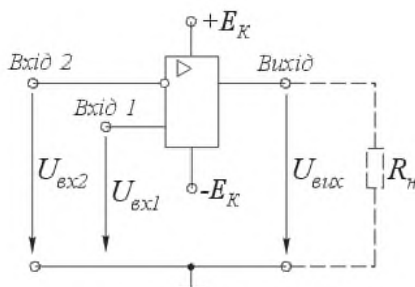


Рис. 9.21. Схема операційного підсилювача та мікросхема LM324:

$U_{вх} = 3 \dots 32 \text{ В}$, $I_{вх} = 10 \text{ мА}$, $U_{зм} = 2 \text{ мВ}$; $K_0 = 100 \text{ дБ}$
(за постійною напругою)

З урахуванням фазових співвідношень вхідного та вихідного сигналів один з вхідних виводів (вхід 1, рис. 9.21) зветься неінвертуючим, а другий (вхід 2) – інвертуючим. Вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ пов’язана з вхідними напругами $U_{\text{вх1}}$ і $U_{\text{вх2}}$ співвідношенням:

$$U_{\text{вих}} = K_0 (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}), \quad (9.41)$$

де K_0 – власний коефіцієнт підсилення ОП за напругою.

У якості джерела живлення ОП використовують двополярне джерело напруги ($+E_K$, $-E_K$). Середній вивід цього джерела, як правило, є спільною шиною для вхідних і вихідних сигналів і в більшості випадків не з’єднується з ОП. У реальних ОП напруга живлення лежить в діапазоні $\pm 3 \dots \pm 18$ В. Використання джерела живлення з середньою точкою передбачає зміни не тільки рівня, але й полярності як вхідної, так і вихідної напруги ОП.

На рис. 9.21 показано ОП LM324, що має чотири незалежних канали, які працюють у широкому діапазоні напруг від 3 до 32 В, дуже низький вхідний струм, що не перевищує 10 мА, і високі параметри за шумом. Підсилювач працює від постійного джерела живлення 5 В, споживає струм до 700 мкА і здатний працювати як з одно-, так і з двополярним джерелом живлення.

Увімкнення ОП у зовнішнє коло з джерелом вхідного сигналу $\pm U_{\text{вх}}$, опором навантаження R_n і двома джерелами живлення E_K^+ і E_K^- показано на рис. 9.22, а. Джерело живлення має три режими: позитивний, негативний і спільнозаземлюючий.

Передавальні характеристики ОП $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ (рис. 9.22, б), які належать до інвертуючого і неінвертуючого входів, зображуються у вигляді двох кривих. Як видно, вхідні і вихідні напруги можуть симетрично змінюватися відносно нуля (бути біполярними). При заземленому неінвертуючому вході (рис. 9.22, а) сигнал передається на вихід підсилювача з інвертуванням фази вхідного сигналу (крива 1) (рис. 9.22, б). При заземленні інвертуючого входу фаза підсилюваного сигналу в процесі підсилювання не змінюється, крива 2, рис. 9.22, б. Вихідна напруга знімається відносно середньої точки джерела живлення. Якщо $U_{\text{вх}} = 0$, то $U_{\text{вих}} = 0$, в чому й полягає умова балансу ОП.

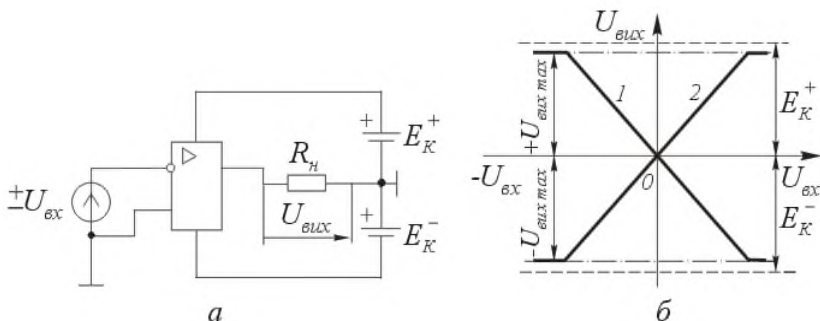


Рис. 9.22. Операційний підсилювач:

а – схема увімкнення ОП у зовнішнє коло;

б – передавальні характеристики ОП

Нахиленим (лінійним) ділянкам передавальних характеристик відповідають пропорційні залежності вихідної напруги від вхідної. При відсутності зовнішніх кіл зворотного зв'язку нахил передавальних характеристик $\partial U_{\text{вих}}/\partial U_{\text{вх}}$ визначається власним коефіцієнтом підсилення K_0 . Граничне значення амплітуди вихідного сигналу близьке до $2E_K$. Але при цьому значно зростають нелінійні спотворення підсилюваного сигналу. Горизонтальні ланки передавальних характеристик відповідають режиму насичення або відсічки транзистора вихідного каскаду. При цьому зміна вхідної напруги не викликає зміни вихідної напруги, яка досягає максимуму, близького до E_K .

Реальні ОП будуються на основі дво- або трикаскадних підсилювачів постійного струму і мають звичайно більшу кількість виводів, ніж п'ять.

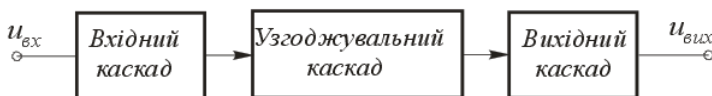


Рис. 9.23. Структурна схема трикаскадного ОП

На рис. 9.23 показана структурна схема трикаскадного ОП. Вона складається з вхідного, узгоджуючого і вихідного каскадів підсилення. Аналіз електричних параметрів ОП показує, що їх

практична реалізація передбачає використання в якості *вхідного каскаду* ОП диференціального підсилюючого каскаду, що дозволяє максимально зменшити величину дрейфу підсилювача, отримати достатньо велике підсилення, забезпечити одержання максимально великого вхідного опору і максимально заглушити діючі на вході синфазні складові, обумовлені зміною температури навколишнього середовища, зміною напруги живлення, старінням елементів і т. п.

Узгоджувачий каскад служить для узгодження вихідного сигналу диференціального підсилювача з вихідним каскадом ОП, забезпечуючи необхідне підсилення сигналу за струмом та напругою, а також узгодження фаз сигналів.

Вихідний каскад, який, як правило, виконується за двотактною схемою, забезпечує потрібне підсилення сигналу за потужністю. Найчастіше вихідний каскад створюється за схемою СК (емітерний повторювач), що забезпечує необхідне навантаження всієї схеми ОП.

На рис. 9.24 показана спрощена принципова електрична схема трикаскадного ОП. Перший каскад виконаний на диференціальному підсилювачі (транзистори $VT1$ і $VT2$) з джерелом стабільного струму на транзисторах $VT3$ і $VT4$ (схема «струмового дзеркала»). Для зменшення потужності, яка розсіюється в підсилювачі, резистор зміщення R_{3M} «струмового дзеркала» живиться від джерела живлення ОП. Резистори R_{E1} і R'_{E1} , забезпечуючи введення в коло кожного транзистора диференціального каскаду місцевого послідовного від'ємного ЗЗ за струмом навантаження, збільшують вхідний опір підсилювача.

Узгоджувачий каскад підсилювача також виконаний за схемою диференціального каскаду (транзистори $VT5$ і $VT6$), до виходу якого приєднаний каскад за схемою з спільним емітером ($VT7$). Особливостями цього каскаду є використання в диференціальному підсилювачі транзисторів, провідність яких протилежна провідності транзисторів вхідного каскаду, і застосування несиметричного виходу.

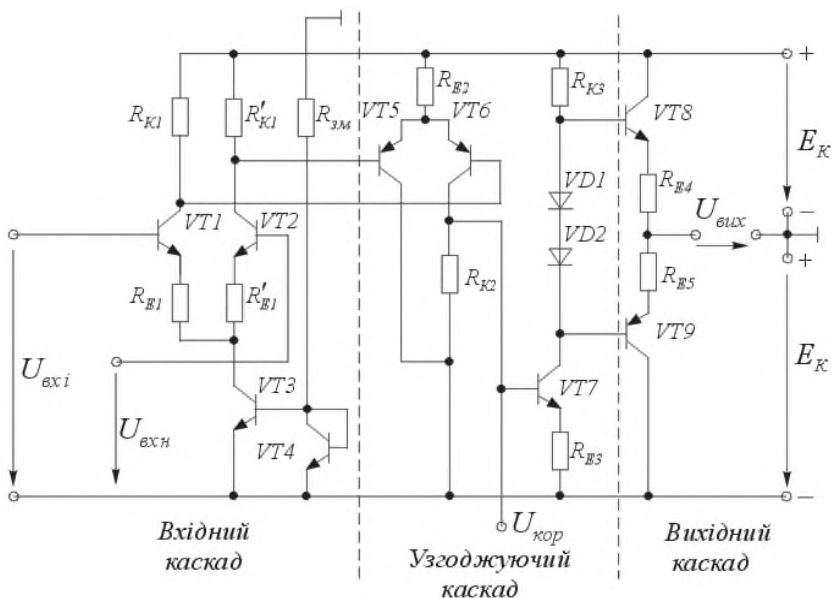


Рис. 9.24. Спрощена принципова електрична схема трикаскадного ОП

Внаслідок цього навантажувальний резистор у колекторному колі транзистора $VT6$ відсутній. Режим за постійним струмом у каскаді на транзисторі $VT7$ стабілізується введенням кола послідовного від'ємного ЗЗ за струмом навантаження. Резистор R_{K3} є навантажувальним для каскаду на транзисторі $VT7$. В узгоджувальному каскаді двофазний сигнал перетворюється в однофазний. Із схеми видно, що струм другого каскаду не фіксується джерелом стабільного струму в колі емітерів транзисторів, оскільки від цього каскаду не вимагається ослаблення синфазного сигналу загального вигляду, який практично відсутній на виході першого диференціального підсилювача. Внаслідок цього другий каскад ОП працює в режимі з міліамперними струмами, забезпечуючи підсилення напруги порядку кількох сотень.

У вихідному каскаді підсилювача використана схема двотактного підсилювача потужності, який працює в класі АВ. Потрібне для цього початкове зміщення задається діодами $VD1$ і $VD2$. Ці ж діоди забезпечують температурну стабілізацію режиму спокою вихідного

підсилювача. Емітерні резистори R_{E4} і R_{E5} забезпечують узгодження параметрів комплементарної пари транзисторів вихідного каскаду ОП і обмежують його максимальний вихідний струм.

Схема підсилювача, рис. 9.24, має три виводи для під'єднання двополярного джерела живлення, вихідний вивід, вивід для під'єднання зовнішнього кола корекції $U_{\text{кор}}$ і два вхідні виводи. Коло зовнішньої корекції дозволяє потрібним чином змінювати частотну характеристику підсилювача, що важливо при введенні в нього різних кіл зворотного зв'язку. Слід відмітити, що кола корекції часто вбудовуються безпосередньо в підсилювач.

Основні параметри операційного підсилювача

Операційні підсилювачі мають високу чутливість, низький поріг чутливості, малий дрейф нуля при зміні температури і високу швидкодію. Нижче приводяться основні параметри ОП, що характеризують його роботу.

Коефіцієнт підсилення за напругою K_0 характеризує здатність ОП підсилювати диференціальний сигнал, що подається на його входи:

$$K_0 = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}}.$$

Типове значення коефіцієнта підсилення ОП складає до $10^5 \dots 10^6$ або 100...120 дБ.

Вхідна напруга зміщення – це напруга, яка обумовлена, в основному, неідентичністю напруг емітерних переходів транзисторів вхідного диференціального підсилювача (розбаланс підсилювача). Наявність цієї напруги призводить до порушення умови, згідно якої $U_{\text{вих}}=0$ при $U_{\text{вх}}=0$. При розбалансуванні на виході підсилювача існує деяка напруга $+\Delta U_{\text{вих}}$ або $-\Delta U_{\text{вих}}$ (криві 1 і 3 на рис. 9.25, а) при $U_{\text{вх}}=0$. Для усунення розбалансування (крива 2) на вхід підсилювача необхідно подати напругу зміщення $U_{\text{зм}}$ (рис. 9.25, б) у K_0 разів меншу за відхилення вихідної напруги. Типове значення цієї напруги одиниці – десятки мілівольт.

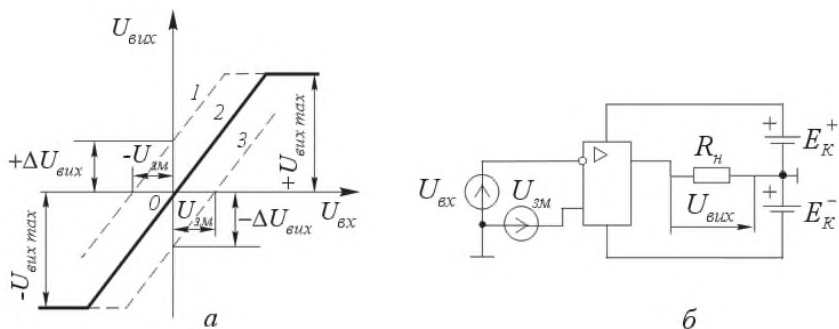


Рис. 9.25. Операційний підсилювач:

а – передавальна характеристика ОП,

б – схема усунення розбалансу ОП

Вхідний струм $I_{вх}$ (вхідний струм зміщення) – струм, який протікає у вхідних виводах ОП і необхідний для забезпечення потрібного режиму роботи його транзисторів. Типове значення цього струму одиниці мікроампер – сотні наноампер.

Різниця вхідних струмів $\Delta I_{вх}$ (струм зсуву). Природа цього струму полягає, в основному, в неоднаковості коефіцієнтів передачі струму h_{21E} транзисторів вхідного каскаду ОП. Чисельно він дорівнює модулю різниці вхідних струмів підсилювача:

$$\Delta I_{вх} = |I_{вх1} - I_{вх2}|. \quad (9.42)$$

Типове значення параметра – від одиниць мікроампер до одиниць і десятих часток наноампер.

Вхідний опір $R_{вх}$. Розрізняють диференціальний вхідний опір $R_{вхд}$ і синфазний вхідний опір $R_{вхс}$.

$R_{вхд}$ визначають як опір між входами підсилювача, а $R_{вхс}$ – як опір між об'єднаними вхідними виводами і нульовою шиною. Типове значення вхідного опору – сотні кілоом.

Вихідний опір $R_{вих}$ – це опір підсилювача, який розглядається як еквівалентний генератор. Типове значення вихідного опору – сотні Ом.

Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу $K_{оsf}$ – визначає степінь ослаблення (заглушення) синфазної складової вхідного сигналу. Його типове значення – 50...70 дБ.

Максимальна швидкість зміни вихідної напруги (V) характеризує частотні властивості підсилювача при його роботі в імпульсних схемах; вимірюється при подачі на вхід ОП напруги східчастої форми. Типове значення швидкості зміни вихідної напруги – одиниці вольт/мікросекунд.

Частота одиничного підсилення F_{max} – це частота, на якій модуль коефіцієнта підсилення ОП дорівнює одиниці. Звичайно ця частота не перевищує декількох мегагерц.

Окрім перелічених, звичайно задаються і гранично допустимі значення основних експлуатаційних параметрів:

- максимально допустима напруга живлення;
- максимально допустимий вихідний струм;
- діапазон робочих температур;
- максимально допустима розсіювана потужність;
- максимально допустима вхідна синфазна напруга;
- максимально допустима вхідна диференціальна напруга та ін.

Більшість перелічених параметрів сильно залежать від умов експлуатації.

Інверторний, неінверторний та диференціальний підсилювачі

Схема інвертуючого ввімкнення ОП показана на рис. 9.26, а. Через те, що підсилення ОП дуже велике, можна з невеликою помилкою вважати таку модель ідеальною. Це відповідає виконанню умов $K_{OU} \rightarrow \infty$ та $K_{OI} \rightarrow \infty$, де K_{OU} та K_{OI} – коефіцієнти підсилення за напругою і струмом схеми без зворотного зв'язку. Якщо при цьому охопити підсилювач паралельним зворотним зв'язком за напругою через резистор R_2 , то будь-який незначний сигнал на вході підсилюється і передається по колу зворотного зв'язку у вхідне коло ОП, компенсуючи вхідний сигнал таким чином, що в стані рівноваги (в стаціонарному режимі) $U_{вх}=0$. Оскільки вхідний опір підсилювача також великий ($R_{вх} \rightarrow \infty$), то можна вважати, що струм джерела сигналу I_1 тече лише через R_2 , спад напруги на якому за рахунок цього струму:

$$U_{R_2} = I_2 R_2 = -I_1 R_1 = -E_c (R_2 / R_1). \quad (9.43)$$

Оскільки потенціал у точці A , де додаються струми, практично дорівнює нулю (точку A називають ще "віртуальним нулем" або "віртуальною землею"), то:

$$U_{\text{вих}} = U_{R_2} = -E_c (R_2/R_1), \quad (9.44)$$

звідки, одержимо коефіцієнт підсилення ОП з урахуванням коефіцієнта передачі зворотного зв'язку за напругою $\varphi = R_1/R_2$:

$$K_{\text{НЗЗ}} = U_{\text{вих}}/E_c = -R_2/R_1 = -1/\beta. \quad (9.45)$$

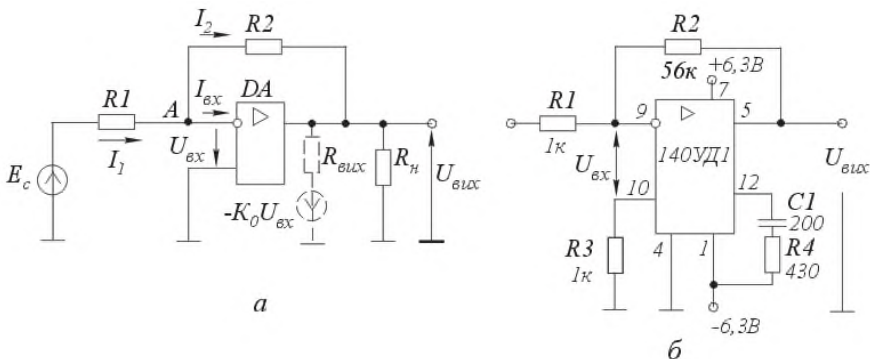


Рис. 9.26. Принципові схеми:

а – інвертуючого ввімкнення ОП,

б – підсилювального каскаду на мікросхемі 140УД1А

Знак "–" у рівнянні (9.45) вказує на інвертування фази (полярності) вхідного сигналу.

З виразу (9.45) випливає, що вибором резисторів кола від'ємного 33 коефіцієнт передачі інвертуючого підсилювача може бути зменшений до як завгодно малої величини.

На рис. 9.26, б зображена принципова схема підсилюючого каскаду на мікросхемі 140УД1А. При вказаних номіналах навісних компонентів схеми підсилення відбувається в смузі частот до 2 МГц з коефіцієнтом підсилення 60, що досить точно відповідає формулі (9.45). Коло C_1, R_4 призначене для корекції частотної характеристики підсилювача.

Схема **неінвертуючого ввімкнення ОП** показана на рис. 9.27, а. Напруга зворотного зв'язку, яка знімається з подільника напруги R_1, R_2 , пропорційна вихідній напрузі підсилювача:

$$U_{33} = U_{\text{вих}} R_1 / (R_1 + R_2) = \beta U_{\text{вих}}, \quad (9.46)$$

де $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$.

Беручи до уваги, що коефіцієнт підсилення підсилювача, охопленого від'ємним ЗЗ, визначається рівнянням (9.21), для неінвертуючого підсилювача одержимо:

$$K_{\text{НЗЗ}} \approx K_0 / (1 + K_0 \beta) = K_0 / \left(1 + K_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right).$$

З урахуванням того, що $K_0 \rightarrow \infty$, маємо:

$$K_{\text{НЗЗ}} \approx (R_1 + R_2) / R_1 = 1 + R_2 / R_1 = 1 / \beta. \quad (9.47)$$

З отриманого виразу можна зробити наступні висновки: коефіцієнт передачі неінвертуючого підсилювача зворотно пропорційний коефіцієнту передачі кола від'ємного ЗЗ; при будь-яких опорах резисторів у колі від'ємного ЗЗ коефіцієнт передачі неінвертуючого підсилювача не може бути меншим одиниці.

Останній висновок безпосередньо впливає з властивостей ОП. Дійсно, для зменшення коефіцієнта передачі у схемі, що розглядається, необхідно збільшити коефіцієнт передачі кола від'ємного ЗЗ. Границею такого збільшення є $\beta = 1$. Проте, в цьому випадку схема рис. 9.27, а перетворюється в схему рис. 9.28, а, тобто у схему неінвертуючого повторювача напруги, у якій $R_2 = 0$ або $R_1 = \infty$, а $K_{\text{НЗЗ}} \approx 1$. Звідси виходить, що коефіцієнт передачі неінвертуючого підсилювача не може бути менший 1.

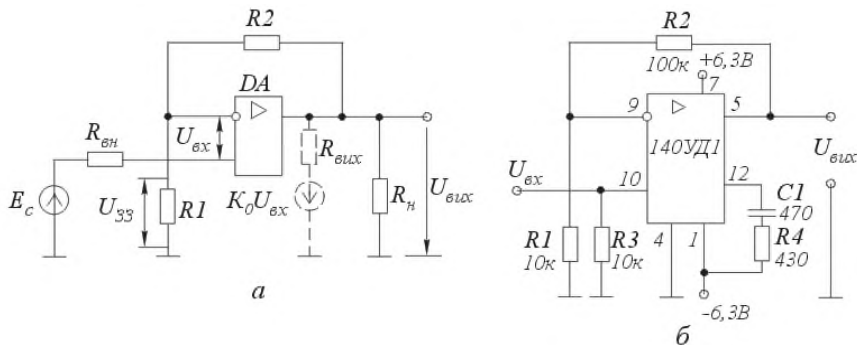


Рис. 9.27. Принципові схеми:

а – неінвертуючого ввімкнення ОП; б – неінвертуючого підсилювача на мікросхемі 140УД1А

Часто одиницею у виразі (9.47) можна знехтувати і при визначенні коефіцієнта передачі використовувати спрощений вираз:

$$K_{НЗЗ} \approx R_2 / R_1 . \quad (9.48)$$

Слід пам'ятати, що в розглянутому підсилювачі фази вхідної і вихідної напруг співпадають.

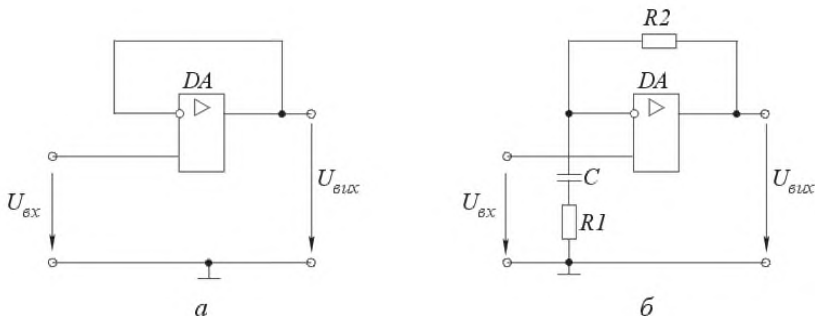


Рис. 9.28. Принципові схеми:

а – неінвертуючого повторювача напруги, б – неінвертуючого повторювача напруги з частотнозалежним зворотним зв'язком

Якщо послідовно з резистором R_1 ввімкнути конденсатор C (рис. 9.28, б), то зворотний зв'язок стане частотнозалежним. На

постійному струмі, де $1/\omega C \rightarrow \infty$, коефіцієнт зворотного зв'язку $\beta \rightarrow 1$, а $K_{\text{НЗЗ}} = K_0(1 = K_0) \approx 1$.

На змінному струмі, де виконується умова $1/\omega C \ll R_1$, коефіцієнт підсилення можна знайти з виразу (9.47). На частотах, де ця умова не виконується, потрібно використовувати загальний вираз:

$$K_{\text{НЗЗ}} = K_0 / (1 + K_0 \beta) \approx 1/\beta = (Z_1 + R_2) / Z_1,$$

де $Z_1 = R_1 + 1/j\omega C$.

Т. ч., внаслідок частотної залежності кола від'ємного ЗЗ коефіцієнт підсилення підсилювача змінюється від одиниці за постійним струмом, до $K_{\text{НЗЗ}} = (R_1 + R_2)/R_1$ у діапазоні робочих частот. Причому, в проміжку між $\omega_{\text{н}}$ і $\omega \rightarrow 0$ він змінюється як за модулем, так і за фазою. 100 %-ний зворотний зв'язок за постійним струмом забезпечує температурну стабільність параметрів підсилювача, в той час як у діапазоні робочих частот коефіцієнт має потрібне значення.

Схема неінвертуючого підсилювача на мікросхемі 140УД1А показана на рис. 9.27, б.

Диференціальне ввімкнення ОП (рис. 9.29) поєднує інвертуючу та неінвертуючу схеми. Вмикання ОП, як у диференціальному підсилювачі, призначене для підсилення різниці напруги $e_{\text{н}} - e_{\text{і}}$. Для того, щоб одержати вираз для коефіцієнта передачі схеми, врахуємо, що струми джерел сигналів не розгалужуються на входи підсилювача, а різниця напруг між входами ОП $u_{\text{вх н}} - u_{\text{вх і}} \approx 0$, тобто, $u_{\text{вх н}} = u_{\text{вх і}}$. Оскільки ми маємо справу з лінійним пристроєм, то використовуючи принцип суперпозиції для вихідної напруги, можна записати:

$$u_{\text{вих}}(e_{\text{і}}) = -e_{\text{і}} R_2 / R_1;$$

$$u_{\text{вих}}(e_{\text{н}}) = e_{\text{н}} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_1 + R_2}{R_1}.$$

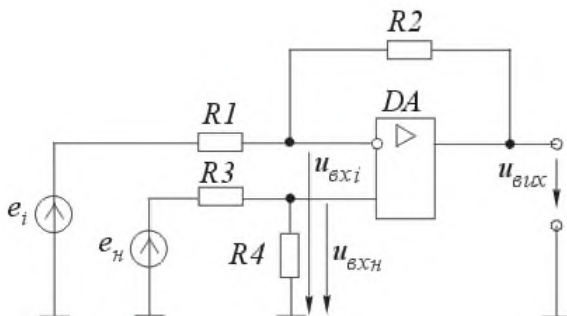


Рис. 9.29. Схема диференціального ввімкнення ОП

Якщо підсумувати одержані вирази, то знайдемо:

$$u_{\text{вих}} = u_{\text{вих}}(e_i) + u_{\text{вих}}(e_n) = -\frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} e_n - \frac{R_2}{R_1} e_i. \quad (9.49)$$

На практиці часто виконується умова:

$$R_1 = R_3 \text{ і } R_2 = R_4, \quad (9.50)$$

і тоді вираз (9.49) прийме більш простий вигляд:

$$u_{\text{вих}} = (e_n - e_i) R_2 / R_1. \quad (9.51)$$

Отже, коефіцієнт передачі ОП з диференціальним входом визначається відношенням $u_{\text{вих}} / (e_n - e_i)$ і дорівнює коефіцієнту R_2 / R_1 , який є коефіцієнтом підсилення інвертуючого підсилювача.

Прецизійні (високоточні) операційні підсилювачі використовуються для підсилення малих електричних сигналів, супроводжуваних високим рівнем завад, і характеризуються малим значенням напруги зміщення і температурного дрейфу, великими коефіцієнтами підсилення і подавлення синфазного сигналу, великим вхідним опором і низьким рівнем шумів. Як правило, вони мають невисоку швидкодію. Їх основні параметри: напруга зміщення; $U_{\text{зм}} \leq 250$ мкВ; температурний дрейф $\Delta U_{\text{зм}} / \Delta T \leq 5$ мкВ/°С, коефіцієнт підсилення $K_o \geq 150$ тис.

На основі прецизійних операційних підсилювачів виконують електронні нормуючі перетворювачі для отримання уніфікованих вихідних сигналів постійного струму (ДСП): 0...5 мА, 0...20 мА, 0...10 В.

9.4. Підсилювачі змінного струму

9.4.1. Підсилювачі з резистивно-ємнісними зв'язками

Для підсилення електричних сигналів змінного струму служать підсилювачі з резистивно-ємнісним зв'язком (з RC-зв'язком), які мають стабільні характеристики, прості в наладці, компактні і надійні. Завдяки використанню в таких підсилювачах як елементів міжкаскадного зв'язку перехідних конденсаторів режими роботи за постійним струмом окремих каскадів взаємозалежні. Типова схема двокаскадного підсилювача на транзисторах з резистивно-ємнісним зв'язком наведена на рис. 9.30, а. Конденсатори C_{p1} і C_{p2} призначені для розділення режимів окремих каскадів за постійним струмом і називаються роздільними. Очевидно, що для наступного каскаду вихідний роздільний конденсатор C_{p2} виконує роль вхідного. Тому для одиничного каскаду розрахунок зводиться до вибору роздільного конденсатора C_{p1} .

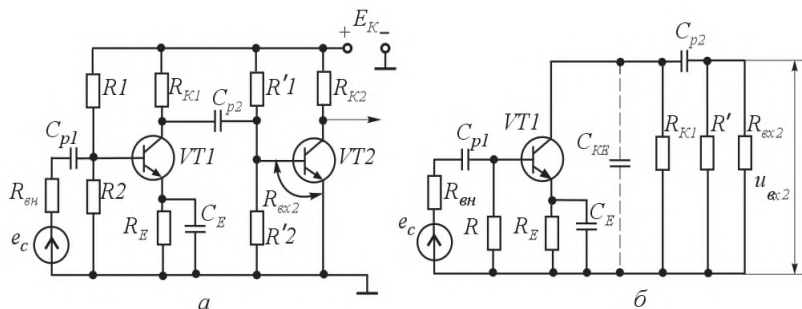


Рис. 9.30. Двокаскадний підсилювач:

а – схема двокаскадного підсилювача на транзисторах з резистивно-ємнісним зв'язком,

б – еквівалентна схема двокаскадного підсилювача за змінним струмом

Підсилюючий каскад на транзисторі $VT2$ є навантаженням попереднього каскаду на транзисторі $VT1$, яке визначається в цьому випадку опором $R_H = R' \parallel R_{\text{вх}2}$, де $R' = R'_1 R'_2 / (R'_1 + R'_2)$. З урахуванням цього еквівалентну схему двокаскадного підсилювача за змінним струмом, справедливу для всього діапазону частот підсилюваного сигналу, можна зобразити так, рис. 9.30, б. Опори $R1$ і $R2$ за змінним струмом увімкнені паралельно, тобто $R = R_1 \parallel R_2$.

Частотна характеристика підсилювача має вигляд, показаний на рис. 9.13 (суцільна крива 1), з якої видно, що в області середніх частот коефіцієнт підсилення за напругою (а також за струмом) практично не залежить від частоти. Зниження коефіцієнта підсилення в області нижніх частот обумовлено розділними (перехідними) конденсаторами C_{p1} , C_{p2} , а також конденсатором C_E в колі емітера транзистора $VT1$. Так, наприклад, зі зниженням частоти збільшується спад напруги на зростаючих опорах розділних конденсаторів і тим самим знижується напруга корисного сигналу, який підводиться до входів окремих каскадів. Збільшення опору конденсатора C_E зі зниженням частоти призводить до росту глибини послідовного від'ємного зворотного зв'язку за струмом. В обох випадках відбувається зниження підсилення, причому тим більше, чим нижча частота підсилюваного сигналу.

Модуль коефіцієнта підсилення за напругою з урахуванням впливу тільки ємності C_{p2} визначається формулою:

$$K_2 = K_0 / \sqrt{1 + (1/\omega_H \tau_{p2})^2}, \quad (9.52)$$

де $\tau_{p2} = C_{p2}(R_{\text{вих}1} \parallel R_{K1} + R' \parallel R_{\text{вх}2})$ – стала часу кола міжкаскадного зв'язку; $R_{\text{вих}1}$ – вихідний опір першого каскаду підсилення. При цьому коефіцієнт частотних спотворень:

$$M_{H2} = K_0 / K_2 = \sqrt{1 + (1/\omega_H \tau_{p2})^2}. \quad (9.53)$$

З рівняння (9.53) випливає, що збільшення ємності C_{p2} (збільшення сталої часу τ_{p2}) при заданому коефіцієнті M_{H2}

призводить до розширення смуги пропускання підсилювача в області низьких частот (крива 2 на рис. 9.13). Величина ємності при заданому $M_{н2}$ визначається співвідношенням:

$$C_{p2} \geq 1 / \left[\omega_n (R_{вх1} \parallel R_{K1} + R' \parallel R_{вх2}) \sqrt{M_{н2}^2 - 1} \right]. \quad (9.54)$$

Дія вхідного роздільного конденсатора і величина ємності C_{p1} визначається аналогічно. При цьому стала часу кола зв'язку першого каскаду підсилення з джерелом вхідного сигналу $\tau_{p1} = C_{p1} (R_{вн} + R \parallel R_{вх1})$, де $R_{вх1}$ – вхідний опір каскаду, а ємність роздільного конденсатора для заданого значення $M_{н1}$ визначається виразом:

$$C_{p1} \geq 1 / \left[\omega_n (R_{вн} + R \parallel R_{вх1}) \sqrt{M_{н1}^2 - 1} \right]. \quad (9.55)$$

Для модуля коефіцієнта частотних спотворень, обумовлених ємністю C_E , справедливий вираз:

$$M_{нЕ} = \sqrt{1 + (1/\omega_n \tau_{CE})^2}, \quad (9.56)$$

де $\tau_{CE} = C_E [r_E + r_B / (h_{21E} + 1)] \approx C_E r_E$ – стала часу емітерного кола. Величина ємності конденсатора C_E при заданому допустимому коефіцієнті частотних спотворень $M_{нЕ}$ визначається за формулою:

$$C_E \geq 1 / \left(\omega_n r_E \sqrt{M_{нЕ}^2 - 1} \right). \quad (9.57)$$

Результуючий коефіцієнт частотних спотворень в області низьких частот з урахуванням дії ємностей C_{p1} , C_{p2} , C_E визначають з рівності:

$$M_H = M_{н1} M_{н2} M_{нЕ}. \quad (9.58)$$

Т. ч., розширення смуги пропускання підсилювача з ємнісним зв'язком в області низьких частот досягається збільшенням сталих часу вхідного, перехідного і вихідного кіл τ_{p1} , τ_{p2} , τ_{CE} . У зв'язку з тим, що величини опорів і особливо їх паралельних з'єднань, які входять у рівняння для сталих часу, звичайно невеликі, то ємності конденсаторів, одержані згідно з виразами (9.54), (9.55), (9.57) для заданих значень M_{h1}, M_{h2}, M_{hE} досягають десятків і сотень мікрофарад.

В області високих частот потрібно враховувати ємність колекторного переходу $C_K = C_{KE} / (h_{21E} + 1)$, опір якого зменшується із збільшенням частоти, шунтуючи навантаження. Крім того, коефіцієнт передачі струму бази h_{21E} починає виявляти комплексний характер, зменшуючись за модулем. Обидві ці причини викликають зменшення підсилення в області високих частот (рис. 9.13).

Для коефіцієнта частотних спотворень підсилювача M_{BC} на деякій частоті $\omega_B = 2\pi f_B$ за рахунок зміни ємності C_{KE} отримаємо:

$$M_{BC} = \sqrt{1 + (\omega_B \tau_{BC})^2}, \quad (9.59)$$

де τ_{BC} – стала часу кола розряду конденсатора C_{KE} :

$$\tau_{BC} = C_{KE} (R_{вих1} \parallel R_{K1} \parallel R' \parallel R_{вх2}) = C_{KE} R_{KB}. \quad (9.60)$$

Коефіцієнт частотних спотворень на цій же частоті ω_B , обумовлений зменшенням h_{21E} :

$$M_{Bh21E} = \frac{h_{21E0}}{|h_{21E}|} = \sqrt{1 + (\omega_B / \omega_{h21E})^2} = \sqrt{1 + (\omega_B \tau_{h21E})^2},$$

де $\tau_{h21E} = \tau_{h21B} / (1 - h_{h21B})$ практично збігається з середнім часом життя неосновних носіїв у базі.

Результуючий коефіцієнт частотних спотворень в області високих частот:

$$M_B = M_{BC} M_{Bh2IE} \cdot$$

Розглянемо схему трикаскадного підсилювача змінного струму (рис. 9.31). Особливістю схеми є:

- використання в першому та другому каскадах схем підсилення із спільним емітером. Причому, для забезпечення температурної стабілізації режиму спокою в кожному з них використаний послідовний від'ємний ЗЗ за струмом навантаження;
- виконання третього каскаду за схемою емітерного повторювача, що зменшує вихідний опір підсилювача;
- використання для формування високочастотної частини характеристики кола загального послідовного від'ємного ЗЗ за вихідною напругою, що збільшує вхідний і зменшує вихідний опори підсилювача. Для введення цього зв'язку емітерний резистор транзистора VT1 розділений на два послідовно з'єднаних резистори. Це дозволяє в першому каскаді при бажаній стабільності режиму спокою зберегти достатній коефіцієнт підсилення за змінним струмом.

Найбільш поширеними підсилювачами змінного струму можна вважати модульні підсилювачі на мікросхемах. Це пояснюється тим, що така мікрозбірка вже містить всі необхідні електронні компоненти. Сьогодні існує велика кількість таких мікросхем серій AN, BA, ESM, HA, KA, LA, LM, STK, TBA, TCA та ін., детальну інформацію про які легко знайти в Інтернеті.

Для прикладу розглянемо найпростішу схему підсилювача на мікросхемі TDA1558Q компанії SGS-THOMSON Microelectronics, рис. 9.31. Представлена схема по суті є мостовою, оскільки в одному корпусі мікросхеми TDA1558Q містяться 4 канали підсилення. У схемі входи 1, 2, і 16, 17 з'єднані попарно, і на них подаються вхідні сигнали $U_{вх1}$, $U_{вх2}$ через конденсатори 0,33 мФ. Підсилювач має вихідну потужність 2x22 Вт у діапазоні частот 40...20000 Гц, допустимий опір навантаження 2 Ом, напругу живлення 6...18 В, номінальний струм 80 мА, коефіцієнт підсилення 50 дБ, корпус мікросхеми TDA 1558Q – 17 SIL. Якщо входи мікросхеми розділити, то можна отримати чотириканальний підсилювач, але тоді

потужність каналів буде в 2 рази менша. Для отримання більших потужностей можна використати іншу мікросхему, наприклад, TDA1560Q. Максимальна потужність такого підсилювача може сягати 40 Вт при навантаженні 8 Ом.

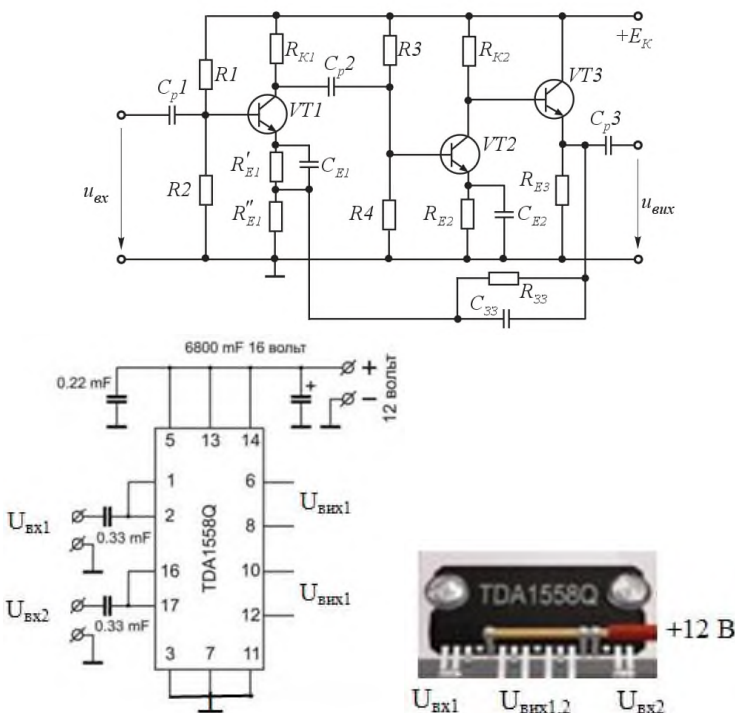


Рис. 9.31. Схеми підсилювачів змінного струму:
трикаскадного транзисторного та на мікросхемі TDA1558Q

9.4.2. Тиристорні підсилювачі

У тиристорному підсилювачі, схема якого показана на рис. 9.32, як керуючий елемент використовується тиристор. Розрізняють діодні і тріодні тиристори та створені на їхній базі симетричні триелектродні тиристори.

Діодний тиристор (диністор) – це двоелектродний прилад з чотиришаровою структурою і ділянкою негативного опору на вольтамперній характеристиці.

Триодний тиристор (далі просто тиристор) – триелектродний прилад з чотири- чи п'ятишаровою структурою. Управління тиристорами (включення і виключення) здійснюється за допомогою електрода управління.

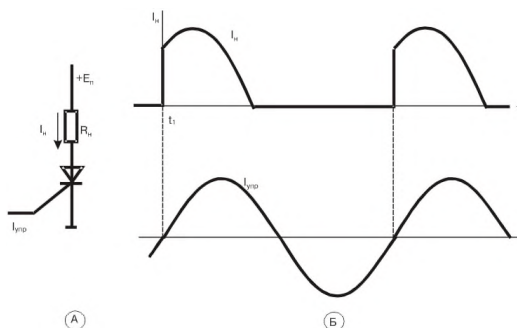


Рис. 9.32. Тиристорний підсилювач:

A – схема; Б – діаграми струмів тиристорного підсилювача

Тиристор може знаходитися тільки в двох стійких станах: включеному і виключеному. Включення тиристора відбувається практично миттєво ($t_{\text{вкл}} = 5 \dots 50$ мкс), після чого він залишається у включеному стані навіть при знятті керуючого сигналу. Вимикання тиристора здійснюється зняттям анодної напруги. Час вимикання тиристора складає $5 \dots 50$ мкс. Оскільки при живленні тиристора змінним струмом, протягом півперіоду струм переходить через нуль, створюються природні умови для вимикання тиристора.

У тиристорний підсилювач входить також схема керування тиристором. Перемикання тиристора з закритого стану у відкритий здійснюється подачею сигналу на його електрод. При живленні підсилювача змінним струмом застосовується фазовий метод управління, оснований на зміні фази сигналу управління відносно фази напруги живлення. Діаграми струмів тиристорного підсилювача при фазовому управлінні показані на рис. 2.4, Б. У момент часу t_1 відбувається відкриття тиристора і у навантаженні починає текти пульсуючий струм, середньо-інтегральне значення якого дорівнює:

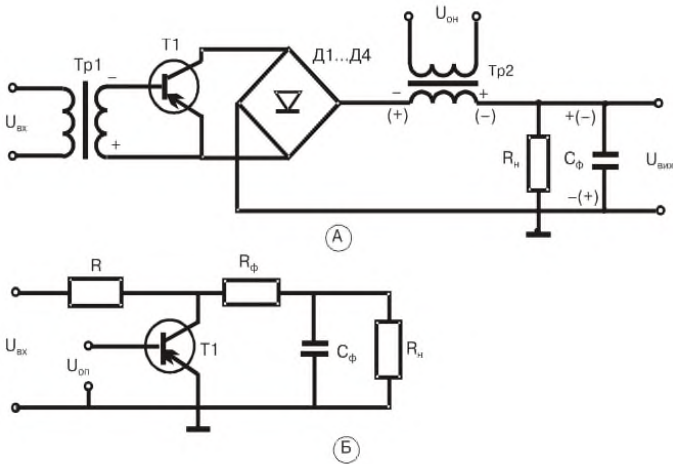
$$I_{н\ cp} = \frac{1}{T} \int_t^{T/2} I_n dt. \quad (9.61)$$

При зміні фази сигналу управління на кут φ в межах $0 < \varphi < \pi$ струм у навантаженні змінюється від максимального значення до нуля.

9.4.3. Фазочутливі підсилювачі

Фазочутливий підсилювач здійснює підсилення і фазочутливе випрямлення вхідного сигналу. При фазочутливому випрямленні зміна фази вхідного сигналу на 180° приводить до зміни полярності випрямленої напруги. Пристрій, у якому відбувається тільки фазочутливе випрямлення, називають фазочутливим випрямлячем чи фазовим детектором. У фазочутливих підсилювачах і випрямлячах фаза вхідної напруги визначається відносно опорної напруги, причому частоти вхідної й опорної напруг повинні бути рівними [23].

Розглянемо роботу транзисторного фазочутливого підсилювача (рис. 9.33, А). Будемо вважати, що вхідна й опорна напруги мають синусоїдальну форму. При відсутності вхідного сигналу напруга на базі (відносно емітера) дорівнює нулю. Транзистор $T1$ закритий і струм на навантаження відсутній. При цьому $U_{вих}=0$. Припустимо, що на вхід підсилювача подано сигнал, причому миттєві полярності напруг на вторинних обмотках трансформаторів відповідають знакам, які показані на рис. 9.33 без дужок. Тоді транзистор $T1$ відкритий і у колі: вторинна обмотка $Tp2$, R_n , діод $D4$, емітер-колектор транзистора, діод $D2$ починає текти струм. Інша частина струму заряджає конденсатор C_ϕ . Струм у навантаженні R_n створює напруга позитивної полярності.

**Рис. 9.33. Принципові схеми:**

А – фазочутливого підсилювача; Б – фазового детектора

Через півперіод миттєві полярності напруг на вторинних обмотках трансформаторів зміняться на протилежні. Транзистор $T1$ закриється й у навантаженні виникне струм розряду конденсатора C_f .

Т. ч., якщо вхідна й опорна напруги синфазні, то на виході підсилювача буде випрямлена напруга позитивної полярності.

Припустимо, що фаза вхідної напруги змінилася на 180° . Це значить, що при негативному півперіоді вхідної напруги миттєва полярність напруги на вторинній обмотці $Tr2$ буде протилежною (на рис. 9.33 показана в дужках). Транзистор відкритий і в колі: вторинна обмотка $Tr2$, діод $D3$, емітер-колектор транзистора, діод $D1$, R_n протікає струм, одночасно відбувається заряджання конденсатора C_f .

Т. ч., якщо $U_{вх}$ і $U_{оп}$ є протифазними, то на виході підсилювача з'являється випрямлена напруга негативної полярності. Чим більша амплітуда вхідної напруги, тим більша величина струму через транзистор і більша випрямлена напруга.

Конденсатор C_f , необхідний для згладжування пульсацій випрямленої напруги, збільшує інерційність підсилювача. Для зменшення інерційності застосовують схеми підсилювачів із двопівперіодним випрямленням, або використовують $U_{вх}$ і $U_{оп}$

прямокутної форми. В останньому випадку застосовують ключовий фазочутливий випрямляч (рис. 9.33, Б).

9.4.4. Магнітні підсилювачі

Принцип дії магнітного підсилювача заснований на залежності магнітної проникливості феромагнітного сердечника котушки при живленні її змінним струмом від підмагнічуючої дії постійного струму.

Найпростіший магнітний підсилювач містить у собі: два однакових замкнутих магнітопроводи (сердечники) (рис. 9.34, А), охоплених обмоткою управління $w_{упр}$, яку називають також вхідною обмоткою, і робочі обмотки w_p на кожному сердечнику [23]. Для живлення робочої обмотки використовується мережа змінного струму (частотами f_l 50 Гц, 400 Гц, 500 Гц чи 1000 Гц). Зі збільшенням частоти коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача збільшується. Обмотка управління живиться постійною напругою $U_{упр}$ і у її колі тече постійний струм, що є вхідним сигналом підсилювача. Його вихідним сигналом є струм у навантаженні, включеному в коло робочої обмотки. Робочі котушки з'єднанні так, щоб їх магнітні потоки у внутрішніх стержнях сердечників, охоплених обмоткою $w_{упр}$, були спрямовані назустріч один одному. Внаслідок чого ЕРС, які індукуються цими потоками в обмотці управління взаємно компенсуються.

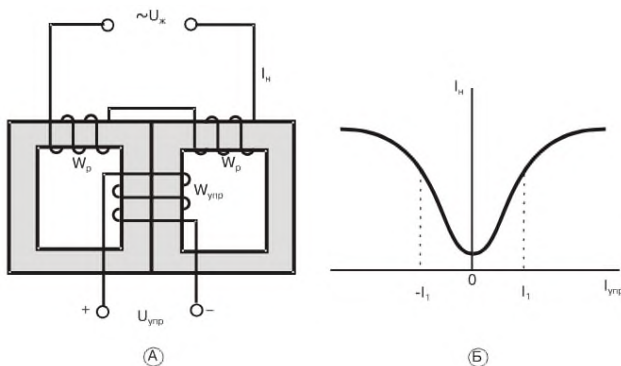


Рис. 9.34. Магнітний підсилювач:

А – схема найпростішого магнітного підсилювача; Б – статична характеристика найпростішого магнітного підсилювача

Сердечники підсилювача виготовляються з магнітом'яких матеріалів з високою магнітною проникливістю (пермалой, трансформаторна сталь).

При збільшенні струму в обмотці управління $I_{упр}$ збільшується поле його підмагнічування. При цьому магнітна проникливість сердечників також збільшується, а індуктивні опори X_L робочих котушок – зменшуються. Струм у колі навантаження I_H у цьому випадку збільшується. Т. ч., затрачуючи невелику потужність для створення підмагнічування, можна керувати значною потужністю в колі навантаження.

Статична характеристика розглянутого найпростішого магнітного підсилювача, що описує залежність I_H від $I_{упр}$, представлена на рис. 9.34, Б.

Видно, що характеристика є нелінійною і коефіцієнт підсилення k_M , визначений як тангенс кута нахилу дотичної до неї, є величина змінна. Найбільші підсилювальні властивості (більший коефіцієнт підсилення) у магнітного підсилювача мають місце при $I_{упр} = \pm I_1$. При $I_{упр} = 0$, $k = 0$. Отже, при зміні $I_{упр}$ в невеликих межах відносно нуля підсилювач не працює, тому що його вихідний сигнал – струм у навантаженні I_H змінюватися не буде.

Коефіцієнт підсилення найпростішого магнітного підсилювача із сердечником з електротехнічної сталі знаходиться в діапазоні 50...200 при частоті змінного струму 50 Гц і 100...800 при частоті 500 Гц. У магнітних підсилювачів із сердечником з пермалоя коефіцієнт підсилення дорівнює 100...1000 і 200...2000 при тих же частотах.

Коефіцієнт підсилення може бути значно збільшений (до 10000) за рахунок введення в підсилювач додатного зворотного зв'язку, що може бути реалізовано за допомогою додаткової обмотки зворотного зв'язку (рис. 9.35, Б), яка живиться від випрямляча в колі робочих обмоток. Зворотний зв'язок при цьому називається зовнішнім. Магнітний потік, створюваний струмом у цій обмотці, додається до магнітного потоку обмотки управління (звідки назва «додатний» зворотний зв'язок).

Додатний зворотний зв'язок можна реалізувати також за допомогою робочих обмоток підсилювача, включивши в їхнє коло пару діодів $D1$ і $D2$ (рис. 9.35, В), які пропускають струм тільки в одному напрямку. Протягом позитивного півперіоду струм буде

протікати у робочій обмотці одного сердечника, а негативного - у обмотці іншого сердечника. Напруженість поля, створювана цим струмом, спрямована узгоджено з напруженістю поля, створюваного обмоткою управління. Отже, і без обмотки зворотного зв'язку в розглянутому підсилювачі виникає постійна складова напруженості, пропорційна вихідному сигналу підсилювача I_H . Зворотний зв'язок підсилювача, реалізований в такий спосіб, називається внутрішнім і додатним. Останнє пояснюється тим, що результуюче поле підмагнічування співпадає за напрямком з полем струму зворотного зв'язку.

Вважаючи наближено магнітний підсилювач без зворотного зв'язку і зворотний зв'язок пропорційними ланками з передатними функціями k_p і k_z , структуру магнітного підсилювача з додатним зворотним зв'язком можна зобразити в такий спосіб (рис. 9.36):

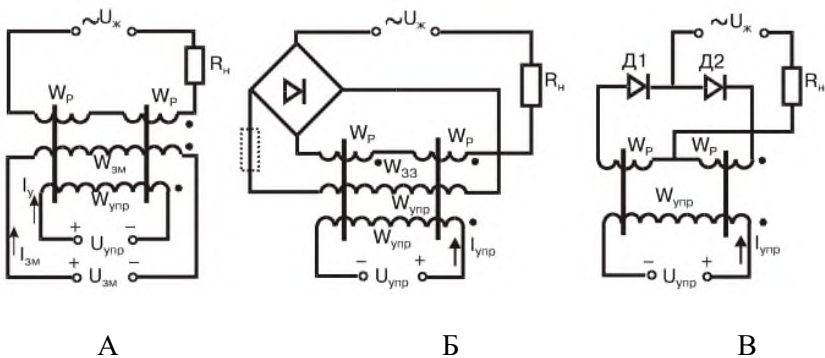


Рис. 9.35. Схеми однотактних магнітних підсилювачів:

А - з обмоткою зміщення; Б - із зовнішнім зворотним зв'язком;

В - із внутрішнім зворотним зв'язком

Як впливає з приведеної структури, коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача з додатним зворотним зв'язком дорівнює:

$$k_M = \frac{k_p}{1 - k_p \cdot k_z}, \quad (9.62)$$

де k_p – коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача без зворотного зв'язку; k_z – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку.

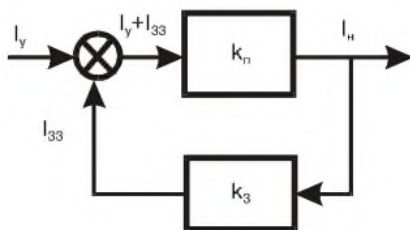


Рис. 9.36. Структура магнітного підсилювача з додатним зворотним зв'язком

Зважаючи на те, що коефіцієнти підсилення є величини додатні $k_M > k_p$.

Статична характеристика розглянутого магнітного підсилювача має вигляд, показаний на рис. 9.37. Видно, що кут нахилу характеристики в деякому діапазоні зміни $I_{упр}$ значно збільшується у порівнянні з підсилювачем без зворотного зв'язку. Робота підсилювача в цьому діапазоні зміни $I_{упр}$ дозволяє значно підвищити його ефективність.

Часто потрібно забезпечити роботу підсилювача в заданому діапазоні зміни $I_{упр}$. Для цього необхідно змістити статичну характеристику підсилювача так, щоб лінійний відрізок характеристики, який має максимальну крутизну, знаходився в заданому діапазоні зміни $I_{упр}$. Для такого зміщення в підсилювач вводиться додаткова обмотка зміщення $w_{зм}$, що живиться від джерела постійної напруги. При цьому, змінюючи величину струму в цій обмотці, можна підібрати таке її підмагнічування, при якому характеристика буде зміщена в необхідне положення.

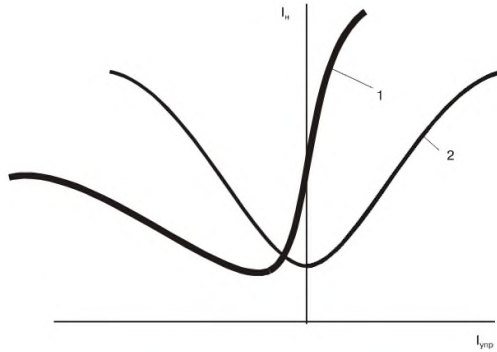


Рис. 9.37. Статичні характеристики магнітних підсилювачів
 1 – зі зворотним зв'язком; 2 – без зворотного зв'язку

Недоліком розглянутих підсилювачів є те, що вони не реагують на полярність вхідного сигналу. При зміні полярності сигналу управління $I_{упр}$ струм у навантаженні змінюється тільки за величиною, протікаючи в тому самому напрямку. Часто потрібні підсилювачі, із вихідними сигналами постійного і змінного струмів, які реагують на зміну полярності $I_{упр}$.

У підсилювачах з виходом на постійному струмі зміна полярності вхідного сигналу викликає зміну напрямку струму навантаження, а в підсилювачах з виходом на змінному струмі – зміну фази струму навантаження на 180° . Забезпечити реверсивність підсилювача можна диференціальним включенням двох магнітних підсилювачів з додатним зворотним зв'язком (рис. 9.38, А).

Обмотки управління в такому підсилювачі з'єднані послідовно. Робоча обмотка реверсивного підсилювача w_p являє собою дві однакові вторинні обмотки трансформатора T_p . Обмотки управління $w_{упр}$ й обмотки зворотного зв'язку $w_{зз}$ реверсивних підсилювачів включені так, щоб при одній полярності вхідного сигналу $I_{упр}$ в одному підсилювачі відбувалося додавання напруженостей магнітних полів обмоток зворотного зв'язку і управління, а в іншому – віднімання.

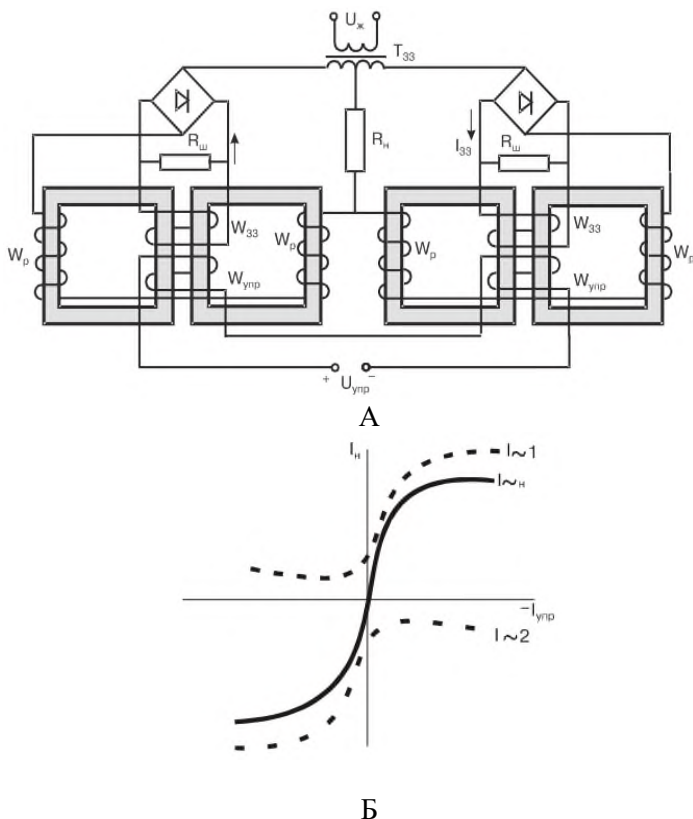


Рис. 9.38. Двотактний диференціальний магнітний підсилювач:
А – схема; Б – статична характеристика

При іншій полярності $I_{упр}$ картина змінюється на зворотну. При цьому фаза струму навантаження міняється на 180° . Все інше в роботі диференціального підсилювача не відрізняється від розглянутого вище. Статична характеристика такого підсилювача показана на рис. 9.38, Б.

Для прикладу розглянемо основні характеристики **блоку трифазних магнітних підсилювачів ПДД-1,1В** компанії **Техномаш (Україна)**.

Блок трифазних магнітних підсилювачів ПДД-1,1В призначений для управління потужними електроприводами, зокрема, будівельних

машин, екскаваторів та ін. Зовнішній вигляд блоку підсилювачів показаний на рис. 9.39.

Основні технічні характеристики:

Напруга живлення, В/Гц	380/50;
Початковий струм одного підсилювача, А	6;
Номінальний струм навантаження блоку, А	16;
Маса, кг	160.

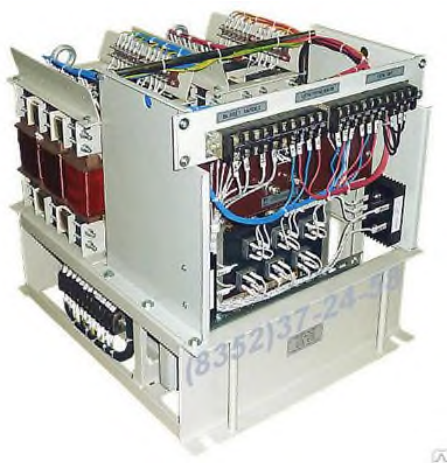


**Рис. 9.39. Блок трифазних магнітних підсилювачів
ПДД-1,1В**

Контрольні запитання

1. Що таке електронний підсилювач?
2. Які існують структурні схеми підсилюючих пристроїв?
3. Чому в електронному підсилювачі відбувається підсилення потужності?
4. За якими ознаками класифікують підсилюючі пристрої?
5. Які показники характеризують роботу підсилювача?
6. Які спотворення підсиленого сигналу Ви знаєте і в чому причина їх появи?
7. Що таке зворотний зв'язок у підсилювачі?
8. Які види зворотного зв'язку існують?

9. Вхідний опір якого підсилювача більший: охопленого послідовним колом зворотного зв'язку за вихідною напругою або струмом?

10. Які типи зворотного зв'язку впливають на вихідний опір підсилюючого пристрою?

11. Від яких параметрів залежить коефіцієнт підсилення каскаду на транзисторі за схемою із спільним емітером?

12. На які класи поділяють режими роботи підсилювачів? Чим вони характерні?

13. Чим відрізняється клас підсилення АВ від класу В?

14. Поясніть призначення елементів у схемі RC- підсилювача.

15. Чому в RC-підсилювачі зменшується підсилення на низьких частотах?

16. Чому в RC-підсилювачі зменшується підсилення на високих частотах?

17. Від яких елементів схеми залежить коефіцієнт підсилення K і смуга пропускання RC-підсилювача?

18. Які методи стабілізації режиму спокою вам відомі?

19. Чому дорівнює коефіцієнт підсилення каскаду на польовому транзисторі із спільним витоком?

20. Які спотворення з'являються в імпульсному сигналі на виході RC-підсилювача?

21. Що таке диференціальний підсилювач?

22. Чому коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача при заданій стабільності струму спокою завжди більший від коефіцієнта підсилення каскаду на одиночному транзисторі?

23. Які напруги звуться синфазними?

24. Що таке дрейф нуля підсилювача постійного струму?

25. З якою метою в емітерні кола каскадів підсилення постійного струму ввімкнені стабілітрони?

26. Як будуються М-ДМ підсилювачі постійного струму?

27. Які основні вимоги пред'являються до ОП?

28. Чим відрізняються передавальні характеристики ОП за інвертуючим та неінвертуючим входах?

29. Яка природа протікання вхідного струму ОП?

30. Для чого у вхідному каскаді ОП використовують диференціальний підсилювач?

31. Чому коефіцієнт підсилення інвертуючого підсилювача не може бути менший від одиниці?

32. Поясніть, чому між входами ОП і спільною шиною потрібно вмикати резистори з однаковим опором.

33. Поясніть, чому у диференціальному підсилювачі коефіцієнт передачі за напругою, яка подається на неінвертуючий вхід ОП, не може бути меншим одиниці.

34. Призначення і принцип дії магнітного підсилювача.

35. Статична характеристика магнітного підсилювача.

36. Поясніть, від чого залежить коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача.

37. Як визначити коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача.

38. Від яких параметрів залежать стала часу і коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача.

39. Поясніть призначення обмотки зміщення магнітного підсилювача.

