

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

М. П. Благодарний, Ю. В. Козлов, С. А. Агаркова

**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕХАТРОННИХ КОМПЛЕКСІВ**

Навчальний посібник до курсового і дипломного проектування

Харків «ХАІ» 2015

УДК 006.91:62-505(075.8)
ББК 30.10я73
Б68

Рецензенти:
д-р техн. наук, проф. О. М. Морозов,
д-р техн. наук, проф. І. В. Руженцев

Благодарний, М. П.

Б68 Метрологічне забезпечення експлуатації мехатронних комплексів [Текст] : навч. посіб. до курс. і дипл. проектування / М. П. Благодарний, Ю. В. Козлов, С. А. Агаркова. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2015. — 68 с.

ISBN 978-966-662-397-6

Розглянуто структуру мехатронних комплексів і систем, особливості метрологічного забезпечення їх експлуатації. Викладено питання практичного застосування окремих процедур метрологічної експертизи вузлів мехатронних систем, зокрема завдань вибору засобів вимірювальної техніки для контролю параметрів вузлів і будування метрологічних ланцюгів контрольованих параметрів об'єктів контролю. Наведено приклади розв'язання задач і контрольні завдання.

Для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва».

Іл. 23. Табл. 15. Бібліогр.: 31 назва

УДК 006.91:62-505(075.8)
ББК 30.10я73

© Благодарний М. П., Козлов Ю. В.,
Агаркова С.А., 2015
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2015

ISBN 978-966-662-397-6

ВСТУП

Сучасний розвиток комп'ютерно-інтегрованих виробництв характеризується постійним удосконаленням технічної оснащеності, упровадженням комп'ютерних технологій при обробленні матеріалів та інформації, використанням енергії під час технологічних процесів [1–31]. Науково-технічний прогрес привів до появи нових технічних засобів для реалізації технологічних процесів, до яких належать і мехатронні системи й комплекси. Щоб підтримувати мехатронні системи й комплекси у стані готовності до застосування за призначенням, обслуговий персонал повинен не лише досконало знати їхній устрій, але й уміти експлуатувати їх із застосуванням нових наукових технологій [24–31].

Для оцінювання технічних рішень з метрологічного забезпечення вузлів МС необхідно вирішити такі завдання:

- визначити склад контрольованих параметрів вузла-об'єкта контролю (ОК), їхні номінальні значення і допустимі відхилення;
- вибрати засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) для контролю параметрів виробу;
- оцінити якість системи контролю.

Перше завдання можна вирішити з допомогою регресійних моделей вузлів-об'єктів контролю.

Для вирішення другого і третього завдань застосовують спеціальні методики, розглянуті в посібнику, які є основними при виконанні метрологічної експертизи вузлів МС. Головне завдання експертизи – оцінювання правильності прийнятих рішень з метрологічного забезпечення виробів на етапах розроблення, виробництва, випробувань, експлуатації, ремонту і модернізації.

У додатках наведено графіки залежностей імовірностей хибної і невиявленої відмов від Δ_n / σ_x для різних $f(x)$ і $f(\Delta)$ (дод. 1), характеристики приладів (дод. 2), значення розподілу Пуассона (дод. 3), значення функції

$$\text{Лапласа } F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ (дод. 4), значення функції } y = e^{-x} \text{ (дод. 5).}$$

Розділи 1–3 підготував до друку заслужений винахідник України доцент М. П. Благодарний, розділ 4 – доцент Ю. В. Козлов, розділ 5 – старший викладач С. А. Агаркова.

1. МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ І КОМПЛЕКСИ

1.1. Мехатронні системи

Мехатронна система (рос. – мехатронная система; англ. – mechatronic system) – це система, що складається з декількох агрегатів або агрегата і кількох окремих модулів, тобто з об'єктів однакових або різних нижчих рівнів. Система – сукупність компонентів, яким-небудь чином зв'язаних між собою (тобто підпорядкованих певному відношенню, залежності або закономірності), що діють як одне ціле [2].

Мехатронна система цілком відповідає цьому означенню як сукупність механічних, електронних і керувальних компонентів, що утворюють синергетичну єдність, яка діє як одне ціле. Мехатронна система – цільова упорядкована сукупність агрегатів з упорядкованими зв'язками, що динамічно функціонують в часі й просторі та взаємодіють із середовищем як єдине ціле.