40. Яким буває зворотний зв'язок у магнітному підсилювачі.

41. Поясніть будову і характеристики диференціального магнітного підсилювача.

РОЗДІЛ 10 ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

10.1. Основні поняття та закони булевої алгебри

Логіка є основою будь-якого керування. Логічні (або цифрові) інтегральні схеми, що реалізують логічні функції, складають основу обчислювальної техніки.

Логічною функцією називається функція виду $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, яка, як і її аргументи, може приймати тільки два значення – «істинності» або «хибності» (заперечення) («так» або «не так», «плюс» або «мінус», «ввімкнено» або «вимкнено», «логічна одиниця» або «логічний нуль» та ін.). У зв'язку з цим найзручнішим математичним апаратом для аналізу та синтезу цифрових схем є алгебра логіки (булева алгебра). Цей математичний апарат був розроблений математиком Джорджем Булем. У булевій алгебрі символи «0» та «1» характеризують стани змінних та їх функцій. Тому ці символи не можна розглядати як арифметичні числа. Алгебра логіки – це алгебра станів, а не алгебра чисел, і їй властиві на відміну від звичайної алгебри логічні дії над станами.

Якщо кожному значенню аргументу відповідає тільки одне значення логічної функції, така функція називається однозначною, якщо два або більше – багатозначною. Для будь-якої логічної функції від n змінних існує число $N=2^n$ різних комбінації цих змінних. Якщо на цих комбінаціях змінних функція визначена, то число логічних функцій від n змінних $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, визначається як $M=2^N=2^{2^n}$.

Однозначна функція (функція одного аргументу) $y=f(x)$ має $N=2$ можливих значень аргументів (0, 1) і два різних значення функції (0, 1), що в результаті дає 2^2 різних однозначних булевих функцій (див. табл. 10.1). Ця таблиця називається таблицею істинності.

Відзначимо особливості цих функцій. По-перше, відзначимо, що функції f_0 та f_3 не залежать від аргументу x . Тому функція f_0 називається константою 0, а f_3 – константою 1. Функція f_1 повністю співпадає з аргументом x , тому що вона приймає значення, яке дорівнює нулю при $x=0$, і дорівнює одиниці при $x=1$. Тому $f_1=x$. Функція f_2 приймає значення, яке дорівнює одиниці при $x=0$, і навпаки, при $x=1$ її значення дорівнює нулю. Ця функція називається інверсією і позначається за допомогою горизонтальної

риски « $\rightarrow$ » над аргументом: $f_2 = \bar{x}$ ($\bar{x}$ читається НЕ x).

Таблиця 10.1.

Таблиця істинності

Аргумент x	Функції			
	$f_0(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
0	0	0	1	1
1	0	1	0	1

З табл. 10.1 видно, що за допомогою функції f_2 між усіма функціями одного аргументу можна встановити наступні зв'язки

$$f_0 = \bar{f}_3 = 0 = \bar{1}; \quad f_1 = \bar{f}_2 = x = \bar{\bar{x}}.$$

Дві риси над аргументом x означають, що інверсія береться двічі. При $n=2$ можливе число комбінацій значень аргументів дорівнює $2^2=4$, а число функцій $2^4=16$. Таблиця істинності усіх існуючих функцій двох аргументів x_1 та x_2 наведені в табл. 10.2.

Таблиця 10.2.

Функції двох аргументів x_1 та x_2

Аргументи		Функції															
x_1	x_2	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Аналіз таблиці показує, що шість функцій нам вже відомі після розгляду функції одного аргументу:

$$f_0 = 0 \text{ (константа нуль),}$$

$$f_{15} = 1 \text{ (константа одиниця),}$$

$$f_3 = x_1 \text{ (аргумент } x_1),$$

$$f_5 = x_2 \text{ (аргумент } x_2),$$

$$f_{12} = \bar{x}_1 \text{ (інверсія } x_1),$$

$$f_{10} = \bar{x}_2 \text{ (інверсія } x_2).$$

Решта десять функцій, які залишились, мають наступні самостійні значення, табл. 10.3.

Таблиця 10.3.

**Позначення логічних операцій, таблиця істинності
та назва операції функцій двох аргументів**

f_n	x_1	0 0 1 1	Назва функції $f_n=(x_1, x_2)$	Позначення функції (логічної операції)
	x_2	0 1 0 1		
0	0 0 0 0		Тотожний нуль, константа 0	$f_0 \equiv 0$
1	0 0 0 1		Кон'юнкція, "І", або логічне множення	$f_1 = x_1 \bullet x_2 = x_1 x_2 = x_1 \& x_2$
2	0 0 1 0		Заперечення імплікації	$f_2 = x_1 \Delta x_2 = x_1 \Rightarrow \overline{x_2}$
3	0 0 1 1		X_1 , або константа x_1	$f_3 = x_1$
4	0 1 0 0		Заперечення зворотної імплікації	$f_4 = x_1 \not\Leftarrow x_2 = \overline{x_2 \Delta x_1} = \overline{x_1 \Leftarrow x_2}$
5	0 1 0 1		X_2 , або константа x_2	$f_5 = x_2$
6	0 1 1 0		Додавання за модулем 2	$f_6 = x_1 \oplus x_2$
7	0 1 1 1		Диз'юнкція, "АБО", або логічне додавання	$f_7 = x_1 + x_2 = x_1 \vee x_2$
8	1 0 0 0		Функція Пірса, або заперечення диз'юнкції	$f_8 = x_1 \downarrow x_2 = \overline{x_1 + x_2}$
9	1 0 0 1		Еквівалентність, або рівнозначність	$f_9 = x_1 \Leftrightarrow x_2 = x_1 \equiv x_2$
10	1 0 1 0		Заперечення X_2	$f_{10} = \overline{x_2}$
11	1 0 1 1		Зворотна імплікація	$f_{11} = x_1 \Leftarrow x_2 = x_1 \Leftarrow x_2$
12	1 1 0 0		Заперечення X_1	$f_{12} = \overline{x_1}$
13	1 1 0 1		Імплікація, або наслідок	$f_{13} = x_1 \rightarrow x_2 = x_1 \Rightarrow x_2$
14	1 1 1 0		Функція Шеффера, або заперечення кон'юнкції	$f_{14} = x_1 x_2$
15	1 1 1 1		Тотожна одиниця, або константа 1	$f_{15} \equiv 1$

Функція f_1 називається *кон'юнкцією* або логічним множенням. Вона дорівнює одиниці тільки у тому випадку, коли обидва аргументи приймають значення одиниця. Цю операцію називають операцією «І».

Функцію f_2 називають *запереченням імплікації* (*запереченням за x_2*). Ця функція дорівнює одиниці тільки в одному випадку – при рівності першого аргументу x_1 одиниці, а другого x_2 нулю. Якщо аргументи поміняти місцями, то можна знайти ще одну функцію заборони. Це функція f_4 – заборона по x_1 .

Функція f_6 називається *нерівнозначністю*. Її ще називають додаванням за модулем 2, або **ВИКЛЮЧНЕ АБО**, тому що значення цієї функції являють собою порозрядну суму аргументів x_1 та x_2 . Функція f_6 дорівнює одиниці тільки тоді, коли обидва аргументи відрізняються один від одного (мають різні, відмінні один від одного значення).

Функцію f_7 називають *диз'юнкцією* або логічним додаванням. Вона дорівнює одиниці, якщо хоча б один з аргументів дорівнює одиниці. Цю функцію часто називають також операцією **АБО**.

Функція f_8 називається *функцією Пірса* (або функцією Вебба). Вона дорівнює одиниці тільки в одному випадку – при рівності обох аргументів нулю. Слід відзначити, що значення функції f_8 є не що інше, як відповідні значення f_7 , взяті з інверсією, тобто $f_8 = \bar{f}_7$. Тому функцію Пірса часто називають операцією **АБО-НЕ**.

У порівнянні з f_6 функція f_9 називається *рівнозначністю* (еквівалентністю), тому що вона приймає значення, яке дорівнює одиниці тільки за умови рівності обох аргументів.

Дві функції f_{11} та f_{13} називаються *імплікацією*. Функція f_{13} дорівнює нулю тільки в одному випадку – коли перший аргумент x_1 дорівнює одиниці, а другий x_2 – нулю. Якщо за перший аргумент прийняти x_2 , то це буде відповідати функції f_{11} .

Функція f_{14} називається *функцією Шеффера*. Вона дорівнює нулю тільки в одному випадку – коли обидва аргументи рівні одиниці. Через те, що значення f_{14} являють собою інверсії значень f_1 , то за аналогією з f_8 функцію Шеффера часто називають операцією **І-НЕ**. У табл. 10.3 наведені позначення логічних операцій, таблиця істинності та назва функцій двох аргументів.

Функції одного та двох аргументів називають елементарними логічними функціями, тому що логічні вирази цих функцій вміщують

не більше однієї логічної операції.

Для складних функцій багатьох змінних також можна скласти таблицю істинності. В ній відображається значення функції для кожного набору (комбінації) значень аргументів. У табл. 10.4 представлена одна з форм таблиці істинності складної функції чотирьох аргументів. При n аргументах число наборів їх значень складає 2^n і зі зростанням n швидко збільшується число стовпців у таблиці. При великих n таблиця стає дуже громіздкою та незручною для використання.

Таблиця 10.4.

Таблиці істинності складної функції чотирьох аргументів

Номери комбінацій	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x_1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
x_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
x_3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
x_4	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
$f(x_1, x_2, x_3, x_4)$	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1

Більшу компактність має інша форма таблиці істинності (табл. 10.5), у якій усі аргументи функції поділяються на дві групи. Стовпцям і рядкам таблиці надають комбінації значень аргументів однієї та іншої групи. У клітинах, розташованих на перетині стовпців і рядків, записуються відповідні значення функції.

Таблиця 10.5

Таблиці істинності				
x_1x_2	00	01	11	10
x_3x_4				
00	1	0	0	1
01	0	1	0	0
11	0	1	0	1
10	1	0	1	1

Таблична форма запису хоча й наглядна, і може бути застосована для довільного числа змінних, однак при аналізі властивостей функцій вона не є компактною. Для випадку чотирьох і більше змінних табличне зображення логічної функції є громіздким і суттєво складнішим. Простішим буде *числовий запис*, де логічна функція задається у вигляді послідовності десяткових чисел, що є еквівалентами тих вхідних комбінацій, при яких дана функція набуває значення 1 або 0. Наприклад, таблицю істинності (табл. 10.4) легко переписати у числову форму: для вхідних комбінацій, при яких $f=1$ маємо $f = \overset{\vee}{1}(0, 3, 5, 6, 11, 12, 14, 15)$, а для комбінацій, при яких $f=0$, маємо $f = \overset{\vee}{0}(1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 13)$. Ці записи повністю представляють логічну функцію, подану табл. 10.4, і, як видно, є більш компактними.

Окрім табличного можливий і аналітичний спосіб запису логічної функції. У звичайній математиці аналітичний спосіб подання функції припускає запис функції у вигляді математичного виразу, в якому аргументи функції зв'язані визначеними математичними операціями. Подібно цьому, аналітичний спосіб подання логічної функції передбачає запис функції у формі логічного виразу, що показує, які логічні операції та в якій послідовності повинні виконуватися над аргументами функції.

Для складного логічного виразу встановлено визначений порядок виконання операцій: спочатку виконуються операції інверсії, потім операції кон'юнкції і в останню чергу операції диз'юнкції. Наприклад, запис логічного виразу $x_1 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \cdot x_2$ передбачає, що при обчисленні виразу спочатку виконуються операції інверсії $\bar{x}_3$ та $\bar{x}_4$, потім операції кон'юнкції $x_2 \cdot \bar{x}_3$ та $\bar{x}_4 \cdot x_2$ і в останню чергу операції диз'юнкції. Якщо треба порушити це правило, то використовуються дужки. Наприклад, $(x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_4)$. У цьому випадку спочатку виконуються операції в дужках (а якщо одні дужки вкладені в інші, то спочатку виконуються операції у внутрішніх дужках).

Останнім часом широке розповсюдження отримало так зване **кубічне** зображення логічної функції. Таке зображення використовує обмежене число символів і застосовується при автоматизації процесів логічного проектування цифрових схем.

Основою кубічної форми є зображення кожного набору (комбінації) вхідних змінних n -мірним вектором. Вершини цих векторів геометрично можуть бути зображені як вершини n -мірного куба. Якщо відзначити точками вершини векторів, для яких логічна функція дорівнює одиниці, то одержимо геометричне зображення функції у вигляді куба.

Приклад 10.1. Для логічної функції $f(x_1, x_2, x_3) = 1(1, 2, 3, 5, 7)$ дати геометричне зображення у вигляді куба.

Розв'язання. Графічне розв'язання задачі представлено рис. 10.1, а.

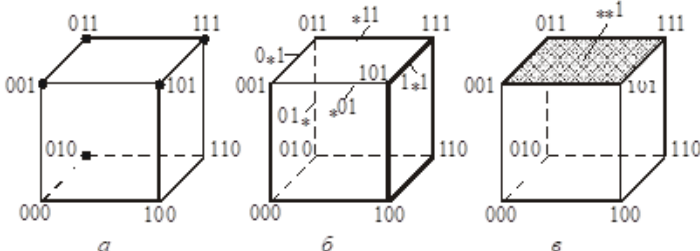


Рис. 10.1. Графічне розв'язання задачі 10.1

Набори змінних, розташованих на кінцях ребер куба, відрізняються тільки однією змінною. Такі набори називаються *сусідніми*. Кожну вершину куба, в якій функція приймає одиничне значення, називають *нульовим кубом* (0-кубом). Записується 0-куб послідовністю вхідних змінних, що його утворюють, тобто кодом, який відповідає конститuentам одиниці.

Конституента одиниці – спеціальна перемикальна функція, яка дорівнює одиниці тільки при одному наборі змінних. Для функції двох змінних число конститuent дорівнює 4, табл. 10.1.

Множина нульових кубів утворює нульовий кубічний комплекс K_0 логічної функції. Якщо два нульових куба комплексу K_0 відрізняються тільки однією координатою (змінною), тобто, якщо два набори змінних, для яких логічна функція дорівнює одиниці, є сусідніми, то вони утворюють *одиничний куб* (1-куб). Геометрично це відповідає ребру початкового n -мірного куба (рис. 10.1, б). 1-куб записується послідовністю спільних елементів 0-кубів, які його утворили, із зірочкою незбіжних елементів. Множина 1-кубів

утворює одиничний кубічний комплекс K_1 .

Аналогічно, якщо два одиничних куба комплексу K_1 відрізняються тільки однією координатою (змінною), то ці одиничні куби утворюють *двійковий куб* (2-куб). Геометрично це відповідає грані початкового n -мірного куба (рис. 10.1, в). 2-куб також записується послідовністю спільних елементів 1-кубів, які його утворили, з зірочкою незбіжних елементів, а множина двійкових кубів утворює двійковий кубічний комплекс K_2 , і т. д.

Приклад 10.2. Для логічної функції з прикладу 10.1 записати кубічні комплекси.

Р о з в' я з а н н я. Нулевий кубічний комплекс для заданої логічної функції вміщує п'ять елементів за числом конститuent одиниці логічної функції: $K_0=(001,010,011,101,111)$.

Порівнюючи записані 0-куби, можна побачити, що 1-й та 3-й куби відрізняються тільки другим членом. Тому вони утворюють 1-куб виду $0*1$. Аналогічно другий та третій 0-куби утворюють 1-куб $01*$ і т. д. Одиничний кубічний комплекс заданої логічної функції буде мати вигляд: $K_1=(0*1,01*,1*1,*11,*01)$.

Аналогічно можна одержати і двійковий кубічний комплекс, який складається з одного 2-куба: $K_2=(**1)$.

Розмірність куба (його *ранг*) визначається числом незбіжних координат, тобто числом зірочок у його запису.

Об'єднання кубічних комплексів, $K_0, K_1, \dots, K_m$ для логічної функції n -змінних утворюють її кубічний комплекс:

$$K(f) = \vee(K_0, K_1, \dots, K_m).$$

Приведемо основні аксіоми та закони булевої алгебри, які дозволяють робити різні тотожні перетворення формул булевої алгебри.

Аксіоми:

$$\begin{array}{lll} 1. x \vee 0 = x; & 5. x \cdot 0 = 0; & 9. \overline{0} = 1; \\ 2. x \vee 1 = 1; & 6. x \cdot 1 = x; & 10. \overline{1} = 0; \\ 3. x \vee x = x; & 7. x \cdot x = x; & 11. \overline{\overline{x}} = x. \\ 4. x \vee \overline{x} = 1; & 8. x \cdot \overline{x} = 0; & \end{array} \quad (10.1)$$

Закони:

1. Комутативності (переміщення) для диз'юнкції та кон'юнкції:

$$x_1 \vee x_2 = x_2 \vee x_1, \quad x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1; \quad (10.2)$$

2. Асоціативності (сполучення) для диз'юнкції та кон'юнкції:

$$\begin{aligned} x_1 \vee x_2 \vee x_3 &= (x_1 \vee x_2) \vee x_3 = x_1 \vee (x_2 \vee x_3), \\ x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 &= (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3 = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3); \end{aligned} \quad (10.3)$$

3. Дистрибутивності (розподілу):

$$\begin{aligned} x_1 \cdot (x_2 \vee x_3) &= x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3, \\ x_1 \vee x_2 \cdot x_3 &= (x_1 \vee x_2) \cdot (x_1 \vee x_3); \end{aligned} \quad (10.4)$$

4. Поглинання (x_1 поглинає x_2):

$$\begin{aligned} x_1 \vee x_1 \cdot x_2 &= x_1, \\ x_1 \cdot (x_1 \vee x_2) &= x_1; \end{aligned} \quad (10.5)$$

5. Склеювання (за x_1):

$$\begin{aligned} (x_1 \vee x_2) \cdot (x_1 \vee \bar{x}_2) &= x_1, \\ x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 &= x_1. \end{aligned} \quad (10.6)$$

У алгебрі логіки діє *принцип дуальності (двоїстості)*, згідно з яким дві функції рівносильні одна одній, якщо на усіх можливих наборах змінних вони набувають одного і того самого значення, тобто $f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Цей принцип є основою *правил де Моргана*, які стверджують, що інверсія кон'юнкції дорівнює диз'юнкції інверсій, а інверсія диз'юнкції – кон'юнкції інверсій:

$$\begin{aligned} \overline{x_1 \vee x_2} &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2, \\ \overline{x_1 \cdot x_2} &= \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2. \end{aligned} \quad (10.7)$$

Ці правила слушні для будь-якого числа аргументів:

$$\begin{aligned} \overline{x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n} &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \dots \cdot \bar{x}_n; \\ \overline{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} &= \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \dots \vee \bar{x}_n. \end{aligned}$$

Корисними для практики є також наслідки принципу дуальності, зокрема:

$$x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}}, \quad (10.8)$$

$$x_1 \cdot x_2 = \overline{\overline{x_1} \vee \overline{x_2}}. \quad (10.9)$$

Деякі корисні співвідношення:

$$(x_1 \vee \overline{x_2}) \cdot x_2 = x_1 \cdot x_2, \quad (10.10)$$

$$x_1 \cdot \overline{x_2} \vee x_2 = x_1 \vee x_2, \quad (10.11)$$

$$x_1 \cdot \overline{x_2} \vee \overline{x_1} \cdot x_2 = \overline{x_1 \cdot x_2} \cdot (x_1 \vee x_2), \quad (10.12)$$

$$x_1 \cdot \overline{x_2} \vee \overline{x_1} \cdot x_3 = \overline{x_1 \cdot x_2} \cdot (x_1 \vee x_3). \quad (10.13)$$

Маючи елементи, які виконують елементарні функції $f_0 \dots f_{15}$ (див. табл. 10.3), можна виконати будь-яку складну логічну функцію. Таку систему функцій називають *повною системою* або *базисом*.

Послідовно виключаючи з базису функції, можна отримати так званий *мінімальний базис*. Під мінімальним базисом розуміють такий набір функцій, виключення з якого будь-якої функції перетворює повну систему функцій в неповну.

Найпростішим (елементарним) базисом, який є основою булевої алгебри, є набір трьох основних логічних функцій (операцій): f_1 – кон'юнкція (логічний добуток) або функція **I**; f_7 – диз'юнкція (додавання) або функція **АБО**; f_{10} , f_{12} – інверсія (логічне заперечення) або функція **НЕ**. За цих логічних операцій можна виразити будь-яку іншу з елементарних функцій $f_0 \dots f_{15}$.

Більше того, будь-яка логічна функція, якою б складною вона не була, може бути виражена через логічні операції I, АБО, НЕ. Т. ч., можна побудувати будь-який логічний пристрій, маючи лише три типи логічних елементів, які виконують операції I, АБО, НЕ.

Базис I, АБО, НЕ не є мінімальним. З цієї сукупності функцій можна виключити функцію I або функцію АБО і набір функцій, що

залишився, буде задовольняти властивостям базису. Дійсно, якщо виключити функцію І, то операцію її можна виразити через операції АБО та НЕ, які залишилися: $x_1 \cdot x_2 = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2}} = \overline{\overline{x_1} \vee \overline{x_2}}$.

Хоча операцію І можна виразити через операції АБО та НЕ, але це ускладнює її виконання, оскільки треба виконати: три операції НЕ та одну операцію АБО. Тому на практиці використовується немінімальний базис, який включає три функції: І, АБО, НЕ.

Існують інші базиси, в яких за допомогою обраного набору логічних функцій, можна виразити функції І та НЕ (чи функції АБО та НЕ).

1. Базис утворює функція І-НЕ. Дійсно, операції І та НЕ можна виразити через операцію І-НЕ наступним чином:

$$\bar{x} = \overline{x \cdot x} = x | x,$$

$$x_1 \cdot x_2 = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2}} = \overline{x_1 | x_2} = (x_1 \cdot x_2) | (x_1 \cdot x_2).$$

Тобто, для побудови логічного пристрою будь-якої складності достатньо мати елементи, які реалізують функцію І-НЕ.

2. Базис утворює функція АБО-НЕ. Покажемо, що операції НЕ та АБО виражаються через операцію АБО-НЕ:

$$\bar{x} = \overline{x \vee x} = x \downarrow x,$$

$$x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{x_1 \downarrow x_2} = (x_1 \downarrow x_2) \downarrow (x_1 \downarrow x_2).$$

3. Отже, якщо використовувати однотипні елементи, які реалізують операцію АБО-НЕ, можна побудувати логічний пристрій будь-якої складності.

4. Базис утворюють функції заперечення $f_4(x_1, x_2) = x_1 \Delta x_2$ та константи одиниці $f_{15}(x_1, x_2) = 1$.

Дійсно:

$$\bar{x} = 1 \cdot \bar{x} = 1 \Delta x,$$

$$x_1 \cdot x_2 = x_1 \cdot \overline{\bar{x}_2} = x_1 \Delta \bar{x}_2 = x_1 \Delta \underbrace{(1 \Delta x_2)}_{\bar{x}_2}.$$

Базис І, АБО, НЕ звичайно використовується на початковій стадії проектування пристроїв для побудови функціональної схеми. При реалізації логічних пристроїв частіше використовуються базиси І-НЕ чи АБО-НЕ. Позначення логічних елементів, які реалізують логічні функції, наведені на рис. 10.2

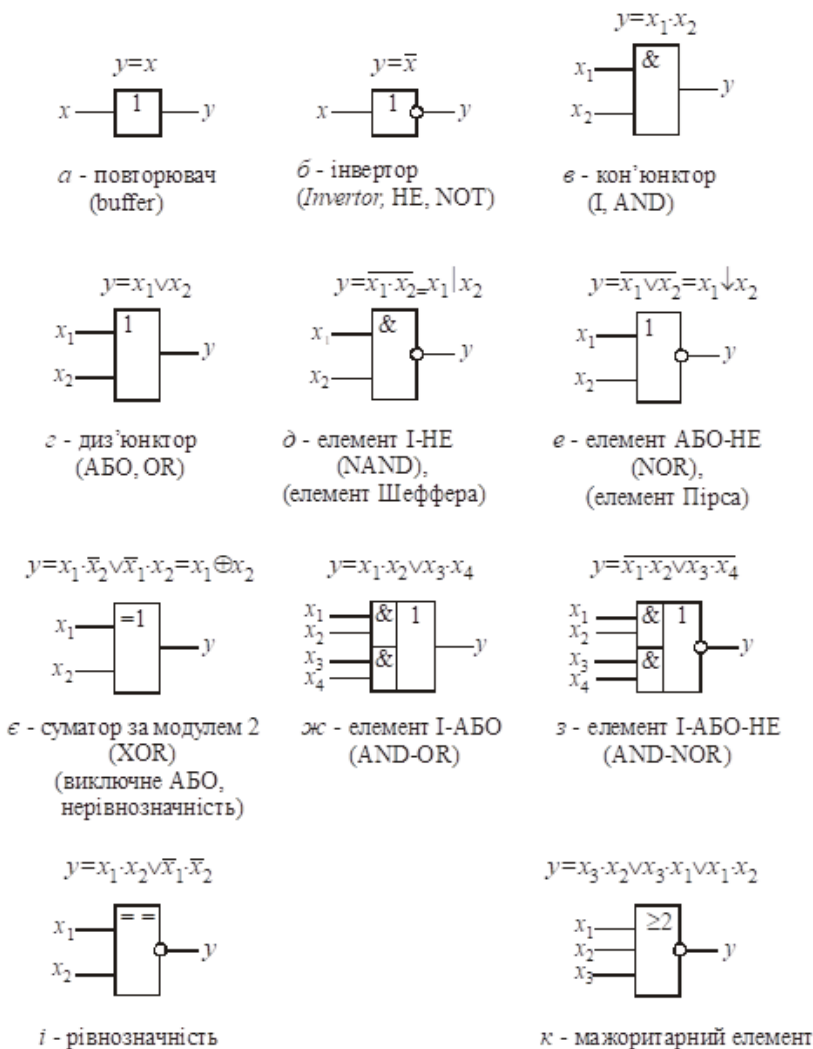


**Рис. 10.2. Позначення логічних елементів,
які реалізують логічні функції**

Приклад 10.3. Довести справедливість закону дистрибутивності для диз'юнкції, тобто рівність:

$$x_1 \vee x_2 \cdot x_3 = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_1 \vee x_3).$$

Розв'язання.

1. Застосовуючи аксіоми (10.1), отримуємо:

$$\begin{aligned} x_1 \vee x_2 \cdot x_3 &= (x_1 \cdot 1 \vee x_2 \cdot x_3) = x_1 \cdot (1 \vee x_2 \vee x_3) \vee x_2 x_3 = \\ &= x_1 \cdot x_1 \vee x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 = \\ &= x_1 \cdot (x_1 \vee x_2) \vee x_3 \cdot (x_1 \vee x_2) = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_1 \vee x_3). \end{aligned}$$

2. Застосовуючи закон поглинання (10.5), отримуємо:

$$\begin{aligned} x_1 \vee x_2 \cdot x_3 &= x_1 \cdot (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \vee x_2 \cdot x_3 = \\ &= \underline{x_1 \cdot x_1} \vee \underline{x_1 \cdot x_2} \vee \underline{x_1 \cdot x_3} \vee \underline{x_2 \cdot x_3} = \\ &= x_1 \cdot (x_1 \vee x_3) \vee x_2 \cdot (x_1 \vee x_3) = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_1 \vee x_3). \end{aligned}$$

Приклад 10.4. Довести справедливість закону поглинання для диз'юнкції та кон'юнкції:

$$x_1 \vee x_1 \cdot x_2 = x_1,$$

$$x_1 \cdot (x_1 \vee x_2) = x_1.$$

Розв'язання.

$$1. \quad x_1 \vee x_1 \cdot x_2 = x_1 \cdot (1 \vee x_2) = x_1.$$

$$2. \quad x_1 \cdot (x_1 \vee x_2) = x_1 \cdot \underbrace{x_1 \vee x_1 \cdot x_2}_{x_1} = x_1 \cdot \underbrace{(1 \vee x_2)}_1 = x_1.$$

Приклад 10.5. Довести справедливість операції заборони:

$$x_1 \Delta x_2 = x_1 \cdot \bar{x}_2 \quad (10.14)$$

Розв'язання. Для доказу цього виразу будемо підставляти в його ліву та праву частини усі можливі набори значень аргументів і кожного разу перевіряти правильність рівностей.

x_1	x_2	$x_1 \Delta x_2$
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

x_1	x_2	$\bar{x}_2$	$x_1 \cdot \bar{x}_2$
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0

Приклад 10.6. Довести справедливність суми за модулем 2 (нерівнозначність):

$$x_1 \oplus x_2 = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 = (x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2). \quad (10.15)$$

Р о з в' я з а н н я. Для доказу цього виразу будемо підставляти в таблицю усі можливі набори значень аргументів і кожного разу перевіряти правильність рівностей.

x_1	x_2	$x_1 \oplus x_2$	$x_1 \cdot \bar{x}_2$	$\bar{x}_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2$	$x_1 \vee x_2$	$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2$	$(x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)$
0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1	1	1	1
1	0	1	1	0	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	0	0

Приклад 10.7. Довести справедливність операції АБО-НЕ

$$x_1 \downarrow x_2 = \overline{x_1 \vee x_2}. \quad (10.16)$$

Р о з в' я з а н н я. Для доказу цього виразу будемо підставляти в його ліву та праву частини усі можливі набори значень аргументів і кожного разу перевіряти слушність рівностей.

x_1	x_2	$x_1 \downarrow x_2$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

x_1	x_2	$x_1 \vee x_2$	$\overline{(x_1 \vee x_2)}$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

Приклад 10.8. Довести справедливність операції І-НЕ:

$$x_1 \mid x_2 = \overline{x_1 \cdot x_2}. \quad (10.19)$$

Р о з в' я з а н н я. Для доказу цього виразу будемо підставляти в його ліву та праву частини усі можливі набори значень аргументів і кожного разу перевіряти слушність рівностей.

x_1	x_2	$x_1 \mid x_2$		x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	$\overline{(x_1 \cdot x_2)}$
0	0	1		0	0	0	1
0	1	1		0	1	0	1
1	0	1		1	0	0	1
1	1	0		1	1	1	0

10.2. Стандартні форми зображення логічних функцій

Логічна функція найбільш наочно зображується за допомогою таблиці істинності, в якій кожному з можливих наборів аргументів ставлять у відповідність значення 0 або 1. Від табличного зображення можна перейти до аналітичної форми запису логічної функції за допомогою операцій І, АБО, НЕ.

Логічну функцію для зручності запису та наступного синтезу зображують у вигляді двох канонічних (стандартних) форм: суми добутків аргументів або добутку їх сум. Запис логічної функції у вигляді суми добутків змінних (аргументів) або їх інверсій називають *диз'юнктивною нормальною формою* (ДНФ):

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3;$$

а запис функції у вигляді добутку сум (або їх інверсій) – *кон'юнктивною нормальною формою* (КНФ):

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \cdot (x_1 \vee x_2) \cdot (x_2 \vee x_3) \cdot (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee x_3).$$

Для кожної логічної функції може існувати декілька рівносильних диз'юнктивних та кон'юнктивних форм. Разом з тим є тільки один вид

ДНФ та КНФ, у якому функція може бути записана однозначним зображенням (*досконалі нормальні форми*). У досконалій диз'юнктивній нормальній формі (ДДНФ) кожен доданок зображує усі аргументи (з інверсіями або без них) і немає однакових доданків:

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3. \quad (10.20)$$

У досконалій кон'юнктивній нормальній формі (ДКНФ) кожен співмножник зображує усі аргументи (з інверсіями або без них) і немає однакових співмножників:

$$f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (x_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3) \cdot (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee x_3). \quad (10.21)$$

Якщо початкова функція задана у табличній формі, то можна перейти до аналітичного запису в ДДНФ або ДКНФ. Нехай задана функція у табличній формі, табл. 10.6.

Таблиця 10.6.

Функція в формі таблиці

Номери комбінацій	0	1	2	3	4	5	6	7
x_1	0	0	0	0	1	1	1	1
x_2	0	0	1	1	0	0	1	1
x_3	0	1	0	1	0	1	0	1
$f(x_1, x_2, x_3)$	0	0	0	1	0	1	1	1

Для комбінацій аргументів 3, 5, 6, 7 функція $f=1$, що означає для вказаних комбінацій рівність одиниці наступних добутків:

$$\bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = 1, \quad x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 = 1, \quad x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 = 1, \quad x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = 1.$$

Комбінації аргументів, при яких $f=1$, називають *конституентами одиниці*, або *мінтермами* (терм – вираз, член, див. приклад 10.1). Зображення логічної функції у вигляді суми мінтермів визначає її ДДНФ, тобто в даному випадку:

$$f(x_1, x_2, x_3) = \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (10.22)$$

Функція, визначена таблицею істинності, може бути зображена не тільки її одиничними, але й нульовими значеннями. Так, на основі табл. 10.6:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, x_3) = \\ = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (x_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3) \cdot (x_1 \vee \bar{x}_2 \vee x_3) \cdot (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee x_3). \end{aligned} \quad (10.23)$$

Кожний співмножник у цьому виразі складається з суми змінних, для яких функція обертається в нуль у відповідності з таблицею істинності. Такі суми називають *конституентами нуля* або *макстермами*. Таким чином, добуток макстермів визначає ДКНФ функції.

Отже, якщо логічну функцію задано таблично, то для переходу до її аналітичного зображення в ДНФ роблять так:

- для зображення в ДДНФ виписують набори аргументів, для яких функція дорівнює одиниці, тобто для конституент одиниці; для кожного такого набору складають мінтерм, причому аргументи $x_i = 0$ замінюють на $\bar{x}_i$, і одержані мінтерми з'єднують диз'юнкцією;
- для зображення в ДКНФ виписують набори аргументів, для яких функція дорівнює нулю, тобто для конституент нуля; для кожного набору складають макстерм, причому аргументи $x_i = 1$ замінюють на $\bar{x}_i$ і одержані макстерми об'єднують кон'юнкцією.

Приклад 10.9. Утворити ДДНФ логічної функції, яка задана в ДНФ:

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3.$$

Р о з в' я з а н н я. Для переходу від ДНФ до ДДНФ треба до кожного з членів, у яких зображені не всі аргументи, ввести вираз виду: $x_i \vee \bar{x}_i$, де x_i – відсутній у члені аргумент. Так як $x_i \vee \bar{x}_i = 1$, то така операція не може змінити значень функції. Тому

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, x_3) &= x_1 \cdot (x_2 \vee \bar{x}_2) \cdot (x_3 \vee \bar{x}_3) \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \cdot (x_1 \vee \bar{x}_1) = \\ &= x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \\ &\vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3. \end{aligned}$$

Використовуючи (11.1), отримуємо:

$$x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 = x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3.$$

Після приведення подібних членів:

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \\ \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3.$$

10.3. Мінімізація логічних функцій

Логічні функції, записані у вигляді ДДНФ або ДКНФ, служать основою для побудови структурних схем цифрового пристрою. Проте для технічної реалізації такої логічної функції властивість однозначності зображення буде зручною тільки в тому випадку, коли повним набором логічних елементів є елементарний базис, що складається з окремих елементів І, АБО, НЕ. На рис. 10.3. наведені структурні схеми, побудовані безпосередньо за канонічними формами (ДДНФ або ДКНФ) функцій (10.22) та (10.23).

При побудові цифрових пристроїв на різних базисах з'ясовується, що досконалі форми зображення логічних функцій не завжди найекономічніші, оскільки їм властива надлишковість інформації, яка підлягає спрощенню, тобто мінімізації.

Мінімізація – це процес зведення логічної функції до такого виду, який припускає більш просту і дешеву її фізичну реалізацію, тобто з меншим числом логічних елементів за рахунок зменшення числа логічних символів, кількості змінних та зв'язків між елементами.

Відомо декілька методів мінімізації, серед яких найбільш поширеними на практиці є: метод безпосередніх перетворень (алгебраїчний метод) і метод карт Карно.

Знайти гарантовано мінімальний вираз для довільної логічної функції можна лише методом повного перебору в процесі мінімізації усіх можливих варіантів, що реально здійснити для невеликої кількості змінних. Зі збільшенням числа змінних складність методів мінімізації зростає за геометричною прогресією і їх реалізація стає можливою лише за допомогою ЕОМ.

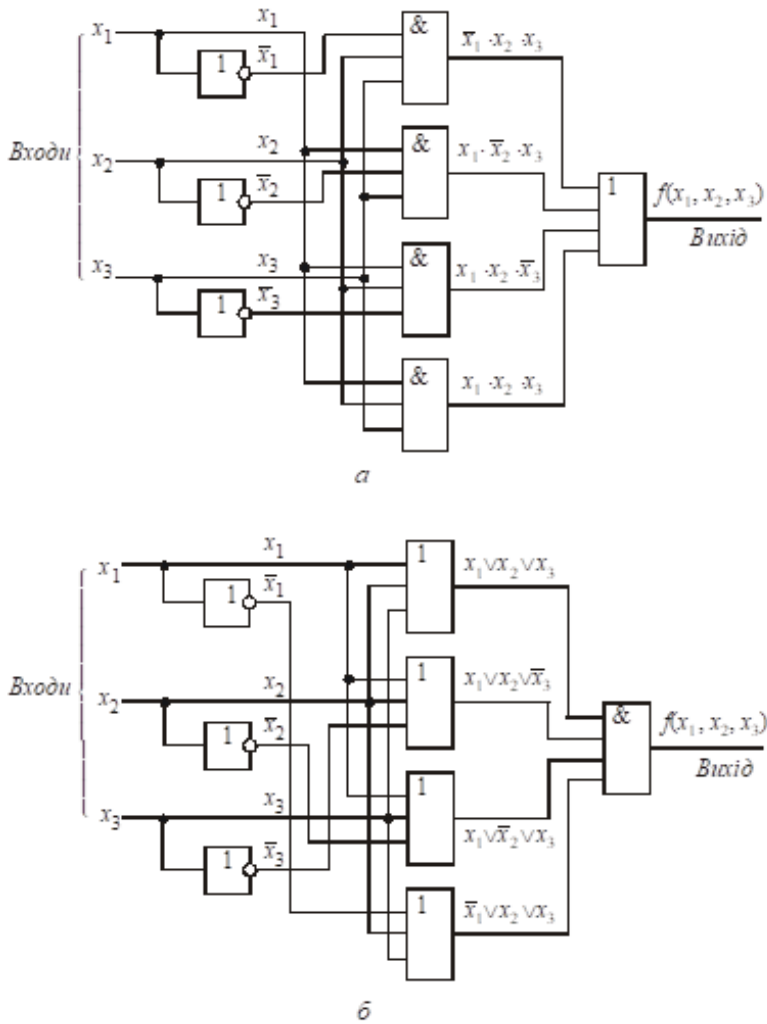


Рис. 10.3. Структурні схеми функцій, побудовані за канонічними формами (ДНФ або ДКНФ)

10.4. Метод карт Вейча і карт Карно

Метод карт Вейча і карт Карно відноситься до класу координатних способів зображення логічних функцій, як правило, не більше 5, 6 аргументів. Карта Вейча являє собою визначену форму таблиці істинності.

Табл. 10.7 є картами Вейча для функцій відповідно двох (а), трьох (б), чотирьох (в) аргументів. Число клітинок карти дорівнює числу усіх можливих наборів значень аргументів $m=2^n$ (n – число аргументів функцій), причому кожній клітинці відповідає один з m мінтермів.

Таблиця 10.7.

**Карти Вейча для функцій
відповідно двох (а), трьох (б), чотирьох (в) аргументів**

$x_2 \backslash x_1$		1	0
		x_2	$\bar{x}_2$
1	x_1	$x_1 x_2$	$x_1 \bar{x}_2$
0	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_1 x_2$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2$

а

$x_2 x_3 \backslash x_1$		10	11	01	00
		x_2		$\bar{x}_2$	
1	x_1	$x_1 x_2 x_3$	$x_1 \bar{x}_2 x_3$	$x_1 x_2 \bar{x}_3$	$x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3$
0	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_1 x_2 x_3$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3$	$\bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3$

б

$x_3 x_2 \backslash x_1 x_4$		10	11	01	00
		x_2		$\bar{x}_2$	
10	x_1	$x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$	$x_1 x_2 x_3 \bar{x}_4$	$x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$	$x_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4$
11	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$	$\bar{x}_1 x_2 x_3 \bar{x}_4$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4$
01	x_1	$x_1 x_2 \bar{x}_3 x_4$	$x_1 x_2 x_3 x_4$	$x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4$	$x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4$
00	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 x_4$	$\bar{x}_1 x_2 x_3 x_4$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4$

в

Для логічної функції, заданої в ДДНФ, достатньо вписати одиниці в клітинки, що відповідають наборам, на яких функція дорівнює одиниці. Карта Вейча будується так, що при будь-якому переході від однієї клітинки до сусідньої вздовж стовпця або рядка змінювалось значення лише однієї змінної (аргументу) функції (див. табл. 10.8). Тому диз'юнкція цих двох мінтермів дає один кон'юнктивний член, з якого вилучена спільна змінна. Отже, якщо в парі сусідніх клітинок

міститься 1, то над відповідними їм членами канонічної форми може бути проведена операція склеювання. Так полегшується пошук членів, які підлягають склеюванню. Сусідніми вважаються також ті клітинки, які розташовані по краях карти (у верхньому і нижньому рядках та лівому і правому стовпцях). Слід відзначити, що значення функції, що дорівнює нулю в карті, як правило, не відображається.

Правила одержання МДНФ функцій за допомогою карт Вейча формулюються наступним чином. Усі клітинки, які вміщують 1, об'єднуються в замкнені області, що відповідає процедурі покриття. При цьому кожна область повинна зображувати собою прямокутник з числом клітинок 2^k , де $k=0,1,2,\dots,K$. Це означає, що допустиме число клітинок в області 1,2,4,8, ... Області можуть перетинатися і одні й ті ж клітинки можуть входити в різні області. Кожна з областей у МДНФ зображується членом, число літер в якому на k менше від загального числа аргументів функції n (тобто дорівнює $n-k$). Кожний член МДНФ складається тільки з тих аргументів, які для клітинок відповідної області мають однакове значення (без інверсії або з інверсією).

Т. ч., при охопленні клітинок замкненими областями треба прагнути, щоб число областей було мінімальним (при цьому мінімальним буде число членів у МДНФ функції), а кожна область вміщувала можливо більше число клітинок (при цьому мінімальним буде число літер у членах МДНФ функції).

Зауважимо, що будувати карту Вейча для логічної функції двох змінних недоцільно. В цьому випадку простіше функцію мінімізувати аналітичним методом.

Для одержання МКНФ функції замкненими областями охоплюються клітинки з нульовими значеннями функції, а при запису членів логічного виразу беруть інверсії змінних, на перетині яких знаходяться області.

При мінімізації за нульовими значеннями функції спочатку можна визначити рівносильні, але не завжди однакові вирази. Різною буде і їх технічна реалізація. Використовуючи теореми булевої алгебри, їх можна перетворити до одного виду. Проте таке перетворення не завжди очевидне та потребує достатніх навичок. Тому, для знаходження найбільш простого технічного рішення бажано проводити мінімізацію як для нульових, так і для одиничних значень логічної функції і з одержаних виразів обрати простіший.

Зображення функції та мінімізація її за допомогою карт Вейча ускладнюється, якщо число змінних більше чотирьох. При п'яти змінних використовуються дві карти, одна з яких відповідає п'ятій змінній $x_5=1$, а друга – інверсії цієї ж змінної $x_5=0$, причому вони розташовуються однаково і порівнюються накладанням (ці карти можна уявно розташувати одна над одною). При цьому області охоплення клітинок можуть бути тривимірними, тобто однією областю можуть охоплюватись клітинки двох карт.

Для функції шести змінних треба чотири карти Вейча. З кожною новою змінною кількість карт збільшується удвоє і, наприклад, для восьми змінних вона уже дорівнює 16. Тобто для мінімізації функції з числом змінних більше п'яти карти Вейча виявляються незручними.

Приклад 10.10. За допомогою карти Вейча знайти МДНФ логічної функції, яка задана у табл. 10.8.

Таблиця 10.8.

Функція, яка задана таблицею

	x_2		$\bar{x}_2$	
I	III			
x_1	1	1	0	0
$\bar{x}_1$	0	1	1	0
	$\bar{x}_3$		x_3	
	II			

Р о з в' я з а н н я. З табл. 10.8 видно, що існує декілька можливих варіантів об'єднання сусідніх клітинок, які вміщують 1 і охоплюються трьома областями. У кожній з областей 2^1 клітинок, для них $n-k=3-1=2$, і ці області в МДНФ будуть представлені членами, які вміщують по дві літери. Оберемо той варіант, при якому зображення функції буде, по-перше, найбільш коротким, а, по-друге, кожний добуток, який входить у диз'юнкцію, складається з найменшої кількості членів. Для цього оберемо I та II області, які охоплюють усі клітинки, що вміщують 1. Першій області відповідає член x_1x_2 (аргумент x_3 тут неприсутній, тому що для однієї клітинки цієї області він має значення без інверсії, а для іншої – з інверсією), тобто: $x_1x_2\bar{x}_3 \vee x_1x_2x_3 = x_1x_2(x_3 \vee \bar{x}_3) = x_1x_2$. Другій області відповідає член: $\bar{x}_1x_3$ ($\bar{x}_1x_2x_3 \vee \bar{x}_1\bar{x}_2x_3 = \bar{x}_1x_3(x_2 \vee \bar{x}_2)$).

Отже, МДНФ функції: $f(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 \vee \bar{x}_1 x_3$.

Приклад 10.11. Знайти мінімальні форми для функції $f = \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3$, карта Вейча для якої зображена у табл. 10.9.

Таблиця 10.9.

Карта Вейча

	x_2		x_2	
x_1	1	0	1	1
$\bar{x}_1$	1	1	1	0
	x_3		x_3	

Р о з в' я з а н н я. Можливі два способи покриття одиниць, які дають дві мінімальні форми функції f (один з них зображений у таблиці пунктиром):

$$f = x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2$$

$$f = x_1 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee \bar{x}_2 x_3$$

Карти Карно відрізняються від карт Вейча порядком розташування змінних, які перераховуються в циклічному коді (коді Грея) двійкових чисел. У табл. 10.10 зображені карти Карно для функцій трьох, чотирьох і п'яти змінних.

Для одержання МДНФ функції усі клітинки, які вміщують 1, об'єднуються в замкнені прямокутні області, як і для карт Вейча, з числом клітинок 2^k , де $k=0,1,2,3,\dots$. Для кожної області складається набір з двох комбінацій: приписаних стовпцям і приписаних рядкам, на перетині яких розташована область. При цьому якщо області відповідають декілька комбінацій коду Грея, які приписані стовпцям або рядкам, то при складанні набору області записується спільна частина цих комбінацій, а на місці розрядів комбінацій, які відрізняються, ставляться зірочки.

Таблиця 10.10

Карти Карно для функцій трьох, чотирьох і п'яти змінних

x_1x_2		00	01	11	10
x_3	0	000	010	110	100
	1	001	011	111	101

x_1x_2		00	01	11	10
x_3x_4	00	0000	0100	1100	1000
	01	0001	0101	1101	1001
	11	0011	0111	1111	1011
	10	0010	0110	1110	1010

$x_1x_2x_3$			000	001	011	010	110	111	101	100
x_4x_5	00		00000	00100	01100	01000	11000	11100	10100	10000
	01		00001	00101	01101	01001	11001	11101	10101	10001
	11		00011	00111	01111	01011	11011	11111	10111	10011
	10		00010	00110	01110	01010	11010	11110	10110	10010

Приклад 10.12. За допомогою карти Карно знайти МДНФ функції чотирьох змінних, яка задана у табл. 10.11, а.

Р о з в' я з а н н я. Для функції, зображеної табл. 10.11, а, області І буде відповідати набір 0*0* або член МДНФ $\bar{x}_1\bar{x}_3$, області II – набір 1*10 або член МДНФ $x_1x_3\bar{x}_4$. Таким чином, для цієї функції МДНФ:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \bar{x}_1\bar{x}_3 \vee x_1x_3\bar{x}_4.$$

Приклад 10.13. За допомогою карти Карно знайти МКНФ функції чотирьох змінних, яка задана у табл. 10.11, б.

Р о з в' я з а н н я. Для одержання МКНФ областями охоплюються клітинки, які вміщують 0, і члени МКНФ записуються через інверсії цифр, що одержуться для наборів окремих областей. Області І відповідає набір 0*0* і член МКНФ $x_1 \vee x_3$, області II – набір *110 і член $\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4$. Т. ч., МКНФ функції:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_1 \vee x_3) \cdot (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4).$$

Таблиця 10.11.

Функція чотирьох змінних, яка задана таблицею

		x_1x_2			
		00	01	11	10
x_3x_4	00	1	1	0	0
	01	1	1	0	0
	11	0	0	0	0
	10	0	0	1	1

а

		x_1x_2			
		00	01	11	10
x_3x_4	00	0	0	1	1
	01	0	0	1	1
	11	1	1	1	1
	10	1	0	0	1

б

10.5. Синтез логічних пристроїв у базисах АБО-НЕ та І-НЕ

При побудові логічного пристрою звичайно не використовується функціонально повна система логічних елементів, яка реалізує усі три основні логічні операції І, АБО, НЕ. На практиці з метою скорочення номенклатури елементів використовують функціонально повну систему елементів, яка має тільки два елементи, що використовують операції І-НЕ та АБО-НЕ, або тільки один з цих елементів.

Реалізація логічної функції на елементах І-НЕ (АБО-НЕ) може бути виконана при наступній послідовності дій: задана логічна функція мінімізується з одержанням МДНФ (МКНФ), а потім мінімізовану логічну функцію двічі інвертують і перетворюють за правилами де Моргана, після чого записують вираз із використанням операції І-НЕ – функції Шеффера (чи АБО-НЕ – стрілки Пірса).

Таблиця 10.12.

Логічна функція чотирьох змінних, яка задана картою Вейча

		x_2			
		1	0	0	1
x_1	1	1	1	0	1
	0	0	1	1	0
	0	0	0	1	0
	1	1	0	1	0

а

		x_2			
		1	0	0	1
x_1	1	1	1	0	1
	0	0	1	1	0
	0	0	0	1	0
	1	1	0	1	0

б

Приклад 10.14. Побудувати логічний пристрій на елементах АБО-НЕ або І-НЕ для логічної функції чотирьох змінних, яка задана картою Вейча (табл. 10.14).

Р о з в' я з а н н я. Мінімальна КНФ функції (табл. 10.14, а):

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_1 \vee x_3) \cdot (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4) \cdot (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3). \quad (10.31)$$

Мінімальна ДНФ функції (табл. 10.14, б):

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 \bar{x}_3 \vee x_2 x_3 x_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3. \quad (10.32)$$

Для переходу від базису І, АБО, НЕ, в яких зображена функція, до базису АБО-НЕ (І-НЕ) виконуємо наступні дії: двічі інвертуємо праву частину виразів (10.31) і (10.32), перетворюємо за правилом де Моргана та записуємо вираз із використанням символу «стрілка Пірса» (чи «штритх Шеффера»):

$$\begin{aligned} f_{\text{МКНФ}} &= \overline{(x_1 \vee x_3) \vee (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4) \vee (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3)} = \\ &= \overline{(x_1 \vee x_3)} \vee \overline{(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4)} \vee \overline{(\bar{x}_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3)} = \\ &= (x_1 \downarrow x_3) \downarrow (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4) \downarrow (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3). \end{aligned} \quad (10.33)$$

$$\begin{aligned} f_{\text{МДНФ}} &= \overline{x_1 \bar{x}_3 \vee x_2 x_3 x_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3} = \overline{(x_1 \bar{x}_3)} \cdot \overline{(x_2 x_3 x_4)} \cdot \overline{(\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3)} = \\ &= (x_1 \mid \bar{x}_3) \mid (x_2 \mid x_3 \mid x_4) \mid (\bar{x}_1 \mid \bar{x}_2 \mid x_3). \end{aligned} \quad (10.34)$$

На рис. 10.4 приведені структурні схеми логічного пристрою, побудовані за виразами (10.33) та (10.34).

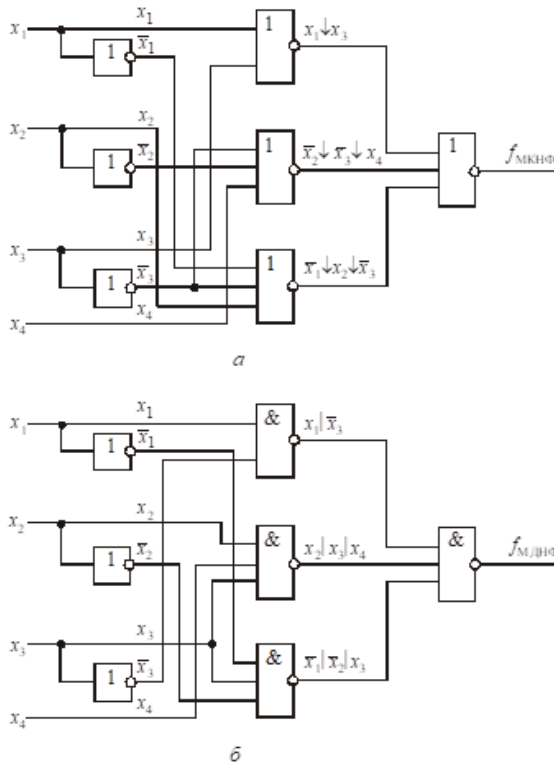


Рис. 10.4. Структурні схеми логічного пристрою

Для переходу від МДНФ (МКНФ) до мінімальної форми в базисі АБО-НЕ (чи І-НЕ) треба МДНФ (МКНФ) функції проінвертувати 4 рази.

Контрольні запитання

1. Які існують форми зображення логічних (булевих) функцій?
2. Які функції зветься однозначними та багатозначними?
3. Що зветься булевими константами та змінними в алгебрі логіки?
4. Назвіть основні аксіоми і закони булевої алгебри?
5. Назвіть основні операції булевої алгебри. Як вони описуються за допомогою таблиць істинності; за допомогою алгебраїчних виразів?
6. Що таке функціонально повний набір логічних функцій?

7. Які функції алгебри логіки звуться повністю та частково визначеними?

8. Наведіть приклад опису логічної функції у вигляді таблиці істинності; у вигляді алгебраїчного виразу; у вигляді послідовності чисел; у вигляді куба; у диз'юнктивній та кон'юнктивній нормальних формах.

9. Складіть таблицю істинності для логічних функцій:

$$f_1 = x_1 \vee x_2; \quad f_2 = x_1 x_2; \quad f_3 = x_1 \vee x_2; \quad f_4 = x_1 x_2; \quad f_5 = x_1 x_2 \vee x_3; \\ f_6 = x_1 \bar{x}_2 \vee x_3 \bar{x}_1; \quad f_7 = x_1 \oplus x_2.$$

10. Що таке нульовий куб; одиничний куб; двійковий куб?

11. Що таке елементарний базис?

12. Які базиси Ви знаєте?

13. Наведіть умовне графічне позначення логічних елементів І, АБО, НЕ.

14. Наведіть приклади функціонально повних систем логічних елементів.

15. Побудуйте логічні схеми на елементах І, АБО, НЕ, які реалізують логічні функції:

$$f_1 = x_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2; \quad f_2 = x_1 \vee x_2 \vee x_1 \vee \bar{x}_3; \quad f_3 = x_1 (x_2 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_3) \vee x_1 x_2; \\ f_4 = x_1 x_2 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2.$$

16. Основні властивості мінтермів і макстермів.

17. Як зобразити логічну функцію в досконалій нормальній диз'юнктивній та кон'юнктивній формах?

18. З якою метою і за яким принципом виконується мінімізація логічних функцій?

19. У чому особливість різних методів мінімізації логічних функцій?

20. Як виконується мінімізація логічних функцій за допомогою карт Вейча?

21. Наведіть карти Вейча функції двох, трьох і чотирьох змінних.

22. Чим відрізняються карти Карно від карт Вейча?

23. Суть структурного синтезу логічних функцій.

РОЗДІЛ 11 МІКРОКОНТРОЛЕРНІ ЗАСОБИ

11.1. Основні поняття мікропроцесорної техніки

У сучасних системах автоматизації практично завжди застосовуються пристрої управління на основі мікроконтролерів. Вони забезпечують такі широкі можливості та ефективність управління процесами та виробництвами, що інші засоби не витримують конкуренції з ними.

Мікропроцесор – це мікросхема, яка під дією програми виконує процес обробки цифрової інформації.

Мікропроцесори – це синхронізовані пристрої, які будь-які зміни здійснюють за сигналами тактової частоти. Так узгоджується взаємодія всіх елементів мікросхеми. У мікропроцесорну систему мають входити електронна пам'ять, зовнішні порти, через які приєднуються зовнішні пристрої системи.

Використання цифрових сигналів зменшує вплив перешкод. Можливість заміни програми робить мікропроцесор універсальним засобом управління.

Мікропроцесор є головним елементом сучасних персональних комп'ютерів. Він з високою швидкістю виконує обробку багаторозрядних даних, вміщує електронні засоби, що прискорюють роботу комп'ютера.

Розвиток техніки та технологій дозволив об'єднати в одному кристалі напівпровідника функції мікропроцесора, постійної й оперативної пам'яті, зовнішніх портів. Їх доцільно використовувати для здійснення задач управління і контролю. Такі мікросхеми називають **мікроконтролерами**.

З англійської слово "control" перекладається "керування, контроль". Тобто мікроконтролер – це мікропроцесор спеціально призначений для автоматизації процесів управління та контролю.

Перший мікроконтролер i8048 був створений фірмою Intel у 1976 році. Особливістю сучасних мікроконтролерів є наявність вбудованих у цю мікросхему модулів, використання яких значно спрощує програмування та підвищує продуктивність роботи мікроконтролерної системи. Такими модулями, наприклад, є таймери, енергонезалежна пам'ять даних, аналого-цифрові та цифро-

аналогові перетворювачі, модулі зв'язку за різними інтерфейсами та ін.

Розрізняють мікропроцесори з CISC (Complex Instruction Set Computing – комплексна система команд) та RISC (Reduced Instruction Set Computing – скорочена система команд) архітектурою. CISC (Прінстонська) архітектура передбачає значну кількість команд (як правило, більше 100) та їх різний розмір. Команди зчитуються по шині даних. Тому їх виконання можливе тільки після того, як прочитано всю команду. Це сповільнює роботу мікропроцесора.

Мікропроцесори з RISC (Гарвардською) архітектурою мають окрему шину команд та шину адреси команд і, як правило, невеликий набір команд однакового розміру.

Програмування мікроконтролерів здійснюється переважно на мовах Асемблер або С.

Розповсюдженими мікроконтролерами є, зокрема, PIC та AVR-мікроконтролери.

11.2. Мікроконтролери сімейства PIC-16

Приклад будови мікроконтролера PIC16F887 подано на рис. 11.1.

PIC-контролери побудовані за RISC архітектурою з окремими шинами:

- даних;
- адреси оперативної пам'яті;
- команд;
- адреси команд.

Програма розташовується в постійній флеш-пам'яті. Всі команди 14-бітові. Тому і шина команд 14-бітова. Адресу команди, що буде виконуватись наступною, визначає 13-розрядний програмний лічильник PC (лічильник команд). Отже, можна максимально адресувати $2^{13} = 8192$ команди.

Код чергової команди зчитується у регістр команд. З нього дешифратор команд визначає, яка саме дія має бути виконана та з якими даними. Пристрій управління виконує дану команду. При цьому програмний лічильник збільшує свій вміст на одиницю, вказуючи на наступну команду. Вона зчитується й буде виконана наступною. Гарвардська архітектура PIC-мікроконтролера передбачає конвеєрну роботу: одночасно виконується попередня

команда й зчитується код наступної команди. Таким чином, удвічі прискорюється робота мікроконтролера.

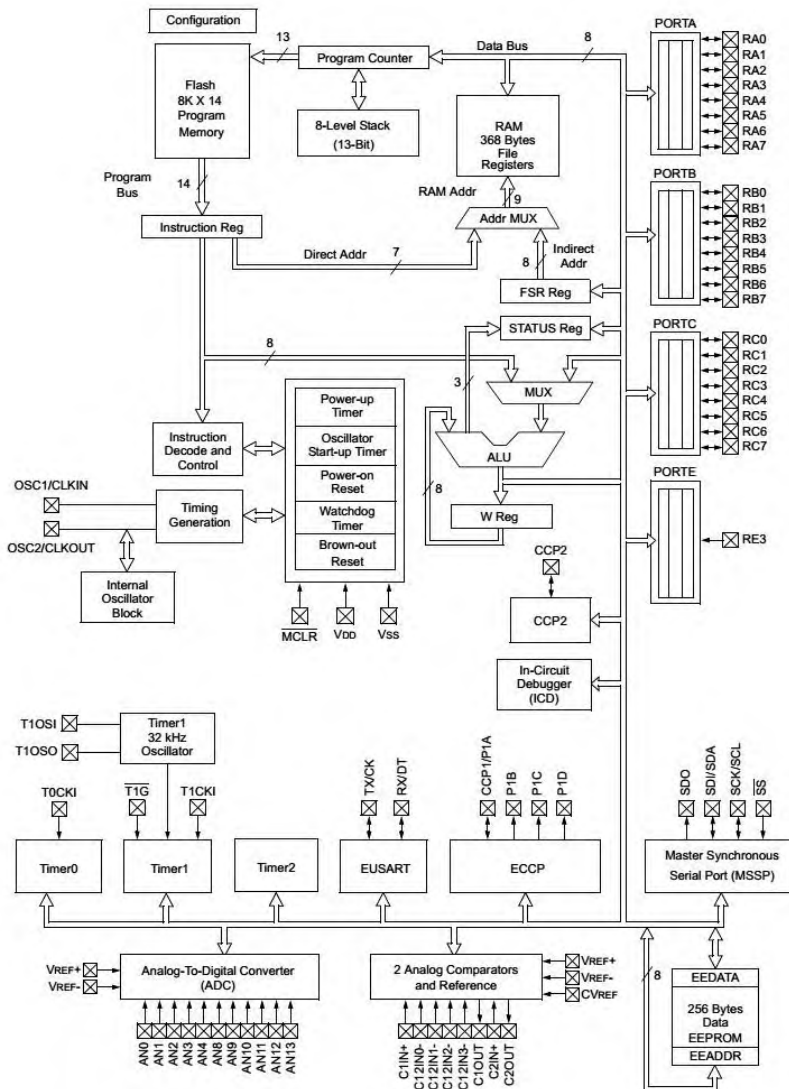


Рис. 11.1. Структура мікроконтролера PIC16F887

Виключенням з цього правила є деякі команди, які порушують їх послідовний порядок виконання (наприклад, перехід на мітку, виклик та повернення з підпрограми). У цьому випадку команда виконується вдвічі довше за інші.

Шина даних зв'язує між собою оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП), арифметично-логічний пристрій (АЛП), зовнішні порти, через які мікроконтролер взаємодіє із зовнішніми пристроями, робочий регістр W (від слова Work – робота). Більшість команд виконується з робочим регістром. Дані у АЛП потрапляють з самих команд, якщо ці дані є константами, з комірок ОЗП, зовнішніх портів. Потоки даних спрямовують мультиплексори MUX, що виконують функцію безконтактних перемикачів. Результати виконання команд потрапляють у робочий регістр W, комірку ОЗП або зовнішній порт. Зовнішні порти розташовано у полі адрес комірок ОЗП. Тому для оперування ними не потрібні особливі команди. Всі команди, що виконують дії з ОЗП, можуть використовуватись і з портами. На схемі їх зовнішні виводи показано перехрещеними квадратами. Через дріб позначено різні функції, що може виконувати кожний зовнішній вивід. Стек глибиною 8 призначений для використання командами виклику підпрограми та повернення з підпрограми.