Мехатроніка перебуває в стадії становлення, тому доцільно розглянути означення, які відображають суть предмета мехатроніки. Найпоширенішим графічним символом мехатроніки є три перетинні кола (рис. 1.1).



Рис. 1.1. До визначення суті мехатроніки

Загальне означення мехатроніки в широкому розумінні надано в Російському державному освітньому стандарті: «*Мехатроніка* — це нова галузь науки й техніки, присвячена створенню й експлуатації машин і систем із комп'ютерним керуванням рухом, що базується на знаннях у галузі механіки, електроніки й мікропроцесорної техніки, інформатики й комп'ютерного керування рухом машин і агрегатів» [3]. У цьому означенні

особливо підкреслено триєдину суть *мехатронних систем* (МС), в основу побудови яких закладено ідею глибокого взаємозв'язку механічних, електронних і комп'ютерних елементів. Таким чином, системна інтеграція трьох зазначених елементів є необхідною умовою мехатронної системи.

Розглянемо приклад схеми мехатронної системи в узагальному вигляді. У більшості випадків мехатронна система складатиметься з основної системи, датчиків, електронних блоків керування і виконавчих пристроїв (рис. 1.2).

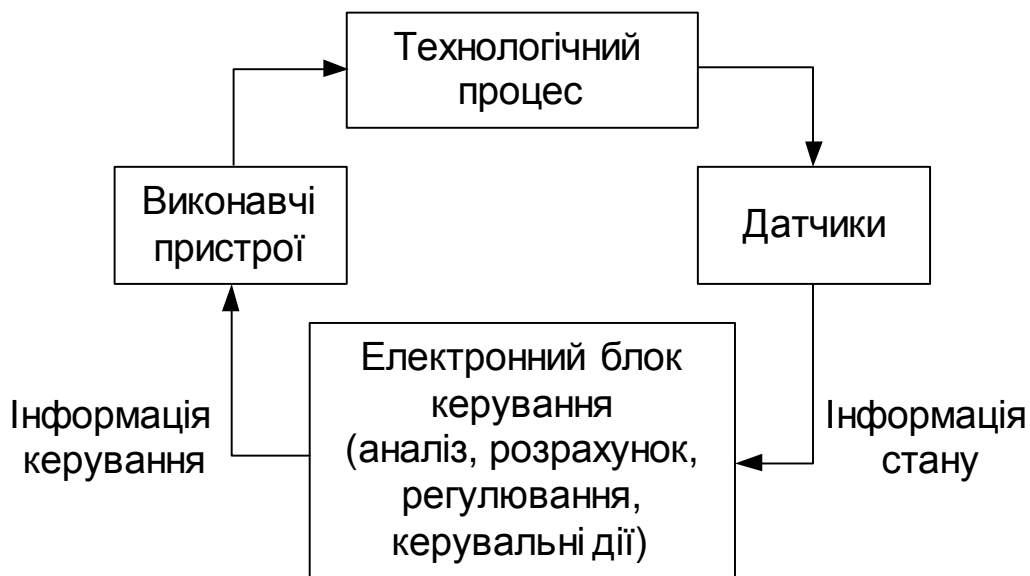


Рис. 1.2. Узагальнений приклад мехатронної системи

Отже, наявність трьох обов'язкових частин — механічної (електромеханічної, пневматичної, гідравлічної тощо), електронної і комп'ютерної, які зв'язані енергетичними й інформаційними потоками, є первинною характерною ознакою мехатронних систем. Електромеханічна частина містить механічні ланки передачі, робочий орган, електродвигуни, сенсори й додаткові електротехнічні елементи (гальма, муфти). Механічний пристрій призначено для перетворення рухів ланок робочого органу машини на необхідний рух цього робочого органу. Електронна частина складається з мікроелектронних пристроїв, силових перетворювачів і вимірювальних засобів. Сенсори (або датчики) призначено для збору даних про фактичний стан зовнішнього середовища й об'єкта керування для наступного первинного оброблення й передання отриманої інформації до пристрою комп'ютерного керування (ПКК). Програмні засоби мехатронних систем мають забезпечувати безпосередній перехід від задуму системи через її математичне моделювання до керування функціональним рухом у реальному часі.