Як вказувалось, суттєвою відмінністю сучасних мікроконтролерів є вбудовані модулі. Зокрема мікроконтролер PIC16F887 має три модулі таймерів, 14-канальний 10-розрядний АЦП, 256 байтів енергонезалежної пам'яті даних та інші модулі. Мікроконтролери сімейства PIC16 інших типів мають таке саме ядро, але інші набори модулів. Розробник конкретного проекту обирає мікроконтролер з потрібним йому набором вбудованих модулів, зовнішніх портів.

11.3. Команди асемблера мікроконтролерів сімейства PIC16

Програми для PIC-контролерів можуть складатись на мовах високого рівня (наприклад, Си) або низького рівня – асемблері.

Команди мови асемблера мікроконтролерів PIC16FXXX складаються з одного, двох або трьох слів. Перед командою можна поставити мітку, що починається з латинської букви або знаку підкреслення. Наступними символами мітки можуть бути латинські букви, знаки підкреслення, цифри. Рекомендується завершувати мітку двокрапкою. Перше слово команди є зарезервованим іменем

команди, друге визначає операнд, третє – місце розташування результату або номер біта. Між першим та другим словом команди ставиться пробіл (або декілька), між другим і третім – кома. Після команди можна розташувати коментар, який починається з крапки з комою (;). У коментарі можна використовувати будь-які символи, в тому числі кирилицю. Коментар завершується кінцем рядка.

Спосіб зазначення даних називається **адресацією**.

Безпосередня адресація передбачає запис у самій команді даних (або їх еквівалентного імені), з якими вона виконується. Ці незмінні дані є частиною команди, розташовані в постійній пам'яті й мають бути відомими вже при складанні програми. Всі ці команди складаються з двох слів. Перше закінчується символами LW (Literal and Work), це підказує, що команди виконуються з числом (константою) і робочим регістром W.

Пряма адресація застосовується в командах, де вказується адреса (зручніше ім'я) регістра ОЗП, з вмістом якого виконується дія. Ці команди, крім `clrf f` та `movwf f`, складаються з трьох слів. Перше майже завжди закінчується символами WF (Work and File). Це підказує, що команда виконується з робочим регістром і регістром ОЗП. Третє слово визначає, на місці якого з операндів розташовується результат – у робочому регістрі чи в тій самій комірці ОЗП.

Непряма адресація використовується з тими ж іменами команд, що й з прямою адресацією. Однак у другому слові команди замість регістра ОЗП пишеться ім'я INDF (INDirect File – непрямо адресований регістр ОЗП). У цьому випадку команда виконується з тим регістром ОЗП, адреса якого на цей момент знаходиться в регістрі FSR. Цей спосіб адресації використовується у циклах для обробки масивів даних.

Далі при розгляді команд будуть застосовані формати команд. Це їх узагальнений запис, щоб можна було розглянути різні варіанти використання команд (табл. 11.1). Слід пам'ятати, що в програмах формати ніколи не зустрічаються, а тільки реальні команди з конкретними регістрами, числами, номерами бітів, визначеним місцем результату.

Числа в асемблерних програмах можна подавати в наступних системах числення:

- двійковій, наприклад, `b'10001101'`;

- десятковий, наприклад, d'195' або .195 (крапка означає не дробове значення, а десяткову систему числення);
 - шістнадцятковий, наприклад, h'3C' або 0x3C.
- За замовчуванням приймається шістнадцяткова система.

Таблиця 11.1.

Узагальнені позначення у форматах команд

<i>Символ формату</i>	<i>№ слова в команді</i>	<i>Розшифровка позначення</i>
f	2	Семирозрядна адреса або визначене раніше ім'я регістра ОЗП
k	2	Однобайтове число або його визначене раніше ім'я
d	3	Одне з двох можливих місць розташування результату: - робочий регістр, тоді в реальній команді після коми пишеться W або 0; - регістр ОЗП, що записаний у команді другим словом, тоді в реальній команді після коми пишеться f або 1
b	3	номер біта (0...7) або його визначене раніше ім'я

Для зручності вивчення команди умовно розбито на декілька груп. Слідом за форматом команди записується розшифровка та переклад імені команди, причому великими позначаються букви, що увійшли в аббревіатуру.

Команди пересилання

movlw k (MOVE Literal to W – переслати число в W).

Дія: число k пересилається в робочий регістр W.

Приклад: movlw .28 – переслати число 28 у робочий регістр.

movwf f (MOVE W to F – переслати W в f).

Дія: копіювання вмісту робочого регістра в f.

Приклад: `movwf RG_1` – копіювання вмісту робочого регістра в `RG_1`.

`movf f, d` (MOVE F – переслати f)

Дія: пересилання вмісту регістра f у приймач, що визначається символом, записаним після коми. А саме, якщо на місці d у реальній команді записано W або 0, результат пересилається в робочий регістр W. Якщо ж на місці d вказати f або 1, результат зберігається в регістрі, записаному перед комою. Це правило дійсне для всіх команд, де в їх форматі третім словом вказується d. Далі воно повторюватись не буде.

Ця команда впливає на ознаку нуля Z наступним чином: якщо результат дорівнює нулю, ця ознака встановлюється ($Z=1$), при будь-якому іншому результаті ознака нуля скидається ($Z=0$). Усі команди, що впливають на ознаку нуля, діють на неї за цим правилом.

Приклад: `movf TEMP, W` – скопіювати вміст регістра TEMP у робочий регістр W. Якщо вміст регістра TEMP дорівнював 24, його копія з'являється в W, а ознака $Z=0$.

`swapf f, d` (SWAP nibbles in f – обміняти півбайти f).

Дія: обміняти місцями старший півбайт регістра f з молодшим. Результат зберігається за правилом попередньої команди. Команда не впливає на ознаки.

Приклад: `swapf CODR, f`.

Якщо до виконання команди вміст CODR дорівнював `b'11100100'`, після її виконання його вміст стане `b'01001110'`.

Арифметичні команди

`addlw k` (ADD Literal to W – додати число до W).

Дія : додати число k до вмісту робочого регістра W.

Впливає на ознаки нуля Z, допоміжного переносу DC та переносу C. Ознака C встановлюється у стан 1, якщо при виконанні команди виник перенос із старшого (сьомого) розряду, а допоміжний перенос встановлюється, якщо був перенос із третього розряду у четвертий. Якщо цих переносів не виникає, відповідний біт ознаки скидається в нуль.

Приклад: `addlw .73` – додати десяткове число 73 до вмісту робочого регістра. Якщо до виконання команди вміст робочого регістра був `d'89'`, команда додає $73 + 89 = 162$. Результат завжди в

робочому регістрі. Щоб визначити стан ознак виконаємо додавання цих чисел у двійковій системі.

Переноси:
$$\begin{array}{r} 1\ 11\ 1 \\ d'73' = b'01001001' \end{array}$$

$$(W) = d'89' = b'01011001'$$

Результат: $(W) = d'162' = b'10100010'$

Після виконання команди ознаки встановились так: $Z=0$, тому що результат не дорівнює нулю, $DC=1$, через те, що при додаванні був перенос з третього розряду в четвертий, $C=0$, тому що немає переносу із старшого розряду.

addwf f, d (ADD W and F – додати W з F).

Дія: Додати вміст регістра ОЗП f і робочого регістра W.

Арифметичний зміст команди такий же, як попередньої, й усі три ознаки встановлюються за тими ж правилами.

Приклад: **addwf MPDT, f** – додати вміст регістрів MPDT і робочого, результат в регістрі MPDT.

sublw k (SUBtract W from Literal – відняти W від числа).

Дія: від числа k відняти вміст робочого регістра. Результат завжди в W. Команда впливає на ознаки Z, DC, C. Насправді команда операцію віднімання замінює додаванням зменшуваного до числа, протилежного від'ємнику, яке отримується шляхом збільшення на одиницю інверсії від'ємника.

Приклад: **sublw .89** – від числа 89 відняти вміст робочого регістра W. Якщо до виконання команди в робочому регістрі було число 68, після її виконання в ньому опиниться $89 - 68 = 89 + (-68) = 21$. Детальніше розглянемо у двійковій системі. Спочатку отримується число, протилежне +68:

$+68 = b'01000100'$. Його інверсія $b'10111011'$. Інверсія, збільшена на одиницю, дорівнює $b'10111100' = -68$. Команда додає це значення з константою 89:

Переноси:
$$\begin{array}{r} 11111 \\ 89 = b'010111001' \end{array}$$

$$(W) = -68 = b'10111100'$$

Результат: $(W) = d'21' = b'00010101'$

При виконанні команди встановлюються ознаки: $Z=0$, оскільки результат не нуль, $DC=1$, – є перенос із третього біта в четвертий, $C=1$, – є перенос із старшого розряду.

subwf f, d (SUBtract W from F – відняти W від F).

Дія: від вмісту регістра f відняти вміст робочого регістра W.

Арифметичний зміст команди такий же, як попередньої, й усі три ознаки встановлюються за тими ж правилами.

Приклад: `subwf MUSA, W` – від вмісту регістра MUSA відняти вміст робочого регістра, результат у робочому регістрі.

incf f, d (INCrement F – збільшити на одиницю F).

Дія: вміст регістра f збільшити на одиницю. Впливає на ознаку нуля Z.

Приклад: `incf CNT, f` – збільшити на одиницю вміст регістра CNT. Результат залишається в ньому ж.

decf f, d (DECrement F – зменшити на одиницю F).

Дія: вміст регістра f зменшити на одиницю. Впливає на ознаку нуля Z.

Приклад: `decf NURK, f` – зменшити на одиницю вміст регістра NURK. Результат залишається в ньому ж.

incfsz f, d (INCrement F and Skip if Zero – збільшити на одиницю f і пропустити, якщо нуль).

Дія: вміст регістра f збільшити на одиницю і пропустити наступну команду, якщо отримано нуль. Не впливає на ознаки.

Приклад: `incfsz SOT, f` – збільшити на одиницю вміст регістра SOT і, якщо отримано нуль, пропускається наступна команда. Якщо ж результат не дорівнює нулю, наступна команда виконується. Результат залишається в SOT.

decfsz f, d (DECrement F and Skip if Zero – зменшити на одиницю f і пропустити, якщо нуль).

Дія: вміст регістра f зменшити на одиницю і пропустити наступну команду, якщо отримано нуль. Не впливає на ознаки.

Приклад: `decfsz COUNT, f` – зменшити на одиницю вміст регістра COUNT і, якщо отримано нуль, пропускається наступна команда.

Коли результат не дорівнює нулю, наступна команда виконується. Результат залишається в COUNT.

Дві останні команди часто використовуються для створення циклів.

clrf f (CLear F – очистити F).

Дія: очистити (занести нуль в) регістр f. Завжди встановлює ознаку нуля (Z=1).

Приклад: clrf SUM – очистити регістр SUM (усі його біти стають нулями), ознака Z=1.

clrw (CLear W – очистити W).

Дія: очистити (занести нуль в) регістр W. Завжди встановлює ознаку нуля (Z=1).

Приклад: clr w – очистити робочий регістр W, ознака Z=1.

rlf f, d (Rotate Left F – зсунути вліво F).

Дія: вміст регістра f циклічно зсунути на один розряд вліво через біт переносу C. Впливає на ознаку переносу.

Приклад: rlf CORK, f – біти регістра CORK зміщуються на один розряд вліво, стан ознаки переносу C заноситься у молодший біт регістра CORK, а його старший біт передається у біт переносу C.

rfr f, d (Rotate Right F – зсунути вправо F).

Дія: вміст регістра f циклічно зсунути на один розряд вправо через біт переносу C. Впливає на ознаку переносу.

Команда виконується так само, як попередня, тільки напрям зсуву протилежний.

Логічні команди

andlw k (AND Literal with W – I з числом та W).

Дія: порозрядне логічне I зі значенням k та робочим регістром W. Впливає на ознаку нуля Z.

Приклад: andlw b'01111101' – логічне I з вмістом робочого регістра та кодом b'01111101'. Якщо до виконання команди в робочому регістрі було значення b'00001111', після її виконання в W буде отримано результат b'00001101'. Ознака нуля Z=0.

andwf f, d (AND W with F – I з вмістом W та F).

Дія: порозрядне логічне I з вмістом робочого регістра та регістра ОЗП f. Впливає на ознаку Z.

Приклад: **andwf MASK**, f – порозрядне логічне I з вмістом регістра MASK та робочого регістра.

За допомогою команд логічного I можна обнулити потрібні біти регістра, а інші лишити незмінними.

iorlw k (Inclusive OR Literal with W – включне АБО з числом та W).

Дія: порозрядне включне АБО зі значенням k та робочим регістром W. Впливає на ознаку нуля Z.

Приклад: **iorlw b'01111101'** – включне АБО з кодом b'01111101' та вмістом робочого регістра. Якщо до виконання команди в робочому регістрі було значення b'00001111', після її виконання в W буде отримано результат b'01111111'. Ознака нуля Z=0.

iorwf f, d (Inclusive OR W with F – включне АБО з вмістом W та F).

Дія: порозрядне включне АБО з вмістом робочого регістра та регістра ОЗП f. Впливає на ознаку Z.

Приклад: **iorwf SKMA**, f – порозрядне включне АБО з вмістом регістра SKMA та робочого регістра.

За допомогою команд включного АБО можна у потрібних бітах регістра встановити одиниці, а інші лишити незмінними.

xorlw k (eXclusive OR Literal with W – виключне АБО з числом та W).

Дія: порозрядне виключне АБО зі значенням k та робочим регістром W. Впливає на ознаку нуля Z.

Приклад: **xorlw b'01111101'** – виключне АБО з кодом b'01111101' та вмістом робочого регістра. Якщо до виконання команди в робочому регістрі було значення b'00001111', після її виконання в W буде отримано результат b'01110010'. Ознака нуля Z=0.

xorwf f, d (eXclusive OR W with F – виключне АБО з вмістом W та F).

Дія: порозрядне виключне АБО з вмістом робочого регістра та регістра ОЗП f. Впливає на ознаку Z.

Приклад: xorwf KMSA, f – порозрядне виключне АБО з вмістом регістра KMSA та робочого регістра.

За допомогою команд виключного АБО можна потрібні біти регістра переключити у протилежний стан, а інші лишити незмінними.

comf f, d (COMplement F – інверсія f).

Дія: порозрядна інверсія (операція НЕ) з вмістом регістра f. Не впливає на ознаки.

Приклад: comf NGT, W – порозрядна інверсія вмісту регістра NGT. Результат потрапить у робочий регістр. Якщо до виконання команди в регістрі NGT було значення b'01001100', після її виконання в W буде отримано результат b'10110011'. Вміст NGT лишиться незмінним.

Команди обробки окремих бітів

bsf f, b (Bit Set in F – встановити біт у f).

Дія: встановити одиницю в біті № b регістра f. Інші біти регістра лишаються незмінними.

Приклад: bsf PORTB, 5 – встановити одиницю в біті № 5 регістра PORTB. Інші його біти лишаються незмінними.

bcf f, b (Bit Clear in F – очистити біт у f).

Дія: встановити нуль в біті № b регістра f. Інші біти регістра лишаються незмінними.

Приклад: bcf VREK, 3 – скинути в нуль біт № 3 регістра VREK. Інші його біти лишаються незмінними.

btfs f, b (Bit Test in F and Skip if Set – перевірити біт в f і пропустити, якщо одиниця).

Дія: якщо в біті № b регістра f знаходиться одиниця, пропустити наступну команду.

Приклад: `btfss VREK, 3` – якщо в біті № 3 регістра `VREK` знаходиться одиниця, пропустити наступну команду, а якщо в цьому біті нуль, наступна команда виконається.

`btfsc f, b` (Bit Test in F and Skip if Clear – перевірити біт в `f` і пропустити, якщо нуль).

Дія: якщо в біті № `b` регістра `f` знаходиться нуль, пропустити наступну команду.

Приклад: `btfsc EKVR, 2` – якщо в біті № 2 регістра `EKVR` знаходиться нуль, пропустити наступну команду. Якщо ж в цьому біті одиниця, наступна команда виконається.

Команди передачі управління

Крім розглянутих далі команд, до цієї групи можна віднести розглянуті раніше команди, що пропускають наступну команду за певної умови.

`goto label` (GO TO label – перейти на мітку).

Дія: безумовний перехід на вказану в команді мітку одинадцятибітової адреси. При виконанні цієї команди в програмний лічильник потрапляє адреса вказаної мітки. Тому наступною буде виконано команду, перед якою поставлено таку мітку.

Приклад: `goto NXT` – безумовний перехід на мітку `NXT`.

`call label` (CALL label – виклик з мітки).

Дія: виклик підпрограми з вказаної мітки одинадцятибітової адреси. При цьому в стеку запам'ятовується повна адреса наступної за `call` команди, а в програмний лічильник заноситься адреса вказаної мітки, з якої далі починається виконання підпрограми.

Приклад: `call MN8` – виклик підпрограми з мітки `MN8`.

`return` (RETURN – повернення).

Дія: повернення з підпрограми. При цьому з верхівки стеку в програмний лічильник повертається адреса команди, наступної за тою, що викликала підпрограму. Таким чином повернення з підпрограми здійснюється в місце виклику.

Підпрограми можуть бути вкладеними. Глибина вкладень 8.

retlw k (RETurn and Literal to W – повернення та число в W).

Дія: повернення з підпрограми з одночасним пересиланням константи k в робочий регістр.

Приклад: retlw .52 – повернення з підпрограми з одночасним потраплянням числа 52 в робочий регістр.

retfie (RETurn From IntErrupt – повернення з підпрограми переривання).

Дія: повернення з підпрограми з встановленням одиниці у біті GIE глобального дозволу переривань.

clrwdt (CLear Watch Dog Timer – очистити сторожовий таймер).

Дія: очищення сторожового таймера.

nop (No Operation – немає операції).

Дія: немає операції. Не відбувається ніяких дій, крім того, що програмний лічильник збільшується на одиницю.

sleep (SLEEP – заснути).

Дія: перейти в режим енергозбереження. При цьому зупиняється тактовий генератор мікроконтролера, перестають виконуватись команди. Споживання енергії зменшується у сотні разів. З цього режиму мікроконтролер може вивести запит переривання або запрограмована раніше для певного модуля особлива ситуація, або зовнішній сигнал.

11.4. Організація пам'яті

Флеш-пам'ять програм. Мікроконтролери PIC16FXXX мають 13-розрядний програмний лічильник, що дозволяє адресувати до 8192 команд. Команди безумовного переходу goto та виклику підпрограм call містять 11-розрядну адресу мітки. Це дозволяє без перешкод адресувати 2048 перших адрес команд. Для можливості адресації переходів до старших адрес команд, постійна пам'ять розбита на сторінки по 2K команд. Щоб у разі потреби адресувати переходи і виклики підпрограм в ОЗП передбачені регістри PCL та PCLATH, які відповідно є молодшим байтом програмного лічильника та буфером його старших 5 бітів. Для переходу до старших сторінок потрібно попередньо занести до PCLATH номер сторінки. Після цього при виконанні команди goto, call або інших, у

яких вказано регістр PCL, при його зміні одночасно вміст PCLATH потрапляє у старші біти програмного лічильника.

Оперативна пам'ять. Оперативну пам'ять PIC-контролерів реалізовано у вигляді статичних однобайтових регістрів. Через обмежений розмір команд оперативна пам'ять адресується 7-розрядним кодом, що дозволяє вказати 128 регістрів ОЗП. Багато типів мікроконтролерів мають більшу кількість комірок, наприклад, в PIC16F628 224 регістри, а в PIC16F887 їх 368. Щоб можна було звертатись до всіх регістрів, область ОЗП розбита на 4 банки пам'яті по 128 адрес у кожному. Банки ОЗП нумеруються від 0 до 3. У будь-який момент роботи мікроконтролера активним є тільки один з них. В цей час можна вернутись до будь-якого регістра цього банку. Щоб використати регістр з іншого банку, треба спочатку змінити активний банк ОЗП. Для цього в регістрі STATUS передбачено пару бітів, які мають назву RP1, RP0. Двійкове число, що є комбінацією цих бітів, визначає номер активного банку.

RP1	RP0	Активний банк
0	0	0
0	1	1
1	0	2
1	1	3

Перші адреси банків займають регістри спеціального призначення (РСП). Вони обслуговують ядро та модулі мікроконтролера, тому не можуть використовуватись довільно. Їх імена для кожного типу мікроконтролера визначені у файлах стандартних імен, які мають розширення .INC і включаються до програми директивою #INCLUDE.

Старші адреси банків займають регістри загального призначення. Їх можна використовувати довільно. У деяких типів мікроконтролерів частина регістрів ОЗП загального призначення може бути фізично відсутня.

Регістр STATUS зберігає (табл. 11.2) біт IRP вибору банку ОЗП при непрямій адресації, біти RP1, RP0 вибору банку ОЗП при прямій адресації, ознаки арифметичних та логічних операцій Z, DC, C відповідно нуля, допоміжного переносу та переносу.

Регістри **PCL**, **PCLATH**, **INDF**, **FSR** розглянуті в цьому розділі раніше.

Регістр **OPTION_REG** пов'язаний із зовнішніми перериваннями та модулем таймера **TMR0**.

Регістри **PORTA**, **TRISA**, **PORTB**, **TRISB**, ... пояснені в 11.5.

Таблиця 11.2.

Регістри спеціального призначення, що обслуговують ядро

Назва	біт 7	біт 6	біт 5	біт 4	біт 3	біт 2	біт 1	біт 0
PCL								
STATUS	IRP	RP1	RP0	TO	PD	Z	DC	C
FSR	Вказівник для непрямої адресації ОЗП							
PORTA								
PORTB								
PORTC								
INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF
PIR1	PSPIF	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR1IF	TMR2IF
PIR2	—	—	EEIF	BCLIF	—	—	—	CCP2IF
PIE1	PSPIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR1IE	TMR2IE
PIE2	—	—	EEIE	BCLIE	—	—	—	CCP2IE
TRISA	Визначає напрям передачі даних через порт А							
TRISB	Визначає напрям передачі даних через порт В							
TRISC	Визначає напрям передачі даних через порт С							
OPTION_REG	-RBPU	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0

11.5. Переривання

Регістри **INTCON**, **PIR1**, **PIE1**, **PIR2**, **PIE2** обслуговують переривання. Переривання призначено для термінової своєчасної реакції програми на зовнішні сигнали або події у вбудованих модулях мікроконтролера. У PIC16F887 переривання може бути викликано більш ніж десятком джерел (рис. 11.2):

- зовнішнє переривання **INT** при зміні стану входу **RB0/INT**;

- зовнішнє переривання при зміні стану будь-якого з чотирьох старших бітів порту В;
- переповнення таймера TMR0;
- переповнення таймера TMR1;
- співпадіння вмісту таймера TMR2 і регістра PR2;
- завершення запису в EEPROM пам'ять даних;
- завершення аналого-цифрового перетворення модулем АЦП;
- отримання байта даних модулем USART;
- завершення передачі байта даних модулем USART;
- переривання від модуля CCP та інші джерела переривань.

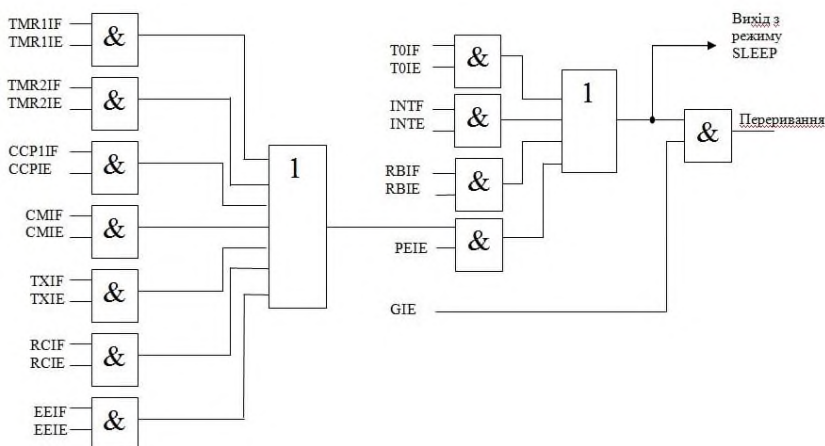


Рис. 11.2. Структурна схема логіки переривань

Переривання від кожного джерела можна програмно дозволити (1) або заборонити (0), встановивши або скинувши відповідний біт дозволу з іменем, що закінчується символом "E" (Enable – дозвіл). Для дозволу переривань, керованих регістрами PIR1, PIR2, треба ще встановити "1" в біті дозволу периферійних переривань PEIE. Після вибору необхідних джерел переривань слід встановити "1" в біті GIE глобального дозволу переривань у регістрі INTCON.

Особливістю переривання INT є необхідність визначення біта INTEDG у регістрі OPTION_REG. Якщо встановити INTEDG=1, переривання почнеться при зміні стану входу RB0/INT з "0" в "1", а якщо INTEDG=0, – з "1" в "0".

Переривання при зміні стану будь-якого з чотирьох старших бітів порту В призначено для зручного приєднання до мікроконтролера клавіатури. Тоді до цих входів програмно приєднують внутрішні підтягуючі опори, скинувши в нуль біт -RBPU регістра OPTION_REG.

Алгоритм роботи мікроконтролера при появі запиту переривання наступний:

1. Завершується поточна команда.
2. Біт глобального дозволу переривання GIE скидається в "0" (забороняються будь-які переривання).
3. Запам'ятовується в стеку вміст програмного лічильника, тобто адреса наступної команди, яка мала виконуватись. А в програмний лічильник завантажується адреса 4, з якої починається підпрограма обробки переривань.
4. Виконується підпрограма обробки переривань, яку слід завершити командою RETFIE, що повертає програму в перерване місце та одночасно встановлює біт глобального дозволу переривань GIE.

Підпрограму обробки переривання слід починати зі збереження у виділених для цього регістрах ОЗП вмісту важливих регістрів, який може бути зіпсований під час виконання підпрограми переривання. Це робочий регістр, STATUS, можливо, FSR, якщо в основній програмі й у підпрограмі обробки переривань використовується непряма адресація. Перед завершенням обробки переривань треба ці регістри відновити. У підпрограмі переривання програміст має визначити джерело, що викликало переривання, шляхом аналізу бітів ознак використаних джерел (з символом F у кінці імені біта) та обов'язково скинути в "0" цю ознаку.

Інші регістри спеціального призначення, пов'язані з роботою вбудованих модулів мікроконтролера, та використовувані ними переривання докладно розглянуті в технічних описах мікроконтролерів (<http://www.microchip.com>).

11.6. Взаємодія мікроконтролера із зовнішніми пристроями

Мікроконтролери обмінюються сигналами із зовнішніми пристроями через порти, які програмно реалізовані як регістри ОЗП. Кожний біт порту можна налаштувати в режим введення або виведення. Для цього порти мають регістри налаштування, що

починаються з символів TRIS. Наприклад, біти зовнішнього порту PORTB налаштовуються регістром TRISB. Якщо у певні біти TRISB записати нулі, біти зовнішнього порту PORTB з тими ж номерами налаштовуються в режим виведення. А якщо у деякі біти регістра TRISB занести одиниці, біти PORTB з тими ж номерами налаштовуються в режим введення. Наприклад, вміст регістра TRISB дорівнює 10001100. Це означає, що біти 0, 1, 4, 5, 6 PORTB налаштовані на режим виведення, інші – введення. Через біт зовнішнього порту, налаштований на введення, неможливо вивести назовні інформацію. При увімкненні живлення мікроконтролера всі виводи його зовнішніх портів апаратно налаштовуються на режим введення. В усіх контролерах PIC16FXXX порти розташовані в банку 0, а регістри TRISA, TRISB, ... – в банку 1.

Введення дискретної інформації в мікроконтролер. Мікроконтролеру потрібно вводити інформацію про стан кнопок, вимикачів, контактів реле та інших двопозиційних пристроїв. Типовий спосіб їх приєднання подано на рис. 11.3.

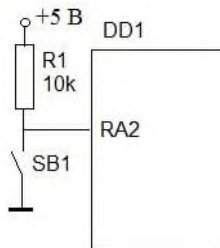


Рис. 11.3. Введення дискретного сигналу в мікроконтролер

Якщо контакт SB1 розімкнутий, на вхід RA2 зовнішнього порту через підтягувальний опір R1 надходить високий рівень напруги, тобто "1". При замкнутому контакті на вході RA2 опиняється "0". Розрізнити, замкнуто контакт чи ні дозволяє фрагмент програми:

```
    btfsc  PORTA, 2
    goto  NOPUSH
PUSHB:
```

Якщо контакт розімкнутий, з біту 2 PORTA вводиться "1". Наступна команда після `btfsc PORTA, 2` виконується, через те, що умова пропуску команди є хибною. Здійснюється перехід на мітку `NOPUSH`. Якщо ж контакт замкнуто, на вході RA2 з'являється "0".

Умова пропуску команди є істинною. Команда goto NOPUSH пропускається, а виконується та команда, яка розташована слідом за міткою PUSHB.

Подібно приєднанню контакту SB1 можна підключати й безконтактні двопозиційні пристрої, наприклад, емітер-колекторний перехід транзистора, що працює в ключовому режимі.

Введення аналогових сигналів здійснюється за допомогою модуля АЦП мікроконтролера.

Виведення дискретної інформації з мікроконтролера. Технічна характеристика мікроконтролерів обмежує діапазони зовнішніх напруг і струмів, що підводяться до їх виводів. Для PIC16FXXX це напруга від -0,5 до 5,5 В і струм не більше 20...25 мА. Ці умови дозволяють приєднувати до мікроконтролера більшість світлодіодів без підсилення сигналу. Їх можна приєднати двома способами (рис. 11.4).

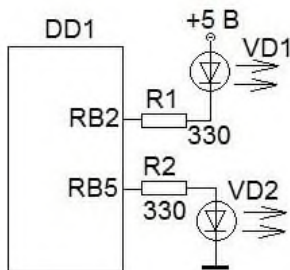


Рис. 11.4. Приєднання світлодіодів до мікроконтролера

Щоб увімкнути світлодіод VD1 слід у другий біт порту В вивести "0" командою `bsf PORTB, 2`. Тоді струм від джерела живлення пройде через і обмежувальний опір R1. А для вимкнення світлодіода VD1 треба використати команду `bsf PORTB, 2`, яка виводить у цей же біт порту "1".

Для світлодіода VD2 управління здійснюється протилежними сигналами. Команда `bsf PORTB, 5` вмикає світлодіод, а `bsf PORTB, 2` – вимикає.

Управління потужними пристроями виконується мікроконтролером з використанням підсилення з гальванічною розв'язкою. Гальванічна розв'язка означає, що низьковольтні кола мікроконтролера електрично не з'єднані з потужними колами навантаження. Її реалізують за допомогою реле, оптронів,

трансформаторів. Типову схему управління потужним двигуном з використанням електромагнітного реле подано на рис. 11.5. Для увімкнення двигуна M1 командою bsf PORTB,4 у біт RB4 виводиться "1". Через опір R1 і перехід база-емітер транзистора VT1 проходить струм, який відкриває перехід колектор-емітер. Спрацьовує електромагнітне реле KV1, що своїм контактом живить котушку магнітного пускача KM1, він своїми потужними контактами вмикає двигун M1.

Коли на вихід RB4 виводиться "0", транзистор VT1 закривається, струм через реле припиняється й воно розмикає свій контакт, що вимикає магнітний пускач KM1, зупиняючи двигун M1.

У перехідному режимі без діода VD1 під час закриття транзистора VT1 у котушці реле на короткий час виникає електрорушійна сила високої напруги. Вона через внутрішній опір джерела живлення прикладається до емітер-колекторного переходу транзистора VT1 і виводить його з ладу. Діод VD1, пропускаючи через себе струм у перехідному режимі, обмежує напругу до безпечного для транзистора рівня.

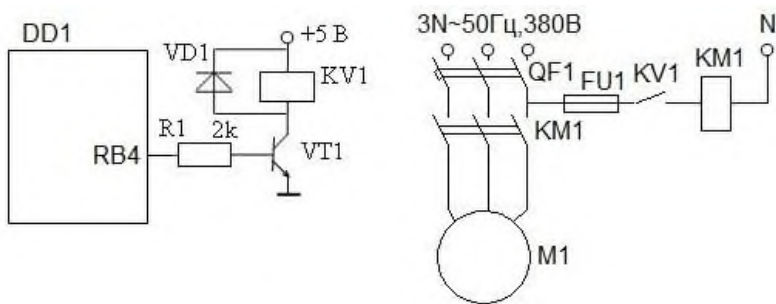


Рис. 11.5. Мікроконтролерне управління потужним пристроєм за допомогою електромагнітного реле

Приклад безконтактного управління потужним пристроєм подано на рис. 11.6.

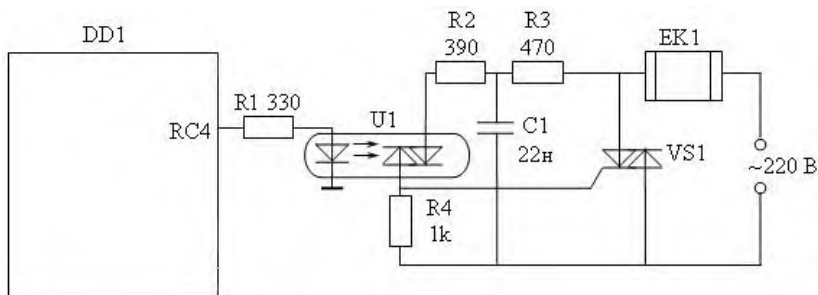


Рис. 11.6. Безконтактне управління потужним пристроєм

Щоб увімкнути електричний нагрівач EK1 має бути виконано команду `bsf PORTC,4`. Високий рівень напруги, який з'являється на зовнішньому виводі мікроконтролера створює струм, що проходить через обмежувальний опір R1 та світлодіод оптрона U1. Світловий сигнал відкриває фотосимістор оптрона. Через нього, нагрівач, опори R2..R4 проходить струм. Створене ним падіння напруги на опорі R4 викликає струм управління силовим симістором VS1, який відкривається та пропускає великий струм джерела живлення через нагрівач EK1. Щоб вимкнути нагрівач, використовують команду `bcf PORTC,4`. При цьому на зовнішньому виводі порту з'являється "0". Світлодіод оптрона U1 гасне, закривається фотосимістор оптрона. Припиняється струм управління силового симістора VS1 і нагрівача EK1.

Якщо програмно змінювати тривалість виведення "1" і "0" на зовнішній вивід мікроконтролера, можна плавно змінювати споживану потужність нагрівача.

11.7. Програмне забезпечення мікропроцесорних систем

Для розробки проектів мікроконтролерних систем управління та контролю використовують інтегроване програмне середовище MPLAB. Воно містить засоби для складання програм, їх трансляції (перетворення в об'єктний і машинний код), програмування мікросхем мікроконтролерів та різні засоби налагодження систем. Занесення машинного коду програми в мікроконтролер може здійснюватися програматором PROPIC2 у середовищі програми PROPIC2.EXE, WINPIC800.EXE або ICPROG.EXE. Для програмування та налагодження програмного забезпечення разом з

апаратними засобами створюваної системи застосовують налагоджувачі/програматори PICkit 2, PICkit 3, ICD2, ICD.

11.8. Програмовані логічні контролери

Програмований логічний контролер (ПЛК; англ.: programmable logic controller або PLC) – це спеціалізована мікропроцесорна система, що використовується для автоматизації технологічних процесів та установок і комплексів. Основна сфера застосування ПЛК – виробництво. Їх застосовують для автоматизації процесів у теплицях, млинах, на птахофабриках, тваринницьких фермах тощо.

Зазвичай ПЛК (рис. 11.7) – це спеціалізований комп'ютер, що побудований на основі однокристального мікроконтролера. В його корпус вбудовані засоби, що забезпечують зв'язок ПЛК з датчиками, кнопками, перемикачами, виконавчими пристроями (клапанами, вентилями, двигунами, нагрівачами тощо).



Рис. 11.7. Зовнішній вигляд ПЛК

Деякі фірми випускають ПЛК з модульною структурою (рис. 11.8). У таких ПЛК можна підібрати потрібний для конкретного проекту набір модулів.

Тільки у Європі більше 80 крупних фірм випускають ПЛК загального та спеціалізованого призначення. Зокрема, це контролери фірм VIPA, Eaton, Schneider Electric, ICP DAS, OWEN, Siemens та ін.

Ці ПЛК мають апаратну уніфікацію. Тобто, вони використовують стандартні рівні напруг, видів сигналів, мають уніфіковані розміри, способи кріплення.



Рис. 11.8. ПЛК з модульною структурою

Головними параметрами ПЛК є розрядність і швидкодія центрального процесора, об'єм різних видів пам'яті, кількість портів і мережевих інтерфейсів. Дуже часто основним показником, що побічно характеризує «потужність» контролера і, одночасно являє собою найважливішу його характеристику, є число входів і виходів (як аналогових, так і дискретних), через які зовнішні пристрої можуть бути приєднані до контролера.

Архітектура ПЛК має такі основні компоненти (рис. 11.9): процесорний модуль, блок живлення і модулі вводу/виводу. Процесорний модуль складається з власне процесора (CPU) і пам'яті. Крім того, є інтерфейс до програматора, а також можуть бути інтерфейси до віддалених пристроїв вводу/виводу і комунікаційних мереж. Модулі вводу/виводу бувають дискретними (вкл./викл.) і аналоговими, а також існують спеціалізовані модулі, наприклад, модулі управління переміщеннями або високошвидкісні лічильники. До модулів вводу/виводу підключаються датчики та виконавчі пристрої відповідно.

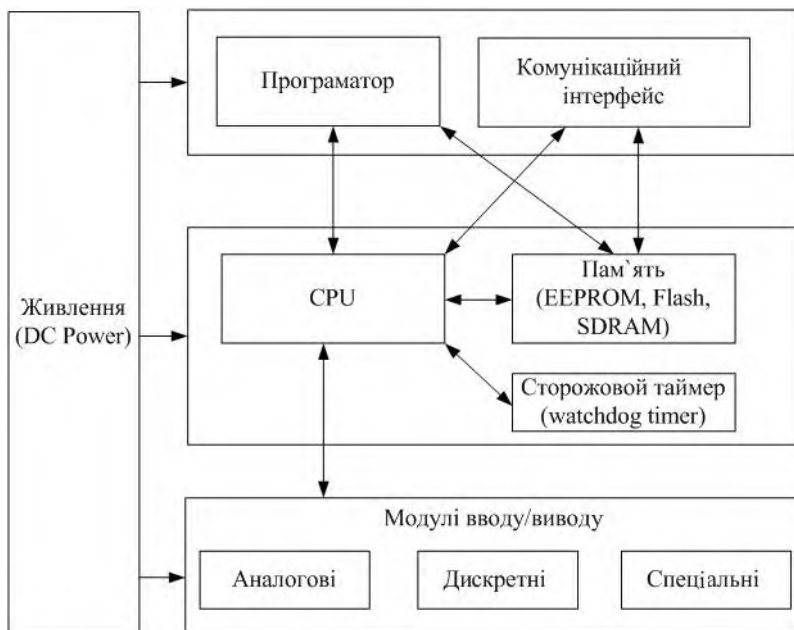


Рис. 11.9. Архітектура ПЛК

Детальну інформацію про ПЛК можна отримати на сайтах відповідних фірм.

Головною особливістю ПЛК є можливість складання для них програм контролю та управління з використанням технологічних мов програмування, визначених стандартом МЕК 61131-3. Стандартом передбачено 5 мов програмування. Розробники ПЛК передбачають використання мінімум однієї з них, а частіше – всіх.

Засвоїти ці мови нескладно технологам, електрикам, іншим спеціалістам, що не мають досвіду з програмування.

Детальніше розглянемо модульні ПЛК фірми ICP DAS. Це ПЛК I-8437 та I-8837, що мають вбудовану інструментальну систему ISaGRAF. Вона дозволяє програмувати ПЛК з використанням мов стандарту МЕК 61131-3. Друга цифра визначає максимальну кількість модулів, які можна розташувати в ПЛК. Основні характеристики модулів подано в табл. 11.3.

Таблиця 11.3.

Основні характеристики ПЛК I-8437, I-8837

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Тип модуля	Вбудований контролер з ISaGRAF
Тип процесора, (частота, МГц)	80188, (40) або (80)
Статична пам'ять (SRAM), кбайт	512
Енергонезалежна пам'ять, кбайт (EPROM)	2
Flash-пам'ять, кбайт	512
Інтерфейс Ethernet	10 BASE-T
Кількість COM-портів	4 (зовнішніх); 1 (внутрішній)
Порт для програмування	COM1
COM0 (внутрішній)	є
COM1	RS-232
COM2	Ethernet
COM3	RS-232/485
COM4	RS-232
Годинник реального часу	є
Сторожовий таймер	є
Кількість слотів розширення	4 або 8
Індикатор	7-ми сегментний
Вбудоване ПО	ISaGRAF
Робоча температура, °C	-25 ... +75
Напруга живлення, В	+10 ... +30
Споживана потужність, Вт	20

Зовнішній вигляд ПЛК I-8437 з двома знятими заглушками представлено на рис. 11.10, а ПЛК I-8837 на рис. 11.11.



Рис. 11.10. Зовнішній вигляд ПЛК I-8417



Рис. 11.11. Зовнішній вигляд ПЛК I-8837

Для ПЛК I-8x37 розроблено різноманітні модулі, які вставляються у слоти, що видно на рис. 11.11. Розглянемо типові модулі, що застосовують з цими ПЛК.

Модуль аналогового входу I-87013.

Технічні характеристики модуля I-87013 наведені в табл. 11.4.

Таблиця 11.4.

Технічні характеристики модуля I-87013

Найменування характеристики		Значення характеристики
Аналоговий вхід	К-ст вхідних каналів	4 (термоопори)
	Спосіб приєднання	2-, 3-, 4-провідний
	Типи термоопорів	Pt100, Pt1000, Ni120
	Частота дискретизації, перетворень/секунду	10
	-3dB ширина смуги, Гц	15,7
	Точність, %	±0,1
	Зменшення синфазних перешкод, dB (Гц)	150; (50/60)
	Зменшення перешкод живлення, dB (Гц)	100; (50/60)
	Напруга ізоляції, В	3000
Світлодіодні індикатори	1 світлодіод живлення/зв'язку; 8 світлодіодів сигналізації високого/низького рівня сигналу	
Потужність споживання, Вт	0,7 (максимальна)	

Позначення зовнішніх виводів I-87013 приведено на рис. 11.12.

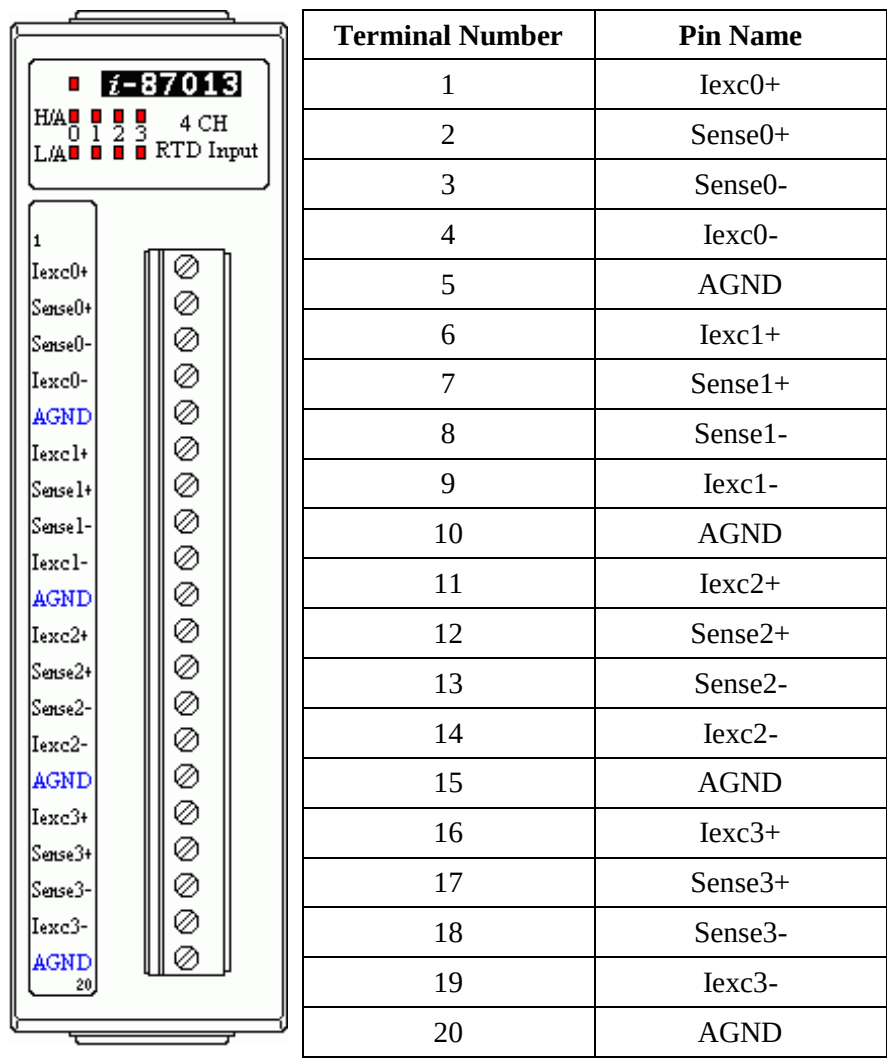


Рис. 11.12. Зовнішні виводи модуля аналогових входів I-87013

Способи приєднання термоопорів показано на рис. 11.13.

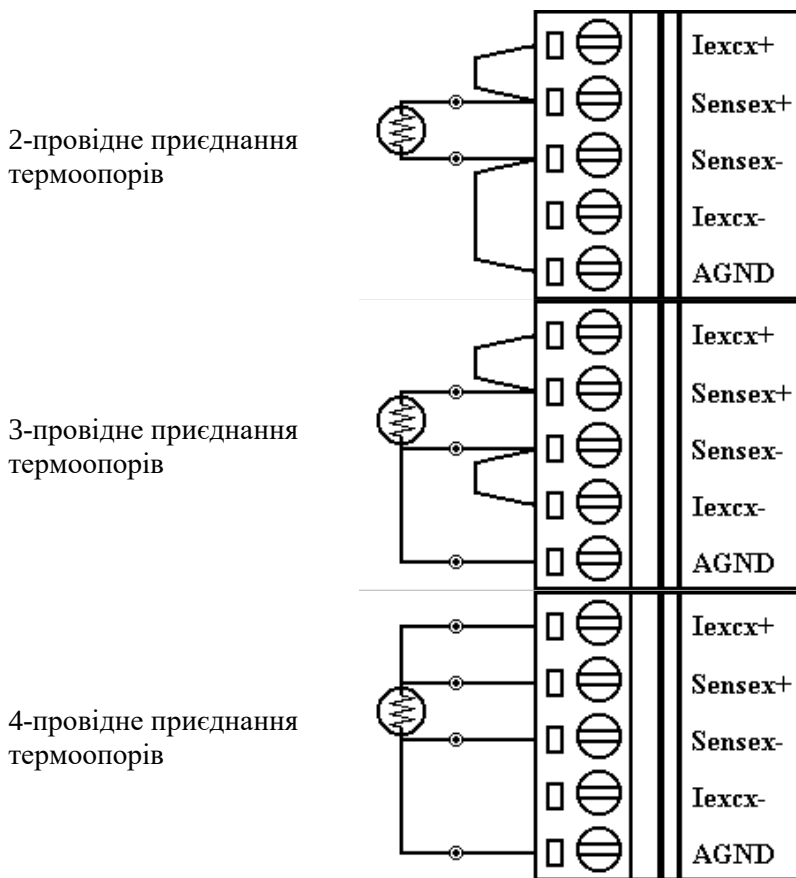


Рис. 11.13. Способи приєднання термоопорів до модуля I-87013

Для приєднання до ПЛК датчиків зі стандартними діапазонами напруг або струмів слугує **модуль I-87017**. Його технічні характеристики подано в табл. 11.5, позначення зовнішніх виводів – на рис. 11.14, способи приєднання – на рис. 11.15.

Таблиця 11.5

Технічні характеристики модуля I-87017

<i>Найменування характеристики</i>		<i>Значення характеристики</i>
Аналоговий вхід	К-сть вхідних каналів	8 (диференціальних)
	Діапазони вхідних сигналів, В:	± 10 ; ± 5 ; ± 1 ,
	мВ:	± 500 ; ± 150 ,
	мА (з зовнішнім резистором 125 Ом):	-20 ... +20
	Частота дискретизації, перетворень/секунду	10
	-3dB ширина смуги, Гц	15,7
	Точність, %	$\pm 0,1$
	Вхідний імпеданс, МОм	20
	Захист від перенапруг, В	від -35 до +35 (максимум)
	Напруга ізоляції, В	3000
Світлодіодні індикатори	1 світлодіод живлення/зв'язку; 16 світлодіодів сигналізації високого/низького рівня сигналу	
Потужність споживання, Вт	1,8 (максимальна)	

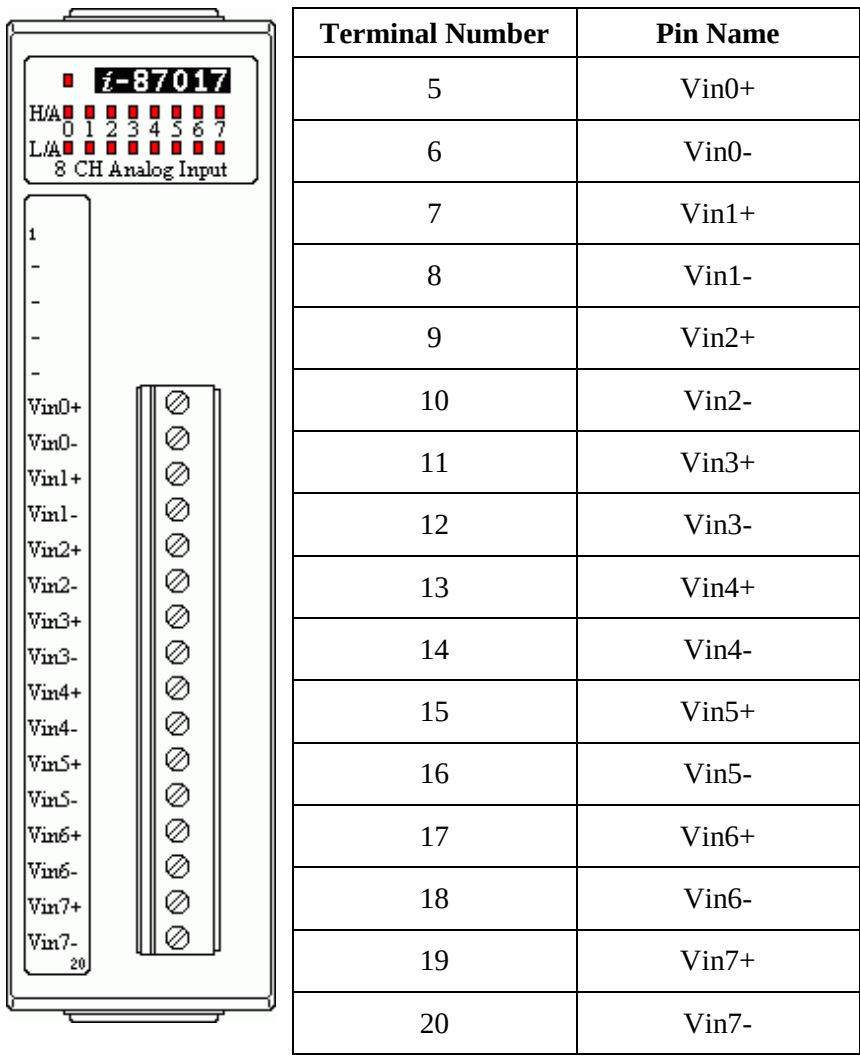


Рис. 11.14. Зовнішні виводи модуля аналогових входів I-87017

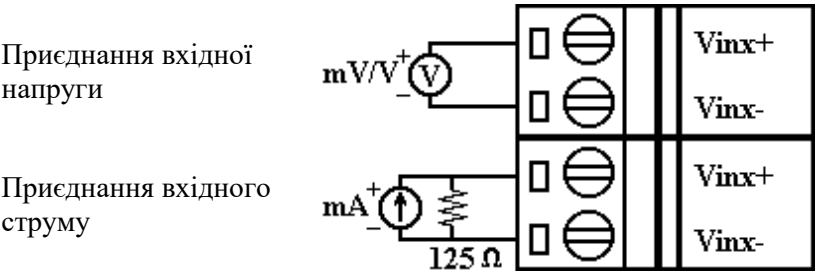


Рис. 11.15. Способи приєднання датчиків зі стандартними сигналами до модуля I-87017

Модуль дискретного введення/виведення I-87054

Технічні характеристики модуля подано в табл. 11.6.

Таблиця 11.6

Технічні характеристики модуля I-87054

Найменування характеристики		Значення характеристики
Дискретні виходи	Кількість виходів	8
	Тип виходів	Ізольовані з відкритим колектором
	Максимальний струм навантаження, мА	375 (на канал)
	Напруга навантаження, В	від +5 до +30
	Напруга ізоляції, В	3750
Дискретні входи	Кількість входів	8
	Тип входів	Ізольований дискретний зі спільним виводом
	Вхідна напруга, В	+30 (максимальна)
	ON стан, В	+3,5 (мінімум)
	OFF стан, В	+1,0 (максимум)
	Вхідний опір, кОм	3
	Напруга ізоляції, В	3750
Світлодіодні індикатори	1 світлодіод живлення/зв'язку; 8 світлодіодів сигналізації виходів; 8 світлодіодів сигналізації входів	
Потужність, Вт	0,7 (максимальна)	

Позначення зовнішніх виводів модуля I-87054 показано на рис. 11.16, способи приєднання – на рис. 11.17.

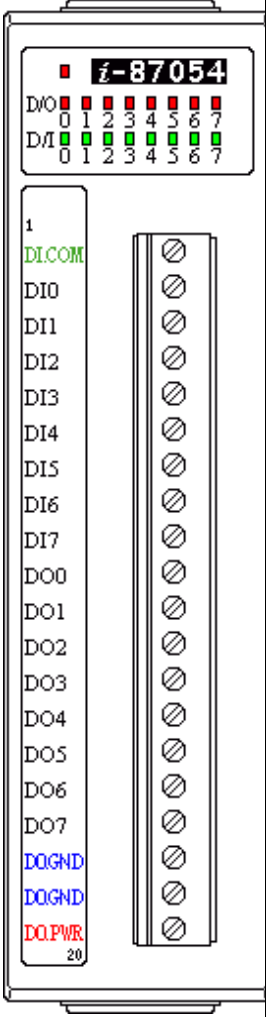
		Terminal Number	Pin Name
		1	DI.COM
		2	DI0
		3	DI1
		4	DI2
		5	DI3
		6	DI4
		7	DI5
		8	DI6
		9	DI7
		10	DO0
		11	DO1
		12	DO2
		13	DO3
		14	DO4
		15	DO5
		16	DO6
		17	DO7
		18	DO.GND
		19	DO.GND
		20	DO.PWR

Рис. 11.16. Зовнішні виводи модуля дискретних входів/виходів I-87054

<i>Тип входу</i>	<i>стан ON LED ON Readback as 1</i>	<i>стан OFF LED OFF Readback as 0</i>
Контакт реле		
ТТЛ/МОН логіка		
NPN вихід		
PNP вихід		
Управління реле		
Резистивне навантаження		

Рис. 11.17. Способи приєднання дискретних пристроїв до модуля I-87054

11.9. Технологічні мови програмування

Стандарт МЕК 1131-3 визначає наступні мови програмування для ПЛК:

1) графічна мова послідовних функціональних схем SFC (Sequential Function Charts). Програма на SFC виглядає як послідовність прямокутників ("кроків", де задаються певні дії – вмикання, вимикання тощо) і горизонтальних рисок, де задається умова переходу до наступного кроку. Програма може мати два види горизонтального розгалуження та сходження, що описують логіку роботи альтернативних або паралельних процедурних кроків і умовних переходів;

2) графічна мова функціональних блоків діаграм FBD (Function Block Diagrams), що дозволяє побудувати комплексну процедуру, що складається з різних бібліотечних функцій (арифметичних, тригонометричних, строкових) і функціональних блоків (тригери, перемикачі, таймери, лічильники тощо). Елементи цієї мови виглядають як блоки, з'єднані проводами в електричні ланцюги, роблячи мову зручною для безлічі прикладних програм, що містять передачу інформації між різними компонентами;

3) графічна мова релейних діаграм або релейно-контактної логіки LD (Ladder Diagrams), які використовуються для опису логічних виразів різного рівня складності. Функціональні блоки в мовах LD і FBD використовуються для програмного заміщення простих електромеханічних елементів;

4) мова структурованого тексту ST (Structured Text), що відноситься до класу мов високого рівня і за мнемонікою схожа на Паскаль. Мова ST надає булеві і арифметичні оператори, а також конструкції структурного програмування, такі, як IF-THEN-ELSE, WHILE-DO, REPEAT-UNTIL. На основі цієї мови можна створювати гнучкі процедури обробки даних;

5) мова інструкцій IL (Instruction List), що відноситься до класу текстових мов низького рівня (асемблерів) і дозволяє створювати ефективні, оптимальні процедури.

У 90-ті роки французька фірма «CJ International» випустила продукт «ISaGRAF for WINDOWS», в якому в повній мірі реалізувала підтримку всіх п'яти стандартних мов програмування ПЛК.

У ISaGRAF закладена методологія структурного програмування, яка дає можливість користувачу описати процес, що автоматизується в найбільш легкій і зрозумілій формі. Інтерфейс з користувачем системи ISaGRAF відповідає міжнародному стандарту, що включає

багатовіконний режим роботи, повнографічні редактори, роботу з мишею і т.п.

Іншим розповсюдженим середовищем розробки проектів автоматизації з використанням мов стандарту МЕК 61131-3 є Codesys.

Проект ISaGRAF можна скласти з декількох програмних модулів, які називаються програмами. Програми проекту пов'язані в деревоподібну структуру. Програми можуть бути описані за допомогою графічних або текстових мов FBD, SFC, LD, IL і ST.

Програма – це логічна програмована одиниця, яка описує операції з змінними процесу. Програма описує або послідовні, або циклічні операції. Циклічні програми виконуються на кожному циклі цільової системи. Виконання послідовних програм визначаються динамічними правилами мови SFC.

Програми пов'язані одна з одною в ієрархічне дерево. Програми, що знаходяться нагорі ієрархії, активізуються системою. Підпрограми (нижній рівень ієрархії) активізуються їх батьками.

Одна і та ж програма не може змішувати декілька мов, за винятком LD і FBD, які можуть бути скомбіновані в одній діаграмі.

Будь яка константа, змінна або вираз, що використовуються в програмі, повинні характеризуватися своїм типом. Типи повинні бути узгоджені в графічних операціях і текстових виразах. Ось основні типи програмних об'єктів:

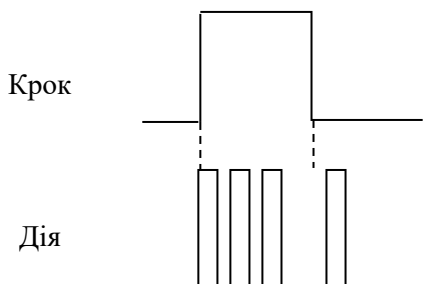
- BOOL – логічна величина;
- ANALOG – ціла або дійсна безперервна величина;
- TIMER – часова величина;
- MESSAGE – рядок символів.

11.10. Класифікатори дій

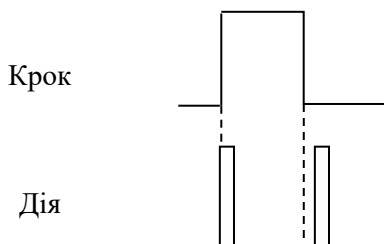
Важливою властивістю кроків є можливість надання їм класифікаторів мови SFC.

Прямокутник, який відображає дію, містить у лівій частині спеціальне поле – *класифікатор*. Класифікатор (Qualifier) визначає спосіб впливу активного кроку на дану дію.

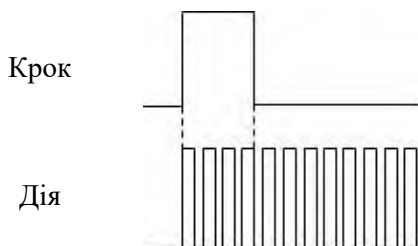
Можливі такі класифікатори:



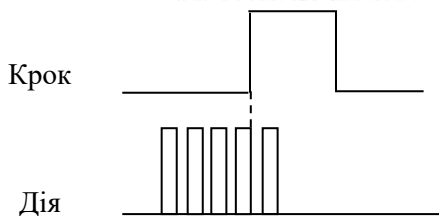
N – дія, що не зберігається (Non-stored) – буде виконуватися в кожному робочому циклі до тих пір, поки крок є активним



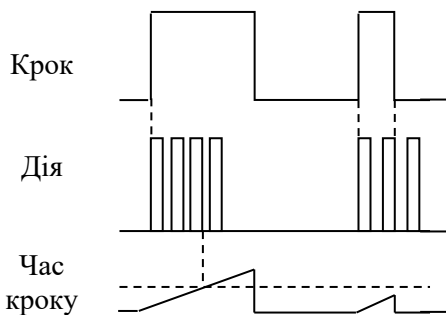
P – імпульс (Pulse) – виконується один раз при активації і другий раз після деактивації кроку



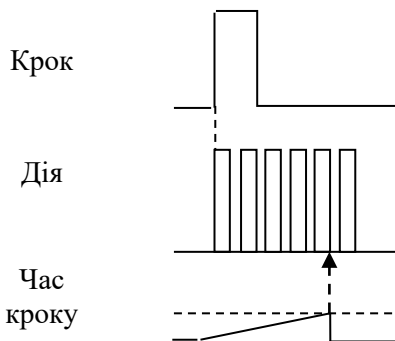
S – дія, що зберігається (Stored) – активується і залишається активною до скидання; дія буде виконуватися навіть тоді, коли крок уже деактивований



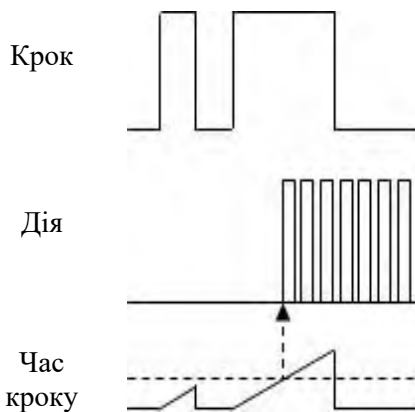
R – скидання (Reset) – дія деактивується



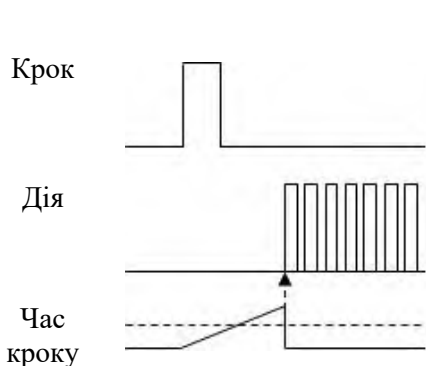
L – обмежена в часі дія (Time Limited) – активується разом з кроком і залишається активною на заданий час, але не довший за крок; можуть бути два випадки: перший – дія деактивується після завершення заданого часу і другий – через деактивацію кроку



D – відкладена (Delayed) дія – активується через заданий проміжок часу після активації кроку і залишається активною, поки крок є активним; якщо крок виявиться активним менше заданого часу, дія взагалі не буде активована



DS – відкладена і збережена дія (Delayed and Stored) – активується через заданий проміжок часу після активації кроку і залишається активною до скидання; якщо крок виявиться активним менше заданого часу, дія взагалі не буде активована. При паралельному виконанні скидання в процесі відліку часу (на іншому кроці з класификатором **R**) дія не буде активована



SD – збережена і відкладена дія (Stored and Delayed) – активується через заданий проміжок часу після активації кроку, навіть у випадку, коли крок уже не активний; проте, якщо в процесі відліку часу виконати скидання (на іншому кроці з класифікатором **R**), дія не буде активована. Активована дія залишається активною до скидання.