Основними вимірюваними величинами, які використовуються в мехатронних системах, є такі [3–5]:

- електричні (напруга, струм, напруженість, опір, ємність, намагніченість, індуктивність,);
- механічні (переміщення, кут, нахил, рівень, швидкість, прискорення, частота обертання, , сила, тиск, момент та ін.);
- термічні (температура);
- хімічні й фізичні (вологість, теплопровідність, рН-значення [31], вміст пилу, вміст пари, інтенсивність випромінювання, довжина хвилі, кольори, молекули газу, рідини, твердого тіла та ін.).

Застосування мехатронного підходу до створення машин із комп'ютерним керуванням визначає їхні основні переваги порівняно із традиційними засобами автоматизації:

- відносно низьку вартість завдяки високому ступеню інтеграції, уніфікації і стандартизації всіх елементів;
- високу якість реалізації складних і точних рухів унаслідок застосування методів інтелектуального керування;
- високу надійність, довговічність і заводо захищеність;
- конструктивну компактність модулів (аж до мініатюризації в мікромашинах);
- поліпшені масогабаритні й динамічні характеристики машин унаслідок спрощення кінематичних ланцюгів;
- можливість поєднання функціональних модулів у складні системи й комплекси під конкретні завдання замовника.

Таким чином, *мехатронна система* (МС) – це сукупність взаємозв'язаних і взаємодійних пристроїв, приладів та елементів, призначених для досягнення єдиної мети.

До пристроїв, що входять до складу мехатронних систем, належать датчики, виконавчі пристрої, засоби зберігання, приймання, передання, оброблення й подання інформації. Усі ці пристрої, прилади й елементи функційно взаємозв'язані та являють собою єдину цілеспрямовану систему. Прикладами окремих мехатронних систем у складі комп'ютерно-інтегрованих виробництв (КІВ) є модулі оброблення, модулі складання, робототехніки, транспортування продукції тощо [8, 10, 12]. Різноманітні або однотипні МС можна об'єднувати в мехатронні комплекси.

1.2. Мехатронні комплекси

Мехатронний комплекс (МК) – ієрархічно організована сукупність мехатронних систем, обчислювальних та інших інформаційно пов'язаних і взаємодійних систем, що цілеспрямовано функціонують і забезпечують виконання в повному обсязі завдань, пов'язаних з обслуговуванням певних об'єктів і технологічних процесів. Як приклад мехатронного комплексу розглянемо структуру КІВ (рис. 1.3).