Класифікатори **L**, **SL**, **D**, **DS** і **SD** вимагають зазначення константи часу в форматі TIME. Наприклад: D T#10s.

Контрольні запитання

1. Що собою являє мікропроцесор?
2. Яке призначення мікроконтролера?
3. З яких функціональних елементів складається мікроконтролер?
4. Чому мікропроцесори синхронізують тактовими сигналами?
5. Яка головна особливість сучасних мікроконтролерів?
6. Чим відрізняються мікропроцесори з CISC і RISC архітектурою?
7. Що називається адресацією?
8. Які способи адресації використовуються командами мікроконтролерів сімейства PIC16?
9. Які формати команд мікроконтролерів сімейства PIC16?
10. Яким чином використовується банкова будова оперативної пам'яті?
11. Яке призначення регістрів спеціального й загального призначення?
12. Для чого слугують переривання? Яка структура апаратної частини переривань?
13. Які регістри обслуговують переривання в контролерах PIC16?

14. Як здійснити введення дискретного сигналу в мікроконтролер?
15. Як виконати виведення дискретного сигналу на світлодіоди?
16. Як реалізувати управління потужними пристроями за допомогою релейно-контактної схеми?
17. Як здійснити безконтактне управління потужними пристроями?
18. Для чого потрібна гальванічна розв'язка в схемах управління потужними пристроями?
19. Яке призначення програмованих логічних контролерів (ПЛК)?
20. Які технічні засоби входять у склад ПЛК?
21. Що являє собою модульна структура ПЛК?
22. Які головні характеристики ПЛК?
23. Які можливості модуля I-87013?
24. Які існують стандартні способи приєднання термоопорів до модуля I-87013?
25. Яке призначення модуля I-87017?
26. Які діапазони стандартних входних сигналів передбачено в модулі I-87017?
27. Як датчики струму приєднуються до модуля I-87017?
28. Яке призначення модуля I-87054?
29. Що означає поняття "вихід з відкритим колектором"?
30. Що значить "ізолюваний вихід", "ізолюваний вхід"?
31. Які типові способи приєднання до входів модуля I-87054 релейних контактів, виходів ТТЛ логіки, транзисторів?
32. Які типові способи приєднання до виходів модуля I-87054 котушок реле, резистивного навантаження?
33. Які технологічні мови програмування для ПЛК передбачає стандарт МЕК 61131-3?
34. Які особливості мови програмування SFC?
35. Які бібліотечні функції передбачені стандартом МЕК 61131-3 в мові програмування FBD?
36. Які схеми нагадує програма на мові LD?
37. Які конструкції структурного програмування, схожі на мову Паскаль, притаманні технологічній мові ST стандарту МЕК 61131-3?
38. Яку назву має мова програмування асемблер, передбачена стандартом МЕК 61131-3?
39. Чи можна в одному проєкті середовища ISaGRAF використати декілька мов програмування?

40. Для чого призначені класифікатори дій мови SFC?
41. Яка функція класифікатора S (Stored)?
42. Яка особливість класифікатора R (Stored)?
43. Коли деактивується дія кроку з класифікатором L?
44. Коли деактивується дія кроку з класифікатором SL?
45. В якому випадку взагалі не виконується дія активного кроку з класифікатором D?
46. Яка відмінність у виконанні дій кроків з класифікаторами DS і SD?

РОЗДІЛ 12

РЕГУЛЯТОРИ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

Регуляторами називаються автоматичні керуючі пристрої замкнутих систем, що призначені для формування керуючого впливу U на об'єкт управління відповідно до реалізованого в ньому алгоритму управління.

Вхідним сигналом для регулятора замкнутої системи є відхилення ΔX , а вихідним – керуючий вплив U (рис. 12.1).

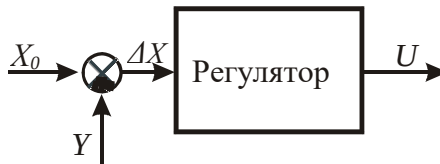


Рис. 12.1. Зображення регулятора на функціональних схемах автоматичних систем

Функціонально необхідним елементом будь-якого регулятора є вимірювальний пристрій, що здійснює формування керуючого сигналу, пропорційного відхиленню ΔX . Усі інші функціональні елементи (підсилювальні, коригувальні і виконавчі пристрої) включаються до складу регулятора у міру необхідності. Іншими словами, регулятор не може працювати без вимірювального пристрою, а без інших пристроїв, взагалі, – може.

Під алгоритмом роботи регулятора розуміють сукупність математичних перетворень, які виконує регулятор над вхідним сигналом ΔX при формуванні керуючого впливу U (вихідного сигналу регулятора).

За видом енергії, що використовується регуляторами для функціонування, їх можна поділити на:

- електронні;
- механічні;
- гідро- і пневмомеханічні.

Для функціонування електронних регуляторів використовується електрична енергія. Основною перевагою таких регуляторів є їхня універсальність. Один і той же електронний регулятор може бути використаний у системах управління різними об'єктами. Наприклад,

електронний регулятор температури може бути використаний як у системах регулювання температури повітря (у теплиці, пташнику, свинарнику), так і в системах регулювання температури пари і води (у паровому і водогрійному котлах), продуктів горіння (у газогенераторах) і т. д.

Електронні регулятори можуть виготовлятися у вигляді електронних схем, а також на базі спеціалізованих комп'ютерів чи мікроконтролерів. Такі регулятори зазвичай виконують функції вимірювальної частини (керуючого пристрою) регулятора в цілому. У ній здійснюється вимірювання відхилення ΔX , корекція отриманого керуючого сигналу відповідно до алгоритму роботи регулятора і перетворення його до необхідного виду.

Для функціонування гідро- і пневмомеханічних регуляторів використовується енергія робочої рідини під високим тиском та енергія стиснутого повітря, відповідно.

За енергетичними ознаками регулятори поділяються на регулятори прямої і непрямой дії.

Регулятор, що містить тільки вимірювальний пристрій, називається *регулятором прямої дії*. Такий регулятор здійснює керуючий вплив U на регулюючий орган об'єкту управління без використання енергії стороннього джерела, тільки за рахунок енергії керуючого сигналу, який формується вимірювальним пристроєм.

Структура такого регулятора має вигляд, показаний на рис. 12.2.

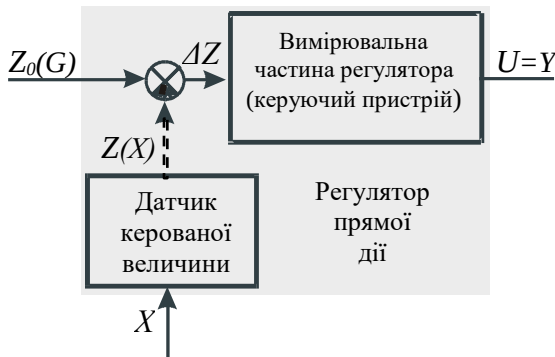


Рис. 12.2. Структура регулятора прямої дії

Як приклад регулятора прямої дії розглянемо регулятор температури, зображений на рис. 12.3. Регулятор містить датчик температури і сильфонний термопривод, з'єднані трубою так, що їх порожнини утворюють замкнутий контур. Принцип роботи регулятора заснований на використанні енергії теплового розширення середовища у замкнутому контурі. Залежно від діапазону регулювання робочим середовищем, що заповнює сильфон і датчик, може бути рідина, газ, газоконденсатна суміш, та ін.

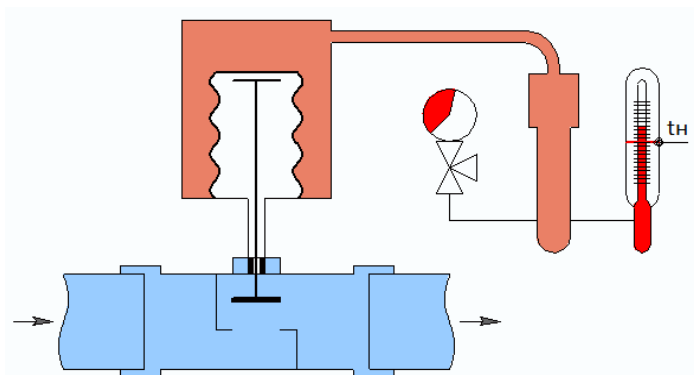


Рис. 12.3. Регулятор температури прямої дії

Датчик регулятора монтується у точці регулювання температури. При нагріванні тиск робочого середовища у замкнутій порожнині (датчик – імпульсна трубка – сильфон) збільшується, а при охолодженні – зменшується. При збільшенні тиску сильфон термоприводу стискається, тисне на шток клапана, закриває затвор і автоматично зменшує потік теплоносія. При зниженні температури середовища тиск в сильфоні знижується і сильфон витягується. Шток регулятора піднімається, відкриває затвор і потік теплоносія збільшується.

Регулятор, у якому зміна стану регулюючого органу об'єкта управління (тобто зміна керуючого впливу U) здійснюється виконавчим пристроєм (механізмом), який входить до його складу, називається *регулятором непрямої дії*.

Структура такого регулятора має вигляд, показаний на рис. 12.4.

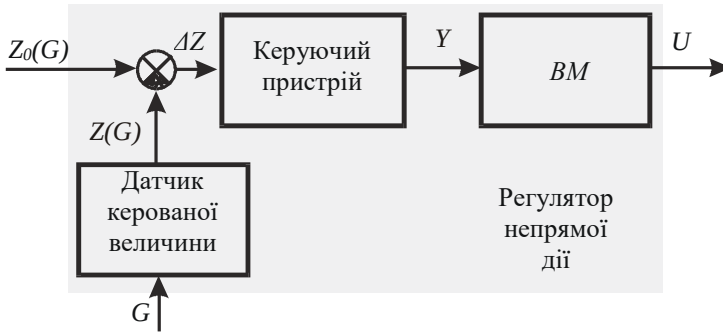


Рис. 12.4. Структура регулятора непрямої дії

За характером зміни керуючого впливу регулятора на об'єкт управління регулятори можна розділити на регулятори неперервної і дискретної дії. У свою чергу регулятори дискретної дії поділяються на позиційні (релейні) та імпульсні регулятори.

У *регуляторах неперервної дії* входні, вихідні, а також усі проміжні сигнали між його елементами є неперервними функціями часу.

За алгоритмом роботи регулятори неперервної дії поділяються на:

- пропорційні, або *П*-регулятори;
- інтегральні, або *I*-регулятори;
- пропорційно-інтегральні, або *ПІ*-регулятори;
- пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори, або *ПІД*-регулятори.

Позиційні (релейні) регулятори дискретної дії при неперервній зміні входного сигналу ΔX забезпечують дискретне формування керуючого впливу на двох або трьох рівнях. Відповідно вони називаються дво- або трипозиційними. У таких регуляторах хоча б один елемент має характеристику дво- або трипозиційного реле.

Статичні характеристики таких регуляторів показані на рис. 12.5.

Імпульсні регулятори містять імпульсний елемент, який при неперервній зміні його входного сигналу формує на виході імпульсний сигнал, один з параметрів якого (амплітуда, фаза, частота або ширина імпульсу), як і в регуляторах неперервної дії,

визначається за відповідним алгоритмом *П*-, *I*-, *ПІ*- або *ПІД* регулятора. Тому імпульсний регулятор за алгоритмом роботи може бути *П*-, *I*-, *ПІ*- або *ПІД* регулятором.

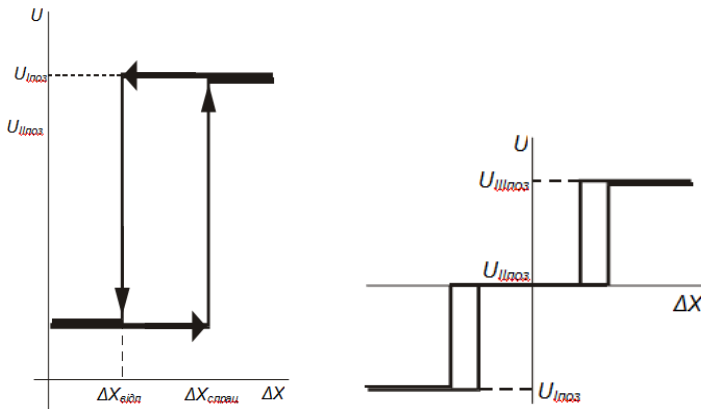


Рис. 12.5. Статичні характеристики 2- і 3-позиційних регуляторів

Імпульсний елемент такого регулятора може здійснювати модуляцію вхідного сигналу:

- за амплітудою (при амплітудно-імпульсній модуляції, скорочено АІМ);
- за фазою (при фазо-імпульсній модуляції, скорочено ФІМ);
- за частотою імпульсів (при частотно-імпульсній модуляції, скорочено ЧІМ);
- за шириною імпульсів (при широтно-імпульсній модуляції, скорочено – ШІМ).

Відповідно такий елемент називається, наприклад, широтно-імпульсний модулятор, амплітудно-імпульсний модулятор і т. д.

Зазвичай модулятор включається на виході керуючого пристрою регулятора. Тому керуючий пристрій імпульсного регулятора можна подати у вигляді сукупності керуючого пристрою неперервної дії (електронного, аналогового або цифрового) і модулятора. Вихідний сигнал такого керуючого пристрою являє собою відповідним чином промодульований імпульсний сигнал. Широтно-модульований керуючий сигнал характеризується параметром $\theta = \frac{\tau}{T} 100\%$, який

називається скважністю, де τ – ширина імпульсів, що залежить від ΔX , а T – період проходження імпульсів.

Найширше практичне застосування знайшли імпульсні електронні регулятори із широтно-імпульсним модулятором.

Статична характеристика керуючого пристрою такого регулятора показана на рис. 12.6.

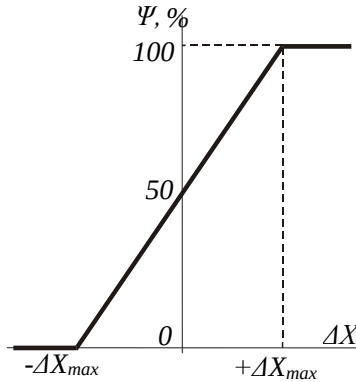


Рис. 12.6. Статична характеристика керуючого пристрою імпульсного регулятора, що здійснює широтно-імпульсну модуляцію керуючого сигналу

Скважність рівноважного режиму (рівноважна скважність) $\theta_{рівн} = 50 \%$. Вона відповідає $\Delta X = 0$.

При використанні регуляторів дискретної дії система автоматичного регулювання стає нелінійною і описується нелінійними рівняннями. Використання нелінійних законів автоматичного регулювання, які описуються нелінійними рівняннями, значно розширює можливості управління якістю процесів регулювання та точності роботи автоматичних систем. Це впливає навіть із загальних міркувань, оскільки область розв'язків нелінійних рівнянь значно ширша і різноманітніша, ніж лінійних.

Незважаючи на те, що загальної теорії нелінійних систем автоматичного регулювання немає, дослідження і досвід застосування окремих видів нелінійних регуляторів говорять про їхню велику практичну ефективність.

Важливою відмінністю нелінійних законів автоматичного регулювання від лінійних є те, що вони надають автоматичній системі принципово нові властивості. Якщо при лінійному законі автоматичного регулювання завжди формується сигнал, пропорційний вхідній змінній або її похідній, то при нелінійному законі може істотно змінюватися сам характер дії автоматичної системи на об'єкт регулювання у залежності від величини вхідного впливу. Іншими словами, якщо для лінійних автоматичних систем зміна величини відхилення ΔX це лише зміна розмірів, але не форми процесів, то у нелінійній автоматичній системі при цьому може істотно змінюватися і форма процесів аж до принципово якісних змін їх характеру включно. Ці особливі властивості нелінійних законів використовуються у техніці автоматичного регулювання.

12.1. *P*-регулятори

P-регуляторами називаються регулятори неперервної дії, які формують керуючий вплив U_P , пропорційний відхиленню ΔX .

P-регулятори можуть бути прямої і непрямої дії. Усі регулятори прямої дії є *P*-регуляторами. Рівняння динаміки регулятора прямої дії має вигляд:

$$U_P = k_{\text{рег}}^P \Delta X. \quad (12.1)$$

Передаточна функція *P*-регулятора прямої дії запишеться як:

$$W_{\text{рег}}^P(p) = k_{\text{рег}}^P. \quad (12.2)$$

Найпростішим пропорційним регулятором може бути звичайний підсилювач із змінним коефіцієнтом підсилення, включений у коло від'ємного зворотного зв'язку відносно об'єкта управління.

Виконавчий механізм, що використовується у регуляторах непрямої дії і служить для переміщення регулюючого органу об'єкта управління, у динамічному відношенні є, зазвичай, інтегруючою ланкою (електродвигунні ВМ та гідроприводи) з передаточною функцією $W_{\text{ВМ}}(p) = \frac{1}{T_{\text{ВМ}} p}$. Для того, щоб отримати пропорційний закон регулювання, частину регулятора, що містить такий ВМ,

охоплюють жорстким від'ємним зворотним зв'язком, який є пропорційною ланкою з передаточною функцією $W_{33}(p) = k_{33}$. Структура такого Π -регулятора наведена на рис. 12.7.

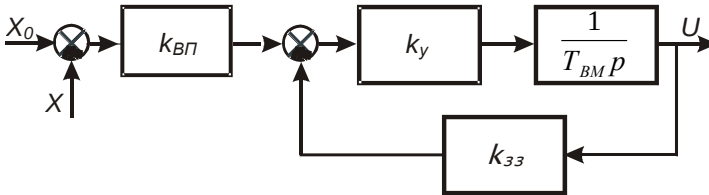


Рис. 12.7. Структура Π -регулятора непрямої дії

Передаточна функція зображеного регулятора визначається формулою:

$$W_{рег}^{\Pi}(p) = \frac{k_{рег}^{\Pi}}{T_{рег}^{\Pi} p + 1}, \quad (12.3)$$

де: $k_{рег}^{\Pi} = \frac{k_{ВП}}{k_{33}}; \quad T_{рег}^{\Pi} = \frac{T_{БМ}}{k_{у} k_{33}}.$

Рівняння динаміки Π -регулятора непрямої дії в цьому випадку буде мати вигляд:

$$U_{\Pi} = \frac{k_{рег}^{\Pi}}{T_{рег}^{\Pi} p + 1} \Delta X. \quad (12.4)$$

Отже, як випливає з (12.3), Π -регулятор непрямої дії за динамічними властивостями є інерційною ланкою. Чим більша постійна часу такого регулятора $T_{рег}^{\Pi}$, тим більше динамічне запізнення при спрацюванні регулятора (менша його швидкодія, рис. 12.8) і гірші динамічні властивості замкненої системи з таким регулятором (більший час регулювання t_p), і навпаки. Для зменшення постійної часу $T_{рег}^{\Pi}$ доцільно використовувати більш швидкодіючі ВМ, які мають менше значення $T_{БМ}$.

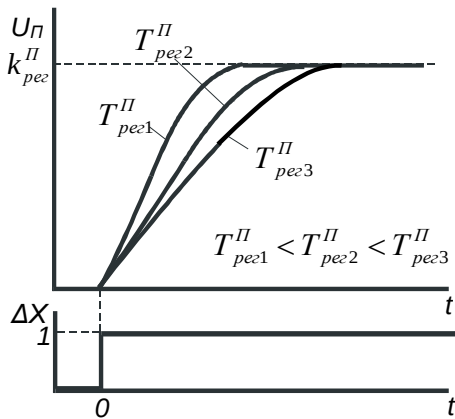


Рис. 12.8. Перехідні характеристики Π -регулятора непрямої дії

Зі збільшенням коефіцієнта зворотного зв'язку $k_{зз}$ постійна часу регулятора T_{Π}^{Π} зменшується і швидкодія регулятора збільшується, а час регулювання в системі зменшується. Однак, варто враховувати, що при збільшенні $k_{зз}$ одночасно зменшується коефіцієнт підсилення регулятора k_{Π}^{Π} . Враховуючи, що інерційна ланка є статичною, зменшення k_{Π}^{Π} викликає збільшення статизму замкнутої системи, тобто збільшення статичної похибки при однакових рівнях збурень F . Для компенсації зменшення k_{Π}^{Π} через збільшення $k_{зз}$ необхідно збільшувати коефіцієнт підсилення $k_{ВП}$.

Основною перевагою Π -регулятора є його висока швидкодія. Внаслідок цього при виникненні відхилення ΔX у результаті дії збурення F регулятор відразу ж (без запізнення) формує пропорційно ΔX керуючий вплив U_{Π} на об'єкт управління. Одночасно з появою ΔX регулятор починає протидіяти збільшенню відхилення і величина максимального відхилення X від X_0 під час перехідного процесу зменшується. Інтенсивність протидії статичної частини регулятора визначається його коефіцієнтом підсилення k_{Π} . Чим більший k_{Π} , тим регулятор більш інтенсивно протидіє збільшенню ΔX . Максимальне відхилення X від X_0 стає меншим, час регулювання зменшується. Якість перехідного процесу при цьому поліпшується, і

динамічні властивості системи покращуються.

До числа недоліків Π -регулятора слід віднести його статизм, який викликає появу статизму замкненої системи. Поява статизму пояснюється так. Для стабілізації вихідної величини X на заданому рівні X_0 при різних рівнях збурень F_i регулятор повинен установлювати відповідні значення керуючого впливу U_{Π} . Як видно з рівняння динаміки Π -регулятора, його керуючий вплив U_{Π} на ustalених режимах може змінитися тільки за рахунок зміни ΔX . Дана обставина і є причиною виникнення статизму замкнених систем, який проявляється у тому, що різним рівням F_i на ustalених режимах роботи системи будуть відповідати різні значення $\Delta X_{уст}$.

Статизм δ виражається у відсотках і визначається за формулою, рис. 12.9:

$$\delta = \frac{X_0(t) - Y_{\infty}(t)}{Y_{\infty}(t)} \times 100\% \quad (12.5)$$

У статичній відносно керуючого впливу системі при впливі, який з часом прямує до певного значення, похибка також прямує до постійного значення, яке залежить від значення керуючого впливу. Тобто, статична система не може забезпечити постійне значення регульованої величини при змінному навантаженні.

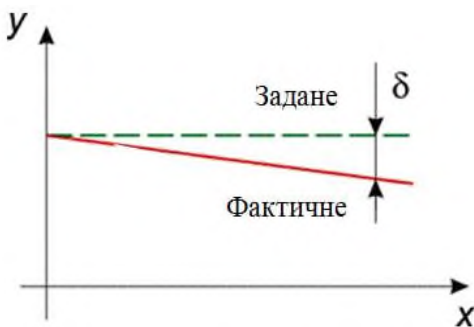


Рис. 12.9. Статична похибка

Говорячи про статичну похибку регулювання вважають, що після кожної зміни зовнішнього збурення, навантаження або відхилення від заданого режиму роботи, що викликається іншими причинами, в системі знову встановлюється постійне значення регульованої величини, взагалі то інше, ніж було раніше, але постійне, яке далі залишається незмінним.

Статична система має нульовий порядок астатизму. Це означає, що в прямому каналі системи немає інтегруючих ланок. Вона може містити тільки статичні ланки: підсилюючі, інерційні, форсуючі або коливальні.

12.2. *I*-регулятори

Для того, щоб позбавитись цього недоліку були створені автоматичні системи непрямої дії, у яких між чутливим елементом і регулюючим органом включається додаткова ланка, яка у більшості випадків виконує операцію інтегрування похибки регулювання і працює від незалежного джерела енергії. За динамічними властивостями така ланка є інтегруючою. Це може бути електродвигун постійного або змінного струму, гідравлічний або пневматичний сервомотор і т.п.

Інтегральними називаються регулятори, які формують керуючий вплив U_I пропорційно інтегралу від відхилення ΔX . Рівняння динаміки такого регулятора має вигляд:

$$U_I = k_{pez}^I \int_0^t \Delta X dt, \quad (12.6)$$

де k_{pez}^I – коефіцієнт підсилення *I*-регулятора, що характеризує його швидкодію і має розмірність c^{-1} .

В операційному вигляді інтегральне рівняння (12.6) запишеться так:

$$U_I = \frac{k_{pez}^I}{p} \Delta X. \quad (12.7)$$

Передаточна функція *I*-регулятора визначається формулою:

$$W_{pez}^I(p) = \frac{k_{pez}^I}{p} = \frac{1}{T_I p}, \quad (12.8)$$

де $T_I = \frac{1}{k_{рег}^I}$ – постійна часу I -регулятора, рівна оберненій величині

його коефіцієнта підсилення $k_{рег}^I$, що також характеризує швидкодію I -регулятора (рис. 12.10) і має розмірність часу [с]. Характеристики ідеального I -регулятора наведені на рис. 12.10.

Перехідний процес у автоматичній системі з I -регулятором характеризується відсутністю статичної помилки регулювання і найбільшим у порівнянні з іншими законами регулювання значенням динамічного відхилення регульованої величини від усталеного значення. У такому вигляді I -регулятори на практиці не застосовуються, тому що вони мають незадовільні динамічні властивості і в більшості випадків сприяють виникненню у системі незатухаючих коливань.

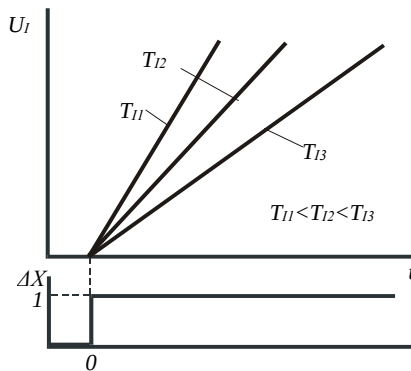


Рис. 12.10. Перехідні характеристики ідеального I -регулятора з різними значеннями T_I

В реальних I -регуляторах завжди є запізнення, тому їх можна подати як дві послідовно з'єднані ланки, одна з яких є ідеальною інтегруючою з передаточною функцією (12.8), а інша – інерційною з передаточною функцією:

$$W(p) = \frac{1}{T_{pec} p + 1}. \quad (12.9)$$

Тому загальна передаточна функція реального I -регулятора буде дорівнювати добутку передаточних функцій (12.8) і (12.9), тобто:

$$W_{pec}^I(p) = \frac{1}{T_I p (T_{pec} p + 1)}. \quad (12.10)$$

Перехідні характеристики реального I -регулятора з різними значеннями T_{pec} , що характеризують його інерційність, показані на рис. 12.11.

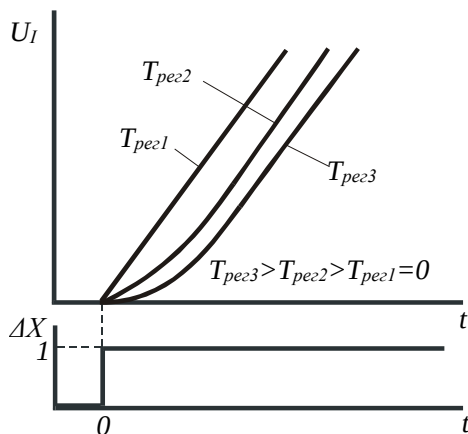


Рис. 12.11. Перехідні характеристики реального I -регулятора

Інтегральний закон регулювання найлегше отримати, використовуючи в регуляторах астатичні ВМ (рис. 12.12), які в динамічному відношенні являють собою інтегруючі ланки, не охоплені зворотними зв'язками, за умови, що інші ланки регулятора є статичними.

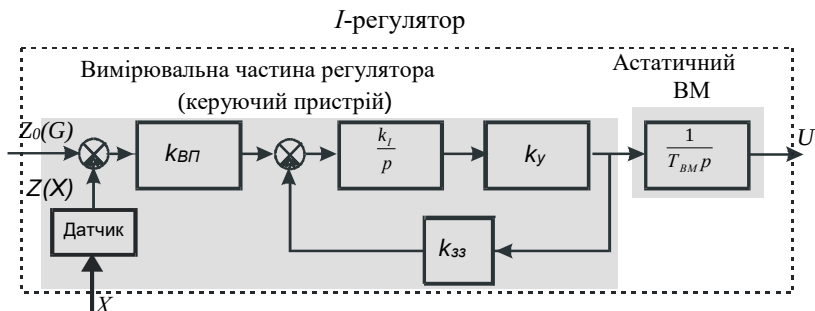


Рис. 12.12. Структура I-регулятора з астатичним ВМ

I-регулятор можна побудувати і зі статичним ВМ, який має передаточну функцію інерційної ланки:

$$W_{BM}(p) = \frac{k_{BM}}{T_{BM}p + 1}.$$

При цьому вимірювальна частина регулятора повинна містити інтегруючу ланку, не охоплену зворотним зв'язком (рис. 12.13). І в тому і в іншому випадку передаточні функції розглянутих регуляторів будуть мати вигляд передаточної функції реального I-регулятора (12.10).

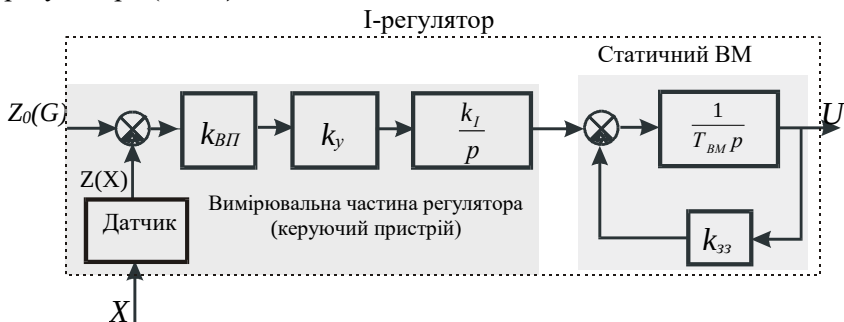


Рис. 12.13. Структура I-регулятора зі статичним ВМ

Для усталеного режиму роботи I-регулятора, при якому $U_I = \text{const}$, необхідно, щоб його вхідний сигнал ΔX був рівний нулю. У

противному випадку, тобто при $\Delta X \neq 0$, виникає неусталений режим роботи, при якому вихідний сигнал I -регулятора U_I буде змінюватися з часом.

Отже, в замкнутій системі з I -регулятором при усталених режимах роботи статична похибка δ завжди дорівнює нулю. Ця обставина є основною перевагою I -регулятора.

До числа його недоліків варто віднести труднощі забезпечення задовільних динамічних характеристик замкнутих систем. Це пояснюється тим, що інтегруючі ланки є фазозатримуючими, і їх вихідні сигнали відстають за фазою від вхідних. Внаслідок цього керуючий вплив I -регулятора U_I завжди на 90° відстає за фазою від вхідного сигналу регулятора ΔX . При великих значеннях T_I (при невисокій швидкодії регулятора) перехідний процес виходить аперіодичним з великим часом регулювання. У деяких випадках це є небажаним і неприйнятним. Збільшення швидкодії регулятора за рахунок зменшення T_I (збільшення k_{reg}^I) спочатку може викликати зменшення часу регулювання при збереженні того ж характеру перехідного процесу. Однак, подальше зменшення T_I викликає коливальність перехідного процесу, тим більшу, чим менший T_I (більше k_{reg}^I) при практично постійному часі регулювання.

12.3. PI -регулятори

Як було показано вище, статична автоматична система не може бути абсолютно точною, якщо мати на увазі рівну нулю статичну похибку, а інтегральні регулятори сприяють виникненню коливальних режимів. Поліпшення роботи автоматичних систем можна досягнути, використовуючи пропорційно-інтегральні регулятори (PI -регулятори).

PI -регуляторами називаються регулятори, які формують керуючий вплив U_{PI} , що включає в себе пропорційну U_P та інтегральну U_I складові, тобто:

$$U_{PI} = U_P + U_I. \quad (12.11)$$

Під час регулювання PI -регулятори здійснюють дві дії: одну, характерну для P -регулятора, отже, можна говорити про P -складову процесу регулювання, і другу, яка здійснює інтегрування величини відхилення – інтегральну складову.

Підставивши вираз (12.1) і (12.6) у (12.11), отримаємо рівняння динаміки ідеального *III*-регулятора з інерційністю у вигляді:

$$U_{III} = \left(\frac{k_{рег}^{II}}{T_{рег}^{II} p + 1} + \frac{k_{рег}^I}{p} \right) \Delta X, \quad (12.12)$$

З рівняння 12.12 випливає, що передаточна функція *III*-регулятора визначається формулою:

$$W_{рег}^{III}(p) = \frac{k_{рег}}{T_{рег} p + 1} \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right). \quad (12.13)$$

де введені наступні позначення:

$k_{рег} = k_{рег}^{II} + k_{рег}^I T_{рег}^{II}$ – коефіцієнт підсилення регулятора;

$T_{рег} = T_{рег}^{II}$ – постійна часу, яка характеризує інерційність *III*-регулятора;

$T_I = \frac{k_{рег}^{II} + k_{рег}^I T_{рег}^{II}}{k_{рег}^I}$ – постійна часу ізодрому, що характеризує

швидкодію інтегральної складової U_I керуючого впливу *III*-регулятора. Перехідні характеристики *III*-регулятора наведені на рис. 12.14.

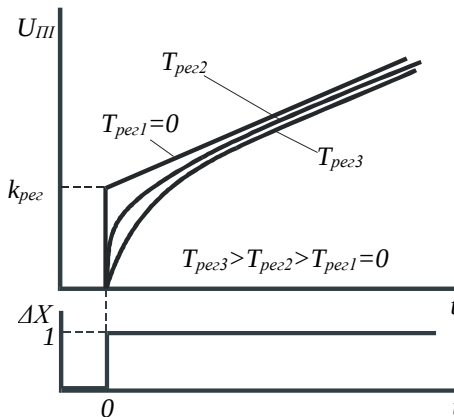


Рис. 12.14. Перехідні характеристики *III*-регулятора при різних значеннях $T_{рег}$

Реалізувати пропорційно-інтегральний закон регулювання можна використавши одну із структур, наведених на рис. 12.15.

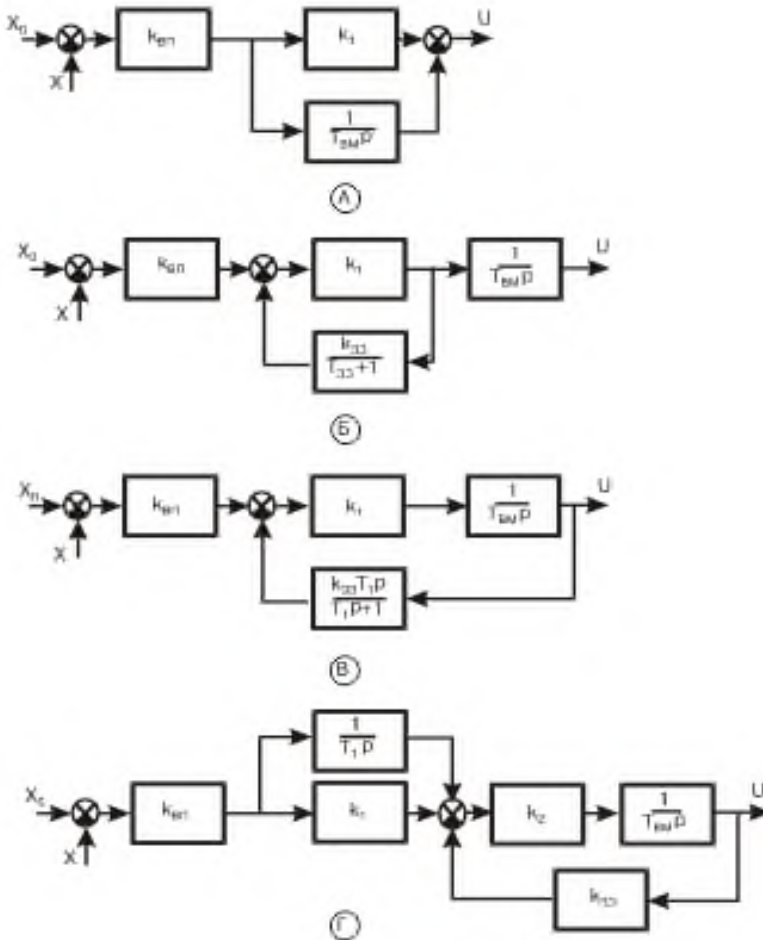


Рис. 12.15. Можливі структури *ПІ*-регуляторів

ПІ-регулятор, зображений на рис. 12.15, А реалізується шляхом включення інтегруючої ланки (іздромного виконавчого пристрою у вигляді електродвигуна чи астатичного гідроприводу) паралельно до

статичної частини регулятора. При цьому $k_{pec} = k_{pec} k_I, T_I = k_I T_{BM}$.

Статична частина зображеного на цьому рисунку регулятора, що містить ланки з передаточними функціями $k_{БП}$ і k_I , при виникненні відхилення ΔX спрацьовує так само, як у вищеприведеного ІІ-регулятора. У результаті її спрацювання виникає статична похибка δ . На початку перехідного процесу статична похибка починає ліквідуватися за рахунок спрацювання астатичної частини регулятора, що містить ланки з передаточними функціями $k_{БП}$ і $1/T_{БМР}$. Астатична частина регулятора, змінюючи складову U_I зі швидкістю, пропорційною ΔX , наприкінці перехідного процесу забезпечує $\delta=0$. Швидкість зміни U_I визначається постійною часу T_I (чи $k'_{ПЕР}$).

Т. ч., ІІІ-регулятор поєднує в собі переваги пропорційних та інтегральних законів автоматичного регулювання, а саме: пропорційна складова забезпечує достатню швидкодію регулятора, а інтегральна складова ліквідує статичну помилку регулювання.

Автоматична система у якій $\delta=0$ є астатичною. Автоматична система називається *астатичною*, якщо при будь-якому постійному задаючому чи збурюючому впливі усталена похибка відтворення регульованої величини дорівнює нулю і не залежить від величини цього впливу.

Астатичні системи можуть бути першого, другого і більш високого порядку астатизму. Астатична система першого порядку не має усталеної похибки регульованої величини, проте має постійну похибку за швидкістю і зростаючу похибку за прискоренням.

Астатична система другого порядку не має усталеної похибки відтворення регульованої величини і похибки за швидкістю, проте має постійну похибку за прискоренням.

Автоматична система буде астатичною відносно керуючої дії, якщо при зовнішньому збуренні, що прямує до усталеного значення, похибка регулювання прямує до нуля незалежно від значення зовнішнього збурення.

Якщо мати на увазі відсутність статичної похибки регулювання, то така автоматична система є абсолютно точною. Але, як показує досвід, у такій системі важко отримати задовільні динамічні показники якості регулювання. Це обумовлено тим, що відхилення ΔX має наближатися до нового усталеного стану з нульовою швидкістю. Інакше в системі виникають незгасаючі коливання

регульованої величини. Загалом, можливості застосування таких автоматичних систем досить обмежені.

Статичні системи зазвичай мають менш складні конструктивні рішення, ніж астатичні. Вони мають усталену похибку відтворення регульованої величини при різних зовнішніх збуреннях. Зміна регульованої величини, яка викликає у статичній системі переміщення регулюючого органу з одного крайнього положення в інше, є важливою характеристикою статичної системи і називається її нерівномірністю. Відношення цієї нерівномірності до номінального значення регульованої величини називають ступенем нерівномірності (коефіцієнтом статизму або статизмом).

Астатична система першого порядку має один інтегратор у прямому каналі регулювання. Після завершення перехідного процесу точність регулювання забезпечується завдяки властивостям інтегратора як запам'ятовуючого пристрою.

При введенні у автоматичну систему двох інтегруючих ланок система стає астатичною другого порядку, що дозволяє здійснювати управління за прискоренням. Система з астатизмом другого порядку завдяки властивостям інтеграторів точно відтворює в усталеному стані постійні і лінійно зростаючі впливи. Впливи ж, що змінюються з постійним прискоренням, система відтворює з постійною динамічною похибкою, яка називається похибкою за прискоренням.

У *III*-регуляторах астатична частина зазвичай виконується ізодромною, швидкість спрацьовування якої не залежить від ΔX і є постійною зі знаком, який визначається знаком ΔX . Рівняння динаміки астатичної ізодромної частини регулятора має вигляд:

$$U_I = \frac{k_{\text{рег}}^I}{p} \text{sign}(\Delta X). \quad (12.14)$$

Аналогічно, неважко встановити, що регулятор зі структурною схемою, рис. 12.15, Б, має передаточну функцію:

$$W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{рег}} \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right) \times \frac{k_{\text{рег}}}{T_I p + 1} = W_{\text{рег}}^{\text{III}}(p) W_B(p), \quad (12.15)$$

$$\text{де } k_{pez} = \frac{k_{BP} k_1 T_{33}}{T_{BM} (1 + k_{33} k_1)}; T_I = T_{33}; T_B = \frac{T_{33}}{1 + k_{33} k_1}.$$

Тобто, регулятор може бути поданий як ідеальний *III*-регулятор, послідовно з'єднаний з баластною інерційною ланкою, постійна часу якої дорівнює T_B .

Передаточні функції регуляторів зі структурними схемами, що показані на рис. 12.15 *Б* і *Г*, також можуть бути подані виразами (12.13). Коефіцієнт підсилення регулятора і постійні часу регулятора зі структурою, рис. 12.15, *Б*, визначаються формулами:

$$k_{pez} = \frac{k_{BP} k_1 T_1}{T_{BM} + k_{33} k_1 T_1}; T_I = T_1; T_B = \frac{T_1 T_{BM}}{T_{BM} + k_{33} k_1 T_1}. \quad (12.16)$$

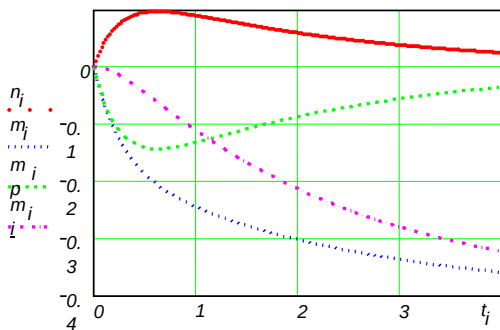
Відповідно, для регулятора зі структурою, представленою на рис. 12.15, *Г*, вирази будуть такими:

$$k_{pez} = \frac{k_{BP} k_1}{k_{33}}; T_I = T_1 k_1; T_B = \frac{T_{BM}}{k_{33} k_2}. \quad (12.17)$$

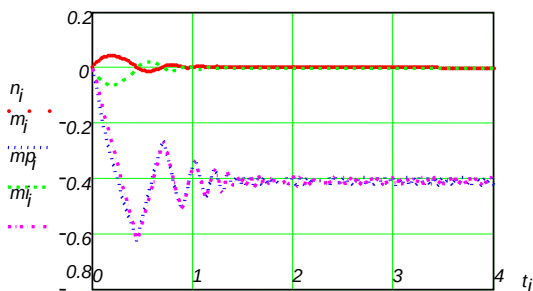
Недоліком схем, рис. 12.15 *Б* і *В* є те, що при настроюванні постійної часу ізодрому T_I одночасно змінюється і коефіцієнт регулятора $k_{PEГ}$, залежний від T_I . У зв'язку з цим, при оптимальному настроюванні астатичної частини регулятора шляхом зміни постійної часу T_1 ланки зворотного зв'язку необхідно щоразу виконувати налаштування його статичної частини шляхом зміни коефіцієнта підсилення вимірювального пристрою k_{BP} . При збільшенні постійної часу ізодрому T_1 збільшується і постійна часу баластної ланки T_B , що також є недоліком схеми.

Параметри настроювання регулятора зі структурною схемою рис. 12.15, *Г* такої взаємозалежності не мають, що видно з формул (12.13).

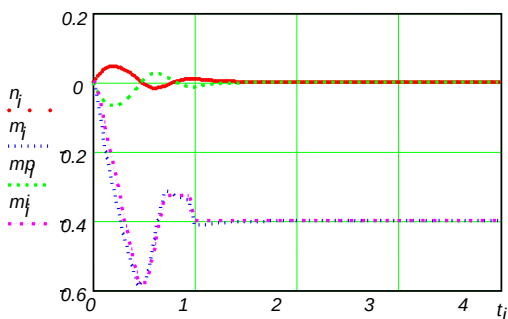
На рис. 12.16, *А*, *Б* і *В* наведені перехідні процеси в САР, яка містить інерційний об'єкт, і *А* – ідеальний *III*-регулятор, а *Б* і *В* – ізодромний *III*-регулятор.



А



Б



В

Рис. 12.16. Перехідний процес САР з інерційним об'єктом і ПІ-регулятором:

А – ідеальний ПІ-регулятор; Б – ізодромний ПІ-регулятор;

В – ізодромний ПІ-регулятор із зоною нечутливості

Як видно з наведених рисунків, характери протікання процесів при стрибкоподібній зміні збурення F у цих САР істотно відрізняються. Це, насамперед, пояснюється тим, що надлишки керуючого впливу в САР з ізодромним регулятором значно більші, ніж у САР з ідеальним регулятором. (Під надлишками керуючого впливу розуміють різницю ΔU між поточним значенням впливу U_m і впливом U_f , що відповідає умові $\Delta X=0$ при новому поточному значенні збурення F_m). Крім цього, в системі з ізодромним регулятором в усталеному режимі роботи мають місце коливання керуючого впливу, що обумовлено релейністю статичної характеристики елемента управління ВМ регулятора. Зменшення коливальності перехідного процесу і зменшення часу його протікання (рис. 12.16, *В*) можна домогтися введенням зони нечутливості у статичну характеристику елемента управління ВМ так, як показано на рис. 12.17. Процес, отриманий при введенні зони нечутливості, рівної $0,01$, показаний на рис. 12.16, *В*.

Постійна швидкість спрацювання астатичної частини ізодромного Π -регулятора забезпечується за рахунок спеціально вибраної статичної характеристики елемента управління ВМ, як показано на рис. 12.17.

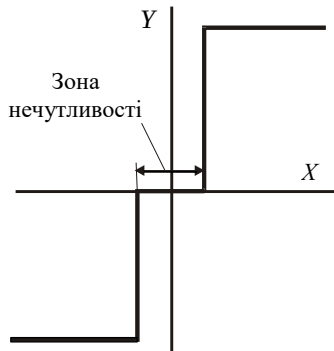


Рис. 12.17. Статична характеристика елемента управління ВМ ізодромного Π -регулятора

12.4. ПІД-регулятори

Позитивні якості всіх розглянутих автоматичних систем об'єднує пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання або ПІД-закон. Для формування керуючої дії за цим законом додатково

використовується похідна від сигналу відхилення ΔX . ПІД-регуляторами називаються регулятори, які формують керуючий вплив $U_{ПІД}$, що включає в себе три складові:

- пропорційну $U_{П}$;
- інтегральну U_I ;
- диференціальну U_D .

Тобто, керуючий вплив регулятора формується згідно виразу:

$$U_{ПІД} = U_{П} + U_I + U_D. \quad (12.18)$$

Остання складова U_D пропорційна похідній від відхилення:

$$U_D = k_{рег}^D \frac{d\Delta X}{dt} = k_{рег}^D p\Delta X. \quad (12.19)$$

Завдяки впливу U_D за похідною від відхилення здійснюється випередження формування керуючої дії, а завдяки впливу за інтегралом від відхилення знімається статична похибка регулювання. Тобто, такі регулятори працюють з випередженням і вступають у дію тоді, коли відхилення ще не відбулося, що дозволяє скоротити час перехідного процесу.

ПІД-регулятор поєднує в собі переваги розглянутих раніше законів автоматичного регулювання:

- високу швидкодію завдяки наявності пропорційної складової;
- високу точність завдяки інтегральній складовій;
- малий час перехідного процесу завдяки диференціальній складовій.

Цей регулятор на початку перехідного процесу, викликаному зміною навантаження, працює як ПІ-регулятор, що є сприятливим для динамічних властивостей системи, а потім під час перехідного процесу, дія зворотного зв'язку слабшає, що дозволяє уникнути статичної похибки. Такий зворотній зв'язок називається гнучким зворотним зв'язком. Незалежно від зміни збурення на усталених режимах роботи регульована величина залишається незмінною.

Підставивши $U_{П}$, U_I і U_D у рівняння (12.18), отримаємо рівняння динаміки ПІД-регулятора:

$$U_{ПД} = \frac{k_{рег}}{T_{рег} p + 1} \left(1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right) \Delta X. \quad (12.20)$$

Тоді передаточна функція ПД-регулятора буде мати вигляд:

$$W_{рег}^{ПД}(p) = \frac{k_{рег}}{T_{рег} p + 1} \left(1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right), \quad (12.21)$$

$$\text{де: } T_I = \frac{k_{рег}^П}{k_{рег}^I}; \quad T_D = \frac{k_{рег}^Д}{k_{рег}^П}.$$

Передаточна функція ПД-регулятора (рис. 12.18, А) визначається формулою:

$$W_{рег}^{ПД}(p) = \frac{k_{БП}}{T_{БМ} p \left(1 + \frac{k_1 k_{33}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \right)}. \quad (12.22)$$

Виділивши передаточну функцію ідеального ПД-регулятора отримаємо:

$$W_{рег}^{ПД}(p) = k_{рег} \left(1 + T_D p + \frac{1}{T_I p} \right) \frac{1}{(T_{Б2} p)^2 + T_{Б1} p + 1}, \quad (12.23)$$

де:

$$k_{рег} = \frac{k_{БП} k_1 (T_1 + T_2)}{(1 + k_{33} k_1) T_{БМ}};$$

$$T_I = T_1 + T_2;$$

$$T_D = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2};$$

$$T_{Б1} = \frac{T_1 + T_2}{1 + k_{33} k_1};$$

$$T_{Б2} = \sqrt{\frac{T_1 T_2}{1 + k_{33} k_1}}.$$

Отже, реальний ПД-регулятор зі структурою, рис. 12.18, А в динамічному відношенні можна подати як ідеальний ПД-регулятор, з'єднаний послідовно з баластною ланкою другого порядку.

Відношення:

$$\frac{T_{Б1}}{T_{Б2}} = \frac{(T_1 + T_2)}{\sqrt{T_1 T_2 (1 + k_{33} k_1)}},$$

баластної ланки практично завжди встановлюється рівним 2, тому що значення коефіцієнтів k_1 і k_{33} вибираються досить великими для зменшення постійних часу баластної ланки $T_{Б1}$ і $T_{Б2}$ і зниження за рахунок цього динамічної похибки при спрацюванні регулятора. Однак, при цьому баластна ланка в динамічному відношенні стає коливальною ланкою.

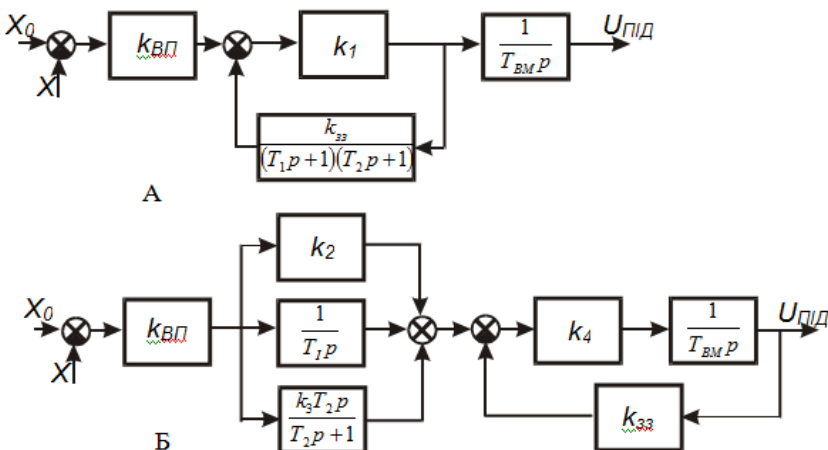


Рис. 12.18. Структура ПД-регулятора зі статичним ВМ

Перехідна характеристика розглянутого ПД-регулятора наведена

на рис. 12.19, А.

Проведені дослідження свідчать про те, що можливості налагодження параметрів регулятора розглянутої структури дуже обмежені. Налаштування регулятора ускладнюється тим, що кожен з параметрів, який налагоджується, одночасно впливає на інші складові у виразі (12.23).

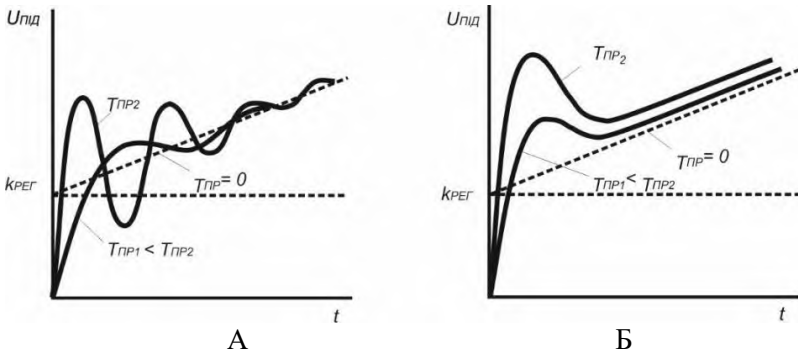


Рис. 12.19. Перехідні характеристики ПІД-регуляторів
 А – із структурою, рис. 12.18, А, Б – із структурою, рис. 12.18, Б

Структура ПІД-регулятора, зображеного на рис. 12.18, Б, відрізняється від розглянутої вище тим, що в ньому паралельно з пропорційною ланкою з передаточною функцією k_2 і інтегруючою ланкою з передаточною функцією $I/T_{ВМ}$ включена реальна диференціююча ланка, яка забезпечує введення в алгоритм роботи регулятора диференціальної складової. Передаточна функція цих ланок і пропорційної ланки з коефіцієнтом підсилення $k_{ВП}$ має вигляд:

$$W_1(p) = k_{ВП} \left(k_2 + \frac{1}{T_1 p} + \frac{k_3 T_2 p}{T_2 p + 1} \right) = \quad (12.24)$$

$$\frac{k_1 (T_2 + k_2 T_1)}{T_1} \left(1 + \frac{T_2 T_1 (k_2 + k_3)}{T_2 + k_2 T_1} p + \frac{1}{(T_2 + k_2 T_1) p} \right) \frac{1}{T_2 p + 1}.$$

Видно, що ПІД-закон управління реалізується тільки розглянутими чотирма ланками, в число яких не входить ВМ

регулятора. При використанні в регуляторі астатичного ВМ інші дві ланки повинні бути охоплені жорстким від'ємним зворотним зв'язком із пропорційною ланкою. Тоді астатичний ВМ перетворюється в статичний. Передаточна функція ВМ визначається формулою:

$$W_2(p) = \frac{\frac{k_4}{T_{BM} p}}{1 + \frac{k_4 k_{33}}{T_{BM} p}} = \frac{1}{k_{33} \left(\frac{T_{BM}}{k_4 k_{33}} p + 1 \right)}. \quad (12.25)$$

В цілому передаточна функція регулятора буде дорівнювати

$$W_{PEG}^{III}(p) = W_1(p)W_2(p) = k_{PEG} \left(1 + T_d p + \frac{1}{T_I p} \right) \frac{1}{(T_{B1} p + 1)(T_{B2} p + 1)}, \quad (12.26)$$

де:

$$k_{PEG} = \frac{k_{BM}(T_2 + k_2 T_1)}{T_1 k_{33}};$$

$$T_d = \frac{T_1 T_2 (k_2 + k_3)}{T_2 + T_1 k_2};$$

$$T_I = T_2 + T_1 k_2;$$

$$T_{B1} = T_2;$$

$$T_{B2} = \frac{T_{BM}}{k_4 k_{33}}.$$

Отже, регулятор, зображений на рис. 12.18, Б, може бути поданий як ідеальний ПИД-регулятор, з'єднаний послідовно з баластною ланкою другого порядку. Перехідна характеристика такого регулятора показана на рис. 12.19, Б.

З виразу (12.26) видно, що баластна ланка в динамічному відношенні є інерційною ланкою другого порядку з дійсними від'ємними коренями $p_1 = -1/T_{B1}$; $p_2 = -1/T_{B2}$. Така ланка не вносить в

алгоритм роботи регулятора коливальної складової. З виразів (12.26) можна знайти максимальне значення відношення T_d/T_1 , яке при $T_1=T_2$ буде дорівнювати:

$$k_{MAX} = \frac{T_d}{T_1} = \frac{k_2 + k_3}{(1 + k_2)^2}. \quad (12.27)$$

Т. ч., у *ПД*-регулятора, зображеного на рис. 12.18, *Б*, немає обмежень у виборі величини відношення постійної часу T_d до постійної часу T_1 . З виразу (12.27) видно, що k_{MAX} , можна змінювати в будь яких необхідних межах за рахунок зміни коефіцієнта k_3 .

Необхідно відзначити, що застосування автоматичних регуляторів з диференціальними складовими незважаючи на їхні переваги не завжди є доцільним, а іноді і неприпустимим. Так, для об'єктів з великим часом запізнення по каналу регулювання вводити вплив за похідною від регульованої величини недоцільно, тому що цей сигнал буде надходити в регулятор із затримкою на час запізнення уже після дії збурення. За цей час в об'єкті управління можуть накопичитися великі відхилення. В таких випадках використання *ПД*-регулятора може призвести до порушення стійкості автоматичної системи.

Розглянемо регулятори, які використовуються в САР параметрами технологічних процесів.

12.5. Електронні регулятори температури

Електронні регулятори температури теплоносія ЕРТ (ТОВ "КатрЛесс", Україна) серій ЕРТ-1; -3; -4; -5 призначені для регулювання температури теплоносія в залежності від температури зовнішнього повітря з корекцією за температурою у приміщенні.

До складу регулятора входять: електронний регулятор температури; блок живлення; термоперетворювач опору; кульовий кран; електропривод обертання кульового крана. Регулятори працюють у комплекті з термоперетворювачем типу ТСМ з номінальною статичною характеристикою 50М, програмним реле часу РВП-Н1 з тижневою (добовою) програмою, електроприводами LR24A-S (SR24A-S).

Блок ЕРТ, рис. 12.20, спільно з електроприводом і кульовим краном утворює незалежний *ПД*-регулятор, який дозволяє регулювати і підтримувати на заданому рівні температуру в системі опалення. На лицьовій панелі електронного блоку розташовані

кнопки для налаштування і керування. Забезпечується корекція постачання тепла на опалення за заданою програмою з використанням програмного реле часу.

Кульовий кран повертається електроприводом обертального типу, який управляється ЕРТ. Лінійна залежність величини потоку від кута повороту кульового крана досягається установкою у вхідному отворі корекційного диску.

Технічні характеристики двоходового кульового крана:

Робоче середовище	вода, вода з антифризом $\leq 50\%$ від обсягу.
Температура середовища, °C	+5 ... 100.
Умовний тиск, кПа	1600 (PN 16).
Робочий тиск, кПа	1400.
Перепад тиску, кПа	350 (200 - безшумна робота).
Величина витoku А-АВ	герметичний при $p \leq 1400$ кПа.
Трубне з'єднання муфтове	ISO7/1.
Кут повороту, град.	90.

Технічні характеристики електроприводів LR24A-S (SR24A-S):

Напруга живлення, В (Гц)	~ 24, (50...60).
Споживана потужність, Вт	1 (2).
Кабель, м	1 (довжина), $3 \times 0,75 \text{ мм}^2$.
Ручне управління	кнопка-важіль (самоповернення).
Обертаючий момент, Нм min	20 (5 при номін. напр.).
Кут повороту, град.	90.
Час повного повороту, с	90.
Індикація положення	механічна.
Температура середовища, °C	-10 ... 120.
Клас захисту	IP 54/III.
Вага, кг	0,55 (без крана).

Технічні характеристики блоку електронного регулятора:

Напруги живлення, В	~ 24 (0,5 А), ~ 12 (0,2 А);
Габарити, мм	100x70x60;
Маса, кг не більше	0,1.

Вимірювачі-регулятори ВР-10 (ТзОВ «Термомір», Україна) відносяться до вимірювачів-регуляторів з широким спектром застосування та гнучкою конфігурацією. Вони призначені для

вимірювання, регулювання та/або сигналізації як температури (у комплекті з вимірювальними перетворювачами температури) так і інших фізичних величин.

Регулятори працюють у комплекті з:

- термоперетворювачами опору 50М, 100М, 50П, 100П (Pt100), Pt500, Pt1000, РТС, NTC та ін.;
- перетворювачами термоелектричними 50М, 100М, 50П, 100П (Pt100), Pt500, Pt1000, РТС, NTC та ін.;
- перетворювачами з аналоговим вихідним сигналом: постійного струму 0-5 мА, 0-20 мА, 4-20 мА; напруги постійного струму: 0-0,1 В, 0-1 В, 0-10 В.
- цифровими перетворювачами або перетворювачами інших фізичних величин з вихідним сигналом струму та напруги постійного струму.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірюваних температур, °С	-200...+2000 (залежно від НСХ).
Похибки вимірювання для, °С	термоперетворювачів опору $\pm(0,02...1)$; термоелектричних перетворювачів $\pm(0,1...3)$; перетворювачів з аналоговим вихідним сигналом, % $\pm(0,05...0,25)$.
Ціна найменшого розряду	0,001; 0,01 або 0,1.
Напруга живлення, В	=9...24 (36); ~220 (9...36), 50 Гц.

Вимірювачі-регулятори забезпечують:

- дво-, трипозиційне або ППД-регулювання;
- регулювання в режимі таймера;
- ППД-регулювання засувками.

Виходи:

- контакти реле на 220 В, 0,5-1 А змінного струму (можливо до 7 А);
- оптосимісторний вихід на одну або три фази для керування потужними тиристорами (симісторами);

- транзисторний ключ;
- аналоговий вихід;
- потужний симісторний (тиристорний) вихід на навантаження 2,5 кВт (або більше).

Регулятори можуть оснащуватись інтерфейсами RS-485, RS-232, USB, архіваторами та ін.

Основні конструктивні виконання регуляторів ВР: щитове (корпус Щ), настінне (корпус В), настільне (корпус Л), на DIN-рейку (корпус Р), у вигляді вставного блоку (корпус Б). Зовнішній вигляд ВР-10 наведено на рис. 12.21.

Регулятор температури і вологості повітря РТВ-109 (ТзОВ "Термомір", Україна) виконаний на базі вимірювача-регулятора ВР-10. Призначений для індикації та регулювання температури та вологості. Складається з двоканального вимірювача-регулятора та вимірювальних перетворювачів температури та вологості (ємнісного). Покази температури та вологості по чергово відображаються на індикаторі приладу. Варіанти реалізації виходів – ті ж самі, що і для регулятора ВР-10. Зовнішній вигляд РТВ-109 показано на рис. 12.21.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірювання відносної вологості, % RH	0...99 (без конденсації).
Діапазон вимірювання температури, °C	-19...+65; -19...+85; -40...+120 (залежно від перетворювача)
Гранична абсолютна похибка вимірювання:	
відносної вологості, %RH	± (3...5);
температури Т повітря, °C	± (1+0,01 T).
Напруга живлення, В:	
джерела постійного струму	24 (12);
джерела змінного струму	
частотою 50 Гц	220 (9; 12).

Примітка. Решта характеристик співпадають з характеристиками ВР-10.

Регулятор температури РТБ-2 (ТОВ "АПЕЛ") призначений для управління нагрівальними елементами або холодильним компресором. Він може застосовуватися для підтримки температури в системах опалення з електричними нагрівачами, накопичувальних водонагрівачах, овочесховищах і т. д.

Регулятор вимірює температуру середовища за допомогою цифрового датчика температури, який поставляється в комплекті, порівнює виміряне значення з встановленим і на підставі цих даних управляє електронагрівачами або холодильним обладнанням.

Індикатор регулятора представляє собою 8-розрядний семисегментний РК індикатор, що відображає режим роботи регулятора, стан вихідного реле, напрямок регулювання і температуру. Для управління роботою регулятора використовуються 4 кнопки. Регулятор виконаний в стандартному корпусі для монтажу в електротехнічні шафи з кріпленням на DIN рейку.

Регулятор РТБ-2 працює в діапазоні температур навколишнього середовища від -20 до +50 °С і відносної вологості повітря до 80 % (при температурі 35 °С). Живлення приладу (виконавчого механізму і первинного перетворювача) підключають за допомогою роз'ємного контакту. Основні технічні дані приладу РТБ-2 наведені в табл. 12.1.

Таблиця 12.1.

Технічні характеристики приладу РТБ-2

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Діапазон вимірювання температур, °С	-55...125
Точність вимірювання, °С	±1
Точність задавання температури, °С	±1
Напруга живлення, В	220
Частота, Гц	50
Споживана потужність, Вт	5
Максимальний струм комутації, А	5 (при 220 В, 50 Гц)
Габарити, мм	77×96×25
Маса, кг	0,2

Електронний регулятор опалення типу "Електроніка Р-1М" призначений для автоматичного регулювання температури води в системах опалення. Пристрій складається з електронного блоку

керування, перетворювачів температури змішаної води в системі опалення і зовнішнього повітря, виконавчого механізму та струменевого насоса з регульованим прохідним перетином сопла.

Регулювання температури змішаної води в залежності від температури зовнішнього повітря здійснюється автоматично відповідно до заданого температурного графіка подачі теплоти для даного кліматичного району і конкретного приміщення. Графік подання теплоти за температурою встановлюється відповідними ручками для настроювання на електронному блоці. Також передбачена можливість зниження температури змішаної води щодо заданого графіка подачі теплоти.

Конструкція пристрою опалення "Електроніка Р-1М" при необхідності дозволяє підключати програмні пристрої типу 2РВМ і працювати за обраною програмою, яка забезпечує зниження температури в помешканні при відсутності в ньому людей чи тварин.

Основні технічні дані електронного пристрою:

Максимальний тиск робочого середовища, МПа	1,6;
Максимальна температура робочого середовища, °C	155;
Діапазон температур змішаної води при зміні температури зовнішнього повітря від -25 до + 20 °C	25...110;
Діапазон уставки програмного зниження температури змішаної води, °C	0...20;
Споживана потужність у робочому режимі, ВА	12;
Напруга мережі живлення, В	220;
Частота мережі, Гц	50;
Діаметр сопла струйного насоса, мм	6...18;
Потужність пристрою, ГДж/год.	0,42...4,07;
Габаритні розміри, мм не більше	1225×215×325;
Маса, кг	21...54.

Регулятори мікроелектронні типу ТМ (ТОВ "ПКП МЕЛТЕКС") призначені для двопозиційного (ТМ2), трипозиційного (ТМ8, рис. 12.20) і пропорційного (ТМ14) регулювання температури, її візуального контролю і вимірювання. На корпусі приладу є перемикач режиму роботи "Авт.", "Руч." і пристрій подачі команд "Нижче", "Вище".

Прилади з вбудованим імпульсним переривачем призначені для астатичного регулювання температури за допомогою виконавчого механізму без жорсткого зворотного зв'язку. Прилади працюють у комплекті з мідними термометрами опору серії ТСМ градуювання 23, із межами температур від -50 до $+150$ °С. Допускається застосування плівкового первинного перетворювача з аналогічною характеристикою. Діапазон регулювання температури $-40...+20$ °С (ТМ2), $0...80$ °С (ТМ8), $-50...+150$ °С (ТМ14).

Прилади комутують контакти в електричному колі потужністю до 550 ВА при струмі навантаження від 1×10^{-3} до 3 А, напрузі змінного струму від 6 до 220 В, $\cos \varphi \geq 0,5$. Довжина лінії, яка з'єднує первинний перетворювач із приладом, не більше 300 м. Потужність, споживана приладом, не більше 7 ВА. Зона повернення $0,5...10$ °С (ТМ2). Зона нечутливості $0,5...10$ °С (ТМ8). Зона пропорційності $1...10$ °С (ТМ14). Маса не більше 1,5 кг. Живлення приладу здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц.



Рис. 12.20. Регулятори BP-10, PTB-109, ЕПТ-50, ТМ-8

12.6. Регулятори температури прямої дії

Регулятори температури манометричні прямої дії **типів РТ, РПДП, РТ-ДО, РТ-ДЗ (УкрГазАвтоматика)** призначені для автоматичної підтримки постійної температури регульованого середовища шляхом зміни витрати гарячої води або пари. Регулятори застосовують у водонагрівних установках гарячого водопостачання, системах тепlopостачання будівель, тощо. Вони складаються з термосистеми, що включає термобалон, капілярну трубку, вузол перестановки і регулюючий клапан з сильфонним приводом. Термобалон монтують на трубопроводі води, що нагрівається, регулюючий клапан – на трубопроводі теплоносія. Регулятори типу РТ виготовляють з діаметром умовного проходу D_v від 15 до 80 мм з умовною пропускною спроможністю K_v 2,5...60 м³/год. (K_v чисельно дорівнює витраті води з температурою 20 °С через повністю відкритий клапан регулятора при перепаді тиску на ньому 0,1 МПа); типу РПДП – на D_v 25-50 мм з K_v 10...40 м³/год.; типу РТ-ДО – на D_v 15-80 мм з K_v 2,5...60 м³/год.; типу РТ-ДЗ – на D_v 15-50.

Регулятор температури манометричний прямої дії типу РТ-3513 призначений для регулювання температури води на циркуляційних магістралях і стояках системи гарячого водопостачання. Термочутливий елемент регулятора, заповнений твердим наповнювачем (воском), і виконавчий механізм об'єднані в одному корпусі. При підвищенні температури води в стояку понад задану (47 ± 2 °С) обсяг термочутливого наповнювача збільшується, корпус датчика температури разом з клапаном переміщується відносно трубопроводу, на якому змонтований регулятор температури, що призводить до зменшення площі прохідного перетину і, отже, до необхідного зменшення витрати води через регулятор. Регулятор випускається з діаметрами 20-50 мм. Розглянемо більш детально характеристики одного з регуляторів цього типу.

Регулятор температури прямої дії типу РТ-ДО (ДЗ) призначений для автоматичної підтримки температури регульованого середовища шляхом зміни витрати пари, рідких і газоподібних середовищ, неагресивних до матеріалів регулятора. Область застосування регуляторів: системи центрального опалення; сушильні приміщення і теплиці; трубопровідні магістралі; парогенератори, печі, теплообмінники, бойлери та ін.

Регулятори виготовляються моделей: РТ-ДО – з двоходовим нормально відкритим регулюючим органом, та РТ-ДЗ – з двоходовим нормально закритим регулюючим органом. Також за потребою прилад може комплектуватися фільтром відповідного діаметру.

Регулятор РТ конструктивно складається з термосистеми і двоходового регулюючого органу, який може бути як нормально відкритим, так і нормально закритим. Принцип дії РТ заснований на зміні об'єму рідини в термобалоні при зміні температури. Зміна обсягу рідини викликає переміщення штока виконавчого механізму і зв'язаного з ним штока клапана, що регулює витрату пари чи рідини.

Основні технічні дані РТ:

Діаметр умовного проходу, мм	15; 25; 40; 50; 80.
Діапазони температури, °С	0...180 з кроком 40.
Зона пропорційності, °С	10.
Зона нечутливості, °С	1.
Постійна часу, с	100.
Умовна пропускна здатність K_v , м ³ /год.	2,5; 6,3; 16; 25; 60.
Протікання у % від K_v , не більше	0,1.
Температура регульованого середовища, °С	-15...225.
Довжина дистанційного зв'язку, м	1,6; 2,5; 4; 6; 10.
Тиск регульованого середовища, МПа	1,6.
Умовний тиск, МПа	1.
Перепад тиску на регулюючому органі, МПа	0,6.
Маса регуляторів, кг	7; 9,5; 14,5; 22; 40.

12.7. Мікропроцесорні-регулятори

Мікропроцесорний ПІД-регулятор температури МикРА 600 (ТОВ "Промрегіон", Україна) призначений для автоматичного регулювання температури за *ПІД*-законом. Він може застосовуватись у складних системах регулювання, де параметри об'єкта можуть змінюватися в процесі експлуатації. Крім каналу управління нагрівачем регулятор містить канал управління системою охолодження за двопозиційним чи *ПІД* законом регулювання. Регулятор також може використовуватися для трипозиційного імпульсного управління приводом засувки. Зовнішній вигляд регулятора показаний на рис. 12.21.

У якості датчика температури використовуються термоелектричні перетворювачі (термопари) типу ХК(Л), ХА(К), ЖК(І) чи термоперетворювачі опору (термометри опору) типу ТСМ-50, ТСП-50, ТСМ-100, ТСП-100. Вихідними комутуючими елементами є напівпровідникові симістори з детекторами нульової напруги фази, які гальванічно розв'язані від внутрішніх кіл регулятора. Регулятор може використовуватися для комутації будь-яких кіл змінного струму напругою 12...250 В і частотою 50...60 Гц, у тому числі напівпровідникових симісторів і тиристорів.

Налагодження параметрів регулювання може виконуватися як вручну, так і автоматично за кривою розгону до моменту виходу на задану температуру. Завдяки застосуванню принципів нечіткої логіки (Fuzzy logic) якість налагодження поліпшується з кожним циклом самоналагодження.

Регулятор призначений для монтажу на вертикальних щитах і панелях. Технічні характеристики наведені в табл. 12.2, 12.3.

Таблиця 12.2.

Технічні характеристики МикРА 600

<i>Чутливий елемент / Діапазон регулювання температури, °С</i>						
ТХК(Л)	ТХА(К)	ТЖК(І)	ТСМ-50	ТСП-50	ТСМ-100	ТСП-100
-50... +550	-50... +999	-50... +800	-50... +200	-50... +800	-50... +200	-50... +250

Примітки: Для виконання МикРА 601 із ТП ТХА(К): -50...+1200 °С.

Регулятор температури МикРА 602 має два незалежних канали регулювання температури з автоматичним настроюванням параметрів ПІД-закону у кожному каналі.

Регулятор температури МикРА А10 забезпечує двопозиційний закон регулювання температури у межах 0...100, 100...250, 50...350 °С у залежності від виконання приладу. Регулятор працює з термоелектричними перетворювачами ХК(Л) або ТСМ-50. Комутуючим елементом у регуляторі є симістор з детектором нульової напруги фази.

Таблиця 12.3.

Технічні характеристики МикРА 600

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Дискретність завдання температури, °C	1,0
Закон регулювання каналу нагрівання	ПІД
Діапазон зміни порога включення системи охолодження, °C	-100 +100
Закон регулювання каналу охолодження	Двопозиційний чи ПІД
Струм виходу управління, А	< 0,5
Діапазон завдання періоду ШІМ, с	2...99
Діапазон коефіцієнта пропорційності, %/°C	1...25
Діапазон зміни часу диференціювання, с	1...999
Точність підтримки температури, % (% від діапазону регулювання)	±0,5
Вихідний сигнал регулювання	ШІМ для нагрівачів; двопозиційний чи ШІМ для охолодження; імпульсний для засувки
Напруга живлення, В (Гц)	110 – 250 (50...60); 18...27 (50 ...60)
Зовнішня температура °C	5...50
Габаритні розміри регулятора, мм	48 x 48 x 120
Маса регулятора не більше, г	170

Терморегулятор DT35-16 (Pulseautomatis, Україна)

застосовується в системах управління опаленням, всіх видів конвекторів, інфрачервоних панелей, напірних вентиляторів твердопаливних котлів, теплих підлог, басейнів, теплиць, морозильних камер, сушарок, інкубаторів, у системах обігріву вуликів, системах незамерзання водозливів та ін.

Терморегулятор управляється мікроконтролером, який аналізує вимірювану цифровим датчиком температуру, порівнює її із заданим значенням, враховує заданий режим роботи і на підставі цих даних включає і відключає навантаження. Комутація здійснюється електромагнітним реле. Про включене реле (включене навантаження) сигналізує світлодіодний індикатор. Управління температурою може відбуватися з одним або двома датчиками температури.

Управління регулятором здійснюється за допомогою кнопок на передній панелі приладу, рис. 20.21. На цифровому індикаторі відображається режим роботи регулятора, температура датчика (температура того місця, де знаходиться датчик). Граничні значення температури, режим роботи і значення мінімуму та максимуму зберігаються в незалежній пам'яті приладу.

Технічні дані:

Межі регулювання, °C	від -54 до + 124.
Максимальний струм навантаження, А	16.
Потужність навантаження, кВт	3.
Напруга живлення, В (Гц)	220 ± 10% (50).
Датчик температури	DS18D20.
Точність вимірювання температури, °C	0,1.
Точність завдання порогу і відображення температури (залежно від діапазону), °C	0,1...1.
Режими роботи	нагрів, охолодження.
Довжина кабелю датчика, м	1,5.
Температурний гістерезис, °C	0,1-30.
Ступінь захисту	IP20.

Крім розглянутого регулятора, підприємство "Пульс Автоматікс" пропонує більше 15-ти різновидів терморегуляторів різної потужності: PT20-N1, PT20-N30 – 2 кВт; PT20-VR1, PT20-VR2, ST-m, DR 35-16 – 3 кВт; DT51-40 – 8 кВт.

Терморегулятор МТП-2 (Digi COP, Україна) (мікропроцесорний терморегулятор двопороговий) застосовується в системах управління опаленням, температурою теплиць, морозильних камер, теплих підлог, басейнів, системах незамерзання водозливів та ін. Терморегулятором управляє мікроконтролер, який

враховує заданий режим роботи, аналізує вимірювану цифровим датчиком температуру і включає або відключає навантаження. Комутація здійснюється електромагнітним реле. Максимальний струм навантаження залежить від моделі: 10, 16, 30, 40, 60, 80, 100 А (вказується на корпусі терморегулятора). Зовнішній вигляд терморегулятора показаний на рис. 20.21.

Технічні характеристики:

Напруга живлення, В	150-280.
Діапазон вимірюваної температури,	-55...+125.
Точність вимірювання температури, °	0,5.
Діапазон регульованої температури, °С	-54...+124.
Точність задавання порогу і відображення температури, °С:	
в діапазоні від -9,9 до + 99,9	0,1;
в діапазоні від -55 до -10 і від 100 до 125	1.

Крім розглянутого регулятора, підприємство "Digi COP" пропонує більше 10-ти різновидів цифрових терморегуляторів з різними струмом навантаження і конструктивного виконання: МТР-1 (10 А, для інкубатора); МТР-2 (16; 30; 40 А з можливостями монтажу на DIN рейку).

Контрольно-вимірювальну і регулюючу апаратуру, що використовується, зокрема, при встановленні енергетичних блоків, технологічного устаткування, обладнання лабораторій і майстерень, а також **мікропроцесорні регулятори серії ТС** виготовляє компанія **METROL** (у м. Київ - САТУРН ДЕЙТА ІНТЕРНЕТШЕНЛ). Регулятори серій ТС4, ТС5, ТС6, ТС7 METROL призначені для стабілізації чи програмного регулювання температури й інших фізичних величин з індикацією обраного параметра. Якість приладів компанії відповідає вимогам норм ISO 9001. Розглянемо їх більш детально.

Мікропроцесорний регулятор ТС4 призначений для регулювання температури. Він застосовується в холодильних камерах, інших пристроях харчової промисловості і торгівлі. Регулятор має двопозиційну структуру з гістерезисом. Параметри регулювання встановлюються шляхом введення цифр за допомогою клавіш, розташованих на передній панелі. Індикація параметрів

здійснюється світлодіодним індикатором. Вхідний сигнал формується датчиком термоопору КТУ10-5. Вихідним елементом є реле. Регулятор також забезпечує світлову та звукову сигналізацію. Клас захисту відповідає PN/E-08106, IP 40 зі сторони передньої панелі.

Технічні характеристики регулятора:

- діапазон вимірювання і регулювання, °C	-40...+40;
- параметри вихідного реле, В	16 А, 250;
- основна похибка, %	0,5 ±1;
- напруга гальванічної ізоляції відповідно до PN/E-08120, кВ	4;
- напруга живлення, В (Гц)	220 (50);
- споживана потужність, ВА	≤ 5;
- габаритні розміри, мм	48×96×108.

На рис. 12.21 показано модернізований **терморегулятор ТС-4W** (Autonics), який забезпечує:

- регулювання за алгоритмами *П, ПІ, ПД, ПІД*;
- короткий інтервал вимірювань (100 мс);
- вхід: термоопір DIN Pt 100 Ом (допустимий опір проводу не більше 5 Ом) і терморезистора К (СА), J (ІС);
- керуючий вихід: реле (250 В ~ 3А); твердотільного реле (SSR) (12В = ± 2В, 20 мА макс.);
- додатковий вихід: 2 реле (250В ~ 1А);
- великий дисплей з можливістю індикації неузгодженості між поточним значенням і установкою;
- габарити (фронт): 96х48 мм;
- живлення: 100 ... 240 В ~ 50/60 Гц.

Мікропроцесорні регулятори серії ТС випускаються також у модифікаціях ТС5, ТС6, ТС7 (9 моделей). Вхідний сигнал регулятора ТС5 крім датчика термоопору може формуватись також терморезистором, потенціометричним датчиком або стандартним сигналом струму чи напруги. Вихідним елементом крім електромагнітного реле (250 В/8 А) може бути чи оптодіод (250 В/0,3 А). Для регуляторів потужності формується вихідний сигнал напругою 0/5 В. Основна похибка складає 0,5 %. Живлення здійснюється змінним струмом 220 В 50 Гц. Габаритні розміри 48×96×108 мм.

Регулятор серії TC6 у порівнянні із TC5 забезпечує крім позиційного також неперервне регулювання. Він обладнаний системою ідентифікації динамічних властивостей об'єкта та інтерфейсом RS-232C. Регулятор TC7 здійснює дво-, або трипозиційне регулювання і реєстрацію результатів регулювання двох величин (температури, вологості або тиску), стабілізацію і програмне регулювання температури, або може бути використаний для вимірювання чотирьох величин. Він обладнується інтерфейсами RS-232C або RS-485 і забезпечує друк значень вихідної величини у вигляді графіка.



Рис. 12.21. Регулятори DT35-16, MTP-2, МикРА 600, TC-4W

Восьмиканальний двопозиційний регулятор ТРМ38 (ОВЕН), рис. 12.22, призначений для двопозиційного управління процесом нагрівання (охолодження) в хлібопекарських печах, термопластавтоматах, екструдерах і іншому технологічному устаткуванні.

Для восьмиканального двопозиційного регулятора характерні:

- широкий діапазон контрольованих температур;
- висока точність вимірювання температури;

- сумісність з більшістю термоперетворювачів і стандартних сигналів;
 - цифрова світлодіодна індикація контрольованих параметрів;
 - вбудоване автокалібрування;
 - програмована логіка роботи вихідних пристроїв;
 - збереження уставок і параметрів регулювання в енергонезалежній пам'яті;
 - вбудований інтерфейс зв'язку з IBM-PC;
- висока надійність.

Основні технічні характеристики:

- граничний діапазон температур, °C	-80...+1800;
- кількість каналів	2...8;
- гранично допустима основна приведена похибка вимірювання, %	0,5;
- час вимірювання одного каналу, с	< 2;
- висота знаків індикатора, мм	14;
- інтерфейс зв'язку з ЕОМ	RS-232;
- Умови експлуатації:	
- навколишня температура, °C	+5...+50;
- відносна вологість, %	30...80;
- атмосферний тиск, кПа	84...107;
- ступінь захисту корпусу	IP20;
- напруга живлення, В (Гц)	220 (50);
- споживана потужність, ВА	< 6;
- габаритні розміри, мм	96×96×180;
- маса приладу, кг	< 1,2.

Восьмиканальний двопозиційний регулятор ТРМ38 виготовляє компанія ОВЕН, яка була створена у 1991 р. У 2007 р. була заснована виробнича площадка ОВЕН у м. Харкові. Сьогодні завдяки сучасному обладнанню ОВЕН є одним з передових українських виробників засобів КВП і промислової автоматики. Зокрема, ОВЕН виробляє:

- контролери з НМІ для локальних систем автоматизації ПЛК63 і ПЛК73;
- контролери для малих систем автоматизації ПЛК100, ПЛК150, ПЛК154;

- моноблочні контролери з дискретними і аналоговими входами/виходами для середніх систем автоматизації ПЛК160, ПЛК110, ПЛК110-M02;
- комунікаційні контролери ПЛК304, ПЛК323.



Рис. 12.22. Зовнішній вигляд терморегуляторів TPM38 і TPM500

Регулятор багатоканальний УКТ38 (ОВЕН) призначений для вимірювання температури чи іншого параметра по 8-ми каналах, аварійного відключення чи сигналізації про вихід параметра в кожному з каналів за встановлену границю. Тип входу: термоопори серій TCM, ТСП, термопари ТХК(L), ТХА(K). Разом із приладом АС-2 забезпечує реєстрацію технологічних процесів у IBM-сумісному комп'ютері.

Відмінні особливості регулятора:

- висока точність вимірювань;
- сигналізація перевищення (зниження) параметрів;
- установка порогу спрацьовування аварійної сигналізації - незалежно для кожного каналу;
- висока навантажувальна здатність;
- енергонезалежна пам'ять для збереження уставок і конфігурації приладу;
- сумісність з більшістю термоперетворювачів і стандартних сигналів;
- вбудований інтерфейс зв'язку з IBM-PC;
- переключення індикації каналів – ручне чи автоматичне.

Технічні характеристики:

- граничний діапазон температур, °C 80...+1200;
- кількість каналів виміру 2...8;
- час обробки одного каналу, с < 2;
- межа приведеної похибки при вимірюванні параметрів, % $\pm 0,5$;
- спосіб формування сигналу "Аварія" контакти реле;
- діапазон уставок у кожному з каналів для сигналу "Аварія" згідно діапазону;
- максимальний струм навантаження реле "Аварія", А 8 при ~ 220 В і $\cos > 0,4$;
- інтерфейс зв'язку з ЕОМ RS-232;
- довжина лінії зв'язку, м < 1000;

Умови експлуатації:

- навколишня температура, °C +5...+50;
- відносна вологість, % < 95;
- атмосферний тиск, кПа 84...107;
- живлення змінним струмом, В (Гц) 220 (50);
- споживана потужність, ВА < 6;
- ступінь захисту корпусу IP20;
- габаритні розміри, мм 96×96×180;
- маса, кг < 1,2.

Зовнішній вигляд (як і габарити) регулятора УКТ38 – аналогічний вигляду регулятора ТРМ 38, рис. 12.22.

Регулятор для керування припливною вентиляцією ТРМ33 (ОВЕН) призначений для контролю і регулювання температури повітря в приміщеннях із припливною вентиляцією. В складі системи він керує роботою жалюзі, вентилятора, а також регулює положення запірно-регулюючого клапана в контурі теплоносія. Тип входу: термоопори серій ТСМ, ТСП. Регулятор реалізує ПИД-закон регулювання.

Для ПДД-регулятора характерні такі застосування:

- регулювання температури припливного повітря;
- регулювання температури зворотної води за заданим опалювальним графіком;
- захист калорифера від заморожування (у тому числі при несправності датчиків);
- захист від несанкціонованої зміни заданих параметрів регулювання;
- дистанційне вимикання припливної вентиляції з переходом у режим очікування.

Технічні характеристики регулятора:

- граничний діапазон температур, °C	80...+750;
- кількість каналів вимірювання	4;
- час обробки одного каналу, с	< 2;
- максимальний струм навантаження реле "Аварія", А	8 при ~ 220 В і $\cos\varphi > 0,4$;
- інтерфейс зв'язку	RS-232;
- довжина лінії зв'язку, м	< 1000;
- номінальна напруга живлення, В (Гц)	220 (50);
- допустиме відхилення напруги, %	-15...+10;
- споживана потужність, ВА	< 64.

Умови експлуатації:

- навколишня температура, °C	+5...+50;
- відносна вологість, %.	< 95;
- атмосферний тиск, кПа	84...107;
- ступінь захисту корпусу	IP20;
- габаритні розміри, мм	96×96×180;
- маса, кг	< 1,2.

Конструкція і зовнішній вигляд приладу співпадають з показаним на рис. 12.22 регулятором ТРМ38.

Для стабілізації заданої температури в печах, екструдерах, гомогенізаторах, термопресах, сушильному устаткуванні, на виробництві будматеріалів і т. д. – скрізь, де потрібно автоматично регулювати температуру в процесі нагрівання, можна використати промисловий **терморегулятор ТРМ500 (ОВЕН)**, рис. 12.22. Даний прилад здатний керувати температурою за ПДД-законом у процесі

нагрівання, а в режимі «Вкл./Викл.» підтримувати задану користувачем температуру. Необхідні кнопки управління розташовані на лицьовій панелі приладу.

Прилад має дискретний вхід, який дозволяє подавати команди для зміни уставки, тобто управління може бути як ручним, так і автоматизованим віддаленим. Команди «Пуск» і «Стоп» можуть реалізовуватися як вручну за допомогою кнопок управління на панелі приладу, так і через дискретний вхід.

В якості вимірювачів температури застосовуються термоопори або термопари, які підключаються за дво-, три-, або чотири-провідними схемами. Підтримуються усі найпоширеніші термодатчики. У регуляторі наявна інтегрована схема компенсації холодних кінців термопари. Входи для підключення датчика і для подачі електроживлення розташовуються на тильній стороні приладу, там же знаходяться і виходи.

Прилад має три виходи: потужне вбудоване реле (на 30 або на 5 А у залежності від модифікації) для управління сигналізацією або безпосередньо навантаженням; вихід для управління зовнішнім твердотільним реле напругою до 5 В; вихід для комутації сигналізації (лампочка або звуковий сигналізатор) до 5 А.

Терморегулятор має цифровий індикатор, завдяки якому можна переконатися, чи знаходиться температура на заданому рівні. Він легко налаштовується, зручний для установки на передню панель обладнання, невеликий за розмірами.

На рис. 12.23 показано **пристрій керування електроприводом насоса САУ-М4 (ОВЕН).**



Рис. 12.23. Пристрій керування САУ-М4

Він призначений для роботи з насосами при автоматизації процесів підтримки заданого рівня в резервуарах, накопичувальних ємностях, відстійниках і т. п. з робочою рідиною, що має електропровідні властивості. Може працювати в режимах заповнення чи осушення резервуара.

Можливість зміни гістерезису між вмиканням і вимиканням електроприводу дозволяє реалізувати оптимальний для об'єкта режим роботи насоса. Формування за допомогою датчика сигналу граничного рівня підвищує надійність роботи системи в цілому.

Технічні характеристики:

- напруга постійного струму на електродах датчиків рівня, В < 12 ;
- максимальне вихідне навантаження при напрузі 220 В 50 Гц, А < 8
- напруга живлення, В (Гц) $(\cos\varphi > 0.4)$; 220 (50);
- споживна потужність, ВА < 4 .

Умови експлуатації:

- навколишня температура, °С $0...+50$;
- відносна вологість, % < 95 ;
- атмосферний тиск, кПа $84...107$.

Габаритні розміри корпусу, мм

- настінного виконання $130 \times 105 \times 65$;
- щитового виконання $96 \times 96 \times 160$;
- маса приладу (без датчиків), кг < 1 .

Для приладу характерні:

- автоматичне керування насосом у режимах заповнення чи осушення робочого резервуара до заданого рівня;
- формування сигналу аварійного (граничного) рівня;
- кондуктометричні датчики рівня, які використовують властивості електропровідності рідини;
- робота з дистильованою, водопровідною і забрудненою водою, молоком і харчовими розчинами, слабокислотними, лужними й іншими електропровідними рідинами;
- світлодіодна сигналізація робочого і граничного рівнів;
- ступінь захисту корпусу настінного виконання – IP44, щитового виконання – IP20.

12.8. Регулятори вологості

Регулятори відносної вологості повітря типу ВМ-510М і ВЧ-536М застосовують у системах мікроклімату тваринницьких приміщень, теплицях, овочесховищах. Принцип дії двопозиційного ВМ-510М і трипозиційного ВЧ-536М регуляторів оснований на методі «нуль - індикатора».

Регулятори комплектуються *первинним перетворювачем відносної вологості ДОВП-1*. **Перетворювач ДОВП-1** має в якості чутливого елемента кварцовий резонатор, на поверхню якого нанесена плівка сорбенту – полікапреаміду, див. п. 8.3.1. У залежності від зміни маси плівки сорбенту при поглинанні води з повітря змінюється частота коливань п'єзоелемента, яка і є мірою відносної вологості повітря. В усталеному режимі частота коливань п'єзоелемента пропорційна масі плівки з поглиненою водою.

Конструктивно перетворювач ДОВП-1 виконаний у вигляді окремого блоку, змонтованого в алюмінієвому корпусі. У нижній частині корпусу є колодка, в яку встановлюється зйомний чутливий елемент. Для захисту від механічних ушкоджень чутливий елемент закритий екраном.

За допомогою перетворювача типу ДОВП-1 відносна вологість повітря перетворюється в уніфікований вихідний сигнал – напругу 0...10 В постійного струму при зміні відносної вологості повітря від 0 до 100 % відповідно.

У регуляторі відбувається порівняння напруги постійного струму перетворювача вологості, яка пропорційна значенню відносної вологості повітря, з напругою постійного струму, яка подається з задатчика вологості. В результаті порівняння напруга, пропорційна відхиленню, надходить у модулятор і підсилюється за допомогою підсилювача змінного струму.

У залежності від знаку напруги відхилення фазочутливий каскад управляє роботою симетричного статичного тригера в двопозиційному регуляторі ВМ-510М або двома тригерами в трипозиційному регуляторі ВЧ-536М. Тригери підключені до обмоток електромагнітного реле, які забезпечують вмикання або вимикання виконавчих пристроїв у системі регулювання. Технічні характеристики регуляторів наведені в табл. 12.4.

Таблиця 12.4.

Технічні характеристики регуляторів ВМ-510М і ВЧ-536М

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>	
	<i>ВМ-510М</i>	<i>ВЧ-536М</i>
Діапазон регулювання відносної вологості повітря, %	0...100	40...100
Температура середовища, °С	5...35	5...35
Діапазон регулювання зони нечутливості, %	2...10	2...10
Основна похибка регулятора, %	< ±4,5	< ±4,5
Потужність вихідного реле, Вт при напрузі ~ 220 В	500	500
при напрузі = 220 В	40	40
Напруга живлення, В	220	220
Коливання напруги живлення, %	+10...-15	+10... -15
Частота змінного струму, Гц	50±1	50±1
Споживана потужність, Вт	25	25
Навколишня температура, °С	-30...+50	-30...+50
Відносна вологість повітря при температурі 35 °С, %	до 95	до 95
Габарити, мм	120×160×240	120×160×240
Маса, кг	4	4

Регулятори вологи ВМ-510М і ВЧ-536М виконані у металевому корпусі прямокутної форми. Їх з'єднують із первинним перетворювачем окремим екранованим кабелем. Довжина з'єднувального кабелю до 300 м. Імовірність безвідмовної роботи приладу за 2000 год. не менше 0,94.

Регулятор відносної вологості повітря типу СПР забезпечує регулювання відносної вологості повітря за дво- і трипозиційним законом у діапазоні від 20 до 95 % при температурі повітря від 10 до 35 °С. Двопозиційний регулятор СПР2 виконує функцію "вмикання-вимикання", трипозиційний СПР3 – "ввімкнути менше-вимкнути-ввімкнути більше". Допустима основна похибка регулювання відносної вологості складає не перевищує ±2,8 %. Варіант виконання

приладу може бути різним і залежать від діапазону регулювання відносної вологості повітря і його температури (01.1.У4, 01.2.У4, 03У4, 04У4). На задану вологість регулятор налаштовують задатчиком – змінним резистором. Управління задатчиком виведене на передню панель приладу, рис. 12.24. Регулятор комплектується калієво-натрієвим первинним перетворювачем відносної вологості повітря типу ЕВЧ.

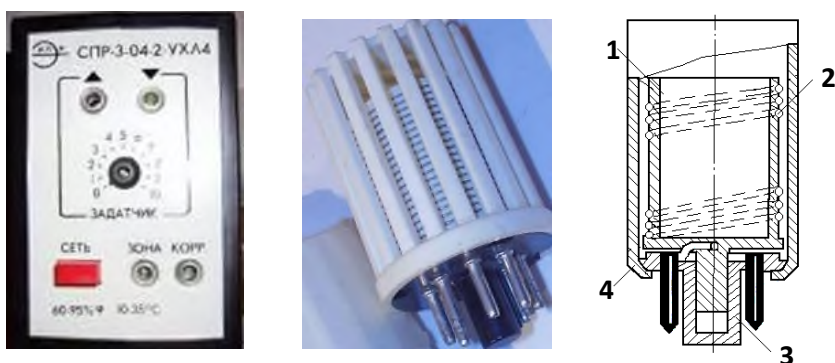


Рис. 12.24. Регулятор СПР-3-04-2 і вологочутливий елемент ЕВЧ:
1- полий циліндр; 2-електроди; 3- цоколь; 4-кожух

Вологочутливий елемент ЕВЧ (рис. 12.24) являє собою порожній циліндр з ізоляційного матеріалу, на бічну поверхню якого намотані електроди 2 із ніхрому та нанесена тонка вологочутлива плівка, див. п. 8.3.1. Циліндр змонтований на цоколі 3 і для захисту від механічних ушкоджень закритий перфорованим кожухом 4.

Вологочутливий елемент включається в одне з плечей вимірювальної мостової схеми через погоджуючий вхідний подільник. Напряда розбалансу з діагоналі моста подається на вхід підсилювача і далі на вхід фазочутливого каскаду. Навантаженням фазочутливого підсилювача служить вхідне потенціометричне коло тригера Шмітта, кероване вихідним реле.

Для компенсації ємності довгої з'єднувальної лінії на вході подільника включають паралельний контур із дроселя і конденсатора, який настроюють на відповідну довжину. Довжина з'єднувальної лінії не повинна перевищувати 200 м.

Регулятор вологості повітря СПР призначений для експлуатації при температурі навколишнього повітря від 1 до 35 °С, відносній вологості не більше 80 % при 25 °С і атмосферному тиску від 84 до 106,5 кПа. Споживана приладом потужність не перевищує 6,5 ВА. Маса не більше 1,4 кг. Живлення приладу здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В, 50 Гц.

Програмний регулятор вологості і температури МПР51 (ОВЕН) (рис. 12.25) призначений для управління багатоступінчастими температурно-вологісними процесами в інкубаторах, термокамерах, сушильних і варочних шафах, при сушінні деревини, виробництві м'ясних і ковбасних виробів, у хлібопекарській промисловості та ін.

Прилад забезпечує вимірювання 5-ти параметрів:

- температури (T_1 , T_2 , T_3);
- різниці температур (ΔT);
- вологості (M).



Рис. 12.25. Регулятор МПР51

У залежності від обраної користувачем конфігурації прилад забезпечує підтримку будь-яких двох із п'яти параметрів, що вимірюються. Стандартні конфігурації МПР51:

- вимірювач-регулятор температури і вологості (T_1 , M);
- вимірювач-регулятор температури і різниці температур (T_1 , ΔT);
- двоканальний вимірювач-регулятор температури з додатковим каналом сигналізації (T_1 , T_2 , T_3).

У приладі передбачена система сигналізації. При виході любого з регульованих параметрів за задані межі, обриві або короткому замиканні датчика видається сигнал "Аварія". У випадку тимчасового відключення живлення під час виконання програми, подальші дії приладу визначаються заданим користувачем алгоритмом. При діагностуванні неможливості продовження роботи видається сигнал на виділене реле. Після закінчення виконання програми видається спеціальний сигнал.

Прилад являє собою двоканальний ПІД-регулятор із вхідним пристроєм для підключення трьох вимірювальних датчиків типу ТСМ або ТСП, блоком обробки даних з 4-ма пристроями порівняння (компараторами) і вихідним пристроєм із 5-ма керуючими реле та 8-ма транзисторними ключами для управління виконавчими механізмами. За рахунок використання ПІД-закону регулювання досягається висока точність регулювання температури і вологості. Для забезпечення надійної роботи у важких промислових умовах (запиленість, жирові відкладення і т.п.) вимірювання вологості здійснюється психрометричним методом за допомогою "сухого" і "вологого" термометрів.

МІР51 містить програмований контролер з вбудованими реле часу. Зміна параметрів регулювання здійснюється за заданою користувачем програмою, що складається з набору кроків. Кількість кроків у програмі задається користувачем. На кожному кроці програми можуть бути задані:

- уставки температури і вологості;
- умови переходу до наступного кроку;
- швидкість виходу на уставку;
- тривалість кроку.

Програми запам'ятовуються в енергонезалежній пам'яті приладу. Регулятор може зберігати від 60 програм по 7 кроків кожна до 5 програм по 99 кроків кожна.

У приладі передбачена можливість реєстрації ходу технологічного процесу на ЕОМ. Підключення приладу здійснюється за стандартним RS-232 інтерфейсом через адаптер мережі АС-2. Реєстрація здійснюється спеціалізованим програмним пакетом ОВЕН на платформі Windows 95 (98). Потім накопичені дані можуть бути переведені в Excel-таблицю для подальшого опрацювання.

Для управління виконавчими механізмами в приладі є 4

двопозиційних реле на 8 А 220 В. ТЕНи, засувки, парогенератори, охолоджувальні системи різного типу підключаються безпосередньо до вихідних реле МПР51. Для управління додатковим устаткуванням або для сигналізації про хід технологічного циклу можна використовувати 8 транзисторних ключів.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірювання при використанні:

(у дужках – роздільна здатність)

- датчика ТСМ, ТСП, °С	50...+200 (0,1);
- датчика положення засувки, %	0...100 (1);
гранично допустима приведена похибка вимірювання вхідного параметра, %	±0,5;
кількість каналів вимірювання:	3 температури, 2 засувки;
кількість каналів регулювання	2;
кількість вихідних реле	5;
кількість вихідних транзисторних ключів	8;
період проходження керуючих імпульсів, с	1...120;
максимально допустимий струм навантаження пристроїв управління:	
- електромагнітного реле, А	8 (250 В 50 Гц); (+30 В);
- транзисторного ключа, А	0,2 (+35 В);
інтерфейс зв'язку з ЕОМ	RS-232;
довжина лінії зв'язку приладу з АС-2, м	<1000;
навколишня температура, °С	+5...+50;
номінальна напруга живлення, В (Гц)	220 (50);
допустиме відхилення напруги, %	-10...+10;
габаритні розміри, мм	96× 96×180;
ступінь захисту	IP20.

У регуляторі передбачено захист від несанкціонованого доступу. Для кожної групи фахівців (наладчиків, технологів і т. д.) є своя група параметрів, доступ до яких можливий тільки через пароль.

Для підтримки температури в сушильній шафі використовується паронагрівач, через який пропускається гаряча пара. Для управління кількістю пари використовуються перше і друге реле. Два інших реле

здіянні в управлінні подачею пари для підтримки вологості: одне з них управляє положенням клапана, що подає пару, а друге – засувкою випуску вологого повітря. П'яте реле використовується для сигналізації про аварію і про закінчення процесу сушіння.

Приклад блоку програми для підтримки компаратором заданої величини ΔT :

<i>Значення параметра</i>	<i>Коментар</i>
c01=004	вхідна величина компаратора $\Delta T = T_{\text{сух}} - T_{\text{продукта}}$;
c02=005	виходом компаратора 1 є реле 5;
c03=A	установка значення верхньої межі спрацювання компаратора C1, рівної "A" ($^{\circ}\text{C}$);
c04=a	установка значення нижньої межі спрацювання компаратора C1, рівної "a" ($^{\circ}\text{C}$);
c05=001	установка логіки роботи компаратора C1: після досягнення $T=A$ (верхньої межі) компаратор блокує вмикання реле 1 (реле 5 розімкнуте); після досягнення $\Delta T=a$ (нижня межа) компаратор знімає блокування реле 1 (реле 5 замкнуте);
c06=000	блокування спрацювання компаратора до 1-го досягнення уставки, на початку програми відключене;
c07=001	блокування спрацювання компаратора до 1-го досягнення уставки, на початку кроку відключена.

Приклад схеми управління температурно-вологісним режимом у процесі сушки з використанням регулятора МПР51 наведений на рис. 12.26.

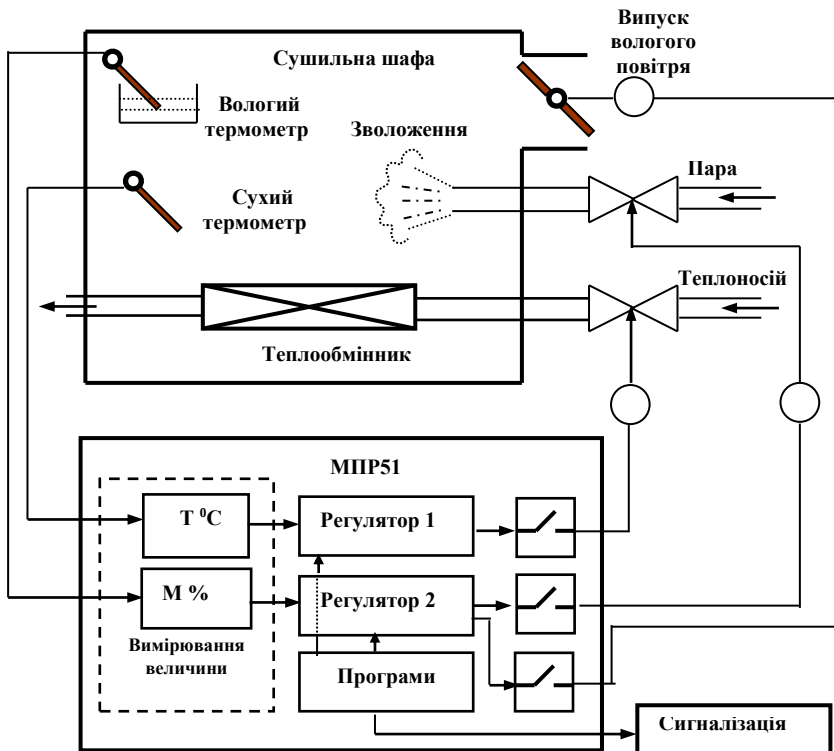


Рис. 12.26. Приклад використання регулятора МПП51 для управління температурно-вологісним режимом у процесі сушки

12.9. Контролер ОВЕН ПЛК73

Контролер ОВЕН ПЛК73, рис. 12.27, призначений для створення локальних систем автоматизованого управління технологічним обладнанням в енергетиці, різних галузях промисловості та с/г. Логіка роботи ПЛК73 визначається споживачем у процесі програмування контролера, яке здійснюється за допомогою програмного забезпечення CoDeSys 2.3 (версії 2.3.9.9). При цьому підтримуються всі мови програмування, зазначені в МЕК 61131-3. Документація щодо програмування контролера і роботи з програмним забезпеченням CoDeSys додається на компакт-диску.



Рис. 12.27. Контролер ОВЕН ПЛК73

Контролер може бути використаний як:

- спеціалізований пристрій управління виділеним локалізованим об'єктом;
- пристрій моніторингу локалізованого об'єкта в складі комплексної інформаційної мережі;
- спеціалізований пристрій управління і моніторингу групою об'єктів у складі комплексної інформаційної мережі.

У контролері реалізовані наступні функції:

- виконання програми користувача (програми контролера, створеної у середовищі CoDeSys 2.3);
- зняття вимірних значень з вбудованих аналогових і дискретних входів з подальшою передачею їх у призначену для користувача програму;
- управління вбудованими обчислювальними пристроями за програмою користувача;
- розширення кількості вихідних пристроїв з використанням модуля MP1, що підключається до контролера за спеціальним інтерфейсом;
- обмін даними по інтерфейсах RS-485 і RS-232;
- відображення символьних даних, що формуються за програмою користувача на РКІ;
- відображення інших даних, що формуються за програмою

користувача, на шести вбудованих світлодіодах;

- відлік реального часу вбудованим годинником з автономним джерелом живлення;
- настройка параметрів функціонування вбудованих входів, виходів та іншого периферійного обладнання контролера і збереження значень конфігураційних параметрів у незалежній пам'яті;
- зміна значень конфігураційних параметрів контролера на РКІ за допомогою вбудованої клавіатури;
- зміна значень параметрів за допомогою середовища програмування CoDeSys.

ПЛК73 має вісім цифрових (дискретних) входів. Живлення дискретних входів здійснюється напругою 24 В. Дискретні входи використовуються для:

- контролю стану зовнішнього обладнання;
- діагностики працездатності системи;
- підключення зовнішніх пристроїв управління станом контролера.

Дискретні входи призначені для підключення контактних датчиків типу «сухий контакт» або транзисторних ключів (N-P-N- і P-N-P-типів). У якості датчиків типу «сухий контакт» можуть бути використані різні вимикачі, кнопки, кінцеві вимикачі, контакти реле і т. д. Сигнали на дискретні входи формуються в результаті замикання (розмикання) зовнішніх контактів. Для дискретних входів можна задавати логіку обробки і час затримки їх перемикавання.

Контролер має вісім аналогових універсальних входів, які здійснюють:

- опитування даних первинних перетворювачів;
- обробку отриманих даних і перетворення їх у фізичні одиниці;
- передачу даних у спеціальну область пам'яті для подальшого використання за програмою користувача.

До аналогових входів безпосередньо може підключатися широкий спектр датчиків: термометри опору, термоелектричні перетворювачі (термопари), активні перетворювачі з вихідним аналоговим сигналом у вигляді постійної напруги або струму); резистивні датчики. Градування датчиків розташовані в пам'яті приладу, а вибір датчика проводиться з РКІ або у середовищі CoDeSys.

Контролер має до 8 вбудованих вихідних пристроїв (ВП), які

можуть бути двох типів: дискретні і аналогові. Типи вихідних пристроїв визначаються на стадії замовлення приладу. Дискретні ВП – електромагнітне реле, транзисторна оптопара, оптосемістор, напівпровідникове реле. Останнє використовується для управління (ввімкнення/вимкнення) навантаженням або безпосередньо, або через більш потужні керуючі елементи, такі як пускачі, напівпровідникові реле, тиристори або симістори.

Електромагнітне реле (вихід «Р») призначене для комутації силових кіл напругою не більше 250 В і робочим струмом не більше 8 А. Транзисторна оптопара (вихід «К») застосовується, як правило, для управління низьковольтними реле (не більше 60 В при струмі не більше 400 мА). Транзисторний ключ (вихід «Т») призначений для прямого підключення до приладу в якості навантаження твердотільного реле (вихідна напруга від 4 до 6 В, постійний струм не більше 25 мА). Оптисимістор (вихід «С») має внутрішню схему переходу через нуль і включається в коло управління потужного симістора або пари зустрічно-паралельно включених тиристорів.

Дискретний ВП («Р», «К», «С», «Т») має два стани: «Вкл.» і «Викл.». Виходи можуть бути також запрограмовані на роботу в якості генераторів ШІМ.

Аналоговий ВП є цифро-аналоговим перетворювачем, що дозволяє формувати вихідний аналоговий сигнал постійного струму або напруги. Пристрій для формування токового сигналу (вихід І) перетворює на активному навантаженні R_n значення сигналу на виході у струмовий сигнал 4...20 мА. Пристрій для формування сигналу постійної напруги (вихід U) перетворює значення сигналу на виході у сигнал напруги 0...10 В. Опір навантаження R_n має бути в діапазоні від 2 до 10 кОм.

Аналогове управління здійснюється за пропорційним законом (тобто 4 мА або 0 В відповідають вихідному сигналу «0», а 20 мА або 10 В відповідають вихідному сигналу «1»).

У контролері ПЛК73 може бути встановлена інтерфейсна плата з модулями інтерфейсів RS-485 і RS-232 для організації роботи за стандартними протоколами ODH і ModBus. Інтерфейс RS-232 DBGU призначений для зв'язку з середовищем програмування CoDeSys, з програмою тиражування, а також для поновлення програмно-апаратних засобів контролера. Контролер може мати від нуля до двох вбудованих портів RS-485. Порт призначений для

організації зв'язку з OPC-сервером, а також з іншими пристроями по інтерфейсу RS-485 за протоколами: OBDH і ModBus у режимах Master або Slave.

Інтерфейс зв'язку з модулем MP1 призначений для підключення до контролера модуля MP1 по внутрішній шині, що дозволяє збільшити кількість вихідних пристроїв на 8 дискретних (ключових) пристроїв у різних комбінаціях:

- електромагнітне реле 4 А, 220 В;
- транзисторні оптопари 400 мА, 60 В;
- симісторні оптопари 0,5 А, 250 В;
- твердотільне реле 4...6 В, 50 мА.

Контролер має вбудований 4-х рядковий 16-ти розрядний РКІ, що дозволяє:

- відображати «стан» входів і задавати значення виходів;
- відображати і редагувати значення параметрів програми;
- візуально відслідковувати зміну значень параметрів програми.

Контролер має вбудований звуковий випромінювач, що дозволяє:

- сигналізувати про підключення живлення до контролера;
- сигналізувати про натискання користувачем кнопок на

лицьовій панелі контролера;

- створювати спеціалізовані засоби сигналізації про хід процесу, які забезпечують управління динаміком за програмою користувача.

Контролер має вбудовану клавіатуру з 9 кнопками: Пуск/Стоп, Вихід, Альт, Введення, Вгору, Вниз, F1, F2, F3. Кнопки можуть використовуватися для перемикання між режимами індикації та завдання значень конфігураційних параметрів.

Контролер має 6 вбудованих світлодіодів: K1, K2, K3, K4, K5 і K6, які дозволяють створювати спеціалізовані засоби сигналізації про хід процесу за програмою користувача.

Основні технічні характеристики контролера ПЛК73 наведені в табл. 12.5.

Таблиця 12.5.

Технічні характеристики контролера ПЛК73

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Напруга живлення, В: постійного струму	від 150 до 300 (номінальна 220);
змінного струму (47...63 Гц)	від 90 до 264 (номінальна 110/220)
Споживана потужність, Вт: для постійного струму	< 12
для змінного струму	< 18
Цифрові (дискретні) входи, к-сть	8
Напруга живлення входів, В	24±3
Вхідний струм дискретного входу, мА	< 11 (при напрузі 30 В)
Рівень сигналу «логічної одиниці» для постійного струму, В (струм у колі)	15...30 (не менше 4,5 мА)
Рівень сигналу «логічного нуля» для постійного струму, В (струм у колі)	3...5 (не більше 1,5 мА)
Аналогові входи, к-сть	8
Тип вхідних датчиків	ТС, ТП, уніфіковані струм або напруга
Розрядність АЦП, біт	15
Дискретні виходи (контакти реле), к-сть	від 1 до 4 (виходи DO5...DO8)
Максимальний струм реле, А: для змінного струму, < 250 В і $\cos \phi > 0,8$ для постійного струму не більше 100 В	< 4 (навантаження для категорії АС-15); < 4 (навантаження для категорії DC-13);
Час перемикання контактів реле, мс (із стану «0» у стан «1» і назад)	< 50

Продовження таблиці 12.5.

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Дискретні виходи , к-сть (оптопари транзисторні n-p-n типу),	від 4 до 8 (DO1...DO8)
Максимальний, комутований струм, мА (при напрузі =60 В постійного струму)	< 400 (навантаження для категорії DC-13)
Час перемикання контактів реле, мс (із стану «0» у стан «1» і назад)	20 (виходи DO1...DO8)
Дискретні виходи , к-сть (оптопари симісторні)	від 1 до 4 (DO5...DO8)
Максимальний, комутований струм, мА (при напрузі < 300 В змінного струму)	< 50 (навантаження для категорії AC-15)
Час перемикання контактів реле, мс (із стану «0» у стан «1» і назад)	< 20 (виходи DO5...DO8)
Дискретні виходи , к-сть (зовнішні твердотільні реле),	від 1 до 4 (DO5...DO8)
Максимальний, комутований струм, мА (при напрузі < 300 В змінного струму)	< 50 (навантаження для категорії AC-15)
Час перемикання контактів реле, мс (із стану «0» у стан «1» і назад)	< 20 (виходи DO5...DO8)
Аналогові виходи , к-сть (ЦАП «параметр – напруга 0...10 В»),	від 1 до 4 (DO5...DO8)
Діапазон вихідного сигналу, В	від 0 до плюс 10
Опір навантаження, Ом, не менше	2000
Розрядність ЦАП, біт	10
Час перетворення вхідного сигналу, мс	100
Аналогові виходи , к-сть (ЦАП «параметр – струм 4...20 мА»),	від 1 до 4 (DO5...DO8)
Діапазон вихідного сигналу, мА	від 4 до 20
Опір навантаження, Ом	< 900
Розрядність ЦАП, біт	10
Час перетворення вхідного сигналу, мс	100

Продовження таблиці 12.5.

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Інтерфейси	RS-485; RS-232
Центральний процесор	RISC - на базі ядра ARM-7, 32 розряди, 50 МГц
Вмонтований звуковий випромінювач	+
Підключення зовнішніх входних елементів через MP1, шт.	8
Тип дисплея	PKI, монохромний
Кількість знакомісць (символів)	4 × 16
Габаритні розміри, мм	(168×137×55)±1
Маса, кг	< 0,5
Середнє напрацювання на відмову, год.	100 000
Середній строк служби, років	8

12.10. Програмовані інтелектуальні реле

Програмовані інтелектуальні реле є однією з різновидів програмованих логічних контролерів. Область їх застосування – це автоматизація окремих агрегатів, управління системами освітлення, локальні контури різних систем автоматизації, побутова техніка. Використання інтелектуальних реле дозволяє значно спростити схеми управління електроустаткуванням, підвищити їх надійність.

Програми для інтелектуальних реле задаються за допомогою кнопок на лицьовій панелі і невеликого, як правило, з одним – двома рядками LCD індикатора. У деяких випадках програми пишуть на персональному комп'ютері з використанням спеціалізованих мов програмування релейної логіки LD, FBD і деяких інших. Для завантаження (прошивки) готових програм у пам'ять мікроконтролера використовуються інтерфейси типу RS-232, RS-485 або Industrial Ethernet, які дозволяють також здійснювати зв'язок з АСУ верхнього рівня.

Конструкція програмованих інтелектуальних реле найчастіше моноблочна, в одному корпусі містяться всі вузли. Це, як правило, блок живлення, мікроконтролер, канали введення і виведення інформації, клеми для підключення виконавчих пристроїв. Корпуси

таких пристроїв невеликі і дозволяють установку в електричних шафах на DIN-рейку, що відповідає сучасним стандартам. Втім, блок живлення може бути і окремим пристроєм.

Програмовані реле випускаються багатьма фірмами. Фірма «ОВЕН» випускає свої реле під назвою Овен ПЛК. Як приклад розглянемо **реле Zelio Logic фірми Schneider Electric**.

Область застосування реле Zelio Logic досить широка і передбачає управління компресорами або насосами, підрахунок виробів або комплектуючих на автоматичних лініях, управління освітленням і електронними табло.

Для програмування реле Zelio Logic можливе використання двох спеціалізованих мов – FBD або LADDER.

Пристрій випускається як у моноблочному виконанні, так і в модульному. Останній варіант дозволяє об'єднання модулів для розширення системи в цілому. Зовнішній вигляд інтелектуального реле в моноблочному виконанні показаний на рис. 12.28.



Рис. 12.28. Інтелектуальне реле Zelio Logic

Реле дозволяють реалізовувати системи управління, кількість вводів/виводів яких знаходиться у межах 10...40 каналів. У корпусі розмірами 124,6x90x59 мм поміщається 26 каналів вводу/виводу. Напруга живлення пристрою знаходиться у широких межах: 24 В АС, 100...240 В АС, 12 В DC, 24 В DC, що дозволяє легко вбудовувати реле в будь-які конструктиви.

Логічні контролери FAB (Array Electronic) являються інтелектуальними реле другого покоління (рис. 12.29). Ці пристрої досить прості в експлуатації і легко піддаються вивченню і програмуванню. Для програмування реле FAB використовується мова програмування FDB, яка призначена, в основному, для інженерів, що займаються автоматизацією. З її допомогою можна створити досить складну і при цьому ефективну і економічну систему.

Області застосування інтелектуальних реле FAB – це регулювання температури на підприємствах і у виробничих приміщеннях, оранжереях і теплицях, управління системами водопостачання, вентиляції, освітлення, виробничими лініями і окремими машинами, управління системами розумного будинку, охоронної сигналізації, аварійного оповіщення та ін.

Інтелектуальні реле серії FAB замінюють собою велику кількість комутаційних пристроїв: реле, тахометрів, лічильників, таймерів і т. п. Одне інтелектуальне реле дозволяє замінити цілу шафу звичайних електромеханічних пристроїв. При цьому надійність схеми у цілому зростає, кількість дискретних елементів зменшується, зменшуються габарити, енергоспоживання. Реле має меншу порівняно з контролерами вартість.

Інтелектуальне реле FAB оснащено LCD дисплеєм, що має 4 рядки по 10 символів, вбудований календар та годинник реального часу.

Можливе дистанційне керування пристроєм по телефонних лініях, і передавання голосових повідомлень. Проста програма SCADA, яка додається безкоштовно, дозволяє здійснювати зв'язок з ПК на досить великій відстані, що забезпечує можливість дистанційного моніторингу та налаштування. В разі використання інтерфейсу RS-485 до одного ПК можуть бути підключені 255 реле FAB, що дозволяє створювати більш функціональні, ніж при використанні одиночних FAB реле, системи.



Рис. 12.29. Інтелектуальне реле серії FAB

Пам'ять програми невелика – 64 К, але вона може містити 127 функціональних блоків, 127 лічильників, 127 інтервалів RTC (реального часу), 127 таймерів, що дозволяє створювати досить складні функціональні програми. Введення програми здійснюється або за допомогою кнопок і LCD-дисплея, або з використанням ПК. Для захисту програми від несанкціонованого доступу можливий захист паролем.

Виходи пристрою мають високу навантажувальну здатність: релейні – 10 А, транзисторні виходи – 2 А.

Контрольні запитання

1. Регулятори автоматичних систем. Призначення. Структура. Класифікація.
2. Класифікація регуляторів неперервної дії. П-регулятор. Призначення. Основні характеристики. Характеристики автоматичних систем з П-регулятором.
3. І-регулятор. Призначення. Основні характеристики. Характеристики автоматичних систем з І-регулятором.
4. ПІ-регулятор. Призначення. Основні характеристики. Характеристики автоматичних систем з ПІ-регулятором.
5. ПІД-регулятор. Призначення. Основні характеристики. Характеристики автоматичних систем з ПІД-регулятором.

6. Який регулятор називається регулятором прямої дії?
7. Який регулятор називається регулятором непрямої дії?
8. Класифікація регуляторів дискретної дії. Призначення. Основні характеристики.
9. Характеристики автоматичних систем із двопозиційним регулятором.
10. Що розуміють під ізодромним І-регулятором? Характеристика елемента управління виконавчим пристроєм такого регулятора.
11. Пояснити вплив диференціальної складової регулюючої дії регулятора на якість перехідного процесу автоматичної системи.
12. Назвіть типи і характеристики електронних регуляторів.
13. Назвіть типи і характеристики мікроелектронних регуляторів.
14. Мікропроцесорні регулятори. Типи, призначення, характеристики, відмінності від електронних.
15. Позиційні регулятори. Характеристики, призначення.
16. Багатоканальні регулятори. Типи, характеристики, призначення.
17. Регулятори вологості. Типи, призначення, характеристики.
18. Основні відмінності програмних регуляторів. Типи програмних регуляторів.
19. Інтелектуальні реле. Основні відмінності. Типи, характеристики, призначення.

РОЗДІЛ 13

ВИКОНАВЧІ ПРИСТРОЇ (МЕХАНІЗМИ)

Виконавчим пристроєм (виконавчим механізмом (ВМ)) регулятора називають пристрій, який безпосередньо діє на регулюючий орган об'єкта управління відповідно до сигналу управління Y , що надходить від вимірювальної частини регулятора (від пристрою управління). Іншими словами, виконавчий пристрій є перетворювачем сигналу управління Y в управляючу дію U на об'єкт. Остання, як було сказано вище, прикладається до регулюючого органу об'єкта управління.

Як регулюючі органи с/г об'єктів управління використовуються різного роду дросельні заслінки, вентилі, клапани, засувки, шибери, реостати, дозатори, живильники й інші органи, здатні здійснювати зміну кількості енергії або робочої речовини, що надходить у об'єкт з метою необхідної зміни його стану (режиму роботи). У деяких об'єктів управління регулюючі органи не можна виділити окремим елементом, при цьому вони розглядаються як єдине ціле. Але у більшості випадків регулюючий орган є окремим елементом конструкції, який в автоматичі умовно відноситься до об'єкта управління.

13.1. Класифікація виконавчих пристроїв

Переміщення регулюючих органів об'єкта управління може бути поступальним і обертальним у межах одного чи декількох обертів. Відповідно до цього ВМ можна розділити на:

- прямохідні;
- однообертові;
- багатообертові.

За видом споживаної енергії ВМ можна класифікувати як:

- електричні;
- гідравлічні;
- пневматичні;
- комбіновані (електрогідравлічні, електропневматичні).

У технічній літературі ВМ регулятора часто називають приводом (електропривод, гідропривод, пневмопривод).

У виконавчому пристрої (механізмі) варто виділяти окремо елемент управління і силовий елемент (скорочено ЕУ і СЕ). При цьому структура ВМ буде мати вигляд, рис. 13.1.