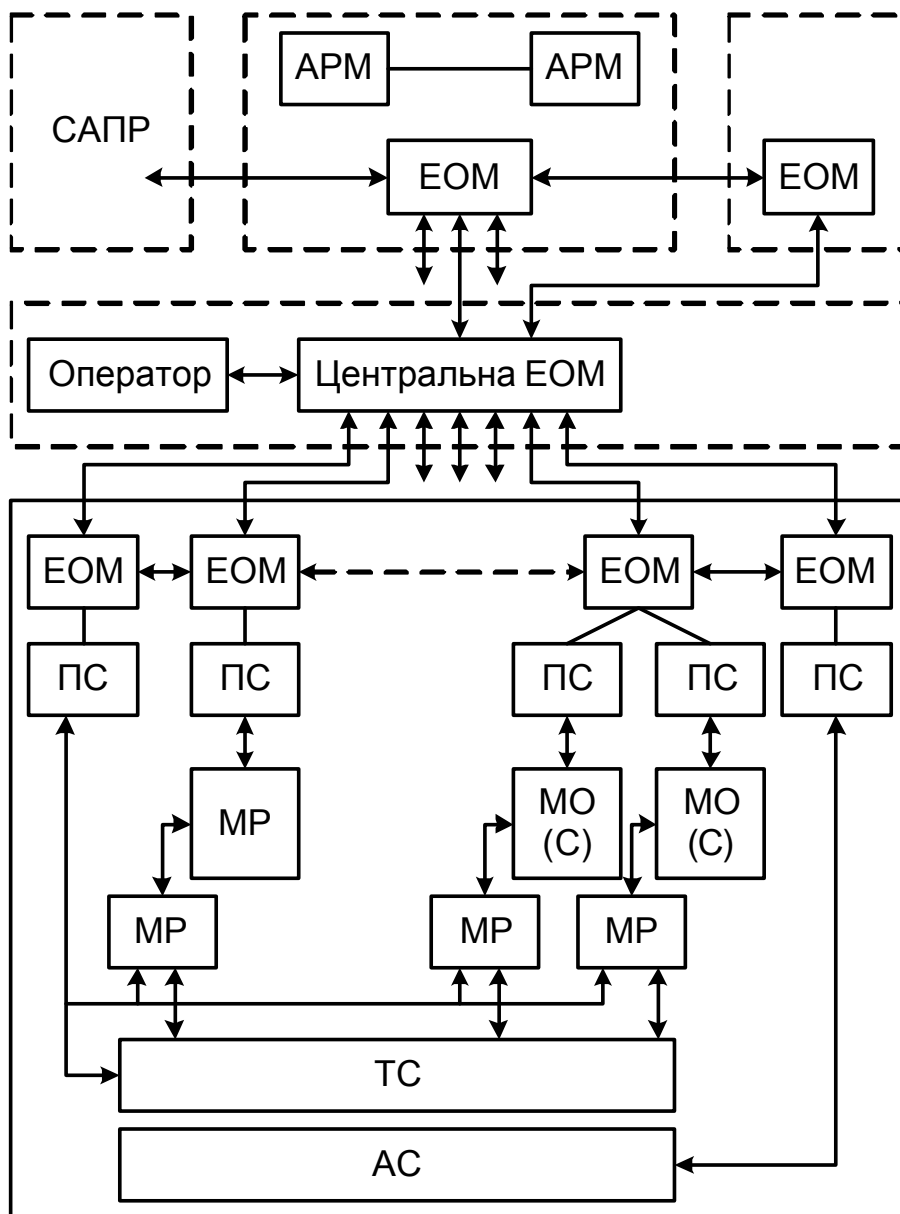


Рис. 1.3. Структура комп'ютерно-інтегрованого виробництва (мехатронного комплексу)

Функції, які виконують комп'ютерно-інтегровані виробництва, поділяються на інформаційні, що реалізуються підсистемою керування, і виробничі. Інформація, що стосується процесів оброблення, складання, технічного стану елементів виробництва й результатів технологічного процесу (виготовленої продукції), надходить до суміжних керувальних ланок, обслугового персоналу, підсистем сервісу, технологічної підготовки виробництва й т. ін.

На основі отриманої інформації приймається рішення стосовно подальшої роботи підсистем КІВ [6, 10, 12]. Як підсистема керування КІВ і робототехнічних систем використовується керувальний обчислювальний комплекс (КОК), який створюється зазвичай на базі комп'ютерів і містить

прилади з'єднання з об'єктом, периферійні прилади, засоби передавання інформації.

Керувальний обчислювальний комплекс має ієрархічну структуру, що містить зазвичай три рівні, кожному з яких відповідає свій комплекс технічних засобів і вирішуваних завдань [10, 12, 28]. Керування роботою КОК, обмін інформацією між рівнями і зв'язок із зовнішніми вищими рівнями забезпечується сукупністю обслуговувальних програм. На першому рівні КОК здійснює керування окремими об'єктами виконувальної системи КІВ.

До складу КОК належить мікро-ЕОМ, що керує модулями оброблення (МО) або складання (МС), модулями робототехніки (МР), транспортною системою (ТС) та автоматизованим складом (АС) через пристрої спрягання (ПС) з об'єктом. На цьому рівні здійснюється зазвичай автоматичне внутрішньомодульне керування технологічними процесами з оптимізацією режимів, яке реалізується на базі мікро-ЕОМ і мікропроцесорних наборів (МПН). На другому рівні виконуються завдання автоматизації організаційно-технологічного керування й синхронізації роботи МО, що реалізується термінальними станціями оброблення інформації центральної ЕОМ. Третій рівень керування являє собою автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП), виробництвом (АСКВ) і систему автоматизованого проектування (САПР). Його призначено для автоматизації оперативного-виробничого керування стосовно задач тижневого й змінно-добового планування, технологічного проектування, обліку й сервісу. Міні-ЕОМ відповідних автоматизованих систем зв'язані з центральною ЕОМ другого рівня [10].