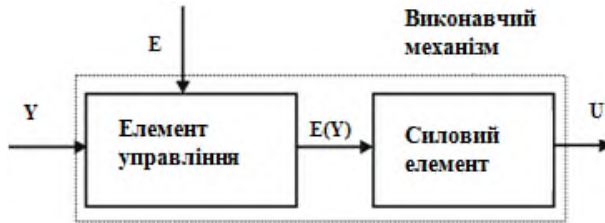


Рис. 13.1. Зображення виконавчого механізму на функціональних схемах автоматичних систем

Елемент управління ВМ при цьому здійснює управління підведенням енергії E від стороннього джерела до силового елемента ВМ. Кількість підведеної енергії при цьому залежить від сигналу управління Y , що надходить на вхід ВМ від вимірювальної частини регулятора, тобто $E(Y)$. Силовий елемент ВМ, сприймаючи цю енергію, перетворює її в регулюючу дію U , сформовану регулятором, яка прикладається до регулюючого органу об'єкта управління.

Характеристики виконавчих механізмів

За статичними властивостями (статичною характеристикою $U(Y)$) ВМ поділяються на:

- статичні ВМ, у яких кожному значенню сигналу управління Y на усталених режимах роботи ВМ відповідає певне значення U (рис. 13.2, А);
- астатичні ВМ, у яких одному нульовому значенню Y_H відповідає нескінченна кількість значень U (рис. 13.2, Б);
- позиційні ВМ (дво- або трипозиційні), у яких вихідний сигнал U при зміні вхідного Y може приймати два або три дискретні значення (позиції). Статичні характеристики позиційних ВМ зображені на рис. 13.3, А і Б.

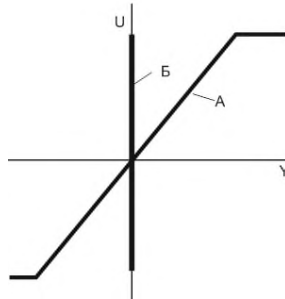


Рис. 13.2. Статичні характеристики статичних (А) і астатичних (Б) ВМ

У залежності від типу силового елемента ВМ їх можна класифікувати як:

- електродвигунні;
- електромагнітні;
- поршневі;
- мембранні.

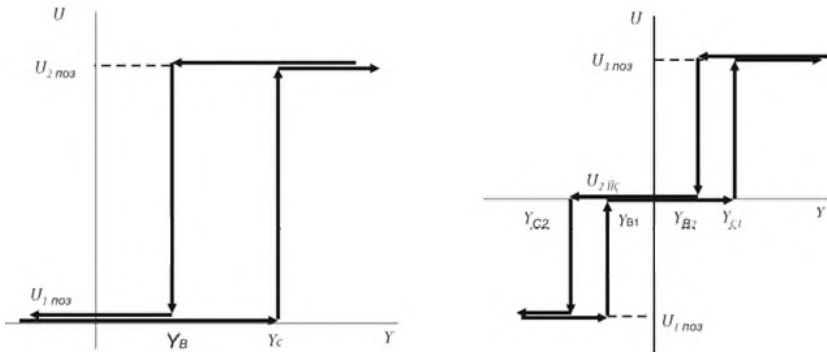


Рис. 13.3. Статичні характеристики позиційних ВМ

У залежності від швидкості зміни регулюючої дії ВМ можна розділити на:

- ВМ з постійною швидкістю зміни U (ізодромні ВМ): тобто $\left| \frac{dU}{dt} \right| = \text{const}$ незалежно від Y (рис. 13.4, лінія А);

- ВМ, у яких швидкість зміни U залежить від величини сигналу управління Y , тобто $\left| \frac{dU}{dt} \right| (Y)$, (рис. 13.4, лінія Б).

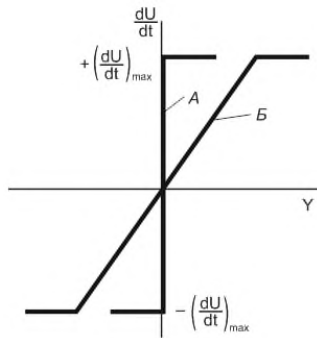


Рис. 13.4. Типи швидкісних характеристик ВМ

У с/г виробництві для автоматизації стаціонарних об'єктів управління застосовують переважно електричні ВМ, а на мобільних машинах – гідравлічні ВМ.

Основними характеристиками ВМ є:

- обертаючий момент на валі (M_m) для поворотних ВМ і зусилля на штоці (H) для прямоходових ВМ;
- кут повороту вала для однообертових ВМ, або число обертів вала для багатообертових;
- час повного ходу вихідного органу ВМ від одного крайнього положення до іншого.

На роботу системи автоматичного регулювання впливають наступні характеристики ВМ:

- вибіг, під яким розуміють переміщення вихідного органу ВМ після його вимикання;
- люфт, під яким розуміють вільний хід вихідного органу ВМ при відсутності сигналу управління ($Y=0$);
- гістерезис, який дорівнює різниці значень сигналів управління Y , що відповідають одному і тому ж значенню U , при прямому і зворотному русі вихідного органу ВМ (рис. 13.3, А і Б).

Вибіг ВМ, причиною якого є його інерційність, впливає на точність і стійкість системи. Люфт може стати причиною виникнення автоколивань.

Вимоги до виконавчих пристроїв автоматичних систем

Основними вимогами до ВМ є:

- висока швидкодія, оцінювана за часом переходу з одного усталеного стану в інший під дією сигналу управління;
- достатня потужність, яка повинна перевищувати потужність, необхідну для зміни стану об'єкта управління або положення його регулюючого органу на всіх режимах автоматичного управління і виключення впливу навантаження на швидкодію ВМ;
- жорсткість механічних характеристик, що являють собою залежності швидкості зміни управляючої дії від сили або моменту навантаження;
- висока кратність регулювання (відношення максимальної швидкості зміни керуючої дії до її мінімального значення, яка забезпечує ще стійке регулювання при номінальному навантаженні);
- вибіг ВМ не повинен перевищувати 0,25...1 % повного ходу вихідного органу;
- величина люфту не повинна перевищувати 0,2...0,5 мм у прямоходових ВМ, і 3 град. – у поворотних;
- гістерезис не повинен бути більшим 1,5 %.

13.2. Електродвигунні виконавчі механізми

Електричні ВМ поділяються на електродвигунні і електромагнітні. У с/г виробництві широко застосовуються *електродвигунні ВМ*, в яких силовими елементами є електродвигуни постійного і змінного струму, а також крокові (імпульсні) електродвигуни. Як елементи управління таких ВМ використовуються силові реле (контактори), електромагнітні пускачі, підсилювачі постійного і змінного струму, частотні перетворювачі та ін.

13.2.1. Виконавчі механізми з електродвигунами постійного струму

ВМ з електродвигунами постійного струму широко використовуються в автоматичних системах неперервної дії. Вони дозволяють порівняно просто здійснювати реверс і регулювати частоту обертання ротора, забезпечуючи швидкодію характеристику ВМ, показану на рис. 13.4, лінія Б. Конструктивна схема електродвигуна постійного струму показана на рис. 13.5.

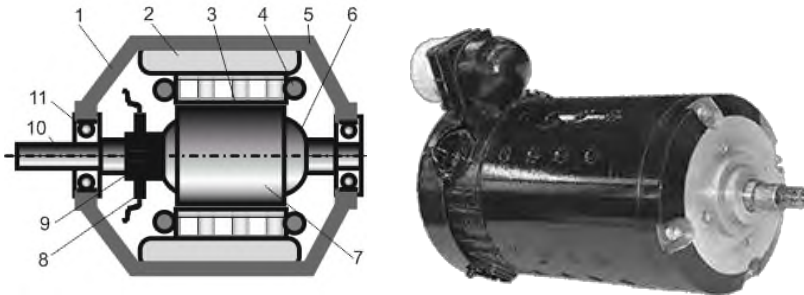


Рис. 13.5. Електродвигуни постійного струму:
конструктивна схема та двигун ДПП-Г-1,5

Двигун містить:

- станину 1 циліндричної форми з закріпленими на ній полюсами 2 (для поліпшення форми магнітного поля двигуна полюси закінчуються полюсними наконечниками 3);
- статорну обмотку 4, що охоплює полюс;
- сердечник ротора 7, запресований на валі 10;
- обмотки ротора 6, що складаються з окремих секцій, кінці яких підключені до пластин колектора 9 на валі 10.

Напруга постійного струму підводиться до секцій обмоток ротора через вугільні щітки 8, які ковзають по колектору 9. Вал ротора обертається на підшипниках 11, встановлених у станині 1.

Обмотка статора двигуна є його обмоткою збудження і може включатися відносно обмотки ротора за різними схемами (рис. 13.6).

Електромагнітні полюси статора створюють магнітний потік $\Phi_{СТ}$, що пронизує секції обмотки ротора, по яких протікає електричний струм I . У результаті взаємодії магнітного потоку статора $\Phi_{СТ}$ із магнітним потоком ротора $\Phi_{РТ}$ виникає обертаючий момент, пропорційний магнітному потоку $\Phi_{СТ}$ і струму I , що протікає в обмотці ротора: $M = k_M I \Phi_{СТ}$, де k_M – постійний коефіцієнт. Під дією обертаючого моменту M ротор (якір) обертається з частотою n .

Струм в обмотках статора називається струмом збудження. Часто магнітний потік збудження створюється постійними магнітами, тоді обертаючий момент M залежить тільки від струму (напруги) якірної обмотки. При зміні напрямку струму I ротора змінюється знак обертаючого моменту і напрямок обертання ротора.

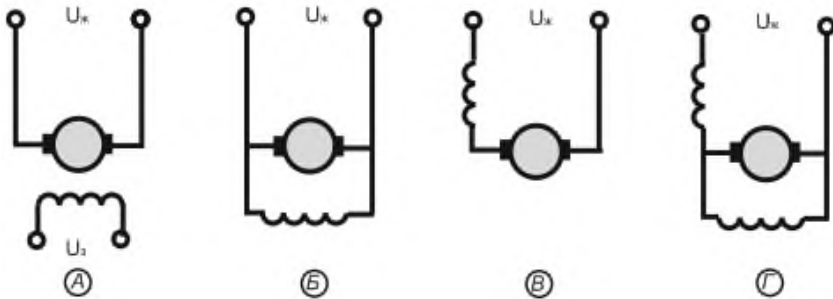


Рис. 13.6. Схеми ввімкнення обмотки збудження в електродвигунах постійного струму

У двигунів з електромагнітним збудженням змінити напрямок обертання ротора можна також зміною полярності напруги збудження. Обмотка збудження може живитись як від окремого джерела напруги (незалежне збудження, рис. 13.6, *А*), так і від того ж джерела, що й обмотка якоря. Обмотка збудження може з'єднуватися з якірною обмоткою паралельно (рис. 13.6, *Б*), послідовно (рис. 13.6, *В*) і змішано, тобто паралельно-послідовно (рис. 13.6, *Г*). Ці схеми з'єднання відповідно називають паралельною, послідовною або змішаною схемою збудження.

ВМ з електродвигунами постійного струму найчастіше працюють у режимах, які характеризуються частими пусками, зупинками і реверсом, тому при розробці таких ВМ велика увага приділяється покращенню їх механічних характеристик, іноді навіть за рахунок ККД.

Однією з основних вимог до розглянутого ВМ є простота управління частотою обертання ротора. При обертанні якоря його обмотки перетинають лінії магнітного поля статорної обмотки. В обмотках ротора при цьому наводиться ЕРС, значення E якої залежить від частоти обертання n , магнітного потоку Φ і постійного для кожного двигуна коефіцієнта k_M , що враховує особливості його конструкції і схеми з'єднання обмотки збудження:

$$E = k_M n \Phi. \quad (13.1)$$

При обертанні якоря ця ЕРС певною мірою врівноважує напругу

живлення $U_{жс} = E + IR$ і знижує струм обмотки якоря:

$$I = \frac{U_{жс} - E}{R}. \quad (13.2)$$

У наведених формулах $R = R_{я} + R_p + r_{щ}$ – опір обмотки кола якоря, де $R_{я}$ – опір обмотки якоря; R_p – опір зовнішнього (пускового) реостата (якщо такий є); $r_{щ}$ – опір щіток.

У нерухомому якорі E дорівнює нулю, і в момент пуску в якорі протікає пусковий струм, що перевищує номінальний у 10...20 разів. Для обмеження пускового струму в коло якоря включають обмежувальний пусковий реостат. Опір останнього вибирається таким чином, щоб пусковий струм I_n не перевищував номінальний більше, ніж у 3...4 рази. З наростанням частоти обертання ротора двигуна росте величина E , а струм в обмотці якоря зменшується. Тому необхідно поступово зменшувати опір пускового реостата. Виведення останнього може здійснюватися вручну або автоматично. При пуску двигунів малої потужності пускові реостати звичайно не включаються, тому що час розгону таких двигунів до номінальної частоти обертання невеликий і обмотка якоря не встигає нагрітися до небезпечної температури великим пусковим струмом.

Підставивши значення E з (13.1) у (13.2), визначимо частоту обертання ротора:

$$n = \frac{U_{жс} - I \cdot R}{k_E \cdot \Phi}. \quad (13.3)$$

Аналіз отриманого рівняння свідчить про те, що частоту обертання двигуна при управлінні ВМ можна змінювати одним з таких чотирьох способів, а саме, шляхом зміни:

- напруги живлення $U_{жс}$;
- активного опору в колі якоря R ;
- магнітного потоку збудження Φ ;
- діючого значення струму якоря I при живленні якірної обмотки імпульсами різної тривалості.

Зміна частоти обертання першим способом здійснюється або за допомогою спеціального генератора, вихідну напругу якого можна плавно змінювати, або діленням напруги потенціометром, або зміною вихідної напруги підсилювача.

Другий спосіб зміни частоти обертання є надійним і простим. Але при цьому значна частина потужності втрачається на нагрівання регулюючого реостата.

Простим і економічним є третій спосіб регулювання частоти обертання за допомогою реостатів або підсилювачів у колі обмотки збудження.

На сьогоднішній день найчастіше застосовується імпульсний метод зміни частоти обертання. Діюче значення струму обмотки якоря, пропорційно якому встановлюється його частота обертання, залежить від амплітуди, тривалості і частоти повторення імпульсів. У коло якоря включається індуктивність L , а паралельно до якоря – ємність C . Якщо параметри вибрані так, що пульсації напруги живлення не перевищують 5...10 %, то робота двигуна практично не відрізняється від роботи при постійній напрузі. Регулювання напруги здійснюється зміною тривалості імпульсів. Для цього в двигунах малої потужності застосовуються схеми на транзисторах, а в двигунах середньої і великої потужності – тиристорні схеми.

Двигуни з паралельним збудженням застосовують у ВМ тоді, коли потрібні постійна частота обертання при змінному навантаженні і можливість плавної зміни частоти обертання в широких межах.

Двигуни з послідовним збудженням у ВМ використовуються значно рідше.

Т. ч., через нелінійність характеристики $n(U_{\text{ж}})$, малу жорсткість механічної характеристики і погані пускові властивості електродвигуни постійного струму з управлінням по колу збудження практично не застосовуються. Тому, при розгляді ВМ з такими електродвигунами будемо припускати, що обмотка збудження живиться від незалежного джерела постійного струму.

Управління частотою обертання ротора здійснюється від підсилювача потужності, що розвиває електрорушійну силу E_n і має вихідний активний опір R_n .

При деяких припущеннях спрощене лінеаризоване диференціальне рівняння, що пов'язує частоту обертання вала n

електродвигуна разом з регулюючим органом об'єкта управління (чи самим об'єктом), електрорушійну силу E_n і момент навантаження M_n на валі такого двигуна в операторній формі може бути представлено у вигляді:

$$(T^2 p^2 + 2T\zeta p + 1)n = kE_n - k_M(T_J p + 1)M_n, \quad (13.4)$$

де: $T = \sqrt{(T_M T_J)}$;

$T_M = \frac{I(R_M + R_n)}{C_M C_E}$ – електромеханічна стала часу (I – приведений до

якоря момент інерції всіх рухомих частин); R_J – активний опір кола якоря; C_M , C_E – коефіцієнти пропорційності, характерні для кожного двигуна);

$T_J = \frac{L_J}{R_J + R_n}$ – електрична стала часу кола якоря разом з

підсилювачем (L_J – індуктивність кола якоря);

$k = I/C_E$ – коефіцієнт передачі електродвигуна за сигналом управління, що пов'язує n з підсилювачем ЕРС в усталеному режимі роботи без навантаження (k має розмірність $[V \cdot \text{сек}]^{-1}$ при розмірності n $[\text{сек}]^{-1}$);

$k_M = T_M/I$ – коефіцієнт передачі електродвигуна за моментом навантаження в усталеному режимі роботи (k_M має розмірність $[H \cdot \text{сек}]^{-1}$).

Передаточна функція двигуна за сигналом управління, отримана з виразу (13.4), буде мати вигляд:

$$W_V(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2T\zeta p + 1}. \quad (13.5)$$

А за навантаженням (збуренням):

$$W_M(p) = \frac{k_M(T_J p + 1)}{T^2 p^2 + 2T\zeta p + 1}. \quad (13.6)$$

Отримані передаточні функції відносяться до випадку, коли вихідним сигналом електродвигуна разом з регулюючим органом об'єкта управління (чи самим об'єктом) є частота обертання n .

Якщо ж за вихідний сигнал прийняти кут повороту вала φ і

врахувати, що $n=d\phi/dt=p\phi$, то передаточні функції електродвигуна постійного струму за сигналом управління і навантаженням будуть мати вигляд відповідно:

$$W_y(p) = \frac{k}{p(T^2 p^2 + 2T\xi p + 1)}, \quad (13.7)$$

і

$$W_M(p) = \frac{k_M(T_J p + 1)}{p(T^2 p^2 + 2T\xi p + 1)}. \quad (13.8)$$

Звичайно, вихідний опір підсилювача достатньо великий ($R_{\Pi} \gg R_J$). При такому співвідношенні опорів електрична постійна часу T_J стає менше механічної $T_J \ll T_M$, що дає можливість в усіх приведених передаточних функціях відкинути величину, яка містить добуток $T_J T_M$, й істотно спростити вигляд цих функцій.

Якщо відомий приведений до якоря момент інерції I всіх рухомих частин, електромеханічна постійна часу T_M , що визначає власні динамічні властивості двигуна, може бути знайдена за його механічною характеристикою (рис. 13.7), або за паспортними даними двигуна за формулою:

$$T_M = \frac{n_{xx}}{M_{\Pi}}, \quad (13.9)$$

де M_{Π} – пусковий момент при номінальній напрузі.

Як видно з рис. 13.7, величина T_M пропорційна тангенсу кута нахилу механічної характеристики до від'ємного напрямку осі моментів. Ця величина тим менша, чим повільніше спадає механічна характеристика. Слід мати на увазі, що нахил механічної характеристики залежить не тільки від властивостей двигуна, але і від вихідного опору R_{Π} підсилювача. Збільшення R_{Π} веде до збільшення кута нахилу характеристики і, отже, до зростання T_M .

Регульовальні статичні характеристики розглянутого двигуна мають вигляд, представлений на рис. 13.7. Пускова напруга E_y при холостому ході ($M_H=0$) залежить від потужності двигуна. Для двигунів з потужністю на валі 1...5 Вт $E_y=0,3...1$ В. Кратність

регулювання при холостому ході в лінійній зоні статичної характеристики досягає декількох десятків одиниць. В особливо точних двигунах, що застосовуються як інтегратори, кратність регулювання може бути значно збільшена за рахунок зменшення моментів тертя в щітковому вузлі.

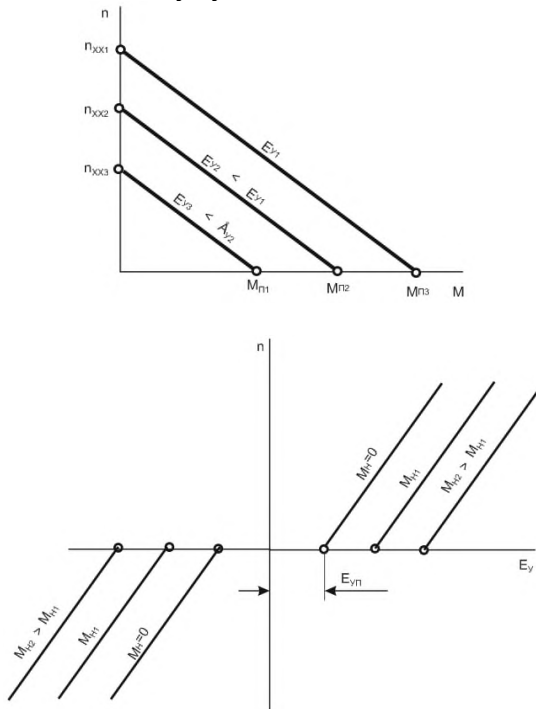


Рис. 13.7. Характеристики електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням:
механічна $n=f(M)$ та регульовальна $n=f(E_f)$

З розвитком мікроконтролерної техніки одним із найбільш поширених методів регулювання частоти обертання двигунів постійного струму став імпульсний метод, оснований на використанні широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги живлення. Суть цього методу полягає в тому, що напруга живлення подається на двигун у вигляді імпульсів. При цьому частота проходження імпульсів залишається постійною, а їх тривалість може

змінюватися. При такому управлінні швидкість обертання двигуна обернено пропорційна скважності імпульсів (пропорційна коефіцієнту заповнення ШІМ сигналу). Для побудови ШІМ модуляторів використовують мікроконтролери PIC, Arduino та ін.

Оскільки всі регульовальні характеристики є жорсткими, а ступінь їх жорсткості залишається незмінною, робота двигуна є стабільною на всіх кутових швидкостях. Т. ч. забезпечується широкий діапазон регулювання швидкості незалежно від навантаження. Регулювання швидкості двигуна здійснюється без додаткових втрат потужності в силовому колі якоря і є досить економічним.

Розглянемо характеристики двигунів постійного струму українських виробників. В Україні функціонують десятки заводів з виробництва електродвигунів, з продукцією яких, зокрема, можна ознайомитись на сайті <https://prom.ua/ua/Elektrodvigateli-v-ukraine>. Наприклад, ПАТ "Дніпропетровський агрегатний завод" випускає **електродвигуни постійного струму серії ДП**: ДП80 потужністю 10 Вт; ДП62 потужністю 16 і 20 Вт; ДП-Р потужністю 0,1 кВт; ДП потужністю 0,18; 0,25 кВт; ДП-Г потужністю 1,5 кВт, які призначені для приводу різних механізмів. Наведемо характеристики електродвигуна ДП-Г-1,5.

Електродвигун постійного струму зі змішаним збудженням ДП-Г-1,5 (рис. 13.5) призначений для приводу насоса гідропідсилювача рульового управління транспортних засобів. Напрямок обертання – за годинниковою стрілкою (з боку робочого кінця вала).

Основні технічні характеристики:

Номінальна напруга, В	24.
Номінальна потужність на валі, Вт не менше:	
- при моменті на валі 9,81 Нм	1500;
- при моменті на валі 0,981 Нм	300.
Струм, А не більше	
- при моменті на валі 9,81 Нм	100;
- при моменті на валі 0,981 Нм	20.
Частота обертання, об./хв.	
- при моменті на валі 9,81 Нм	1500 ± 200;
- при моменті на валі 0,981 Нм	3000 ± 350.

Режим роботи (ГОСТ 183)	S6.
Кліматичне виконання (ГОСТ 15150)	У2.
Робочий діапазон температур, °С	-40... +40.
Габаритні розміри, мм не більше	382x171x228.
Маса, кг не більше	23.

Для управління двигуном сайт www.kiev.prom.ua пропонує **ШИМ регулятор швидкості 10-50 В 40 А 2000 Вт** (рис. 13.8), призначений для зміни швидкості обертання двигуна постійного струму без втрати потужності на валі двигуна.



Рис. 13.8. ШИМ регулятор швидкості

Основні технічні характеристики ШИМ регулятора:

Напруга живлення, В	10-50.
Максимальний вихідний струм, А	40.
Частота, Гц	12000.
Потужність двигуна, Вт	0,01-2000.
Максимальна потужність, Вт:	
при напрузі 12 В	480;
при напрузі 24 В	960;
при напрузі 36 В	1440;
при напрузі 50 В	2000.
Регулювання швидкості, %	5-100.
Розмір корпусу регулятора, мм	125 x 55 x 40.

До недоліків двигунів постійного струму необхідно віднести великий момент інерції якоря і малу надійність щіткового вузла, що особливо погано працює у високому вакуумі через сильне іскріння. Тому, все ширше застосовуються безколекторні двигуни.

13.2.2. Виконавчі механізми з електродвигунами змінного струму

Найбільш поширеними серед електродвигунів змінного струму, які використовуються як силові елементи ВМ, є асинхронні двигуни. Такі двигуни поділяються на три класи:

- трифазні;
- однофазні;
- двофазні.

Вони можуть бути з короткозамкнутим ротором, з пустотілим феромагнітним ротором, з пустотілим немагнітним ротором.

У автоматичних системах часто використовуються асинхронні електродвигуни з пустотілим немагнітним ротором, що мають ряд істотних переваг перед іншими типами двигунів:

- малий момент інерції ротора;
- відсутність ковзаючих струмопроводів (щіток), що знижує момент від сил тертя і виключає виникнення радіоперешкод;
- зручність управління частотою обертання і простота її реверсу;
- пропорційність частоти обертання напрузі живлення;
- можливість живлення від підсилювачів змінного струму;
- стабільність характеристик при значній зміні температури навколишнього середовища;
- відсутність самоходу та ін.

Розглянемо будову, принцип дії та характеристики асинхронних двигунів, які найчастіше застосовуються у ВМ.

Асинхронні електродвигуни з пустотілим немагнітним ротором

Конструктивна схема асинхронного електродвигуна з пустотілим немагнітним ротором представлена на рис. 13.9. У корпусі 1 встановлений сердечник 3 з ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі. В пазах сердечника розташована обмотка статора 2, яка складається з двох обмоток, зсунутих за фазою на кут $\pi/2$, що створюють обертове магнітне поле. Внутрішній сердечник 5 також складається з листів електротехнічної сталі і встановлюється на кронштейні корпусу 6. Сердечник 5 призначений для зменшення опору на шляху основного магнітного потоку. Пустотілий ротор 4 виконується у вигляді тонкостінного циліндра з немагнітного

матеріалу, найчастіше зі сплавів алюмінію. Товщина стінок циліндра складає 0,2...1 мм у залежності від потужності двигуна. Ротор закріплюється на валі 7, що обертається на підшипниках 8. Між стінками ротора і сердечниками є зазор 0,15...0,25 мм.

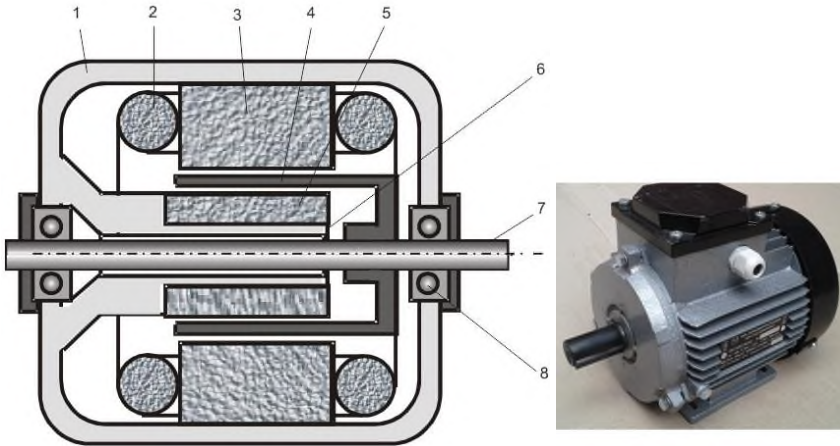


Рис. 13.9. Асинхронні електродвигуни:

конструктивна схема двигуна з пустотілим немагнітним ротором та двигун AIP71B2Y2 з короткозамкнутим ротором

У двигунах малої потужності (до 1,5 Вт) обмотки розташовуються у пазах внутрішнього сердечника і тоді зовнішній статор є просто магнітопроводом. Інколи одна з обмоток розміщується на зовнішньому статорі, а друга – на сердечнику.

Обертаючий момент у таких двигунах створюється в результаті взаємодії обертового магнітного поля, яке виникає при живленні обмоток статора струмами, зсунутими за фазою на кут $\pi/2$, з магнітним полем вихрових струмів, що наводяться в стінках ротора цим же обертовим магнітним полем. Напрямок обертання ротора збігається з напрямком обертання магнітного поля.

Обертове магнітне поле утворюється як результат пульсуючих магнітних полів двох обмоток статора, які розглядають як обмотки управління і збудження. Обмотка збудження живиться від мережі змінного струму, а обмотка управління, зазвичай, від підсилювача. При цьому напруги управління і збудження повинні бути зсунуті за фазою на кут 90° . Найбільшу потужність і частоту обертання двигун

розвиває, якщо його обертове магнітне поле має кругову форму. Це можливо лише в тому випадку, коли магнітні потоки Φ_U і Φ_Z , створювані обмотками управління і збудження, рівні за величиною і зсунуті між собою за фазою рівно на 90° . У всіх інших випадках магнітне поле має форму еліпса. Якщо одна із напруг (зазвичай управління) дорівнює нулю, то результуюче магнітне поле – пульсуюче і обертаючий момент не виникає. Ротор при цьому нерухомий. Аналогічну картину маємо при зміні кута зсуву фаз: при $\varphi=0$ поле пульсуюче і ротор нерухомий. При зміні знака кута φ напрямок обертання ротора змінюється на зворотний.

Управління двохфазними асинхронними двигунами

Застосовуються дві схеми управління двохфазними асинхронними двигунами:

- амплітудна (змінюється напруга на обмотці управління);
- фазова (змінюється фаза напруги на обмотці управління).

При виборі способу управління прагнуть найбільшу зміну обертаючого моменту отримати при найменшому сигналі управління. Схема, показана на рис. 13.10, А забезпечує амплітудне управління електродвигуном. Зсув фази, близький до 90° , між напругами збудження і управління досягається ввімкненням у коло обмотки збудження конденсатора С. Зміна частоти обертання ротора двигуна здійснюється шляхом зміни амплітуди напруги управління. У схемі на рис. 13.10, Б зсув фази на 90° забезпечується включенням конденсаторів C_1 і C_2 у кожен обмотку. Конденсатор C_2 включається в обмотку збудження, коли обидві обмотки живляться від єдиного однофазного джерела, і служить для зсуву фаз між U_z і U_U на 90° . Конденсатор C_1 установлюється для компенсації індуктивного опору в колі обмотки управління, що дозволяє знизити втрати, обумовлені реактивною складовою струму у вихідному каскаді підсилювача, який виконує функції елемента управління двигуном. При правильному виборі ємностей конденсаторів C_1 і C_2 двигун, ввімкнений за цією схемою, розвиває найбільшу потужність. Слід зазначити, що в цій схемі споживання потужності колом управління менше, ніж у попередній за рахунок компенсації індуктивності в колі управління конденсатором C_1 . Тому таку схему застосовують частіше за інші.

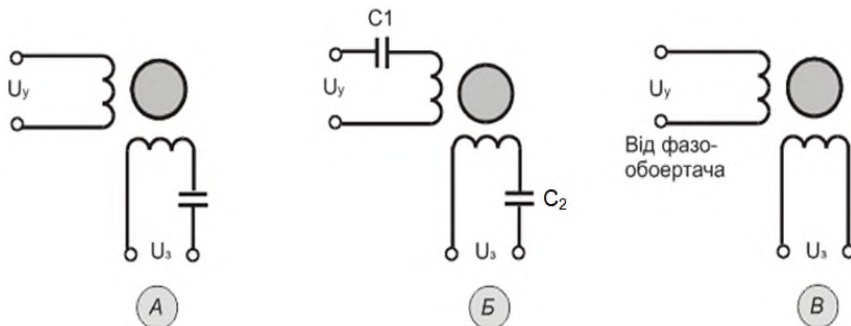


Рис. 13.10. Схеми управління двофазними асинхронними двигунами

При однакових обмотках управління і збудження регулювальні характеристики такого двигуна без навантаження мають вигляд, представлений на рис. 13.11, *А*. З них видно, що максимальна частота обертання холостого ходу n_{xx} настає при $U_y/U_3=1$. При цьому обертове магнітне поле є круговим. Подальше збільшення U_y/U_3 викликає деформацію магнітного потоку, який при цьому стає еліптичним. Надлишок величини магнітного поля по відношенню до кругового створює гальмуючий момент, і частота обертання холостого ходу починає знижуватися.

Відповідно до розглянутих регулювальних характеристик на рис. 13.11, *Б* представлені статичні характеристики двофазних асинхронних двигунів. Їх праве сімейство відноситься до зсуву фаз між U_y і U_3 , рівного 90° , а ліве – до $-90^\circ \pm 180^\circ$. Таким чином, зміна напрямку обертання якоря досягається зміною фази напруги U_y на 180° .

Механічні характеристики розглянутих двигунів показані на рис. 13.11, *В* суцільними лініями. Однак, у багатьох випадках для попередньої оцінки динамічних властивостей таких двигунів реальні механічні характеристики можна замінити прямими (на рис. 13.11, *В* – пунктирні лінії).

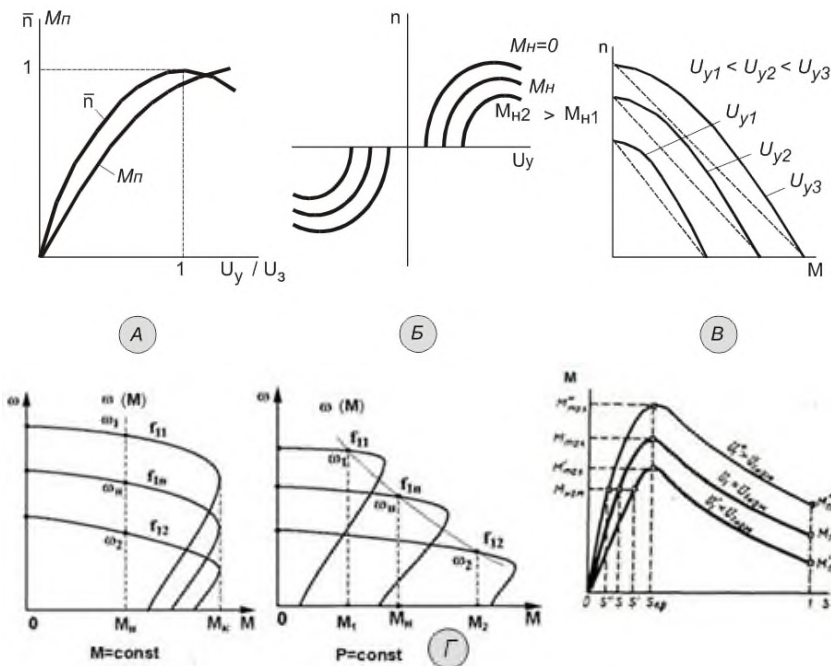


Рис. 13.11. Характеристики асинхронних двигунів:
А – регульовальна, Б – статична, В – механічна двофазних АД,
Г – механічні трифазних АД при різних режимах роботи

В цьому випадку можна показати, що динаміка асинхронного двофазного двигуна наближено описується таким же диференціальним рівнянням (13.4), як і двигуна постійного струму. Як показали дослідження, величина, що містить p^2 в цьому рівнянні, без значних похибок може бути відкинута. Тоді передаточна функція асинхронного двигуна за управляючою дією буде мати вигляд:

$$W_B(p) = \frac{n}{U_y p} = \frac{k}{T_M \cdot p + 1},$$

$$W_B(p) = \frac{\varphi(p)}{U_y p} = \frac{k}{p(T_M \cdot p + 1)}. \quad (13.10)$$

У першій передаточній функції вихідною величиною двигуна є

частота обертання вала n , а в другій – кут повороту вала φ .

Механічна постійна часу T_M може бути приблизно визначена за механічною характеристикою:

$$T_M = Idn/dM, \quad (13.11)$$

яка враховує криволінійність характеристики.

Фазове управління електродвигуном здійснюється за схемою, представленою на рис. 13.10, *В*. Тут напруги збудження і управління мають постійні амплітуди. Зміна частоти обертання і обертаючого моменту досягається зсувом фаз між напругами збудження і управління за допомогою фазообертача, який відіграє роль елемента управління ВМ.

Розміри двигуна з пустотілим немагнітним ротором більші, ніж розміри трифазних асинхронних двигунів і двигунів постійного струму тієї ж потужності приблизно у 2...4 рази. Для зменшення розмірів таких двигунів і збільшення частоти обертання переходять до живлення двигунів напругою підвищеної частоти 400...500 Гц.

Істотним недоліком розглянутих двигунів є низький ККД, який не перевищує 15...30%, що обумовлено значною витратою енергії на збудження і великими втратами при еліптичному обертаючому магнітному полі. З цієї причини потужність таких двигунів не перевищує 10...20 Вт.

Трифазні асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором

Конструкція трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором (АД) подібна до розглянутої раніше конструкції асинхронного електродвигуна з пустотілим немагнітним ротором, рис. 13.9, з тією різницею що обмотки статора зсунуті одна відносно одної в просторі на кут 120° , а короткозамкнутий ротор має відому конструкцію «білчиного колеса».

Принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна заснований на здатності трифазної обмотки при її включенні в мережу трифазного струму створювати обертове магнітне поле. Взаємодія магнітного поля обмоток статора зі струмами короткозамкнутого ротора змушує ротор обертатися в напрямку обертання поля. Швидкість обертання ротора двигуна n_2 визначається виразом:

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60 f_1}{p}(1 - S),$$

де:

$n_1 = 60f_1/p$ – швидкість обертання магнітного поля (синхронна швидкість двигуна);

p – число пар полюсів;

f_1 – частота мережі живлення;

$S = (n_1 - n_2)/n_2$ – ковзання асинхронного двигуна: відносна різниця швидкостей обертання ротора n_2 і змінного магнітного потоку, створюваного обмотками статора двигуна n_1 .

Трифазні АД з короткозамкнутим ротором відрізняються суттєвими перевагами: надійністю, простотою конструкції, високим ККД, відносно малою масою і дешевизною. Тому доцільно застосовувати їх не тільки для приводів, що не потребують регулювання частоти обертання, але і для приводів з регульованою частотою обертання, частка яких серед усіх існуючих електричних приводів безперервно зростає. В даний час вона становить понад 60 % і буде зростати і далі. Розглянемо характеристики асинхронних двигунів, що виробляються на підприємствах України.

ТОВ "Промелектро" (Україна) виготовляє лінійку асинхронних двигунів АИР56, АИР63, АИР71, АИР80, АИР90, АИР100, призначених для приводу загальнопромислових механізмів, які мають основне виконання і модифікацію з підвищеним ковзанням. Двигуни розраховані для роботи від мережі змінного струму зі стандартною напругою від 220 до 660 В при частоті 50 (60) Гц.

Частоти обертання двигунів АИР56А(В) – 3000 об./хв.; АИР63А(В) – 950 (3000) об./хв.; АИР71А(В) – 3000 об./хв.; АИР80А(В) – 3000; (1410) об./хв.; АИР90L2 – 2865 об./хв.; АИР100S4(L2) – 1500; (2900) об./хв.

Споживана потужність АИР56А(В) – 0,18; (0,25) кВт; АИР63А(В) – 0,18; (0,55) кВт; АИР71А2(В2) – 0,75; (1,1) кВт; АИР80А2(В2) 1,5; (2,2) кВт; АИР90L2 – 3 кВт; АИР100S4(L2) – 3; (5,5) кВт.

Основні характеристики асинхронного трифазного двигуна АИР71В2У2

Напруга живлення, В	380.
Номинальний струм, А	2,52.
Споживана потужність, кВт	1,1.
Фазність	трифазний.
Кількість полюсів	2.
Максимальні обороти, об./хв.	2805.
Коефіцієнт потужності	0,8.
ККД електродвигуна, %	79,5.
Номинальний режим роботи	S1.
Ступінь захисту	IP54.
Навколишня температура, °С	від -45 до +40.
Відносна вологість (при 20 °С), %	< 80%.

Відомим виробником асинхронних електродвигунів в Україні є завод «Електромотор». Завод випускає трифазні і однофазні асинхронні електродвигуни змінного струму з висотою осі обертання 63, 71, 80, 100 мм, потужністю від 0,18 до 7,5 кВт, частотою обертання від 750 до 3000 об./хв., частотою мережі 50, 60 Гц, напругою 36-660 В загальнопромислового та спеціального виконань, у т. ч. підвищеної точності, вбудовані, тропічного виконання, з підвищеним ковзанням, редукторні, з вбудованим електромагнітним гальмом та ін.

Згідно Каталогу промислових підприємств України (www.ukr-prom.com) провідними виробниками електродвигунів різного призначення в Україні також є: ТОВ "Новокаховський електромеханічний завод"; ПАТ "Харківський електротехнічний завод «Укрелектромаш»"; ПАТ "Черкаський приладобудівний завод"; ПАТ "Дніпропетровський агрегатний завод"; ПАТ "НВК«Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського»"; ДП "Харківський електромеханічний завод"; ДП "Завод «Електроважмаш»" та ін.

13.2.3. Регулювання частоти обертання АД

З наведених вище залежностей для швидкості обертання ротора двигуна n_2 впливає, що регулювання швидкості обертання

трифазного асинхронного двигуна можна здійснювати трьома основними способами:

- зміною числа пар полюсів p ;
- зміною ковзання S ;
- зміною частоти мережі живлення f_1 .

Розглянемо більш детально ці способи.

Регулювання частоти обертання АД шляхом зміни числа полюсів обмотки статора

Цей спосіб регулювання частоти обертання забезпечує ступінчасте регулювання. З формули для n_2 видно, що швидкість обертання двигуна визначається значенням його синхронної швидкості n_1 , яка при стандартній частоті мережі 50 Гц залежить від числа пар полюсів. При одній парі полюсів вона становить 3000, при двох парах – 1500, при трьох парах – 1000 об./хв. і т. д.

Змінювати число полюсів у обмотці статора можна або укладанням на статорі двох обмоток з різним числом полюсів, або укладанням на статорі однієї обмотки, конструкція якої дозволяє шляхом перемикання груп котушок отримувати різну кількість полюсів. Останній спосіб застосовується найчастіше.

Регулювати швидкість зміною ковзання можливо двома способами:

- зміною напруги живлення;
- зміною активного опору кола ротора (в АД з фазним ротором).

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміною напруги на статорі

Можливість регулювання цим способом ґрунтується на механічних характеристиках асинхронного двигуна $M=f(s)$, рис. 13.11, G , з яких випливає, що зміни напруги живлення U_1 відносно номінального значення $U_{1ном}$ супроводжуються не тільки змінами максимального моменту двигуна, але і змінами частоти обертання ротора. Зі зменшенням напруги U_1 ковзання s збільшується, а частота обертання ротора знижується.

Однак діапазон регулювання частоти обертання цим способом невеликий. Це пояснюється вузькою зоною стійкої роботи двигуна,

обмеженим значенням критичного ковзання $s_{кр}$ і неприпустимістю значного відхилення напруги живлення від її номінального значення.

При перевищенні номінальної напруги виникає небезпека перегріву двигуна, обумовлена різким збільшенням електричних і магнітних втрат, а також необхідність застосування двигуна завищеної потужності.

Тому регулювання напруги живлення може здійснюватися тільки в напрямку зменшення U_1 і зниження частоти обертання ротора. Але тут слід зауважити, що зі зменшенням U_1 пропорційно квадрату напруги зменшується електромагнітний момент двигуна, а також його максимальне і пускове значення. Двигун втрачає переважувальну здатність і виникає небезпека перекидання двигуна. Якщо момент опору робочої машини більший від пускового моменту електродвигуна, то двигун обертається не буде і його необхідно запускати або при номінальній напрузі $U_{ном}$, або на холостому ході, при якому ковзання, а отже і частота обертання, залишаються практично незмінними. Тому регулювати частоту цим способом можна тільки при вентиляторному характері навантаження. Крім того, повинні використовуватися спеціальні електродвигуни з підвищеним ковзанням.

Для регулювання напруги U_1 між мережею змінного струму зі стандартною напругою $U_{1ном}$ і статором електродвигуна включається регулятор напруги. В якості регуляторів крім автотрансформаторів використовують транзисторні регулятори напруги. Транзисторні регулятори змінюють напругу за принципом ШІМ (широтно-імпульсної модуляції), а у вихідних каскадах регуляторів використовуються транзистори – польові або біполярні з ізолюваним затвором (IGBT). Вихідні транзистори комутуються з високою частотою (близько 50 кГц), і якщо при цьому змінювати тривалість імпульсів і пауз між ними, то буде змінюватися і результуюча напруга на навантаженні. Чим коротший імпульс і триваліша пауза, тим меншою буде напруга і потужність.

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна шляхом зміни активного опору кола ротора

Цей спосіб регулювання частоти обертання двигуна використовується для асинхронних двигунів з фазним ротором. Зі збільшенням активного опору кола ротора зростає ковзання, яке

відповідає заданому моменту навантаження, а частота обертання двигуна знижується.

Але при такому способі регулювання неминучі відносно великі втрати енергії, які пропорційні ковзанню. Для зменшення частоти обертання двигуна, наприклад, на 25 % потрібно включити в коло ротора реостат, в якому буде марно втрачатись чверть енергії обертаючого магнітного поля. Зростання втрат у роторі супроводжується зменшенням ККД двигуна, погіршенням умов вентиляції через зниження частоти обертання, що призводить до перегріву двигуна. Крім того, при включенні в коло ротора додаткового опору погіршується стабільність частоти обертання двигуна і малі зміни навантаження на валі викликають значні зміни частоти обертання ротора.

Розглянутий спосіб забезпечує регулювання частоти обертання в широкому діапазоні, але тільки вниз від синхронної частоти обертання. Разом з тим, він забезпечує двигуну поліпшені пускові властивості.

Регулювання частоти обертання АД зміною частоти струму в статорі

Розглянуті способи управління частотою АД шляхом управління напругою, введенням додаткових опорів у коло статора і ротора, зміною числа пар полюсів у сучасних розробках використовуються рідко. З розвитком силової електроніки та мікропроцесорної техніки були розроблені перетворювачі частоти, що забезпечують управління асинхронними двигунами з короткозамкнутим ротором з енергетичними і динамічними показниками, які часто переважають показники інших приводів.

У даний час налічується більше 20 видів систем частотного управління АД. Умовно їх можна класифікувати за такими ознаками:

- за способом управління параметрами напруги (струму) живлення електродвигуна – скалярні і векторні;
- за алгоритмом функціонування автоматичної системи регулювання параметрів напруги (струму) живлення – розімкнені і замкнені;
- за законом управління параметрами напруги (струму) живлення – лінійні (з *ПІ*-, *ПД*- регуляторами) і нелінійні (з нелінійними гістерезисними регуляторами);

- за видом кола зворотного зв'язку – бездатчикові, коли на валі двигуна відсутній енкoder, і системи з датчиками.

Скалярні системи частотного управління АД поділяються на системи з постійним моментом і постійною потужністю двигуна та на системи із законами регулювання напруги пропорційно частоті, пропорційно квадрату частоти і пропорційно кореню квадратному від частоти.

Лінійні векторні системи частотного управління поділяють на полеорієнтовані системи (прямі і опосередковані) і системи з прямим управлінням моментом.

Нелінійні векторні системи управління розділяють на системи з прямим управлінням моментом з таблицею вмикання, прямим самоуправлінням, адаптивним прямим управлінням моментом, нейронними мережами, регуляторами з нечіткою логікою.

Принцип частотного способу управління швидкістю асинхронного двигуна полягає в тому, що змінюючи частоту напруги живлення f_1 , можна відповідно до виразу $n_1 = 60f_1/p$ не змінюючи число пар полюсів p змінювати кутову швидкість n_1 обертання магнітного поля статора.

Але зі зміною частоти f_1 буде змінюватись і максимальний момент двигуна [53]:

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 (x_1 + x'_2)},$$

де m_1 – число фаз в обмотках статора;

x_1 – індуктивний опір розсіювання фазної обмотки статора,

x'_2 – індуктивний приведений опір обмотки ротора.

Тому для збереження перевантажувальної здатності, коефіцієнта потужності і ККД двигуна на потрібному рівні необхідно одночасно зі зміною частоти f_1 змінювати і напругу живлення U_1 .

Закон одночасної зміни f_1 і U_1 залежить від характеру зміни моменту навантаження двигуна і визначається рівнянням:

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} n_1 \sqrt{\frac{M'}{M}},$$

де U_1 і M – напруга і момент при частоті f_1 , а U'_1 і M' – напруга і момент при частоті f'_1 .

У **розімкнутих скалярних системах регулювання напруга (струм) змінюється лише в залежності від частоти за деяким законом,**

який залежить від виду навантаження. Якщо частота обертання двигуна регулюється за умови необхідності забезпечення постійного моменту навантаження ($M=M'=const$), то напругу двигуна необхідно змінювати пропорційно зміні частоти струму: $U'_1 = U_1 f'_1/f_1$. Іншими словами, умовою підтримання постійного моменту навантаження двигуна при регулюванні частоти буде закон $U/f = const$. Цей закон використовується при статичному характері навантаження, механічні характеристики двигуна наведені на рис. 13.11.

При регулюванні напруги і частоти струму за цим законом, механічні характеристики двигуна будуть залишатися жорсткими, а максимальний момент майже незалежним від частоти (він істотно зменшується лише при відносно низьких частотах). У той же час потужність двигуна буде змінюватися пропорційно частоті струму. Наприклад, при зменшенні частоти струму в 2 рази потужність двигуна теж зменшується вдвічі.

При частотах $f > f_{ном}$ умову постійного моменту M_{max} не виконують, оскільки її дотримання потребує збільшення напруги U_1 вище її номінального значення $U_{ном}$. Щоб уникнути перевантаження двигуна за потужністю режим $f > f_{ном}$ допускається тільки при зниженні навантаження на валі двигуна.

Якщо ж регулювання частоти обертання проводиться за умови забезпечення постійної потужності двигуна ($P=const$), то напругу двигуна слід змінювати відповідно до закону: $U'_1 = U_1 \sqrt{\frac{f'_1}{f_1}}$. Тобто,

умовою підтримання постійної потужності двигуна при регулюванні частоти є закон $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$. Механічні характеристики двигуна

наведені на рис. 13.11. А для «вентиляторного» типу навантаження частотне регулювання виконують згідно із законом $U/f^2 = const$.

Для покращення якості регулювання створюються **замкнуті системи** з різними сигналами зворотного зв'язку, якими можуть бути: струм і ЕРС статора, основний магнітний потік АД, частота обертання або абсолютне ковзання. Для отримання таких сигналів зворотного зв'язку використовуються відповідні вимірювальні перетворювачі – енкодери.

Створення зворотного зв'язку за магнітним потоком у зазорі вимагає установки датчиків Холла; за ЕРС статора – укладання

вимірювальної обмотки (витків) у пази статора. Сигнали абсолютного ковзання і частоти обертання вимагають установки тахогенератора. Найбільш доступним сигналом зворотного зв'язку для частотного управління є струм статора, і саме він найчастіше використовується.

Електроприводи зі скалярним управлінням використовують для компресорів, вентиляторів, насосів і інших механізмів в яких необхідно утримувати на певному рівні або швидкість обертання вала електродвигуна, або стабілізувати певний технологічний параметр (наприклад, тиск у трубопроводі із застосуванням відповідного датчика).

Недоліком скалярного управління АД також є неможливість одночасного регулювання швидкості і моменту, тому доводиться здійснювати регулювання тієї величини, яка в даний момент часу найбільш важлива при виконанні технологічного процесу.

13.2.4. Векторне управління АД

Ідея векторного управління двигуном полягає в управлінні за допомогою ортогональних складових струму статора амплітудою і кутом повороту (фазою) вектора струму статора I_s .

Найчастіше застосовуються такі системи векторного управління:

- прямого векторного управління з обчислювачем поточкозчеплення і датчиком швидкості;
- прямого бездатчикового векторного управління з математичною моделлю двигуна;
- непрямого векторного управління з датчиком;
- бездатчикового непрямого векторного управління.

Розглянемо останню з названих систем векторного управління.

Векторне управління АД з орієнтацією за полем ротора - rotor field-oriented control (R-FOC)

При побудові системи векторного управління АД використовують дві системи координат, рис. 13.12:

- нерухому декартову систему, орієнтовану за статором, осі α , β якої співпадають з електричними осями відповідних обмоток статора;

- рухому систему декартових координат d, q , (або x, y), осі якої співпадають з поздовжньою і поперечною осями поля ротора (або статора), що обертається.

Використання рухомої системи координат дозволяє суттєво спростити диференціальні рівняння для електромагнітних процесів АД і тим самим значно зменшити обсяги обчислень при їх моделюванні. Оскільки в системі координат, яка синхронно обертається разом з вектором поля, що визначає електромагнітний момент, проекція цього вектора на іншу вісь координат дорівнює нулю, то вираз для електромагнітного моменту двигуна суттєво спрощується. Як буде показано пізніше, він формально набирає вигляду, ідентичного виразу для електромагнітного моменту двигуна постійного струму, величина якого пропорційна струму якоря і основному магнітному потоку.

Нерухома система координат α, β використовується для формування керуючих впливів на поле статора у вигляді струмів (напруг) обмоток

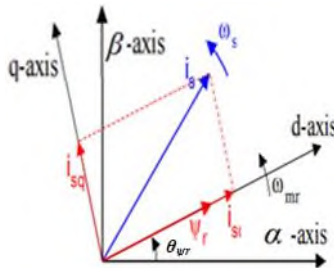


Рис. 13.12. Системи координат:
нерухома – осі α, β та рухома – осі d, q

У першій системі векторного управління, створеній фірмою Siemens у 1971 р., використовувалась рухома система координат, орієнтована за виміряним датчиком Холла магнітним потоком ротора.

Перетворення значень величин з системи координат, яка синхронно обертається разом з полем ротора d, q (або статора x, y), у систему нерухомих координат α, β обмоток статора і зворотне

перетворення здійснюється за відомими формулами перетворень Парка (Park transformation).

Принцип FOC-управління полягає в незалежному управлінні магнітним потоком і моментом АД за допомогою роздільного управління складовими струму статора, які відповідають проекціям вектора струму на осі системи координат, орієнтованої за напрямком вектора магнітного потоку.

Можливість незалежного управління магнітним потоком і моментом M двигуна впливає з рівнянь електромагнітних процесів асинхронного двигуна. Якщо вибрати рухоми систему координат d, q , сумістивши вісь d з вектором потокозчеплення ротора ψ_r , то отримаємо формули [54, 55] для проекцій струмів управління, що відповідають заданим значенням ψ_r , та M :

$$i_{sd} = \frac{\psi_{rd}}{L_m};$$
$$i_{sq} = \frac{2M}{3p_n K_r \psi_{rd}},$$

де M – момент АД, p_n – кількість полюсів, $K_r = L_m/L_r$ – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора, L_m – найбільше значення взаємної індуктивності для трифазної обмотки.

З цих виразів випливає, що:

- за допомогою поздовжньої проєкції струму статора i_{sd} можна управляти потокозчепленням ротора ψ_{rd} ;
- за допомогою поперечної складової струму статора i_{sq} можна незалежно управляти моментом АД при постійному значенні ψ_{rd} ;

Оскільки поле і момент можуть контролюватися окремо, то управління безщітковим двигуном змінного струму стає ідентичним управлінню колекторного двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

При цьому управління моментом двигуна може здійснюватися двома вхідними сигналами: потокозчепленням ψ_{rd} ; і, як було показано раніше, частотою ротора ω_r , що впливає із залежностей [53, 55]:

Блоки координатних перетворень БКП-1 і БКП-2 здійснюють перетворення проєкцій струмів із системи координат, яка обертається синхронно з полем ротора d, q , у систему нерухомих координат α, β і зворотні перетворення. Для виконання цих перетворень використовується також інформація про кут потокозчеплення ротора $\theta_{\psi r}$ від спостерігача. Блок «Спостерігач» швидкості і моменту являє собою математичну модель двигуна і мікроконтролер, що забезпечує розрахунки в реальному масштабі часу поточних значень швидкості обертання ω_m , моменту вала M_m і кута $\theta_{\psi r}$ вектора потокозчеплення ротора за результатами вимірювання струмів фаз статора двигуна вимірювальними перетворювачами (датчиками струму). У наведеній схемі кут потокозчеплення ротора і швидкість оцінюються за бездатчиковим алгоритмом без використання датчика швидкості (положення) вала ротора.

ПІ-регулятор швидкості використовується при необхідності управління швидкістю ω двигуна. За сигналом відхилення швидкості $\Delta\omega = \omega_{зад} - \omega_m$ він формує сигнал завдання $i_{q\_зад}$ для моменту M . Якщо ж регулюється тільки момент АД, то цей регулятор не використовується, а момент задається безпосередньо струмом $i_{q\_зад}$. У системах з датчиком для відстеження частоти обертання використовуються інкрементальний енкодер або тахогенератор. Використання датчиків дозволяє підвищити точність відпрацювання завдання швидкості.

Регулятори струму РТ_d і РТ_q за певним законом (ПІ, ПІД) формують у системі координат d, q вектор напруги статора U шляхом формування двох проєкцій: U_d і U_q , які за допомогою блоку БКП-1 переводяться в U_α і U_β у нерухому систему координат α, β , пов'язану зі статором, де потім і реалізуються.

Напруги U_d і U_q у блоці векторної широтно-імпульсної модуляції ШІМ інвертуються у вектор струму статора I_s , який реалізується струмами i_a, i_b, i_c в обмотках a, b, c статора.

Бездатчикові системи векторного управління використовуються, якщо діапазон вимірювання швидкості не перевищує 1:100, а вимоги до точності коливаються в межах $\pm 1,5\%$.

Якщо вимірювання швидкості здійснюється в межах 1:10000 і більше, а вимоги до точності високі ($\pm 0,2\%$ при частоті обертання нижче 1 Гц), або ж необхідно позиціонувати вал чи здійснювати

регулювання моменту вала при низьких частотах обертання, то застосовуються системи із зворотним зв'язком за швидкістю.

Основними перевагами частотного управління є:

- точність і широкий діапазон регулювання частоти обертання;
- плавний старт і плавне обертання двигуна у всьому діапазоні частот;
- можливість зниження пускових струмів і динамічного навантаження електродвигунів і комутаційної апаратури;
- економічність регулювання, яка забезпечується роботою двигуна з малими значеннями абсолютного ковзання, зниженням втрат на нагрів і намагнічування, підвищенням ККД електродвигуна;
- можливість дистанційного управління двигунами за допомогою ПК, через Internet при використанні сучасних перетворювачів частоти (ПЧ) з картами розширення функцій.

До недоліків відносяться складність і висока вартість ПЧ. Крім того, при роботі на знижених частотах обертання погіршуються умови охолодження електродвигунів. Робота з частотою $f > 50$ Гц потребує обмеження верхнього значення частоти обертання з метою запобігання його перегріву.

Застосування ПЧ призводить до появи у складі вихідної напруги вищих гармонік, що обумовлює збільшення втрат в електродвигуні, його перегрів, пробій ізоляції та ін. негативні явища. Поява гармонік вищих порядків вимагає зниження допустимого навантаження двигуна на 8-15 %. На 1-2 % знижується максимальний момент електродвигуна, на 1-4 % – його ККД і на 5-7 % – $\cos\varphi$.

Для компенсації вищих гармонік на виході ПЧ включають вихідні трансформатори, LC-, dU/dt - або інші фільтри, що призводить до додаткових втрат потужності, яке може становити від 4 до 6 %.

13.2.5. Перетворювачі частоти

Для технічної реалізації розглянутих методів частотного управління електродвигунами не потрібно розробляти відповідні схеми і пристрої. Для цього використовують перетворювачі частоти. Частотний перетворювач – пристрій (взагалі-то система), що використовується для контролю (управління) швидкості і/або моменту двигунів змінного струму шляхом зміни частоти і напруги живлення електродвигуна.

Існує два основних типи ПЧ [58]: з безпосереднім зв'язком і з проміжним контуром постійного струму. В першому випадку вихідна напруга синусоїдальної форми формується з ділянок синусоїд вхідної напруги. При цьому максимальне значення вихідної частоти не може бути рівним частоті мережі живлення і, зазвичай, лежить у діапазоні від 0 до 25-33 Гц.

Найбільш поширеними є ПЧ з проміжним контуром постійного струму, виконані на базі інверторів напруги. Змінна напруга мережі перетворюється діодним випрямлячем й індуктивно-ємнісним фільтром у постійну. Інвертор перетворювача, вихідний каскад якого зазвичай виконується на основі IGBT-модулів, здійснює зворотне перетворення з постійного струму на змінний, забезпечуючи формування вихідного сигналу з необхідними значеннями напруги і частоти. Найбільш часто в інверторах застосовується метод високочастотної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вихідний сигнал інвертора являє собою послідовність імпульсів напруги з постійною амплітудою і змінною тривалістю. Імпульси напруги на індуктивному навантаженні, якою є обмотка статора, формують струми синусоїдальної форми. Можливий діапазон регулювання частоти таких ПЧ складає від 0 до декількох тисяч Гц.

ПЧ також класифікують за такими критеріями: кількістю фаз на вході (однофазні та трифазні); номінальною напругою (для мереж до 500 В, і високовольтні до 6000 В); потужністю (малої до 1 кВт, середньої – потужністю десятки кВт), великої – потужністю сотні і більше кВт); типом управління (векторний або скалярний); областю застосування – (загальнопромислові, ліфтові, для насосно-вентиляторних навантажень та ін.); конструктивним виконанням і за ступенем захисту IP.

Обґрунтування вибору ПЧ

На сьогодні вітчизняна і зарубіжна промисловість виготовляє велику кількість ПЧ різного призначення і потужності, з різними технічними характеристиками і конструктивним виконанням. Залишається лише зробити правильний вибір моделі ПЧ. Чіткого переліку критеріїв, які б дозволили вибрати перетворювач частоти, не існує, що пояснюється специфікою різних типів електротехнологічного обладнання. Тому вибір моделі і технічних параметрів ПЧ у кожному випадку індивідуальний, зорієнтуватися в

яких можна, перш за все, за типом електроприводу та деякими наведеними нижче рекомендаціями і характеристиками.

Вибір ПЧ слід розпочати з аналізу конкретного завдання, яке має вирішувати електропривод, і врахувати ряд робочих параметрів: тип і потужність електродвигуна, його призначення, діапазон регулювання швидкості, спосіб управління двигуном та ін.

Потужність перетворювача частоти вибирається залежно від номінальної потужності двигуна виходячи з таких параметрів:

- планованого типу навантаження;
- максимального значення струму, споживаного електроприводом від ПЧ;
- перевантажувальної здатності перетворювача;
- рівня, тривалості та частоти появи перевантажень.

Оскільки перевантажувальна здатність різних моделей ПЧ може сильно відрізнятись, то потрібно врахувати характер перевантажень механізму, з'єданого з валом двигуна, зокрема, рівень перевантажень, їх частоту і тривалість.

Від правильного вибору потужності буде залежати ефективність і ресурс роботи ПЧ і електроприводу в цілому. Якщо потужність перетворювача мала, він не зможе забезпечити високодинамічний режим роботи і може вийти з ладу через перевантаження, а якщо занадто завищена – він не зможе належним чином забезпечити захист двигуна.