Нормальне функціонування засобів оброблення усіх рівнів КОК забезпечується завдяки обміну інформацією між з'єднаними комп'ютерами. Обмін інформацією між комп'ютерами й об'єктами, якими вони керують, є необхідною закономірністю функціонування КІВ. Комп'ютерно-інтегроване виробництво в загальному випадку містить технологічне устаткування, засоби керування й зв'язку, перевірне устаткування, енергосистеми та інші механічні, електричні, електронні пристрої й засоби, які є взаємозв'язаними й утворюють певну цілісність і єдність. Цей комплекс є автоматизованим.

Контрольні запитання

1. Що називають мехатронікою?
2. Назвіть основні елементи мехатронної системи.
3. Які вимірювальні величини використовуються в мехатронних системах?
4. У чому полягає перевага мехатронного підходу?
5. Якими є основні рівні інтеграції мехатронних систем?
6. Дайте означення закону керування.
7. Назвіть склад узагальненої схеми КІВ.

2. ВУЗЛИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

2.1. Виконавчі пристрої

Виконавчий пристрій (рос. – исполнительное устройство; англ. – execution unit) – складова частина (елемент) мехатронної системи, що здійснює перетворення інформаційного сигналу на механічні, теплові або електричні впливи на мехатронні керовані елементи.

Виконавчі пристрої мехатронних систем являють собою електричні машини, електромагнітні приводи, апарати запалювання, гідравлічні й пневматичні приводи, нагрівальні пристрої тощо [1, 2].

Виконавчі механізми (рис. 2.1) (кінцеві елементи керування) формують зв'язок між електричним сигналом процесора і реальним впливом (органи регулювання) і перетворюють малопотужні сигнали, що передають інформацію до виконачих пристроїв (приводів), на робочі сигнали енергетичного рівня для здійснення процесу контролю й керування.



Рис. 2.1. Структура мехатронної системи

Конвертори сигналу об'єднано з елементами підсилювача, щоб можна було використати фізичні принципи перетворення, які керують взаємозв'язком між різними формами енергії (електричною, механічною, рідинною, тепловою тощо) [1].

Виконавчі механізми класифікують за такими ознаками [4, 5]:

– *тип перетворення енергії* (енергія, що надходить від джерела, перетворюється на енергію магнітного або електричного поля або на тепло; наприклад, автомобільні виконавчі механізми являють собою здебільшого електромагнітні механізми у вигляді електродвигунів, а також поворотні соленоїди (електромагніти), винятком є піротехнічна система надування подушки безпеки [3]; соленоїдні виконавчі механізми можуть бути самостійними серво-елементами або виконувати керувальні функції, спрямовуючи роботу силового пристрою, наприклад гідромеханічного;

– *вид електричного струму* (постійний або змінний);

– *швидкодія* (надшвидкодійні, швидкодійні, уповільнені, нормальні);

– *габарити й маса* (малогабаритні, мініатюрні, надмініатюрні);

– *потужність* (надпотужні, великої або нормальної потужності, мало-потужні).

До виконавчих механізмів мехатронних систем належать пропорційні й дискретні приводи, керовані розподільники й насоси, пропорційні клапани, регулятори та інші пристрої, здатні відповідно до сигналів електронного блока керування дозовано перетворювати один вид енергії на інший [1– 6].

2.1.1. Електричні приводи

В електричному приводі використовується перетворення електричної енергії на механічну [5]. Електричний привід на базі асинхронних двигунів, двигунів постійного струму або крокових двигунів широко застосовується в мехатронних системах вантажністю до 35 кг.

В асинхронних двигунах допускається ступінчасте регулювання частоти обертання шляхом змінення кількості підімкнених пар полюсів або пропорційне регулювання шляхом змінення частоти напруги змінного керівного струму. У двигунах постійного струму частота обертання регулюється амплітудою підведеної напруги постійного струму. У крокових електродвигунах з частотно-імпульсною системою керування частота обертання визначається частотою керівних імпульсів, а кут повороту — їх кількістю.

До переваг електричних приводів належать великі значення ККД, використання одного виду енергії в керувальній і силовій частинах, безшумність в роботі, екологічна чистота.