Робота при нестабільному живленні. При виборі ПЧ слід врахувати вимоги до якості напруги живлення. Перетворювач повинен зберігати свою працездатність при будь-яких відхиленнях напруги від норми. У залежності від моделі ПЧ забезпечують працездатність пропорційним просіданням напруги зниженням швидкості, автоматичним перезапуском при відновленні живлення, визначенням швидкості двигуна при повторному запуску (а не розгоном з нуля), функцією контрольованої плавної зупинки двигуна при відключенні напруги та ін.

Діапазон регулювання частоти. Діапазон регулювання частоти ПЧ повинен, перш за все, задовольняти високошвидкісний режим двигуна. Крім того, якщо робота електроприводу не передбачає зниження швидкості нижче 20 % від номінальної, то підійде практично будь-який ПЧ. Але якщо потрібно знижувати швидкість і далі, забезпечуючи при цьому номінальний момент на валі, потрібно

вибирати ПЧ, здатний забезпечити роботу електродвигуна на частотах, близьких до нуля. Також важливо врахувати спосіб охолодження двигуна і наявність у ПЧ функції контролю теплового режиму, а для двигуна з самовентиляцією передбачити захист від перегріву.

Спосіб управління. Сучасні ПЧ забезпечують різні способи управління електродвигуном. При виборі ПЧ потрібно сформулювати вимоги до процесу управління електроприводом з врахуванням характеру навантаження, його динаміки і відповідного крутного моменту, діапазону і точності регулювання частоти, швидкості відгуку на зміну частоти обертання та ін.

Основні способи управління асинхронними двигунами та їх властивості були розглянуті раніше. Це – U/f (вольт-частотний, скалярний), U/f з енкодером, векторне управління без зворотного зв'язку і векторне управління зі зворотним зв'язком. Нагадаємо основні характеристики кожного з цих способів та особливості їх використання.

Скалярний режим з лінійною залежністю між напругою і частотою ($U/f = \text{const}$) використовується для навантажень з постійним моментом. Це такі навантаження як, наприклад, конвеєри, компресори, міксери, поршневі насоси. Він використовується також для управління синхронними двигунами або двигунами, підключеними паралельно. Для підвищення моменту на низьких частотах у ПЧ передбачається функція підвищення вихідної напруги.

Цей режим є доволі простим, але має кілька обмежень. Діапазон регулювання частоти обертання дорівнює 1:40. Початковий обертаючий момент двигуна обмежений 150 % потужності при частоті 3 Гц. Частота обертання зазвичай регулюється з кроком 2-3 % від максимальної. Швидкість відгуку складає біля 3 Гц. Крім того, метод не гарантує обертання вала двигуна.

При змінній механічній характеристиці, момент навантаження якої зростає зі збільшенням швидкості обертання (відцентрові насоси і вентилятори), використовується квадратична залежність напруга/частота ($U/f^2 = \text{const}$). Цей режим, як і попередній, можна використовувати для управління паралельно підключеними двигунами. Він забезпечує зменшення струму намагнічування на низьких частотах за рахунок зменшення напруги живлення, дозволяє поліпшити продуктивність і ККД.

Якщо обладнання вимагає більш точного ніж 2-3 % регулювання швидкості й можливості роботи на більш високій опорній частоті, то можна використати замкнуту систему вольт-частотного регулювання з енкодером. Система з енкодером дозволяє домогтися регулювання з кроком до 0,03 % від максимальної частоти.

Векторний режим. Для приводів з важкими умовами роботи (вентилятори великої потужності, екструдери, підйомно-транспортне обладнання) та з метою покращання технічних та економічних показників електротехнологічного обладнання використовують ПЧ з векторним управлінням. Векторний спосіб дозволяє незалежно контролювати швидкість і обертаючий момент двигунів і забезпечує високий ККД.

Оскільки більшість електродвигунів змінного струму не мають вбудованих датчиків поточного стану ротора, то затребуваною є розглянута раніше, рис. 13.13, система векторного управління без енкодера. У цій системі замість датчика використовується математична адаптивна модель двигуна, яка потребує налаштування ПЧ на параметри двигуна.

У векторних системах без зворотного зв'язку управління обертаючим моментом і швидкістю двигуна здійснюється шляхом управління ортогональними складовими струму статора i_{sq} та i_{sd} , рис. 13.13. Якщо обладнання потребує збільшення обертаючого моменту, то струм i_{sd} збільшується і за рахунок зростання потокозчеплення збільшується момент, і навпаки, струм i_{sd} зменшується для обмеження обертаючого моменту. Якщо ж потрібно змінити швидкість двигуна, то змінюється струм i_{sq} при постійному значенні потокозчеплення. Саме ця можливість дозволяє здійснювати динамічне управління двигуном на відміну від вольт-частотного скалярного методу управління. Інвертор ПЧ розраховує струм намагнічування і струм обертаючого моменту у вигляді векторів, забезпечуючи їх розташування під кутом 90° для досягнення максимального крутного моменту і ККД. Обертаючий момент двигуна може становити 200 % від номінального при частоті 0,3 Гц. Можливе обмеження крутного моменту для запобігання пошкодження обладнання або продукції.

Управління без зворотного зв'язку дозволяє жорстко регулювати роботу двигуна. Крок регулювання частоти обертання становить $\pm 0,2$ % від максимальної, а діапазон регулювання частоти досягає 1:

200, що дозволяє двигуну працювати на низьких швидкостях без втрати обертаючого моменту. Відгук на зміну швидкості відбувається з частотою 10 Гц і забезпечує динамічну реакцію на її зміну.

До недоліків такого управління можна віднести необхідність налаштування ПЧ під двигун і відсутність інформації про динаміку вала двигуна через відсутність зворотного зв'язку.

Векторне управління зі зворотним зв'язком. При необхідності управління моментом двигуна зі швидкістю, близькою до нульової, при навантаженні, що може змінюватися на одній і тій же частоті, або для розширення діапазону регулювання швидкості чи прецизійного регулювання з похибкою меншою 1 % потрібен ПЧ, який має режим векторного управління зі зворотним зв'язком. Його ключова відмінність від векторного управління без зворотного зв'язку полягає у можливості використання інкрементального енкодера.

Управління із застосуванням енкодера дозволяє досягнути обертаючого моменту 200 % від номінального при нульовій частоті, що є важливим для обладнання, яке утримує вантажі без руху (ліфти, крани та підйомники). Діапазон регулювання частоти обертання розширюється до 1: 1500 з кроком $\pm 0,02$ % від максимальної частоти, а швидкість відгуку зростає до 50 Гц, що є найкращим показником серед всіх методів управління.

ПЧ зі зворотним зв'язком також може запускати двигун у режимі управління тільки обертаючим моментом, а не частотою обертання. Такий режим використовується в обладнанні, для якого обертаючий момент є більш важливим параметром, ніж частота обертання двигуна, наприклад, в обладнанні конвеєрних фасувальних і розливних ліній.

Недоліками такого управління є потреба в налаштуванні ПЧ під двигун та необхідність використання енкодера і блоку зворотного зв'язку.

Останнім часом у ПЧ стали застосовувати метод прямого управління моментом з таблицею включення (switching table DTC, ST DTC). Цей метод полягає у формуванні вектора напруги для одночасного управління і моментом, і потокозчепленням статора. Необхідні параметри вектора напруги для управління електродвигуном вибираються з таблиці включення ПЧ.

Недоліком класичного методу прямого керування моментом є наявність пульсацій струму і моменту в усталеному режимі, які зменшуються при підвищенні робочої частоти інвертора вище 40кГц. ПЧ реалізують різні модифікації методу DTC, які забезпечують поліпшення пуску, умов перевантаження, роботи на дуже низьких швидкостях, зменшення пульсацій моменту, роботу на змінній частоті перемикавання, зменшення рівня шумів та ін.

Зі збільшенням функціональних можливостей і покращанням характеристик зростає складність і вартість ПЧ. Але при виборі простого і недорогого ПЧ слід врахувати перспективну модернізацію електротехнологічного процесу і передбачити потрібні параметри ПЧ, що дозволить зекономити кошти на обладнання в майбутньому. Після вибору ПЧ з необхідним переліком способів і режимів регулювання слід звернути увагу на наступні важливі характеристики.

Автоматичне налаштування. У найпростіших моделях ПЧ налаштування під параметри двигуна не передбачено. У деяких ПЧ потрібно вводити ряд додаткових технічних даних двигуна. Функція автоматичного налаштування ПЧ стає необхідною при векторному способі управління двигуном. Сучасні ПЧ забезпечують можливість так званого ідентифікаційного пуску, при якому перетворювач сам вимірює всі параметри, або проводить необхідні вимірювання безпосередньо під час роботи. Ця функція є особливо потрібною, якщо передбачається реалізувати прецизійну систему управління двигуном.

Комунікаційні можливості. Для роботи електродвигуна у складі системі автоматичного управління технологічним процесом використовуються різні протоколи передачі даних. Якщо треба зв'язати два пристрої між собою, то вони обидва повинні підтримувати однакові протоколи. Найбільш поширеними є протоколи зв'язку MODBUS, PROFIBUS, CANOPEN. Проте в залежності від наявного обладнання питання про необхідність вбудованого чи додатково доступного того чи іншого протоколу необхідно вирішувати окремо.

Існуючі моделі ПЧ забезпечують виконання спеціальних функцій для технологічного обладнання. Сервісні функції можуть конфігуруватись за допомогою вбудованої панелі програмування, зовнішніх терміналів, контролера або ПК. Конфігурувати, керувати і

діагностувати ПЧ можна дистанційно через Інтернет чи за допомогою Bluetooth.

У разі використання зовнішнього керуючого пристрою (контролера, логічного реле і т.д.), необхідно переконатися в узгодженні технічних параметрів цих пристроїв з параметрами ПЧ. Зазвичай використовуються сигнали струму або напруги з діапазонами 0...20 мА, 4...20 мА і 0...10 В відповідно.

При створенні складної системи управління ПЧ повинен мати достатню кількість входів і виходів для передавання сигналів управління і контролю. Аналогові входи служать для введення сигналів завдання і зворотного зв'язку, дискретні – для введення різного роду команд, запрограмованих користувачем (швидкість, пуск, реверс, стоп, зміна завдання, аварійна зупинка і т.д.), цифрові – для високочастотних сигналів від енкодерів або цифрових датчиків швидкості і положення. Їх кількість повинна бути достатньою для передавання усіх керуючих сигналів.

Аналогові виходи використовуються для побудови систем автоматизованого управління, живлення пристроїв відображення та ін. Дискретні виходи теж застосовуються для побудови складних систем управління, а також для виведення сигналів про стан системи і різноманітні події (наприклад, про критичний режим двигуна чи аварію).

Функції захисту. Крім функцій управління ПЧ виконує функції захисту, основними серед яких є:

- обмеження струму при пуску, тривалій роботі, зупинці і короткому замиканні;
- захист від перенапруги і заниженої напруги;
- контроль температури двигуна;
- захист від перегріву радіаторів охолодження;

Набір функцій захисту ПЧ є різним. Зокрема, більшість ПЧ мають декілька функцій обмеження струму – при пуску, тривалій роботі, зупинці чи короткому замиканні. ПЧ з тепловою моделлю двигуна здатні захистити двигун від перегріву та ін. Вибір функцій захисту ПЧ потрібно робити виходячи з аварійних ситуацій, властивих технологічному процесу.

Заборона роботи на резонансних частотах. Технологічне обладнання може мати власні резонансні частоти, при яких виникають вібрації, що можуть привести до його поломки. У таких

випадках ПЧ повинен мати функцію виключення цих резонансних частот, що дозволить позбавитись від резонансних явищ і передчасного виходу з ладу обладнання.

Режими гальмування. Звичайне гальмування вибігом (інерційне гальмування), аналогічне відключенню двигуна від мережі живлення. При цьому процес гальмування може зайняти певний час, особливо при масивних механізмах з великою інерцією. ПЧ може зупиняти або гальмувати двигун за більш короткий проміжок часу. Можливі кілька варіантів гальмування:

- рекуперативне гальмування з віддачею в мережу електроенергії;
- гальмування напругою низької частоти або постійною напругою (гальмування постійним струмом), з розсіюванням теплової енергії гальмування через радіатори;
- гальмування з використанням гальмівного переривача і гальмівних резисторів.

Режим рекуперації забезпечує економію електроенергії, привід з використанням гальмівних резисторів – більш дешеве технічне рішення, але можливе тільки при малих потужностях.

Конструктивне виконання. Конструктивне виконання ПЧ має відповідати умовам експлуатації, зокрема, діапазону робочих температур, вологості, висотності, вібрації, ступінь захисту IP. Виконання IP00 прийнятне тільки для установки в шафі або спеціальному приміщенні, оскільки не має захисту від ураження електричним струмом. Виконання IP20 допускає установку в приміщеннях загального доступу. При установці в приміщеннях з високою вологістю або великою кількістю пилу в повітрі необхідно використовувати виконання IP54 або інше відповідно до вимог стандартів.

Звичайно, рішення про вибір ПЧ не обмежується розглянутими вище критеріями. Ми розглянули лише ті з них, які є найважливішими на початковому етапі. Вибір ПЧ того чи іншого конкретного виробника крім розглянутих критеріїв залежить також від призначення ПЧ, виконуваних функцій, вартості тощо. На ринку України представлена продукція великої кількості вітчизняних і зарубіжних виробників ПЧ: китайських, японських, європейських, американських. Серед зарубіжних найбільш відомими є компанії Siemens (перетворювачі Micromaster), Control Techniques, Danfoss,

Lenze, Schneider Electric (перетворювачі Altivar), ABB та ін. Розглянемо найбільш поширені з них.

Зарубіжні та вітчизняні ПЧ

Компанія Siemens виробляє ПЧ для керування двигунами постійного і змінного струму. Це – ПЧ Micromaster для регулювання трифазних електродвигунів з діапазоном потужностей від 120 Вт при однофазному вході і до 75 кВт при трифазному. Перетворювачі можуть працювати індивідуально або інтегруватися в системи автоматизації. ПЧ Simovert Masterdrives цієї компанії – високовольтні ПЧ з ланкою постійної напруги для точних і високопродуктивних електроприводів з жорсткими вимогами до динамічних характеристик та великих автоматизованих систем.

Фірма Control Techniques (Великобританія) виготовляє ПЧ Control Technics серії Commander SK з векторним управлінням асинхронними двигунами без датчика зворотного зв'язку та серії Unidrive SP для векторного управління асинхронними і синхронними приводами як зі зворотним зв'язком, так і без зворотного зв'язку. ПЧ серії Unidrive SP характеризуються гнучкою системою настройки і можуть управляти прямим приводом, забезпечують істотну економію енергії і високий ККД.

Датська фірма Danfoss виробляє ПЧ для електроприводів систем водопостачання та водовідведення (серія Danfoss VLT AQUA), опалення, вентиляції і кондиціонування (серія Danfoss VLT HVAC). Приводи Danfoss оснащені інтелектуальною системою тепловідводу, вбудованими фільтрами гармонік і вважаються досить економними і компактними в своїй лінійці.

ПЧ німецької компанії Lenze серії SMD призначені для простого регулювання швидкості асинхронних двигунів, забезпечують виконання тільки основних функцій і мають невисоку вартість.

Компанія ОВЕН випускає лінійку **перетворювачів ПЧВЗ** (рис. 13.14) широкого діапазону потужностей від 0,25 до 90 кВт для приводів систем вентиляції, каналізації, холодного і гарячого водо-, теплопостачання, димососів, градирень, чілерів і т. д. Перетворювачі мають вбудований *П*-регулятор для управління в замкнутому контурі (тиском, температурою, рівнем і т. д.) та вбудований ПЛК для створення складних систем управління і позиціонування

приводу. ПЧ ОВЕН обладнані функцією автоматичної оптимізації енергоспоживання і мають високий рівень енергоефективності.

Перетворювачі ПЧВЗ забезпечують виконання таких основних функцій:

Вольт-частотний або векторний алгоритми управління;
Плавний пуск і зупинку двигуна, в т. ч. відкладений запуск;
Компенсацію навантаження і ковзання;
Автоматичну адаптацію двигуна без обертання.

Основні параметри ПЧВЗ:

Живлення, ф×В	3 × 220.
Потужність, кВт	0,25...11.
Живлення, ф×В	3 × 380.
Потужність, кВт	0,37...90.
Вихідна частота, Гц	до 400.
Діапазон регулювання до	1: 100.
Точність підтримки швидкості, %	до 0,5 від фактичної.
Точність підтримки моменту, %	до 1 від фактичного.



Рис. 13.14. Перетворювачі частоти:
ПЧВЗ Овен та ATV 320 Schneider Electric

ПАТ «Запорізький електроапаратний завод» виробляє ПЧ і частотні електроприводи ЕКТ на їх основі, що охоплюють шкалу

потужностей від 0,375 до 800 кВА при струмі від 4 до 800 А для насосів, центрифуг, підйомників, транспортерів, вентиляторів та інших механізмів з постійним або вентиляторним моментом навантаження.

Перетворювачі частоти побудовані на IGBT-модулях виробництва ФРН і Японії, сучасних контролерах, захисній і комутаційній апаратурі. Вольт/частотна (U/f) характеристика управління може коригуватися користувачем. Для зупинки електроприводу використовується динамічний спосіб гальмування з інжекцією постійного струму в статор. Перетворювачі комплектуються: входними фільтрами (мережевими дроселями); вихідними фільтрами (дроселями двигуна, RC-колами); гальмівними резисторами.

Перетворювачі електроприводів ЕКГ забезпечують:

Роздільне значення частоти, Гц 0,1;
Перевантажувальну здатність, % 150 від $I_{ном}$ протягом 2 хв.;
Виключені частоти, Гц 2 зони з діапазоном 0,1-50;
Час розгону/уповільнення, с 0-120.

ТОВ «КЕП» виробляє комплектні ПЧ типу «СТРУМ» потужністю від 5,5 до 315 кВт для приводів комунального господарства (насосів водопостачання та водоочисних споруд, багатонасосних станцій, вентиляторів і системи кондиціонування), харчової промисловості (конвеєрів, фасувальних і розливних ліній, пакувальних машин), с/г (тваринницьких комплексів, цукропереробних заводів, елеваторів та ін.). ПЧ мають функцію дистанційного керування від пульта за інтерфейсом RS-485. Вони комплектуються резистивними блоками динамічного гальмування з номінальним струмом 15 і 30 А і потужністю 9,3 і 18,6 кВт.

Технічні характеристики ПЧ СТРУМ (СТ2):

Клас напруги, кВ 0,4.
Діапазон потужностей, кВт 5,5...315.
Діапазон номінальних струмів, А від 10 до 630.
Діапазон регулювання вихідної частоти, Гц 0,5...50 (400).
ККД, не менше 0,97.
Коефіцієнт потужності мережі, не менше 0,95.

МПП «ОВИС», яке спеціалізується на АСУ млинового комплексу, виробляє **перетворювач частоти ЧПД**, призначений для живлення трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором. Перетворювач ЧПД має функції управління навантаженням, яке найбільш часто використовуються, наприклад: вентилятори, насоси, транспортувальне, фасувальне і упаковочне обладнання та поставляється готовим до використання для більшості застосувань.

Компанія Schneider Electric виготовляє перетворювачі частоти Altivar 320. Перетворювачі частоти Altivar Machine 320 призначені для управління асинхронними і синхронними електродвигунами потужністю від 0,18 кВт до 15 кВт з двома типами живлення: однофазним 200-240 В для двигунів потужністю від 0,18 до 2,2 кВт та трифазним 380-500 В для двигунів потужністю від 0,37 до 15 кВт.

Перетворювачі забезпечують виконання функцій управління (скалярного і векторного) електродвигунами, їх плавного пуску, зупинки, контролю частоти обертання, функцій безпеки та прикладних функцій. Області застосування перетворювачів: вентилятори, насоси, компресори, тістозмішувачі, міксери, конвеєри, механізми переміщення матеріалів, підйомні механізми, виконавчі механізми та ін.

Блок управління перетворювачів може мати компактне (для установки в невеликій електричній шафі (глибиною 200 мм або менше) або книжкове (ширина 45 або 60 мм) конструктивне виконання (рис. 13.14).

Перетворювач ATV320 забезпечує: скалярний режим управління за лінійним U/f та квадратичним U/f^2 (енергозберігаючий режим, робота без навантаження) законами; векторний режим управління в системі без енкадера (енергозберігаючий і стандартний режими). Параметри двигуна визначаються перетворювачем автоматично.

Логічний контролер ATV Logic з вбудованою системою керуючих функцій дозволяє налаштувати алгоритми управління без додаткових пристроїв. Програмування функцій контролера здійснюється за допомогою програмного забезпечення SoMove та вбудованої панелі програмування. Можливе виконання таких функцій, як: арифметичні дії; Булеві операції; лічильники та ін.,

всього до 50 операцій. Перетворювач дозволяє створювати схеми автоматичного регулювання параметрами (CAP). Додатково Schneider Electric надає готові до використання бібліотеки для ПЛК.

Конфігурувати, керувати і діагностувати перетворювачі частоти з використанням ПЗ SoMachine і SoMove можна за допомогою програмного блоку DTM, який містить уніфіковану структуру управління параметрами перетворювача. DTM також має спеціальні функції: offline і online доступ до інформації; передача файлів конфігурації з перетворювача і назад; настройка (за допомогою меню); осцилограф; моніторинг параметрів перетворювача; виявлення сигналів про помилки та попередження.

Перетворювач ATV320 забезпечує виконання 150 прикладних функцій, зокрема: конфігурування (стандартне або користувача); спеціальні функції для відповідного технологічного обладнання; настроювання частоти комутації (корекція струму двигуна, зменшення шуму двигуна); моніторинг за допомогою опції «Індивідуальне меню» та ін. Сервісні функції можуть вибиратись за допомогою програмного забезпечення SoMove або призначатись безпосередньо на дискретних входах перетворювача.

ПЧ передбачає виконання 5 функцій безпеки: відключення моменту; обмеження швидкості; зупинка; безпечний максимум швидкості; блокування дверей.

ATV320 обладнаний 4-символьним дисплеєм, який дозволяє відображати його стан, коди помилок і значення параметрів. Для вибору пунктів меню, коригування значень параметрів і зміни швидкості двигуна в режимі ручного управління використовуються навігаційні клавіші на панелі приладу.

Комунікаційні можливості перетворювача Altivar Machine забезпечують його роботу в структурах автоматизації. Вбудованими є інтерфейси CANopen і Modbus RTU. Додатково доступні модулі: Ethernet, Modbus TCP, EtherNet/IP, Profinet, EtherCAT b Serial, Profibus DP. Зв'язок із зовнішніми приладами здійснюється за протоколами: ModBus IP; VW3A3601; VW3A3607; VW3A3609; VW3A3616; Ethernet IP; DeviceNet; RS-485/Modbus. За допомогою комунікаційних шин і мереж можливий доступ до всіх функцій ПЧ: управління; контроль; настройка; конфігурація. Задавання частоти і команд управління може здійснюватись від: дискретних і/або

аналогових входів; комунікаційної шини або мережі; виносних терміналів.

Характеристики перетворювача ATV320U15N4C:

Потужність, кВт	1,5.
Число фаз/напруга на вході, В	3-ф/380.
Число фаз/напруга на виході, В	3-ф/380.
$M_{\max}$ (1 хв.), % від $M_{\text{ном}}$	150.
$M_{\max}$ (1 с), % від $M_{\text{ном}}$	200.
Струм номінальний, А	4,1.
Струм протягом 1 хв., А	6,2.
Точність без датчика швидкості, % від $S_{\text{ном}}$	10.
Максимальна вихідна частота, Гц	600.
ЕМС фільтр	Так.
Вбудований регулятор	ПІД.
Модуль контролю швидкості	VW3A3620.
Панель програмування	VW3A1006 (1101).
Програматор	VW3A8121.
Максимальне число фіксованих швидкостей	16.
Тип аналогових входів	0-10 V; -10...+10V; 0(4)-20 mA.
Число дискретних входів	6.
Тип аналогових виходів	0-10 V або 0(4)-20 mA.
Число дискретних (транзисторних) виходів	1.
Число релейних виходів	2.
Зовнішня температура, °C	50.
Клас виконання за IEC 60721-3-3	3C3, 3S23.
Ступінь захисту по IP	20.
Розміри, мм	210x105x182.
Вага виробу, кг	1,30.

До ПЧ можуть підключатися виносний термінал або виносний графічний термінал. Виносний термінал використовується для: дистанційного керування, налаштування і конфігурації перетворювача; відображення його стану і кодів помилок на 4-символьному дисплеї. Дисплей має клавіші: прокрутки; вибору ENT, ESC; ручного управління приводом: RUN (команда пуску

електродвигуна); FWD/REV (зміна напрямку обертання електродвигуна); STOP/RESET (зупинка електродвигуна/скидання виявлених помилок); кнопку вибору режиму MODE.

Виносний графічний термінал з текстовим дисплеєм забезпечує конфігурування, налагодження або обслуговування перетворювача. Він має: графічний екран з відображенням тексту на 8-ми рядках з 24 символами в кожному; клавішу доступу до меню; навігаційні клавіші й клавіші ручного управління приводом: RUN, STOP/RESET, FWD/REV; інтерфейс на шести мовах.

Зовнішній завантажувач дозволяє перенести конфігурацію з одного ПЧ на інший. Мультизагрузчик дозволяє копіювати конфігурації з комп'ютера або перетворювача частоти і переносити їх на інший перетворювач.

ПЧ Altivar Machine 320 може оснащуватися додатковим обладнанням і приладами, можливість використання яких залежить від його типорозміру. Це таке обладнання: гальмівні резистори, мережеві дроселі, дроселі двигуна, додаткові фільтри ЕМС, модулі контролю поточної швидкості, адаптери для підключення додаткових комунікаційних модулів.

Гальмівні резистори забезпечують розсіювання енергії при гальмуванні до повної зупинки або при зниженні швидкості приводу. Мережеві дроселі використовуються для захисту від перенапруг і зменшують спотворення форми кривої струму. Установка основних і додаткових фільтрів ЕМС дозволяє задовольняти вимоги до рівня наведеного випромінювання в мережі, встановленого стандартом МЕК (IEC) 61800-3, категорія C1 або C2. Модуль контролю поточної швидкості VW3A3620 забезпечує контроль фактичної швидкості і напрямку руху двигуна і дозволяє виявити небажані прослизання навантаження за допомогою зовнішнього енкодера.

13.2.6. Виконавчі механізми з кроковими електродвигунами

В автоматичних системах у ролі пристроїв управління (вимірювальної частини регулятора) все частіше використовуються мікроконтролери та електронні обчислювальні машини. Сигнали управління, сформовані ними, зручно подавати у вигляді послідовності імпульсів. При цьому кут повороту вала силового елемента ВМ повинен бути пропорційним числу імпульсів у команді. Висока точність і надійність цього способу управління обумовила

необхідність розробки крокового двигуна з кутом повороту ротора, пропорційним числу імпульсів, які надходять на його обмотку управління.

Кроковий двигун це – безколекторний синхронний двигун, ротор якого має постійну намагніченість, а статор складається з декількох обмоток, розташованих під певним кутом. Конструктивна схема крокового двигуна показана на рис. 13.15. Двигун складається з:

- статора 1;
- полюсів 3 статора з обмотками;
- ротора 2;
- полюсів 4 ротора.

Якщо на обмотку статора подати імпульс напруги, то протягом цього імпульсу струм обмотки створює магнітне поле. Як відомо, різнойменні полюси магнітів притягуються. Під дією намагнічуючої сили полюси ротора займають найближче до полюсів статора положення. При цьому ротор двигуна повернеться на кут $\Delta\phi$, з фіксацією положення ротора вкінці імпульсу (рис. 13.15).

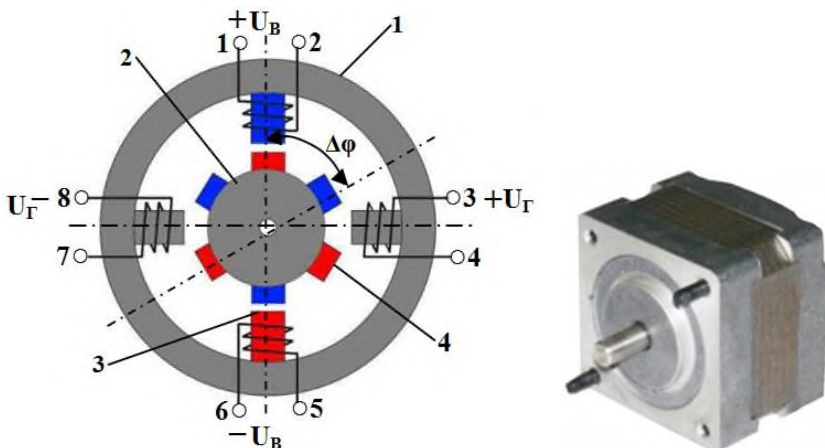


Рис. 13.15. Кроковий двигун:
*конструктивна схема; двигун ДШР39-0,06-1,8;
драйвер L298N; блок керування SMSD-1.5*

При послідовній зміні напрямку струму в обмотках статора керуючим пристроєм змінюється напрямок магнітного поля статора.

Магнітне поле статора взаємодіючи з магнітним полем ротора приводить ротор в круговий рух. Ротор здійснює синхронні дискретні переміщення (кроки) певної величини, що визначаються кількістю обмоток статора і полюсів ротора. Частота обертання ротора пропорційна частоті зміни напрямку струму в обмотках статора, яке здійснюється шляхом послідовної зміни полярності напруги живлення на U_B вертикальних і U_G горизонтальних обмотках, рис. 13.15.

Кроковий двигун може бути біполярним або уніполярним. **Біполярний двигун** має по одній обмотці для кожної фази (вертикальну, на яку подається напруга $+U_B$, $-U_B$, та горизонтальну, на яку подається напруга $+U_G$, $-U_G$, при з'єднаних між собою клеммах 2 і 5 та 4 і 7 обмоток, рис. 13.15, і двополюсний ротор. Для їх комутації використовується мостовий драйвер, прикладом якого є мікросхема L298N, рис. 13.16, що забезпечує струм комутації до 2 А. Управління драйвером здійснюється або від контролера Arduino, або від іншого мікропроцесорного керуючого пристрою за допомогою спеціальних програм.

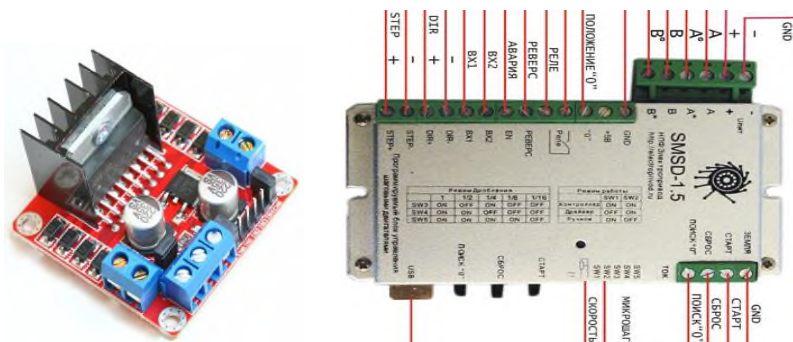


Рис. 13.16. Пристрої керування кроковими двигунами:
драйвер L298N та блок SMSD-1.5

Кроковий двигун з уніполярними обмотками має один загальний вхід, підключений до плюса напруги джерела живлення $+U$, з яким з'єднані клеми 1, 3, 6 і 8 обмоток. Інші 4 клеми обмоток (2, 4, 5 і 7) послідовно комутуються до мінусового полюса джерела живлення $-U$. Для комутації уніполярних обмоток досить чотирьох

ключів, замикаючих обмотки на землю, управління якими здійснюється мікроконтролером. Біполярний двигун при тих же розмірах забезпечує більший обертаючий момент у порівнянні з уніполярним.

Іноді середні клеми вертикальних і горизонтальних пар обмоток (клеми 2 і 5 та 4 і 7) конструктивно з'єднують всередині двигуна, іноді всі 8 клем виводять окремо. В останньому випадку двигун часто називають чотирифазним, хоча фактично він являється двофазним.

Крокові двигуни поділяють на двигуни:

- з постійними магнітами;
- зі змінним магнітним опором;
- гібридні.

Крокові двигуни з постійними магнітами можуть мати ротор, число полюсів якого більше 2. При цьому збільшується число кроків двигуна. Показаний на рис. 13.15 двигун з трьома парами полюсів ротора має 6 кроків на один оберт. У реальних двигунів з постійними магнітами число кроків на оберт доходить до 48, що відповідає куту кроку 7,5 град.

У двигунів зі змінним магнітним опором у роторі немає постійних магнітів. Їх ротор виконаний з магнітомягкого матеріалу і має зубчасту форму. Магнітний потік замикається через найближчі до полюсів статора зубці ротора, які притягуються до полюсів, забезпечуючи обертання ротора. При тих же розмірах, двигуни зі змінним магнітним опором мають менший обертаючий момент, ніж інші типи крокових двигунів.

Найпоширеніший тип крокових двигунів - **гібридні двигуни**. Вони мають і зубчастий ротор, і постійні магніти. Їх принцип дії еквівалентний двигунам з постійними магнітами з істотно більшим числом полюсів.

Крокові електродвигуни дозволяють у широких межах регулювати як обертаючий момент (змінюючи амплітуду імпульсів), так і обороти (частоту) з високою точністю без зворотного зв'язку, легко здійснювати реверс зміною порядку проходження сигналів.

До переваг крокових двигунів також можна віднести такі:

- забезпечення повного обертаючого моменту при зниженні швидкості обертання, аж до зупинки;
- фіксований стан при зупинці за рахунок струму утримання;

- здатність до швидкого старту і зупинки;
- відсутність колекторних щіток і високу надійність.

Об'єднуючи в собі двигун і позиціонуючий пристрій без зворотного зв'язку, кроковий двигун є незамінним приводом у промисловому обладнанні, верстатах з ЧПУ, робототехніці.

Недоліки крокових двигунів – складність системи управління, без якої крокові двигуни непрацездатні, невисокі швидкості обертання, низька питома потужність.

На підприємствах України виробляються крокові двигуни різного призначення. Розглянемо деякі з них більш детально.

Олександрійський завод крокових двигунів "KROK Motor" виробляє гібридні біполярні і уніполярні крокові двигуни серій ДШР40, ДШР56, KRS28, KRS39, KRS42, KRS56, KRS86, KRS110 за технологією фірми Sinano Elektric.

Крокові двигуни серії ДШР40 мають такі характеристики: кроки $3,6^\circ$ (100 поз./об.); $1,8^\circ$ (200 поз./об.); $0,9^\circ$ (400 поз./об.); статичний момент від 0,025 до 0,196 Нм; напругу управління U_y від 3,5 до 22,5 В; струм управління I_y від 0,18 до 0,80 А; частоту обертання від 180 до 5000 об./хв.

Характеристики двигунів серії ДШР56-1,8: крок $1,8^\circ$ (200 поз./об.) статичний момент від 0,294 до 1,764 Нм; напруга управління U_y від 1,5 до 11,0 В; струм управління I_y від 0,35 до 4,50 А; частота обертання від 360 до 5800 об./хв.

Двигуни серії KRS281, KRS282, KRS283, KRS284 з кроком $1,8^\circ$ мають статичний момент від 0,042 до 0,12 Нм; струм управління I_y від 0,67 до 0,95 А; масу від 0,1 до 0,2 кг.

Двигуни серії KRS110, KRS112, KRS113, KRS114, мають статичний момент від 6,9 до 29,4 Нм; струм управління I_y від 2,5 до 14 А; масу від 5,2 до 12 кг.

Для прикладу наведемо основні технічні характеристики **гібридного крокового двигуна ДШР39-0,06-1,8 виробництва ТОВ "Западприбор"**, рис. 13.15. Електродвигуни серії ДШР39 застосовуються для роботи в якості виконавчого механізму в системах автоматичного управління і контролю із застосуванням мікропроцесорної техніки, в обчислювальній техніці, медичних приладах та ін.

Технічні характеристики ДШР39-0,06-1,8:

Номінальна напруга управління, В	12.
Номінальний обертаючий момент, Нм	0,06.
Прийомистість (швидкодія), кроків\с:	
- номінальна	600;
- максимальна	700.
Номінальний момент інерції, кг·м ²	1,7×10 ⁻⁶ .
Номінальний крок, град.	1,8.
Максимальний статичний момент, Нм не менше	0,07.
Фіксуючий момент, Нм не менше	0,001.
Струм управління (фази), А не більше	0,2.
Статична похибка кроку, % не більше	10.
Габаритні розміри, мм	39×39×45.
Маса, г не більше	210.
Кліматичне виконання	УХЛ4.

Широко використовуються крокові двигуни й інших виробників, таких як: NEMA23, SanyoDenkiSM28, FDD (floppy-disk), SM-200-0.22, SP-57, STH-39D1112, Purelogic R & D з енкодером та ін.

13.2.7. Управління кроковими двигунами

Способи управління кроковими двигунами можна поділити на такі:

- повнокрокові;
- напівкрокові;
- мікрокрокові.

Повнокроковий спосіб управління описаний вище. Англійською мовою цей спосіб називається *one phase on full step* – одна фаза на повний крок. Він здійснюється поперемінною комутацією фаз (клем 1 і 6 вертикальних або клем 3 і 8 горизонтальних пар обмоток статора до полюсів $+U$ та $-U$ джерела живлення, при з'єднаних між собою клеммах 2 і 5 та 4 і 7, рис. 13.15. При цьому фази не перекриваються, і в кожен момент часу до джерела напруги підключена тільки одна фаза (одна пара горизонтальних або вертикальних обмоток). Недоліком цього способу є те, що в один і той же момент використовується лише половина обмоток біполярного двигуна, і тільки чверть обмоток уніполярного двигуна.

Існує повнокроковий режим управління, який називається *two-phase-on full step* – дві фази на повний крок. При такому способі одночасно включені дві фази і ротор фіксується між полюсами статора за рахунок подачі живлення на всі обмотки. Для цього клемма 2 вертикальної і клемма 3 горизонтальної обмоток з'єднуються між собою так, що утворюється одна обмотка з вхідними клеммами 1 і 4, а після з'єднання клемми 6 вертикальної з клеммою 7 горизонтальної обмоток утворюється друга обмотка з вхідними клеммами 5 і 8. Для переміщення ротора на наступний крок утворюють наступні дві пари обмоток з вхідними клеммами 3, 6 і 7, 2 шляхом з'єднання між собою клем 4 і 5 та 8 і 1 обмоток, і т. д. Кут кроку не змінюється, а ротор у стані рівноваги зміщений тільки на півкроку. Це дозволяє збільшити обертаючий момент двигуна на 40%.

Напівкроковий спосіб дозволяє отримати від двигуна в два рази більше кроків на оборот ротора. При напівкроковому режимі на кожному другому кроці включається одна фаза (як при повнокроковому режимі *one phase on full step*), а між ними – включаються одночасно дві фази (як при режимі *two-phase-on full step*). У результаті такої комутації кут кроку зменшується в два рази, і в два рази збільшується число кроків. Цей метод подвоєння числа кроків двигуна є простим, хоча отримати в напівкроковому режимі повний обертаючий момент не вдається. Не дивлячись на це, напівкроковий режим використовується часто.

Відзначимо, що при зупинці двигуна зі зняттям напруги з усіх фаз, ротор двигуна знаходиться у вільному стані і може зміщуватися від механічних впливів. Щоб зафіксувати положення ротора, необхідно формувати в обмотках двигуна струм утримання.

Мікрокроковий режим здатний значно підвищити точність позиціонування крокового двигуна. При мікрокроковому режимі включають дві фази, як при напівкроковому, але струми обмоток розподіляють нерівномірно. При цьому магнітне поле статора зміщується між полюсів, синхронно зміщується і положення ротора. Як правило, диспропорція струмів між робочими фазами відбувається з певною дискретністю – мікрокроком. Кількість мікрокроків може досягати 1000. При цьому система управління двигуном стає набагато складнішою.

Для управління кроковими двигунами використовуються системи на контролерах *Attiny2313*, *AVR-USB-MEGA16*

(під'єднується через порт USB), CNC-1318, HDD, PLCM-LPT, PIC, CD ULN, Arduino UNO, ATmega8, драйвер l293d.

Розглянемо характеристики **блоку керування кроковими двигунами SMSD-1.5 (ТОВ "Електропривод")**, який призначений для управління чотирифазними і двофазними гібридними кроковими двигунами зі струмом фази до 1,6 А, рис. 13.16. Блок може задавати напрямок, швидкість, прискорення руху, а також працювати за складним алгоритмом (програмою), записаним в енергонезалежну пам'ять. Забезпечуються режими управління з цілим кроком або з діленням кроку на 1/2, 1/4, 1/8, 1/16. SMSD-1.5 може працювати автономно, від комп'ютера (за логічними сигналами «Напрямок», «Крок» і «Дозвіл», що передаються за допомогою символічних ASCII команд через USB-порт), або від зовнішнього задаючого контролера.

Блок має можливість отримувати сигнали від зовнішніх пристроїв і датчиків (два додаткових входи), а також подавати сигнали до зовнішніх пристроїв (один додатковий вихід). Забезпечується робота з програмами SMC Program, StepMotor LPT і більшістю CNC-програм. Для поліпшення завадостійкості і гнучкості інтерфейсу використовуються диференціальні входи. Передбачена функція пошуку нульової точки через додатковий вхід, а також можливість роботи в ручному режимі.

Технічні характеристики блоку:

Кількість каналів керування	1.
Точність установки частоти, % не гірше	0,2.
Напруга живлення, В	10...30.
Максимальний вихідний струм, А	1,6.
Кількість додаткових входів	3.
Кількість додаткових виходів	1.
Режими ділення кроку	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16.

13.2.8. Одно- і багатообертові виконавчі механізми

Електродвигунні ВМ, які випускаються промисловістю, крім електродвигуна містять, як правило, редуктор, гальмо, кінцеві вимикачі і датчик положення вихідного органу (потенціометр зворотного зв'язку).

Виконавчі механізми, у яких кут повороту вихідного вала не перевищує 360°, прийнято називати **однообертовими**. Однообертові

ВМ типу ДР-М, ДР-1М, ПР-М і ПР-1М призначені для переміщення регулюючих органів об'єктів управління, які потребують відносно малих перестановочних зусиль.

При цьому ВМ типу ДР-М і ДР-1М (ДР-дискретне регулювання) служать для позиційного переміщення органів управління з одного крайнього положення в інше. Вони містять однофазний конденсаторний електродвигун, редуктор і кінцевий вимикач, розташовані в загальному пилонапроникному корпусі з алюмінієвого сплаву. ВМ ДР-М має два вихідних органи:

- диск, що обертається на 180° і призначений для дії на поворотний регулюючий орган;
- шток з ходом 19 мм для дії на поступальний регулюючий орган.

ВМ ДР-1М має тільки один орган – диск.

ВМ ПР-М і ПР-1М (ПР – пропорційне регулювання) призначені для пропорційного переміщення регулюючого органу, конструктивно виконані аналогічно ДР-М і ДР-1М. Відмінність полягає у будові кінцевого вимикача, який забезпечує можливість зупинки вихідного вала ВМ у будь-якому проміжному положенні в межах від 0 до 180° , а також у наявності в них потенціометрів зворотного зв'язку, повзунок яких кінематично пов'язаний з вихідним валом ВМ.

Час повороту вала ВМ ДР-М і ДР-1М з одного крайнього положення в інше залежить від налаштування редуктора і може складати 10, 30, 60, 90 і 120 с. На заводах ВМ налаштовують на 30 с. При цьому момент на валі ВМ складає 1 Нм. Конструктивною особливістю ВМ ДР-М, ДР-21М, ПР-М і ПР-1М є те, що вони можуть працювати тільки при горизонтальному положенні вала електродвигуна.

ВМ типу ВМ-2/120 зазвичай застосовуються в ІІ- й І-регуляторах, можуть використовуватися в позиційних регуляторах, а також для ручного управління. Кут повороту вала може бути встановлений у межах до 120° . Для контролю положення регулюючого органу на них є стрілка-показчик зі шкалою 0...100 %. Номінальний обертаючий момент складає 2 Нм, а маса 22 кг. Шестиступеневий редуктор цих ВМ знижує частоту обертання асинхронного конденсаторного електродвигуна потужністю 26 Вт до 0,5 об./хв.

ВМ ТМ-4/25 служить для швидкого переміщення органів

управління у системах з позиційним регулятором і системах дистанційного управління. Номінальний момент на валі ВМ дорівнює 4 Нм. Час одного повного обороту вала дорівнює 2,5 с. Як силовий елемент використовується трифазний електродвигун типу АОЛ-21-4 потужністю 220 Вт.

Електричні кривошипні ВМ типу МЭК-К використовуються в позиційних регуляторах і регуляторах неперервної дії, а також у системах дистанційного управління. Вибіг вала в цих ВМ не перевищує $0,7^\circ$. Як силовий елемент у них застосовуються трифазні електродвигуни типу АДП і АОЛ потужністю до 0,4 кВт. Номінальний обертаючий момент має значення у межах від 10 до 100 Нм.

ВМ типу МЭО-К відрізняються від МЭК-К більшим обертаючим моментом на вихідному валі (до 1000 Нм) і наявністю індукційних датчиків зворотного зв'язку замість потенціометричних.

Одним з виробників **однообертових ВМ типу МЭО, МЭОФ в Україні є ТОВ "ВО УКРСПЕЦКОМПЛЕКТ"**. Вони призначені для приведення в дію запірно-регулюючої арматури в системах автоматичного регулювання технологічними процесами. Механізм МЭО встановлюється поблизу регулюючих пристроїв і безпосередньо з'єднується з ними за допомогою тяг і важелів.

Особливістю безконтактних однообертових ВМ типу МЭО є:

- висока надійність і велика довговічність;
- універсальність управління і можливість установки в будь-якому положенні;
- висока швидкодія;
- наявність незалежного ручного приводу;
- наявність механічних обмежувачів ходу і місцевого покажчика положення;
- відсутність обмежень на тривалість і частоту вмикань;
- малі вага і габарити;

Механізми можуть комплектуватися керуючими пристроями типів ПБР для безконтактного управління при:

- трифазній напрузі живлення (220/380 В) – пускачами ПБР-3А;
- однофазній напрузі живлення (220 В) – пускачами ПБР-2М.

Основні технічні характеристики однообертових механізмів МЭО-6,3...МЭО-10000 наведені в табл. 13.1, зовнішній вигляд МЭО-100/15-0,25АС – на рис. 13.17.

Таблиця 13.1

Основні технічні характеристики однообертових ВМ

Умовне позначення	Крутний момент	Час повного ходу	Значення повного ходу	Споживана потужність	Маса
	Нм	с	г	Вт	кг
МЭО-6,3/12,5-0,25-99	6,3	12,5	0,25	43	3,9
МЭО-12,5/25-0,25-99	12,5	25	0,25	43	3,9
МЭО-16/10-0,25-93	16	10	0,25	100	7,6
МЭО-16/160-0,63-01	16	160	0,63	46	6,5
МЭО-25/63-0,25-99	25	63	0,25	35	3,9
МЭО-40/10-0,25-99	40	10	0,25	240	27
МЭО-40/160-0,63-01	40	160	0,63	46	6,5
МЭО-100/10-0,25-99К	100	10	0,25	250	27,5
МЭО-100/63-0.63-99	100	63	0,63	240	27
МЭО-250/25-0.25-99К	250	25	0,25	250	27,5
МЭО-250/160-0.63-99	250	160	0,63	240	27
МЭО-630/10-0,25-92К(КБ)	630	10	0,25	490	135
МЭО-630/160-0,63-92К(КБ)	630	160	0,25	200	74
МЭО-1600/25-0,25-92К(КБ)	1600	25	0,25	490	135
МЭО-4000/63-0,25-97К	4000	63	0,25	700	270
МЭО-10000/63-0,25-97К	10000	63	0,25	900	580
МЭО-10000/160-0,63-97К	10000	160	0,63	900	580

Багатообертові виконавчі механізми використовуються для управління різноманітною трубопровідною арматурою:

- запірними і регулюючими засувками;
- вентилями;
- клапанами;
- заслінками.



Рис. 13.17. Виконавчі механізми:

- однообертовий МЗО -100/15-0,25 АС;
- багатообертовий МЭМ-100/250-250

Ці ВМ являють собою механізми з постійною швидкістю спрацювання. Більшість багатообертових ВМ є позиційними виконавчими пристроями, і тільки ВМ типу МЭМ з датчиками зворотного зв'язку можуть бути використані у регуляторах з *П*-, *ПІ*- і *ПІД*- законами регулювання. Багатообертові електроприводи типів М, А, Б, У, Г і Д використовуються для дистанційного управління трубопровідною арматурою.

ВМ типу ПВ (привід вибухозахищений) призначений для роботи у вибухонебезпечних приміщеннях усіх класів.

ВМ типу ВАЗ за конструктивним виконанням поділяються на дві групи:

- колонкові, що являють собою електродвигуни з черв'ячним редуктором, розташовані на опорних колонках;
- колонкові, які можуть бути розташовані на деякій відстані від арматури; з'єднання такого ВМ з регулюючим органом виконується за допомогою приводних штанг і шарнірів.

ВМ з постійною швидкістю і безконтактним управлінням відрізняються від розглянутих вище контактних тим, що в їхню конструкцію входить підсилювач електричного сигналу (зазвичай, магнітний підсилювач типу УМД).

Безконтактні ВМ змінної швидкості типу БИМ за конструктивним виконанням аналогічні ВМ типу ВМ-2/120. Відмінність полягає в

управлінні за допомогою магнітного підсилювача, вмонтованого в регулятор типу БРМ. Схема вмикання і режими магнітного підсилювача забезпечують у заданих межах пропорційну залежність частоти обертання вала ВМ від сигналу управління.

Відомим виробником **багатообертових електродвигунних виконавчих механізмів типу МЭМ є ТОВ "УкрГазАвтоматика"**. ВМ призначені для переміщення регулюючих органів у системах автоматичного (дистанційного) керування. Основні функції механізмів МЭМ такі:

- автоматичне, дистанційне або ручне відкриття і закриття арматури, останов арматури в будь-якому проміжному положенні;
- вказівка ступеня відкриття (закриття) арматури на шкалі місцевого показника;
- позиціонування робочого органу арматури в будь-якому проміжному положенні;
- формування дискретного сигналу про проміжні і кінцеві положення робочого органу арматури і динаміки його переміщення.

Режим роботи механізму – повторно-короткочасний з частими пусками з частотою включень до 320 за год., тривалістю включень до 25 % при навантаженні на вихідному штоці в межах від номінальної протидіючої до 0,5 номінальної супутньої. Допускається максимальна частота включень до 630 на год., але не більше 1 год. на добу.

У механізмі може бути встановлений один з наступних типів блоків сигналізації положення:

- струмовий БСПТ-10 або БСПТ-21;
- індуктивний БСПІ-10 або БСПІ-21;
- реостатний БСПР-10 або БСПР-21;
- блок вимикачів БВ.

Основні технічні характеристики багатообертових механізмів МЭМ-16...МЭМ-250 наведені в табл. 13.2, зовнішній вигляд МЭМ-100/15-0,25АС – на рис. 13.17.

Таблиця 13.2

Основні технічні характеристики багатообертових ВМ

Умовне позначення	Ном. зусилля	Живлення	Споживана потужність	Габарити	Маса	
	Н	В (Гц)	Вт	мм	кг	
МЭМ 16/63-10	16	380 (50)	210	250x164x330	14	
МЭМ 16/400-63						
МЭМ 40/63-10	40		125	300x230x350	22	
МЭМ 40/400-63						
МЭМ 40/25-10			200		23	
МЭМ 40/63-25						
МЭМ 40/160-63	100		545	300x230x350	25	
МЭМ 100/160-25						
МЭМ 100/400-63			1045		365x230x365	32
МЭМ 100/63-25						
МЭМ 100/160-63	250		545	350x230x350	23	
МЭМ 100/250-250			1900	520x445x470	48	
МЭМ 250/160-25						
МЭМ 250/240-200						
МЭМ 100/63-10	100	=24В	240	390x230x350	28	

Динамічні властивості електродвигунних ВМ

Електродвигунні ВМ як функціональні елементи регулятора, у яких вхідний сигнал напруга U_y , що подається на обмотку управління, а вихідний – кут повороту вихідного вала $\alpha_{\text{ВМ}}$, або переміщення штока $L_{\text{ВМ}}$ за динамічними властивостями є інтегруючими ланками з передаточною функцією:

$$W_{\text{ВМ}}(p) = \frac{k_{\text{ВМ}}}{p} = \frac{1}{T_{\text{ВМ}} \cdot p} \quad (13.12)$$

Це впливає з того, що для електродвигуна, який використовується в таких ВМ як силовий елемент, справедлива рівність:

$$n = k_d U_y \quad (13.13)$$

Зважаючи на те, що $n = \frac{d\alpha_{\text{рот}}}{dt}$, де $\alpha_{\text{рот}}$ – кут повороту ротора двигуна, а $\alpha_{\text{ВМ}}$ (або $L_{\text{ВМ}}$) – вихідний сигнал ВМ, пропорційний $\alpha_{\text{рот}}$ ($\alpha_{\text{ВМ}} = k_{\text{ред}} \alpha_{\text{рот}}$, де коефіцієнт пропорційності дорівнює передаточному відношенню редуктора $k_{\text{ред}}$, який перетворює $\alpha_{\text{рот}}$ у $\alpha_{\text{ВМ}}$ (або $L_{\text{ВМ}}$)), можна записати:

$$\frac{d\alpha_{\text{ВМ}}}{dt} = k_{\text{ред}} \cdot k_{\text{д}} \cdot U_{\text{У}} = k_{\text{ВМ}} \cdot U_{\text{У}}. \quad (13.14)$$

Дане рівняння є рівнянням інтегруючої ланки.

Електродвигунні ВМ з елементами управління, які мають релейну статичну характеристику, є виконавчими механізмами з постійною швидкістю спрацювання (ізодромними ВМ). Швидкісна характеристика таких ВМ має вигляд показаний на рис. 13.4, А.

Розглянуті ВМ (зі сталою і змінною швидкостями спрацювання) використовуються, як правило, у регуляторах неперервної дії з *П*, *ПІ* і *ПІД* алгоритмами управління.

ВМ з постійною і змінною швидкістю спрацювання за статичними характеристиками є астатичними. Для надання цим ВМ характеристик статичних ланок силовий елемент ВМ охоплюється від'ємним зворотним зв'язком, який найчастіше виконується у вигляді потенціометра 33, включеного у плече мостової вимірювальної схеми. Повзунок останнього зв'язується з вихідним елементом ВМ (валом або штоком), при цьому його положення пропорційне фактичному положенню вала $\alpha_{\text{ВМ}}$ або $L_{\text{ВМ}}$. Сигнал управління від вимірювальної частини регулятора може формуватися у вигляді переміщення повзунка заданого потенціометра $l_{\text{У}}$, пропорційного заданому положенню вихідного елемента ВМ $\alpha_{\text{ВМ}}$ (або $L_{\text{ВМ}}$), що включається в інше плече мостової схеми. Сигнал, пропорційний неузгодженості $\Delta\alpha_{\text{ВМ}}$, або $\Delta L_{\text{ВМ}}$ формується при цьому у вигляді напруги $U_{\text{У}}$ в діагоналі моста. При цьому кожному рівню сигналу управління $l_{\text{У}}$ буде відповідати певне значення вихідного сигналу ВМ $\alpha_{\text{ВМ}}$ або $L_{\text{ВМ}}$. Зворотний від'ємний зв'язок може бути реалізований на базі магнітного підсилювача з двома обмотками управління.

13.3. Електромагнітні виконавчі механізми

Електромагнітні ВМ призначені для дистанційного управління механічними, гідравлічними чи пневматичними пристроями, а також в регуляторах автоматичних систем. Як силові елементи в таких ВМ використовуються електромагніти й електромагнітні муфти тертя.

Електромагнітні ВМ в порівнянні з електродвигунними мають невелику потужність, просту конструкцію і значно дешевші. Вони є більш простими в управлінні, швидкодіючими і надійними в роботі.

Електромагнітні механізми працюють як на постійному, так і на змінному струмі, але електромагніти постійного струму мають кращі характеристики, оскільки при однакових розмірах вони розвивають більші тягові зусилля. При цьому для роботи на постійному струмі широко використовуються соленоїдні ВМ змінного струму з вбудованими в коло живлення випрямлячами.

Суттєвим недоліком цих ВМ є можливість виникнення при їхньому спрацюванні гідравлічних ударів у трубопроводах.

Виконавчі механізми з електромагнітним клапаном

Клапани і вентилі, які є регулюючими органами (РО) об'єктів управління і конструктивно з'єднані з електромагнітними ВМ, називаються електромагнітними або соленоїдними (клапанами і вентиллями). Схема ВМ з електромагнітним клапаном показана на рис. 13.18, А.

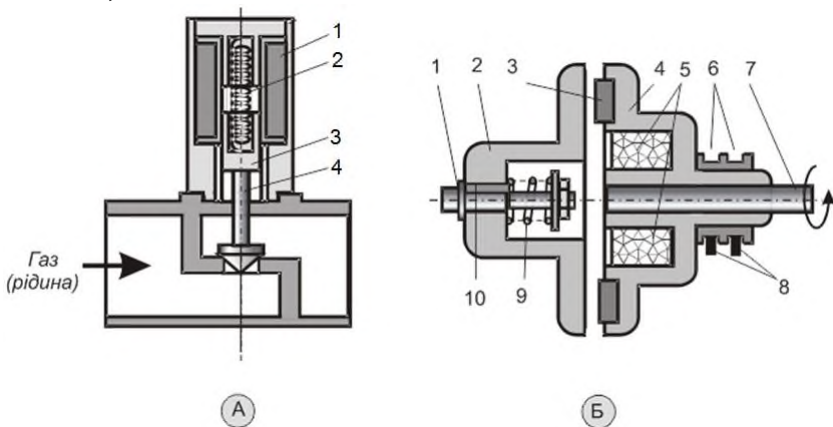


Рис. 13.18. Виконавчі механізми:

А – з електромагнітним клапаном; Б – з електромагнітною муфтою

Клапан може перебувати тільки в одному з двох крайніх положень: відкритому або закритому. За відсутності напруги живлення на котушці 1 соленоїда, пружина стиснення 2, впливаючи на сердечник 3 соленоїда зверху, притискає шток 4 із запірним золотником до сидла, закриваючи тим самим клапан. При подачі напруги живлення на котушку 1 соленоїда, сердечник 3 соленоїда, долаючи опір пружини стиснення 2 втягується, піднімає шток 4 із запірним золотником вгору і клапан відкривається.

Широке практичне застосування знайшли **електромагнітні ВМ серії ЭВ (ТОВ "НВО ПРОМЕНЕРГО")** з поступальним характером руху, призначені для управління різними клапанами, вентилями, заслінками і золотниками.

Електромагнітні приводи **ЕВ-1 і ЕВ-2** працюють від мережі постійного струму напругою 110 і 220 В і від мережі змінного струму напругою 127, 220 і 380 В. При подачі напруги на котушку електромагніта його якір втягується, відкриваючи вентиль. Електромагніти розраховані на тривалу роботу (тривалий час протікання струму в їх котушках).

До недоліків слід віднести постійне споживання енергії при відкритому положенні РО і можливість довільного перемикаання РО при зникненні напруги. Крім цього, вони не мають пристроїв для ручного управління клапанами і вентилями у випадку відсутності електроенергії або ушкодження електромагнітів.

Електромагнітні ВМ типу **ЭВ-3**, які розраховані на короткочасний режим роботи, містять два електромагніти. Один з них є головним (тяговим), призначеним для переміщення РО, а інший є приводом засувки, яка утримує РО у заданому положенні після спрацювання. При подачі напруги на тяговий електромагніт він спрацьовує і його якір переміщає РО у положення, яке відповідає першій позиції. В цьому положенні РО фіксується засувкою, що дає можливість розірвати коло живлення тягового електромагніта за допомогою кінцевого вимикача. Для зворотного переміщення РО досить подати напругу на обмотку електромагніта засувки, який спрацьовуючи звільняє РО, і він під дією власної ваги або поворотної пружини переміщується в положення, яке відповідає другій позиції. Зняття напруги з електромагніту засувки здійснюється за допомогою кінцевого вимикача.

Компанія ОВЕН виготовляє **соленоїдний клапан YCP31**. Це – електромагнітний нормально закритий клапан непрямої дії, призначений для довгострокової експлуатації в системі трубопроводів при зниженому енергоспоживанні. Основні технічні характеристики клапана YCP31 наведені в табл. 13.3, зовнішній вигляд – на рис. 13.19.

Таблиця 13.3

Технічні характеристики клапана YCP31

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>
Робоче середовище	Вода, пара, масла, алкоголь
Матеріали	Корпус: нержавіюча сталь. Ущільнення: PTFE
Робочі температури клапана для ущільнення PTFE, °C	-20...180
Робочий тиск, МПа	0,05...1,6
Ду, мм	12; 15; 20; 25; 32; 40; 50
К _v , м³/год.	4,4; 4,5; 9,3; 12; 24; 29; 48
Приєднання різьбове	3/8", 1/2", 3/4", 1", 1 1/4", 1 1/2", 2"
Котушки, Вт	S21H, 22 (AC), 15 (DC), IP65
Живлення, В	DC: 12, 24; AC: 24, 110, 220



Рис. 13.19. Електромагнітні виконавчі механізми:
клапан YCP31 та муфти ETM2 і ETM5C

Виконавчі механізми з електромагнітною муфтою

Електромагнітні муфти бувають двох видів: тертя і ковзання. Електромагнітна муфта ковзання конструктивно являє собою індуктор з обмоткою, закріплений на ведучому валі, і короткозамкнутий ротор, встановлений на веденому валі. Муфта працює за принципом асинхронного двигуна і дозволяє здійснювати плавне регулювання швидкості обертання веденого вала шляхом управління напругою живлення індуктора.

В електромагнітної муфти сухого тертя (рис. 13.18, Б) на ведучому валі 7 закріплений електромагніт 4 з обмоткою 5, до якої через контактні кільця 6 і щітки 8 підводиться постійний струм. На веденому валі 1 закріплений якір 2, який може ковзати вздовж вала, але не може повертатися завдяки шпонці 10. Пружина 9 відтягує якір 2 вліво.

Зчеплення веденого і ведучого валів здійснюється під дією сили тертя, що виникає між поверхнею шайби тертя 3, закріпленої на електромагніті 4, і поверхнею якоря 2, які притискаються один до одного при подачі напруги на котушку 5.

У ВМ з електромагнітними муфтами часто використовуються дві фрикційні або порошкові муфти. Принципова електрокінематична схема такого ВМ наведена на рис. 13.20, а. Вал електродвигуна обертається неперервно, але при $U_{BX}=0$ його обертання на вихідний вал не передається.

При подачі вхідного сигналу U_{BX} зазначеної на схемі полярності замикається верхній контакт поляризованого реле Р. На обмотку електромагнітної муфти 1 надходить струм і вона спрацьовує. Обертання двигуна при цьому передається на вихідний вал. При зміні полярності U_{BX} реле Р замикає нижній контакт. Муфта 1 знеструмлюється і спрацьовує муфта 2. Напрямок обертання вихідного вала змінюється на протилежний.

Статична характеристика такого ВМ, яка являє собою залежність усталеної частоти обертання вихідного вала від величини вхідної напруги U_{BX} , є релейною і має зону нечутливості. Для одержання лінійної характеристики використовується вібраційна лінеаризація. Її принцип полягає в тому, що вхідний сигнал U_{BX} спочатку надходить на широтно-імпульсний підсилювач, який перетворює його в імпульсний сигнал з постійним періодом T повторення імпульсів

(рис. 13.20, б). Імпульси U_1 подаються на обмотку муфти 1, а імпульси U_2 – на обмотку муфти 2.

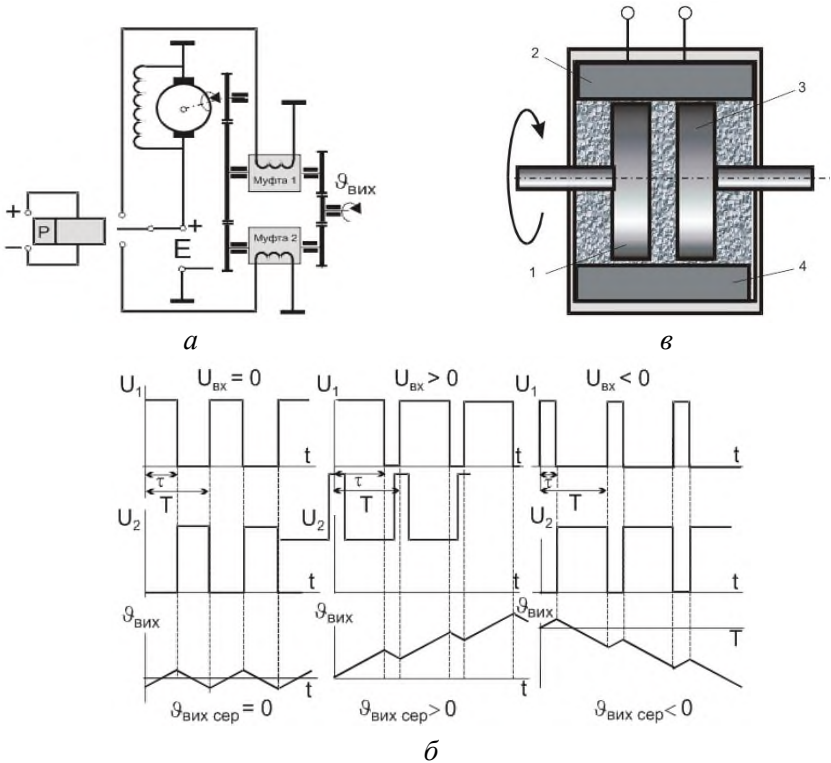


Рис. 13.20. Електромагнітні муфти:

а, б – фрикційні вібраційно-лінеаризовані та в – порошкова

При $U_{вх}=0$ тривалість імпульсів напруги U_1 і U_2 однакові. Вихідний вал при цьому здійснює симетричні коливання і його середня кутова швидкість дорівнює нулю (рис. 13.20, б).

При $U_{вх} > 0$ тривалість τ імпульсів напруги U_1 стає більшою за тривалість імпульсів напруги U_2 . Термін зчеплення муфти 1 стає більшим, ніж муфти 2, і вихідний вал починає обертатися у визначеному напрямі з середньою кутовою швидкістю $\varphi_{ср}$. Чим більша $U_{вх}$, тим більша різниця тривалостей імпульсів напруг U_1 і U_2 і тим більша середня кутова швидкість обертання вихідного вала.

При зміні полярності U_{BX} тривалість імпульсів U_1 стає меншою за тривалість імпульсів U_2 і напрям кутової швидкості обертання вихідного вала ВМ змінюється.

Цілком очевидно, що середня кутова швидкість обертання вихідного вала ВМ пропорційна різниці тривалостей імпульсів напруги U_1 і U_2 і визначається за формулою:

$$\varphi_{CP} = \varphi_0(\tau_1 - \tau_2)/T, \quad (13.15)$$

де φ_0 – усталена кутова швидкість вихідного вала ВМ без вібраційної лінеаризації.

Вібраційно-лінеаризовані ВМ з електромагнітними муфтами можуть застосовуватися для обертання регулюючих органів управління мобільних агрегатів. Для здійснення гальмування шестерень, пов'язаних з вихідним валом, у ВМ включають спеціальні гальмові електромагніти, які скорочують вибіг вихідного вала після того, як U_{BX} стає рівним нулю.

Поряд із фрикційними муфтами в розглянутих ВМ застосовуються порошкові муфти. На відміну від фрикційних, вони мають плавну залежність передавального моменту від величини вхідного сигналу і, в той же час, дозволяють отримувати великі прискорення вихідного вала. Це дає можливість створювати швидкодіючі автоматичні системи, які пропускають вхідні сигнали з частотами (10...15) Гц.

В порошкових муфтах, рис. 13.20, в диски ведучого і веденого валів розділені зазором, заповненим сумішшю феромагнітного порошку з маслом, гасом або графітом. Частинки порошку мають діаметр 0,002...0,008 мм. Диски і феромагнітна суміш знаходяться у магнітному полі обмотки управління. При пропусканні через обмотку управління постійного струму створюється магнітне поле, і частинки порошку намагнічуються. Феромагнітна суміш ніби загусає, і появляється момент сил тертя між ведучим і веденим валами. У міру збільшення струму в обмотці управління збільшується намагнічування феромагнітної суміші і момент, переданий з ведучого вала на ведений, зростає.

Вібраційно-лінеаризовані ВМ з електромагнітними фрикційними муфтами і ВМ з порошковими муфтами мають невелике динамічне запізнення спрацювання. Їх інерційність визначається тільки

моментом інерції вихідної частини ВМ. У випадку, коли часом спрацювання муфт можна знехтувати, рух ВМ можна описати рівнянням інтегруючої ланки.

Розглянемо характеристики **муфт електромагнітних фрикційних серії ЕТМ (ТОВ «ПРОМТЕХТРЕЙД», Україна)**. Муфти призначені для дистанційної комутації кінематичних кіл і використовуються для автоматизації приводу металорізальних верстатів та інших машин: перемикання ступенів чисел оборотів у коробках швидкостей і подач, пуску, реверсування і гальмування головного приводу. Вони можуть використовуватися також для управління циклами неточних переміщень, як зчіпні (пускові) у різних агрегатах і приладах. Основні технічні характеристики муфт серії ЕТМ наведені в табл. 13.4, зовнішній вигляд – на рис. 13.19.

Таблиця 13.4

Технічні характеристики муфт ЕТМ

Габарит	Номін. момент	Струм	Гранична швидкість обертання		Залишк. момент	Вага
	Нм	А	ЭТМ2	ЭТМ6	Нсм	кг
05	16	0,3	5000	7000	0,16	0,56
06	25	0,4	4500	6000	0,25	0,83
07	40	0,55	4000	5000	0,4	1,3
08	63	0,55	3500	4500	0,7	1,7
09	100	0,65	3000	4000	1,0	2,2
10	160	0,90	2800	3600	1,2	3,6
11	250	1,1	2500	3300	2,0	5,0
12	400	1,8	2200	3000	2,5	7,2
13	630	2,3	2000	2900	4,0	10,0
14	1000	3,0	1800	2700	6,5	14,2
15	1600	4,0	1600	2500	10	19,8

Муфти випускаються:

- зі змащуваними фрикційними дисками (масляні муфти) – ЕТМ2, ЕТМ4 і ЕТМ6;

- з фрикційними дисками сухого тертя (сухі муфти) – ЕТМ1, ЕТМ3 і ЕТМ5.

Змащування масляних муфт здійснюється в основному шляхом поливу пакета фрикційних дисків індустриальним мастилом. Сухі муфти експлуатуються без змащування фрикційних дисків і мають швидкодіюче виконання (швидкодіючі муфти). Швидкодіючі муфти застосовуються для механізмів подач копіювальних і програмних верстатів, для крокових приводів і т. д.

Залежно від способу підведення напруги і за функціональним призначенням муфти виготовляються:

- контактні – ЕТМ1 і ЕТМ2;
- безконтактні – ЕТМ3 і ЕТМ4;
- гальмівні – ЕТМ5 і ЕТМ6.

Вибір типу муфт залежить від параметрів навколишнього середовища, наявності або відсутності масел у місцях установки муфт, способу підведення напруги і функціонального призначення муфт. Масляні муфти випускаються з 5 по 15 габарит у діапазоні номінальних передавальних моментів від 16 до 1600 Нм. Сухі муфти випускаються з 5 по 12 габарит у діапазоні номінальних передавальних моментів від 16 до 400 Нм. Сухі муфти поділяються на прості і швидкодіючі.

Живлення муфт серії ЕТМ здійснюється від джерела постійного струму або через двопівперіодний випрямляч. Номінальна напруга живлення масляних і сухих муфт 24 В. Напруга швидкодіючих муфт від 4 до 10,5 В. Для забезпечення швидкодії схема живлення швидкодіючих муфт повинна забезпечувати форсування процесу ввімкнення імпульсом напруги 50-60 В.

13.4. Пневматичні виконавчі механізми

Пневматичні ВМ, що використовуються в системах управління, як правило, являють собою **мембранні і поршневі ВМ** (МВМ і ПВМ, рис. 13.21, а, б).

Мембранні ВМ за конструктивним виконанням поділяються на:

- мембранні пружинні (МВМ);
- мембранні безпружинні (МВМБ).

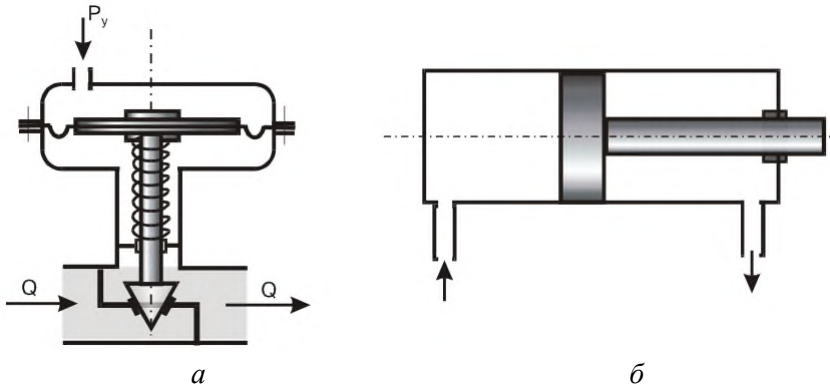


Рис. 13.21. Конструктивні схеми пневматичних ВМ

В таких ВМ керуючим елементом служать золотники і клапани, що забезпечують підведення стиснутого повітря з тиском p_y в командну порожнину мембрани (поршня). Останні в пневматичних ВМ виконують функції силових елементів.

Розглянуті ВМ відносяться до позиційних, тому що при використанні в якості робочого тіла стиснутого повітря важко забезпечити однозначну відповідність між вхідним сигналом пневматичного ВМ (положення регулюючого клапана чи золотника, $Y_{зол}$ чи $Y_{кл}$) і його вихідним сигналом (положенням штока чи мембрани пневмоциліндра $m_{шт}$) в широкому діапазоні. Тому пневматичні ВМ використовуються, як правило, в позиційних регуляторах. До недоліків таких ВМ слід віднести:

- неможливість забезпечення великих перестановочних зусиль при прийнятних розмірах ВМ;
- запізнення при спрацюванні, обумовлене стискальністю повітря і наявністю трубопроводів, які пов'язують регулюючі органи (золотники і клапани) із силовими елементами (мембранами і пневмоциліндрами);
- труднощі забезпечення достатньої герметичності в процесі експлуатації.

Як приклад використання пневматичних ВМ у с/г виробництві розглянемо пневматичний ВМ дозатора комбікорму, конструкція якого показана на рис. 13.22. ВМ дозатора містить вакуумний

пневмоциліндр 1, шток якого виконаний у вигляді повзуна 2 із зубчастою рейкою 3. Рейка за допомогою зубчастого колеса і храпового механізму 4 приводить у переривчастий обертальний рух шнек 5.

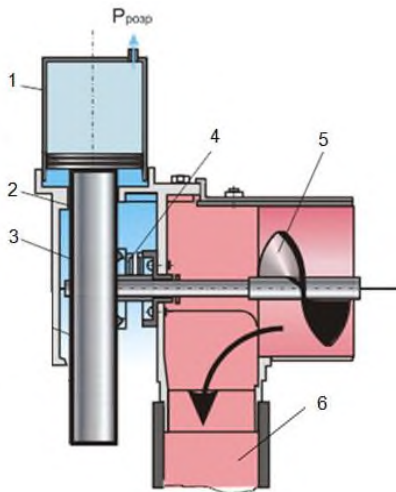


Рис. 13.22. Пневматичний ВМ дозатора комбікорму

Верхня порожнина пневмоциліндра 1 періодично з'єднується з вакуумною лінією доїльної установки. При цьому рухома частина пристрою послідовно здійснює робочі ходи. Шнек 5, повертаючись на один оберт, подає з бункера в годівницю через горловину 6 від 0,25 до 0,28 кг комбікорму. Розкид ваги дози залежить від густини комбікорму. Зворотний хід рухома частина пристрою виконує при відключенні вакууму за рахунок пружини. Шнек при цьому не повертається завдяки храповому механізму зчеплення зубчастої рейки 3 і шнека 5. Число одиничних доз (число робочих ходів рухомої системи) встановлюється на пульті управління дозатора.

Слід зазначити, що в розглянутому пристрої представлений тільки силовий елемент пневматичного ВМ. Елемент управління, який здійснює періодичне з'єднання робочої порожнини пневмоциліндра з вакуумною магістраллю, на схемі не показаний.

Як інший приклад розглянемо пневматичний ВМ пропускового крана, конструктивна схема якого представлена рис. 13.23.

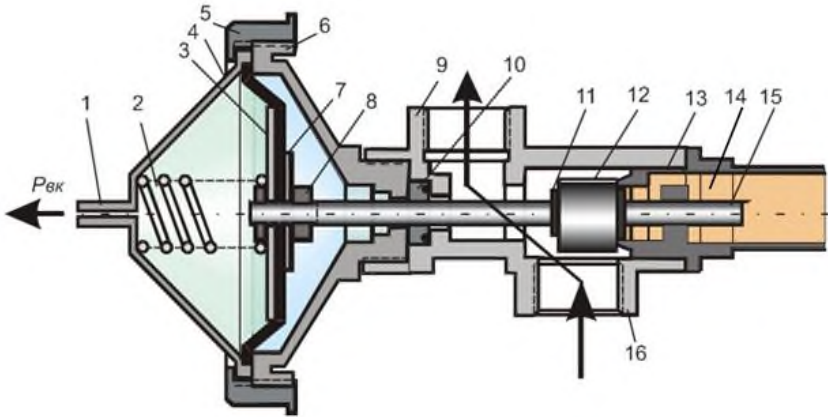


Рис. 13.23. Пневматичний ВМ пропускного клапана

Цей пристрій застосовують для переключення потоку миючого розчину при автоматичному промиванні молочної лінії доїльних установок. Пневматичний ВМ містить мембрану 5, яка з тарілками 3 і 7 та штоком 15 складає рухому частину механізму. На штоку встановлений двосторонній клапан 12, притиснутий у вихідному положенні пружиною 2 до правого гнізда. М'який розчин при цьому подається через штуцер 9 для промивання молочної лінії.

При з'єднанні лівої (командної) порожнини мембрани з вакуумною магістраллю мембрана 5 прогинається вліво, забезпечуючи перестановку клапана 12 на упор у ліве гніздо корпусу 9. Потік розчину при цьому переключається на злив через дренажний штуцер 14. У розглянутому пристрої також представлений тільки силовий елемент пневматичного ВМ односторонньої дії мембранного типу. Його елемент управління на цій схемі не показаний.

Передаточні функції пневматичних ВМ із пропорційним елементом управління аналогічні передаточним функціям гідравлічних ВМ, з тією лише істотною різницею, що повітря має значну стискальність, а приведена маса рухомих частин пневмосистем часто невелика, і нею можна знехтувати. При цьому передаточна функція таких ВМ має вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{(T_p + 1) \cdot p}, \quad (13.16)$$

де $T = f / k_{\text{ж}}$;

f – коефіцієнт в'язкого тертя;

$k_{\text{ж}}$ – жорсткість (стискальність) повітря.

Такі ВМ є реальними інтегруючими ланками.

Роторні пневматичні виконавчі механізми

У якості пневматичних ВМ можуть використовуватися пневмомотори, що мають ряд переваг у порівнянні з іншими типами пневматичних ВМ. До цих переваг відносяться:

- порівняно невелика маса, що приходить на одиницю потужності;

- менший вплив перевантаження на характеристики ВМ;
- простота конструкції;
- надійність роботи;
- здатність роботи при високих температурах і вібраціях.

Використовуються різні типи пневмомоторів:

- шестерневі;
- поршневі;
- коловоротні;
- турбінні і ін.

Для прикладу наведемо основні характеристики **радіально-поршневого пневмомотора РПД-5, виробництва ПП "Завод Точмаш" (Україна)**. Пневмомотор призначений для приводу в дію насосів, лебідок тельферів та інших механізмів. Зовнішній вигляд РПД-5 показаний на рис. 13.24.

Основні технічні характеристики:

- номінальний тиск стисненого повітря на вході, МПа	0,63;
- номінальна потужність, кВт	12;
- номінальна частота обертання вихідного вала, об./хв.	12,5;
- номінальна питома витрата вільного повітря, м ³ /хв.кВт	1,02;
- умовний отвір приєднувальної арматури, мм	40;
- габарити, мм, не більше	410x425x383;
- маса, кг, не більше	105;
- рівень звуку, дБА, не більше	98.

Пневмомотор працює при температурі навколишнього середовища від 5 до 50 °С і відносній вологості повітря до 97 %.



Рис. 13.24. Пневмомотори:
радіально-поршневий РПД-5 та ротаційно-пластинчастий М30

Пневмомотори Рутса

Одним з найбільш перспективних пневмомоторів є пневмомотори Рутса. Вони надійно запускаються і мають великий обертаючий момент при порівняно невеликих габаритах і масі. При роботі в системах управління вони здатні забезпечити характеристики, близькі до характеристик систем з поршневими ВМ. Однак, у порівнянні з останніми є більш термостійкими і надійними. Дані обставини дають можливість використовувати їх у системах управління, які працюють у важких умовах експлуатації.

Принципова схема пневмомотора Рутса представлена на рис. 13.25. В корпусі розміщені два елементи ротора. Їхній поперечний переріз має трипелюсткову форму (існують ВМ і з двопелюстковими елементами).

В корпусі мотора зроблені отвори (вікна) для підведення і відводу робочого тіла – повітря. Повітря, яке надходить від елемента управління ВМ з високим тиском живлення p_n , створює на елементах ротора обертаючий момент. Вісь одного з елементів є вихідним валом пневмомотора. З нього знімається потужність (зазвичай через редуктор), необхідна для приводу регулюючого органу об'єкта управління.

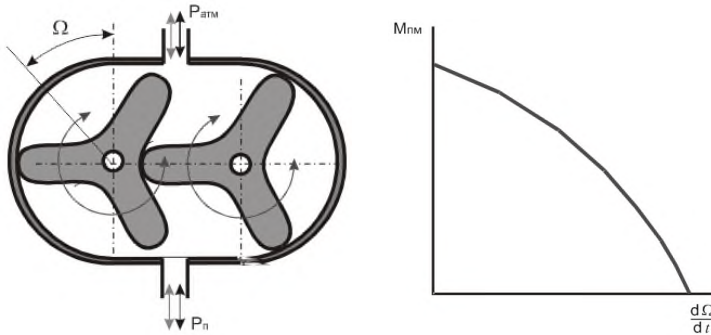


Рис. 13.25. Принципова схема силового елемента та статична характеристика пневмомотора Рутса

Статична характеристика пневмомотора Рутса представлена на рис. 13.25. Вона побудована для постійного перепаду тисків на пневмомоторі $\Delta p_{плм} = p_{п} - p_{атм} = const$. При інших перепадах тиску характеристика буде іншою.

Ротаційні пластинчасті пневмомотори

Пневмомотор ротаційно-пластинчастого типу відрізняється від пневмомотора Рутса конструкцією ротора, який має не пелюсткову, а пластинчасту форму. Обертаючий момент на роторі виникає внаслідок дії на його пластини різниці тисків повітря у вхідній магістралі (тиску живлення $p_{п}$) і в робочій камері $p_{к}$, який менший за вхідний тиск. Швидкість обертання ротора можна регулювати зміною витрати стисненого повітря за допомогою дроселя, що включається, зазвичай, у вхідну магістраль, а величину обертаючого моменту – зміною тиску, яка здійснюється за допомогою регулятора (редуктора) тиску. Регулювання швидкості можна здійснювати також поворотом його статора відносно осі симетрії корпусу. При цьому змінюється тривалість з'єднання робочих камер статора з вікном живлення, а отже, і ступінь наповнення камер стисненим повітрям.

Пластинчасті пневмомотори є швидкохідними, забезпечують плавність обертального моменту, простоті за конструкцією, мають невеликі розміри і вагу. Їх питома вага складає 2...4 кг/кВт. Вони працюють при тисках повітря 0,3...0,6 МПа, мають потужність до 15 кВт, частоту обертання 50...250 с⁻¹. До недоліків можна віднести великий рівень шуму і значний знос деталей в процесі експлуатації.

Лінійку пневмоторів ротаційно-пластинчастого типу серії М з потужностями в межах від 0,22 до 9,2 кВт виготовляє компанія **TSA (Італія)**. Пневмотори серії М30 – це двигуни, які широко застосовуються для механізації ручного інструменту.

Технічні параметри пневмоторів Series M30:

- тиск стисненого повітря на вході, бар	7; 6; 5; 4; 3;
- обертаючий момент, Нм	0,55; 0,46; 0,39;
(відповідно до вхідного тиску)	0,31; 0,23
- потужність, кВт	0,31; 0,26; 0,21;
	0,15; 0,1;
- навколишня температура, °C	-20...+80;
- витрати повітря, л/с	7,4; 6,8; 6,8; 4,8; 3,83;
- момент інерції, г·м ²	200;
- габарити, мм, не більше	56x68x108;
- маса, кг, не більше	0,6.

Зовнішній вигляд пневмотора М30 наведено на, рис. 13.24.

13.5. Гідравлічні виконавчі механізми

Гідравлічні виконавчі механізми поділяються на механізми поступального й обертального руху. Гідравлічні ВМ поступального руху, як і пневматичні ВМ, поділяються на поршневі і мембранні. Гідравлічні ВМ обертального руху з необмеженим кутом повороту вихідного вала являють собою гідромотори. Обертальний рух вихідного вала ВМ можна також отримати за допомогою шатуна і кривошипа, використовуючи гідравлічний ВМ поступального руху (рис. 13.26). У цьому випадку кут повороту вала менший 360°.

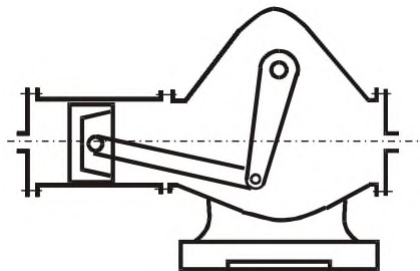


Рис. 13.26. Кривошипно-шатунний гідравлічний ВМ

На практиці широко використовуються роторні гідравлічні ВМ з необмеженим кутом повороту вихідного вала (чи гідромотори). За конструктивною схемою (рис. 13.27) вони поділяються на радіальні, аксіальні (плунжерні) і лопатеві.

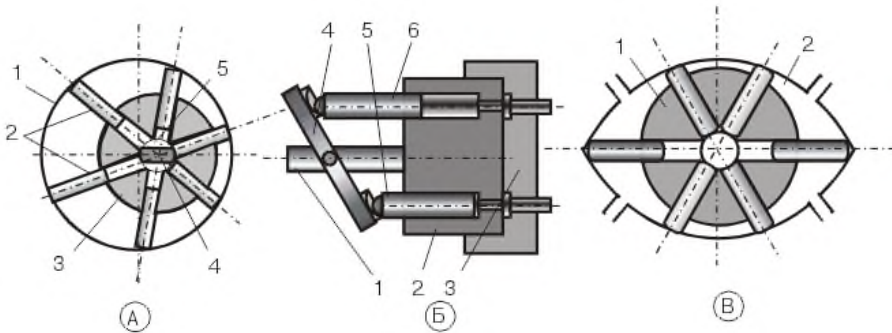


Рис. 13.27. Роторні гідравлічні ВМ:
А - радіальний; Б - аксіальний; В – лопатевий

Радіальні гідромотори

На рис. 13.27, *А* зображена схема радіального гідромотора. В кожусі 1 ексцентрично розташовується ротор 3, в тілі якого є циліндричні проточки з поршнями 2.

Внутрішня порожнина ротора 3 розділена на дві частини нерухомою перегородкою 4. В нижню порожнину внутрішньої частини ротора здійснюється підведення робочої рідини з високим тиском від гідронасоса. Верхня порожнина внутрішньої частини ротора з'єднана зі зливною магістраллю.

Робоча рідина в порожнині 4 намагається витиснути нижні поршні і притискає їх до кожуха 1. При зсуві осі ротора щодо осі кожуха на роторі з'являється обертаючий момент тим більший, чим більше зміщується вісь ротора. При цьому ротор починає обертатися з частотою:

$$\Omega = 2Q / (e \pi d^2 z), \quad (13.17)$$

де: Q – витрати робочої рідини в гідромоторі; e – ексцентриситет; d – діаметр поршнів; z – кількість поршнів.

Розглянутий радіальний роторно-поршневий гідромотор має зворотну властивість, тобто, якщо обертати ротор 3 з частотою обертання Ω , то він працює як гідронасос із продуктивністю:

$$Q=0,5e\pi d^2z\Omega. \quad (13.18)$$

Отже, при $\Omega=const$ і обраних конструктивних параметрах гідромотора його продуктивність Q залежить тільки від ексцентриситету e . Зміна знаку ексцентриситету приводить до зміни напрямку потоку робочої рідини при роботі пристрою в режимі насоса, чи до зміни напрямку обертання ротора при роботі пристрою в режимі гідромотора після підключення його до гідронасоса. При цьому, змінюючи ексцентриситет e гідронасоса можна змінювати (регулювати) частоту обертання ротора гідромотора. В такий спосіб цей пристрій можна використовувати як силовий елемент гідравлічного ВМ з об'ємним управлінням. Об'ємним це управління називається тому, що частота обертання вала гідромотора змінюється врешті-решт за рахунок зміни продуктивності гідронасоса. В деяких випадках для регулювання частоти обертання ротора гідромотора використовується зміна його ексцентриситету e .

Розглянутий об'ємний гідропривід містить у собі силовий елемент – гідравлічний ВМ з об'ємним управлінням, і елемент управління – гідронасос із змінною за рахунок зміни ексцентриситету ротора продуктивністю. Застосування такого гідроприводу забезпечує можливість поліпшення динамічних характеристик гідромеханічних систем управління, а також істотне підвищення потужності ВМ при малих габаритах і вазі.

Час розвантажування гідромоторів середньої потужності 5...75 кВт не перевищує 0,1 с і, як правило, складає 0,03...0,04 с. В об'ємних ВМ ККД значно перевищує ККД поршневих ВМ і складає 95...98 %. До переваг об'ємних ВМ слід також віднести можливість неперервного регулювання частоти обертання вихідного вала ВМ в діапазоні 1...1000 об/хв. при простому управлінні. Крім цього, зусилля, створювані об'ємними гідромоторами, у 20...25 разів вищі зусиль, створюваних електродвигунами ВМ.

Оскільки принцип дії об'ємного гідроприводу оснований на використанні енергії тиску робочої рідини, то при високих тисках, понад 20 МПа, істотно зростають вимоги до ущільнень. При високих

тискає в об'ємних гідроприводах збільшуються шуми, тому необхідно передбачати заходи для їхнього зменшення.

При інерційному навантаженні гідромотора, в якого вихідною величиною є кут повороту вала, передаточна функція об'ємного гідроприводу записується у вигляді:

$$W_{BM}(p) = \frac{\theta(p)}{e(p)} = \frac{k_p / (1 + f(k_p / k_m))}{p[(1/\omega_p^2)p^2 + (2\delta/\omega_p)p + 1]}, \quad (13.19)$$

де: ω_p – резонансна частота;

θ – кут повороту вихідного вала ВМ (рад);

e – величина ексцентриситету насоса, м;

k_p – коефіцієнт підсилення ВМ за швидкістю, рад/с;

f – коефіцієнт в'язкого тертя і навантаження гідромотора;

$\delta = \frac{k_p J \omega_p}{2k_M} \cdot \frac{1 + f[Vk_M / (k_p \chi V_D^2 J)]}{1 + f(k_p / k_M)}$ – коефіцієнт демпфірування;

χ – об'ємний модуль пружності рідини;

V – ефективний об'єм робочої рідини у гідросистемі, рівний половині загального об'єму робочої рідини між насосом і гідромотором, m^3 ;

V_D – питомий об'єм гідромотора, $m^3/\text{рад}$;

J – загальний момент інерції, приведений до вала гідромотора.

Аксіальні та лопатеві гідромотори

На рис. 13.27, Б зображена схема аксіального гідромотора. В роторі 2, розташованому в кожусі 3 і зв'язаному з валом 1, установлені декілька невеликих гідроциліндрів, поршні яких шарнірно пов'язані з поворотною шайбою 4. Якщо шайба 4 повернена під деяким кутом до осі вала 1, то при подачі робочої рідини з високим тиском від гідронасоса до поршня 5 гідромотора, він змусить повернутися ротор останнього на деякий кут. При цьому здійснюється витиснення робочої рідини з порожнини поршня 6. Але при повороті ротора відбудеться переключення живлення робочою рідиною наступного поршня, який буде здійснювати подальше повертання ротора.

Без урахування навантаження і витоків робочої рідини швидкість обертання ротора, рад/с:

$$\Omega = 4Q / (\pi d^2 z D \operatorname{tg} \beta), \quad (13.20)$$

а обертаючий момент на валі (Нм):

$$M_{\text{кр}} = (d^2 / 8) \cdot z D \Delta p \operatorname{tg} \beta, \quad (13.21)$$

де: Q – витрата робочої рідини в гідромоторі; d – діаметр поршнів; z – число поршнів; D – діаметр кола, на якому розташовані центри поршнів; Δp – перепад тисків у гідромоторі; β – кут нахилу шайби.

При роботі в режимі насоса, коли ротор обертається від зовнішнього джерела потужності з частотою Ω , продуктивність аксіально-поршневого насоса з урахуванням витоків робочої рідини дорівнює:

$$Q = (\pi d^2 / 4) \cdot Z d \Omega \operatorname{tg} \beta - r_n' \Delta p, \quad (13.22)$$

де r_n' – питомий витік робочої рідини в насосі, що залежить від геометричних параметрів і температури рідини, м³/(Нс).

Отже, при обраних конструктивних параметрах гідронасоса і $\Omega = \text{const}$ продуктивність гідронасоса визначається кутом β нахилу поворотної шайби. Змінюючи цей кут за допомогою, наприклад, поршневого гідравлічного ВМ, одержуємо об'ємний насос з регульованою продуктивністю.

Тиски робочої рідини, створювані аксіально-поршневими гідронасосами, складають 10...40 МПа, а витрати 0,04...2 м³/с. При частоті обертання ротора гідронасоса, рівній 30...600 рад/с, частота обертання вихідного вала гідромотора може змінюватися в діапазоні 1...600 рад/с. Відношення моменту аксіального гідромотора до моменту інерції його обертових частин на порядок вище, ніж у електродвигунах такої ж потужності.

Для квазілінійного режиму роботи такого гідроприводу з урахуванням впливу витоків, навантаження і стискальності робочої рідини передаточна функція гідромотора має вигляд:

$$W(p) = \frac{\Omega(p)}{\varphi(p)} = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (13.23)$$

де: $k = \frac{(1-c_1)V_H\Omega_H}{1-c_1+k_r\mu f V_D}$ – передаточний коефіцієнт гідромотора,

$T = \sqrt{\frac{JV(1-c_1+k_r\mu f V_D)}{\chi_{\text{пн}} V_D^2}}$ – постійна часу;

$\xi = 0,5T \left[\frac{k_r \chi_{\text{пн}} V_D^2}{V} + \frac{\mu f V_D}{J} \right]$ – відносний коефіцієнт демпфірування;

φ – сигнал управління (кут нахилу шайби гідронасоса);

Ω – частота обертання вихідного вала гідромотора;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості робочої рідини;

c_1 – коефіцієнт втрат, пропорційний навантаженню ($0,025 \leq c_1 \leq 10,09$);

V_D – питомий об'єм гідромотора;

f – коефіцієнт в'язкого тертя в гідромоторі;

V_H – питомий об'єм гідронасоса;

Ω_H – частота обертання вихідного вала гідронасоса;

k_r – коефіцієнт герметичності, що характеризує витоки у гідронасосі й гідромоторі. Для насоса і мотора однакового типу:

при $V_D > 40 \times 10^{-6} \text{ м}^3$

$$\frac{0,04}{V_D} \leq k_r \leq \frac{0,24}{V_D};$$

при $V_D < 40 \times 10^{-6} \text{ м}^3$

$$\frac{0,04}{V_D} \leq k_r \leq \frac{0,24}{V_D};$$

J – приведений момент інерції навантаження гідромотора;

V – об'єм робочої рідини в напірному тракті;

$\chi_{\text{пн}}$ – приведений до нескінченно жорстких стінок тракту модуль об'ємної пружності робочої рідини:

$$\chi_{III} = \frac{\chi}{1 + 2\chi \frac{(d_1 + d_2)}{\chi_T (d_1^2 - d_2^2) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_T^2}\right)}},$$

де: χ – модуль об'ємної пружності рідини;

χ_T – модуль пружності матеріалу стінок трубопроводу;

d_1, d_2 – зовнішній і внутрішній діаметри трубопроводу постійного перетину відповідно;

ω – частота гармонічних коливань;

$\omega_T = 2 \sqrt{\frac{\chi_T (d_1 + d_2)}{\rho_T d_2 (d_1^2 + d_2^2)}}$ – власна частота радіальних коливань

трубопроводу;

ρ_T – густина матеріалу стінок трубопроводу.

На рис. 13.27, В приведена схема лопатевого гідромотора, ротор 1 якого поміщений в статор 2, що має внутрішню порожнину еліптичного перетину. Ротор має лопаті, які притискаються робочою рідиною до внутрішніх стінок статора. При подачі робочої рідини під тиском у верхню праву і нижню ліву чверті еліптичної порожнини ротор починає обертатися.

Розглянемо характеристики **аксіально-поршневих гідронасосів з похилим диском серій S и Н**, що виготовляються ПАТ "Гідросила" (Україна). Насоси призначені для об'ємних гідроприводів, які складаються з насоса і гідромотора, що працюють за закритою схемою, і використовуються в гідроприводах мобільних машин, зернозбиральних та інших комбайнах, гідроприводах технологічного обладнання та ін. Насоси серії S використовуються в гідросистемах з максимальним тиском 35,7 МПа, а серії Н – 45 МПа. Напрямок потоку робочої рідини в насосах змінюється шляхом повороту похилого диска в протилежні сторони від його нейтрального положення. Подача насоса прямо пропорційна частоті обертання ротора і робочому об'єму, який регулюється шляхом зміни кута повороту похилого диска. Модульне приєднання розподільника дозволяє приєднувати до насосів системи управління різних типів.

Для насосів серії S системи:

МН – гідромеханічну пропорційну систему управління, яка дозволяє утримувати похилий диск у заданому важелю управління положенні, підтримуючи тим самим подачу насоса на заданому рівні;

ER – електричну трипозиційну систему управління "Вкл.-Викл.-Вкл." Можлива модифікація з регулюванням максимального робочого об'єму.

Для насосів серії Н крім систем МН і ER такі системи управління:

HD - гідравлічну пропорційну систему управління, яка дозволяє утримувати похилий диск в заданому положенні за допомогою подачі керуючого гідравлічного сигналу. Система використовується в машинах зі складним компонуванням, або таких, що потребують узгодження подачі насоса і технологічного обладнання;

ЕР - електричну пропорційну систему управління, яка забезпечує безступінчасту зміну робочого об'єму насоса за рахунок зміни сили струму на двох пропорційних магнітах.

В конструкції насосів розмірністю 71, 90 і 112 см³ передбачена можливість приєднання додаткових насосів за схемою «тандем».

Технічні характеристики насосів серії S наведені в табл. 13.5, зовнішній вигляд – на рис. 13.28.

Підприємство виготовляє також аксіально-поршневі регульовані гідромотори з похилим диском серії Н з робочим об'ємом 90 і 112 см³ і максимальним тиском у гідролінії високого тиску 42 МПа, рис. 13.28.

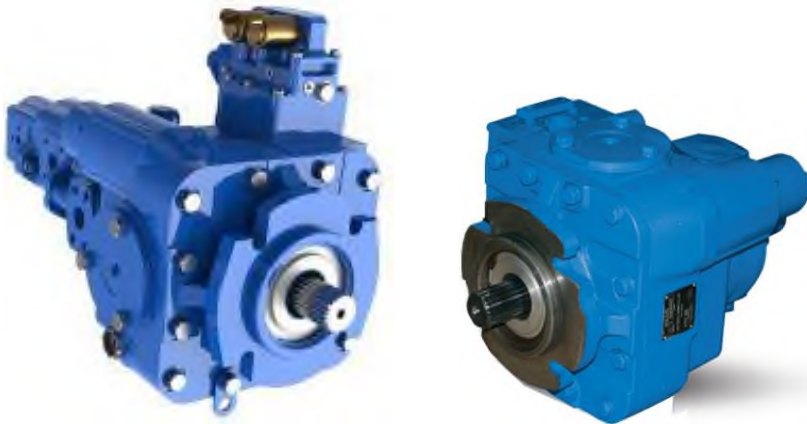


Рис. 13.28. Аксіально-поршневий насос серії S і гідромотор серії Н (Гідросила)

Таблиця 13.5

Технічні характеристики насосів серії S

<i>Найменування характеристики</i>	<i>Значення характеристики</i>			
Максимальний робочий об'ємом, см ³	33,3	51,6	69,8	89,
Максимальна подача, л/хв.	113,5	151,8	186,3	218,9
Максимальний тиск у гідролінії, МПа	42			
Номінальний тиск у гідролінії, МПа	37,5			
Максимальний тиск дренажа, МПа	0,25			
Максимальна частота обертання, хв.-1	3800	3500	3200	2900
Мінімальна частота обертання, хв.-1	500			
Номінальна частота обертання, хв.-1	2500			
Кут нахилу шайби, град., не більше	±18			
Номінальна потужність, кВт	18,7	29	39,3	63,3
Маса (без рідини)	45	55	63	79

Гідромотори серії Н призначені для роботи в закритих гідросистемах там, де необхідно розширити діапазон регулювання частоти обертання виконавчого механізму. Вихідний обертаючий момент гідромотора прямо пропорційний перепаду тисків між напірними гідролініями. Максимальний обертаючий момент становить 542 і 675 Нм відповідно до робочого об'єму. Напрямок обертання вала залежить від того, в яке з двох отворів («А» або «В») подається високий тиск. Частота обертання вала гідромотора прямопропорційна витраті робочої рідини і обернено пропорційна величині кута повороту похилого диска. Максимальна частота обертання гідромоторів 3720 об./хв.

Система управління гідромотором на основі слідкуючого механізму дозволяє утримувати похилий диск в необхідному положенні, підтримуючи тим самим подачу на заданому рівні. В разі відпускання важеля управління похилий диск автоматично повертається у вихідне положення. Передбачено модульне приєднання і монтаж розподільної гідроапаратури, що дозволяє приєднувати системи управління різних типів.

Аксіально-поршневі гідромотори серії Н є простими в управлінні і мають відносно малі габаритні розміри.

Підсумовуючи сказане відмітимо, що основними перевагами гідравлічних ВМ є порівняно проста конструкція, значні пересувні

зусилля при малих розмірах, надійність і довговічність. Ці переваги обумовили їхнє широке застосування в промисловості і машинобудуванні, у т. ч. і сільськогосподарському.

13.6. Обґрунтування вибору виконавчих механізмів

Виконавчі механізми регуляторів непрямої дії з'єднуються безпосередньо з регулюючим органом об'єкта управління. Переміщаючи регулюючий орган за допомогою команд, які формуються вимірювальною частиною регулятора (тобто його регулюючим пристроєм), виконавчий механізм здійснює управляючу дію на об'єкт управління.

В системах автоматичного управління технологічними процесами застосовуються різні типи регулюючих органів. Наприклад, для управління витратами рідин і газів найбільше застосування отримали дросельні регулюючі органи, що являють собою змінний гідравлічний опір, який включається в підвідну магістраль. Управління витратами при цьому здійснюється за рахунок зміни прохідного перерізу магістралі. Зміна витрат рідини і газу можлива також шляхом зміни тиску за насосом (зміни напору насоса) при постійному гідравлічному опорі магістралі.

Для управління витратами сипучих матеріалів як регулюючі органи застосовуються такі типи живильників:

- дискові;
- шнекові;
- стрічкові;
- лопатеві;
- скребкові і ін.

Для управління енергетичними механічними потоками широко використовуються гідравлічні і електромагнітні муфти, які виконують функції регулюючих органів об'єктів управління.

Управління електричними енергопотоками, як правило, здійснюється електронними тиристорними підсилювачами, які виконують функції регулюючих органів ВМ.

Електродвигунні виконавчі механізми вибирають у залежності від величин обертаючого моменту, необхідного для обертання поворотних заслінок:

$$M_{II} = \kappa / (M_P + M_T), \quad (13.24)$$

де κ – коефіцієнт, який враховує зтяжку сальників і забрудненість трубопроводів, $\kappa = 2 \dots 3 \%$; M_p – реактивний момент, обумовлений намаганням потоку речовини закрити заслінку; M_T – момент від сили тертя в опорах.

В свою чергу реактивний момент можна визначити так:

$$M_p = 0,07 \Delta p_y D_3^3, \quad (13.25)$$

де Δp_y – перепад тисків на заслінці (у розрахунках рекомендується приймати рівним надлишковому тиску перед заслінкою p_H); D_3 – діаметр заслінки.

Момент від сил тертя в опорах:

$$M_T = 0,785 D_3^2 p_H r_{ш} \lambda, \quad (13.26)$$

де $r_{ш}$ – радіус шийки вала заслінки; λ – коефіцієнт тертя в опорах (наближено можна прийняти рівним 0,15).

Момент обертання вала вибраного виконавчого механізму повинен бути не меншим моменту, потрібного для повороту заслінки: $M_{BM} \geq M_{П}$. Його зазвичай вибирають зі значним (більше ніж двократним) перевищенням, тому що коефіцієнт тертя в опорах у процесі експлуатації може значно зрости через забруднення опорних поверхонь.

Як видно із наведених рівнянь, для розрахунку перестановочних зусиль ВМ в якості розрахункових параметрів використовуються: розмірна величина регулюючого органу D_3 – діаметр заслінки (її площа) і Δp_y – перепад тисків на заслінці, а також надлишковий тиск перед заслінкою p_H . Саме ці параметри визначають витрати середовища управління (фактора управління), підведеного до об'єкта управління при заданих значеннях параметрів робочого середовища (тиску, витрат, температури, в'язкості, густини і ін.).

В позиційних регуляторах систем стабілізації можуть використовуватися пневматичні і електромагнітні ВМ, які мають релейну статичну характеристику і таку ж витратну характеристику, і рідше електродвигунні ВМ.

У неперервних регуляторах, як було зазначено вище, можуть використовуватися астатичні ВМ, які за динамічними властивостями є інтегруючими ланками з передаточними функціями:

$$W_{BM}(p) = k_{BM}/p \text{ та } W_{BM}(p) = k_{BM} \left(1 + \frac{1}{T_{BM} p} \right) \quad (13.27)$$

відповідно, і статичні ВМ, які за динамічними властивостями є інерційними ланками з передаточною функцією:

$$W_{BM}(p) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} p + 1}. \quad (13.28)$$

Витратна характеристика регулюючого органу повинна охоплювати діапазон витрат робочого тіла (фактора управління) від мінімального значення, яке відповідає роботі об'єкта управління на мінімальному режимі (при мінімальному значенні управляючої величини) з мінімальним навантаженням, до максимального значення, яке відповідає роботі об'єкта з максимальним значенням управляючої величини (на максимальному режимі) з максимальним навантаженням. Вона повинна бути лінійною, що забезпечується підбором відповідного закону зміни прохідного перерізу регулюючого органу F_{po} в залежності від його положення m_{po} або φ_{po} .

Способи з'єднання регулюючого органу з силовим елементом ВМ у кожному конкретному випадку визначаються їх типом і конструкцією, взаємним розташуванням, характером переміщення регулюючого органу і іншими умовами. Основною задачею з'єднання є забезпечення заданої витратної характеристики регулюючого органу, яка являє собою залежність витрат робочого тіла (фактора управління) G від положення регулюючого органу – координати m_{po} (або кута установки φ_{po}).

Суттєвим фактором, який впливає на обґрунтування вибору ВМ є його надійність. Надійність ВМ багато в чому визначає надійність роботи всієї системи регулювання. Це пояснюється тим, що з усіх елементів системи саме ВМ працюють у найбільш важких умовах, тому при виборі ВМ і способів управління ними слід віддавати перевагу тим типам чи модифікаціям, які при однаковій якості регулювання забезпечують більшу надійність. Найвищу надійність електричні ВМ мають при безконтактному виконанні електродвигуна (силового елемента) і силових елементів управління. Однак, при цьому слід враховувати деякі особливості с/г виробництва, такі, наприклад, як сезонність робіт.

Поряд із вищевикладеними вимогами до виконавчих пристроїв автоматичних систем при їх виборі необхідно звертати увагу на економічну доцільність вибраного способу регулювання.

Для вибору найбільш економічного способу регулювання при проектуванні автоматичної системи необхідно проводити їх порівняльний аналіз. При цьому слід враховувати:

1. Управління продуктивністю відцентрових машин (нагнітачів, насосів, вентиляторів) дросельним способом економічно виправдано лише за тієї умови, що їх навантаження близьке до граничного значення, так як у цьому випадку втрати енергії будуть найменшими. Із зменшенням навантаження машин втрати збільшуються, і зазначений спосіб управління стає економічно недоцільним.

2. Найбільш економічним способом управління продуктивністю відцентрових машин у широкому діапазоні є спосіб, оснований на управлінні частотою обертання ротора цих машин. Це може бути досягнуто шляхом зміни частоти обертання вала електродвигуна, передавального відношення редуктора або використання керованих муфт зчеплення. Так, при використанні для зміни частоти обертання розглянутих машин гідравлічних муфт ККД досягає 94...98 %.

3. Ефективність управління продуктивністю димососів і дуттьових вентиляторів за допомогою напрямних апаратів за економічною оцінкою близька до способу, оснований на використанні керованих муфт зчеплення, але дещо нижча, однак, вища ніж при дросельному способі.

4. При управлінні продуктивністю відцентрових машин дросельним способом економічно доцільно (з точки зору зниження енергетичних витрат) встановлювати дросель управління не у вихідному каналі, а в каналі перепуску. У цьому випадку регулюючий орган буде знаходитися в більш сприятливих умовах і буде мати менші розміри.

Контрольні запитання

1. Призначення, структура і типи виконавчих пристроїв (механізмів).
2. Назвіть основні характеристики ВМ.
3. Електродвигунні ВМ постійного струму.
4. Будова електродвигуна постійного струму.

5. Схеми ввімкнення обмотки збудження в електродвигунах постійного струму.
6. Способи управління частотою обертання електродвигуна постійного струму. Статичні і швидкісні характеристики.
7. Електродвигунні ВМ змінного струму.
8. Будова асинхронного електродвигуна з пустотілим немагнітним ротором.
9. Схеми управління двофазними асинхронними двигунами.
10. Будова асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором.
11. Способи управління частотою обертання асинхронних двигунів.
12. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміною напруги на статорі.
13. Регулювання частоти обертання АД шляхом зміни числа полюсів обмотки статора.
14. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна шляхом зміни активного опору кола ротора.
15. Принцип частотного способу регулювання швидкості асинхронного двигуна.
16. Переваги частотного регулювання швидкості АД.
17. Скалярні системи частотного управління АД.
18. Закони зміни напруги при частотному управлінні у скалярних системах.
19. Закон зміни напруги при скалярному частотному управлінні вентиляторним навантаженням.
20. Принцип векторного управління АД.
21. Векторне управління АД з орієнтацією за полем ротора.
22. Переваги векторного управління АД.
23. Перетворювачі частоти.
24. Широтно-імпульсна модуляція.
25. Перетворювачі частоти. Їх призначення та основні характеристики.
26. Обґрунтування вибору частотних перетворювачів.
27. Конструкція крокового двигуна. Призначення.
28. Типи крокових двигунів.
29. Управління кроковими двигунами.
30. Виконавчі механізми з кроковими електродвигунами.

31. Однообертові ВМ типу МЭО. Основні характеристики.
32. Багатообертові ВМ типу МЭМ. Основні характеристики.
33. Електромагнітні виконавчі механізми. Типи і основні характеристики.
34. Вібраційна лінеаризація ВМ з електромагнітними муфтами.
35. Електромагнітні муфти серії ЕТМ. Призначення. Основні характеристики.
36. Пневматичні виконавчі механізми. Призначення, будова, характеристики.
37. Роторні пневматичні виконавчі механізми. Типи, будова, характеристики.
38. Гідравлічні виконавчі механізми. Призначення, будова і основні характеристики.
39. Радіальні гідромотори. Типи і їх будова. Призначення, характеристики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алиев Т.М, Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника: Учеб. пособие для техн. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
2. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога: Пер. с англ. – М.: Издат. дом «Додэка-XXI», 1992. – 384 с.
3. Вакулин А.А., Шабаров А. Б. Диагностика теплофизических параметров в нефтегазовых технологиях: Монография. – Новосибирск: Наука, 1998. – 249 с.
4. Головки Д.Б., Рого К. Г., Скрипник Ю.О. Основи метрології та вимірювань. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
5. Головки Д. Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин: Навч. посіб. – К.: Либідь, 2003. – 328 с.
6. ГОСТ 8.563-97. Межгосударственный стандарт: ГОСТ 8.563.1-97. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия; ГОСТ 8.563.2-97. Методика выполнения измерения с помощью сужающих устройств; ГОСТ 8.563.3-97. Процедура и модуль расчетов. Программное обеспечение. – Чинний від 24.04.2001. – К.: Держстандарт України, 2001.
7. Грушка І.Г. Методи і засоби вимірювання вологості матеріалів та середовищ / Наук. праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, Київ.- 2005, Вип. 254.-С169-187.
8. Датчики измерительных систем: В 2 кн. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др.: Пер. с франц. / Под ред. А. С. Обухова. – М.: Мир, 1992.
9. Датчики: Справочник / З. Ю. Готра, Л. Я. Ильницкий, Е. С. Полищук и др. / Под ред. З.Ю. Готры, О.И.Чайковского. – Л.: Каменяр, 1995. – 312с.
10. ДСТУ 2681-94.Метрологія. Терміни та визначення. – Чинний від 26.07.1994. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68с.
11. ДСТУ 2837-94. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення. – Чинний від 31.10.1994. – К.: Держстандарт України, 1995. –221 с.
12. ДСТУ 2858-94. Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. – Чинний від 23.11.1994. – К.: Держстандарт України, 1995. – 53 с.
13. ДСТУ 3307-96. Перетворювачі термоелектричні. Подовжувальні та компенсаційні проводи. Допуски та система ідентифікації. – Чинний від 27.02.1996. – К.: Держстандарт України, 1998. – 6 с.
14. Дж. ФРАЙД. Сучасні датчики. Довідник - М.: Техносфера, 2005. - 592 с.

15. Ефимов В.Т., Молчанов В.И., Ефимов А.В. Методы расчетов в автоматизации химико-технологических и теплоэнергетических процессов: Учеб, пособие для вузов. – Х.: ХГПУ, 1998. – 316 с.

16. Електроніка і мікропроцесорна техніка / Сенько В.І., Лисенко В.П., Юрченко О.М., Лукін В.Є., Руденський А.А. – К.: «Агроосвіта», 2015. – 676 с.

17. Измерение температур в технике: Справочник / Г. Бройнинг, П. Дитрих, В. Глокман и др.: Пер. с нем. / Под общ. ред. Ф. Линевега. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.

18. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб, пособие для вузов / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров; Под общ. ред. Н. Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

19. Измерения в промышленности: Справоч. изд.: В 3 кн.: Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990.

20. Й. Й. Білінський, К.Ю. Іоніна Світловодні сенсори температури точки роси природного газу: монографія / Вінниця: ВНТУ, 2014. – 136 с.

21. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики: Учеб. для сред. спец. Учеб. заведений. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.

22. Климентовський Ю.А. Технічні засоби автоматики: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / Климентовський Ю.А., Лавінський Д.С. – К.: «Видавничий центр НАУ», 2002. – 57 с.

23. Климентовський Ю.А., Гладкий А. М. Технічні засоби автоматики. – Навчальне видання. – К.: Видавництво «КВІЦ», 2003. – 238 с.

24. Коваленко І.О., Коваль А.М. Метрологія та вимірювальна техніка: Навч. посіб. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 652 с.

25. А. с. № 1516811 СССР, МКИ G 01 L 7/00. Устройство для измерения гидростатического давления жидких нефтепродуктов в резервуарах / Ю. В. Кречотень, М. В. Лукинчук, Н.Р. Буголовский и др. (СССР). – Заявл. 18.02.88. Опубл. 23.10.89, Бюл. №39. – С. 28.

26. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник: В 2 кн. – СПб.: Политехника, 2002.

27. Кубрак А.І. Жученко А. І., Кваско М.З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем: Навч. посіб. – К.: Політехніка, 2004. 424 с.

28. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учеб. пособ. для студ. вузов. – М.: Машиностроение, 1983. – 464 с.

29. Коломієць Г.Г. Фізичні основи сенсорики. Конспект лекцій для студентів ЗДІА/Запоріжжя, 2014.-64с.

30. Лисенко В.П. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1). Видання 2-е, перероблене і доповнене / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: «Освіта України», 2013. – 720 с.

31. Лукінюк М.В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с.

32. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 535 с.

33. Методы конструирования измерительных систем / А. Н. Дубовец, Б. Г. Лях, Н. Н. Тovaжнянский, И. И. Литвиненко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 160 с.

34. Матус С.К. Інформаційно-вимірювальна система збору даних і контролю за вологозапасами ґрунту./Вісник НУВГтаП, вип.2(66), серія «Технічні науки», Рівне, 2014.с.198-208.

35. Методи і засоби агрометеорологічних вимірювань параметрів ґрунтів / Український гідрометеорологічний інститут. <http://uhmi.org.ua/rozi/agro/index.php#Z15>.

36. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

37. Немова Т.Н., Цветков. Н.А. Методы измерения температуры. Часть 1. Методы и средства контактного измерения температуры. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 38 с .

38. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування: Підруч. для студ. вищ. закл. освіти за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – К.: Задруга, 1999. – 424 с.

39. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник. – Л.: Вид-во Держ. ун-ту «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.

40. Промислові засоби автоматизації: Навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; За заг. ред. А.К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХПІ», 2003 р.

41. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справ. пособие / Под ред. В.В. Черенкова – М.: Машиностроение, 1987. – 794 с.

42. Перелигін Б.В, Вельміскін Д.І. Удосконалення методів побудови систем одержання і обробки вимірювальної інформації з метою моніторингу навколишнього середовища / Одеський державний екологічний університет, Звіт про НДР, № держ. реєстр. 0113 У 000164с. 2014.-249с. <http://sevntu.com.ua>.

43. Романова Л.А. Метрологические основы поверки и калибровки средств электрических измерений. – М.: АСМС, 1999. – 68 с.

44. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. / Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 592 с.

45. Стенцель Й.І., Тишук В. В. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості / Східноукраїн. держ. ун-т; Сіверськодон. технол. ін-т. – Луганськ: Вид-во СУДУ, 2000. – Ч. 1. – 263 с.

46. Стенцель Й.І. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості / Східноукраїн. держ. ун-т; Сіверськодон. технол. ін-т. Ч. 2: Аналітичні прилади і методи контролю. – Луганськ : Вид-во СУДУ, 2001. – 263 с.

47. Теорія автоматичного управління: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Г. Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, О.І. Бріцький; За ред. проф. Г.Ф. Зайцева. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.

48. Термoeлектричні прилади контролю: Навч. посіб. / В.П. Гондюл, Д.Б. Головка, Ю.О. Скрипник, Л.О. Глазков. – К.: Либідь, 1994. – 200 с.

49. Фарзане Н. Г., Ильясов Л.В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. для студ. вузов, – М.: Высш. шк., 1989. – 456 с.

50. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. / Под ред. Е. Л. Свинцова. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

51. Храмов А.В. Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювальних іладів і автоматичних систем: Навч. посіб. – К.: Вища шк., 1998. – 527 с. 37

52. Шикалов В.С. Технологічні вимірювання: Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2007. – 169 с.

53. Сизиков С.В. Электрические машины: Учебное пособие, часть II. – Минск: МГВАК, 2008.

54. Фирабо Б.И. Васильев Д. С. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. Электроэнергетика.–2015.–№5.–С.5-16.

55. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

56. Ляшкевич М.. Векторное управление для асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://geektimes.ru/company/npf_vektor/blog/269486/.

57. Векторное управление двигателем // Инженерные решения [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/>

58. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.

ЗМІСТ

Список прийнятих скорочень і позначень	3
Вступ.....	4
Розділ 8. Сучасні первинні вимірювальні перетворювачі	5
8.1. Загальні відомості	5
8.2. Первинні перетворювачі температури	6
8.2.1. Термоперетворювачі опору	9
8.2.2. Термопари	17
8.2.3. Термістори.....	21
8.2.4. Безконтактні вимірювачі температури	29
8.2.5. Пірометричні вимірювачі	32
8.2.6. Тепловізори	42
8.3. Первинні перетворювачі вологості.....	48
8.4. Вимірювачі вологості повітря.....	51
8.4.1. Конденсаційні гігрометри.....	52
8.4.2. Сорбційні гігрометри.....	57
8.4.3. Імпедансні вимірювачі вологості	60
8.4.4. П'єзосорбційні гігрометри	71
8.5. Вимірювачі вологості ґрунту	76
8.5.1. Термогравіметричні аналізатори вологості	77
8.5.2. Тензіометричні вологоміри	82
8.5.3. Нейтронний вимірювач вологості.....	84
8.5.4. Вологоміри на основі електричних методів вимірювання вологості.....	86
8.5.5. Вологоміри на основі електромагнітних методів вимірювання вологості.....	92
8.6. Вологість зерна.....	102
8.6.1. Методи визначення вологості зерна	103
8.6.2. Гравіметричні аналізатори вологості зерна	108
8.6.3. Титратори вологи	113
8.6.4. Портативні вимірювачі вологості зерна.....	118
8.6.5. Вологоміри спеціального призначення	140
Розділ 9. Підсилювачі.....	149
9.1. Загальні відомості	149
9.1.1. Класифікація підсилювачів	151

9.1.2. Основні характеристики	152
9.1.3. Зворотний зв'язок у підсилювачах	161
9.2. Напівпровідникові підсилювачі.....	164
9.2.1. Підсилювач на біполярному транзисторі за схемою із спільним емітером.....	164
9.2.2. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі за схемою із спільним витоком	170
9.3. Підсилювачі постійного струму. Підсилювачі постійного струму прямого підсилення	173
9.3.1. Підсилювачі з безпосереднім зв'язком.....	173
9.3.2. Диференціальні підсилювачі	180
9.3.3. Підсилювачі постійного струму з перетворенням....	184
9.3.4. Операційні підсилювачі	188
9.4. Підсилювачі змінного струму	201
9.4.1. Підсилювачі з резистивно-ємнісними зв'язками.....	201
9.4.2. Тиристорні підсилювачі.....	206
9.4.3. Фазочутливі підсилювачі.....	208
9.4.4. Магнітні підсилювачі	210
 Розділ 10. Логічні елементи.....	219
10.1. Основні поняття та закони булевої алгебри	219
10.2. Стандартні форми зображення логічних функцій	233
10.3. Мінімізація логічних функцій.....	236
10.4. Метод карт Вейча і карт Карно	238
10.5. Синтез логічних пристроїв у базисах або–не та і–не....	243
 Розділ 11. Мікроконтролерні засоби.....	247
11.1 Основні поняття мікропроцесорної техніки	247
11.2. Мікроконтролери сімейства PIC-16	248
11.3. Команди асемблера мікроконтролерів PIC-16.....	250
11.4. Організація пам'яті	260
11.5. Переривання.....	262
11.6. Взаємодія мікроконтролера із зовнішніми пристроями.....	264
11.7. Програмне забезпечення мікроконтролерних систем...	268
11.8. Програмовані логічні контролери.....	269
11.9. Технологічні мови програмування	281
11.10. Класифікатори дій.....	283

Розділ 12. Регулятори автоматичних систем	289
12.1. П-регулятори.....	295
12.2. І-регулятори	299
12.3. ІІІ-регулятори	303
12.4. ПІД-регулятори	310
12.5. Електронні регулятори температури	316
12.6. Регулятори температури прямої дії	323
12.7. Мікропроцесорні регулятори	324
12.8. Регулятори вологості	337
12.9. Контролер ОВЕН ПЛК73	344
12.10. Програмовані інтелектуальні реле.....	351
 Розділ 13. Виконавчі пристрої (механізми).....	356
13.1. Класифікація виконавчих пристроїв	356
13.2. Електродвигунні виконавчі механізми.....	360
13.2.1. ВМ з електродвигунами постійного струму ...	360
13.2.2. ВМ з електродвигунами змінного струму	370
13.2.3. Регулювання частоти обертання АД.....	377
13.2.4 Векторне управління АД	383
13.2.5. Перетворювачі частоти	388
13.2.6. ВМ з кроковими електродвигунами	403
13.2.7. Управління кроковими електродвигунами	408
13.2.8. Одно- і багатообертові виконавчі механізми.....	410
13.3. Електромагнітні виконавчі механізми	418
13.4. Пневматичні та гідравлічні виконавчі механізми	425
13.5. Гідравлічні виконавчі механізми.....	431
13.6. Обґрунтування вибору виконавчих механізмів.....	441
 Література	447

**М.В. ЛУКІНЮК, В.П. ЛИСЕНКО, В.Є. ЛУКІН, А.М. ГЛАДКИЙ,
С.А. ШВОРОВ, А.А. РУДЕНСЬКИЙ, А.А. ЗАВЕРТКІН**

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Частина 2

*Навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів*

Підписано до друку 12.12.2017. Формат 60×84 1/16
Папір офсетний. Гарнітура Cambria, Times.
Ум. друк. арк. 19,59. Обл.-вид. арк. 15,17.
Наклад 50. Зам. №1418

Видано з оригінал-макету замовника
Видавець та виготовлювач ПП Лисенко М.М.,
вул. Шевченка, 20, м. Ніжин, Чернігівська обл., 16600
Тел./факс (04631) 9-09-95. E-mail: vidavec.lisenko@lgmail.com

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
Суб'єктів видавничої справи.
Серія ДК №2776 від 26.02.2007 р.