Основні недоліки цього типу виконавчих пристроїв обумовлені, закладеним у них способом перетворення електричної енергії на механічну. Це перетворення здійснюється з допомогою електромагнітного

поля, що приводить до зменшення жорсткості й збільшення інерційності приводу. Унаслідок цього частота реверсу електроприводів зазвичай не перевищує 70 Гц і для них характерними є низькі динамічні характеристики [15]. Наявність силових електричних обмоток і колекторне підведення енергії роблять привід пожежо- і вибухонебезпечним, що обмежує його застосування у деяких хімічних виробництвах, а також під час виконання фарбувальних робіт, обслуговування окремих видів складських приміщень та інших технологічних процесів.

Чутливість електродвигунів до зовнішніх електромагнітних полів зменшує надійність електроприводів. Електричні приводи характеризуються низькими масогабаритними показниками. Питома потужність приводів з асинхронними електродвигунами становить 100 Вт/кг, а з двигунами постійного струму – 40 Вт/кг.

Перспективні високомоментні електродвигуни дають змогу довести цей показник до 150 Вт/кг [15]. Роздільна здатність електричних приводів становить одиниці кутових хвилин і десяті частки міліметра. Їхньою властивістю є вузький діапазон регулювання швидкості, складність отримання лінійних переміщень і вузький температурний діапазон. Потужність електричних стежних приводів зазвичай не перевищує 2 кВт. Існують розробки електродвигунів з друкованим і гладким роторами, безредукторних неіскрувальних електродвигунів, що дають змогу частково усунути недоліки електроприводу.

2.1.2. Пневматичні приводи

З допомогою пневматичних приводів (ПП), незважаючи на їх широку поширеність в мехатронних системах, можна вирішувати тільки дуже невелику кількість технологічних завдань [4, 5]. Пневматичні приводи застосовують в основному тільки в циклових системах керування, які є вузькоспеціалізованими і їх не часто програмують. У циклових системах точність позиціонування може досягати десятих часток міліметра.

Для забезпечення повільного гальмування приводу при наближенні до заданої позиції або торцевої кришки зазвичай застосовуються пневматичні або замкнуті гідравлічні гальмівні пристрої [5]. Для ПП характерними є дуже висока швидкість переміщення і легкість отримання лінійних і кутових переміщень. Вантажність пневматичних приводів зазвичай не перевищує 20 кг. Висока стисливість повітря як робочого тіла не дає змоги будувати точні пневматичні приводи з вантажністю понад 10 кг.

Для будування малопотужних стежних ПП зазвичай використовують широкоімпульсне керування у поєднанні з швидкодійними двопозиційними електропневматичними клапанами в каналах керування пневмоциліндра. Точність позиціонування в таких приводах при робочому тиску до 0,8 МПа не перевищує декількох міліметрів.

ПП належать до категорії екологічно чистих приводів і за відсутності маслорозпилювача у блоці підготовки повітря широко використовується в екологічно чистих мехатронних системах. *Недоліки пневматичних виконавчих механізмів*: необхідність додаткового підведення стисненого повітря, великі габарити, обмежена точність позиціонування.

2.1.3. Гідравлічні приводи

Гідравлічні виконавчі пристрої (ГВП) використовують у мехатронних системах, вантажність яких перевищує 35 кг [5]. Питома потужність ГВП становить 200 Вт/кг і більше. З їх допомогою забезпечується висока швидкодія, швидкість лінійних переміщень становить 1,5–2 м/с і кутових — 6,3–8 рад/с. Частота реверса становить 200 Гц. Мала стисливість рідини в них забезпечує високу жорсткість.

Значення ККД гідравлічних приводів залежить від застосованого способу дозування рідини, тому може коливатися від 0,9 при машинному або об'ємному і до 0,18 при дросельному способі регулювання швидкості з послідовним увімкненням дроселя. Проте, зважаючи на високу вартість регульованих об'ємних гідромашин, стежні електро-гідравлічні приводи з машинним регулюванням швидкості є економічно виправданими тільки при потужності понад 5 кВт.

Істотною перевагою застосування гідравлічних приводів є легкість отримання лінійних і кутових переміщень. Завдяки компактності, високій питомій потужності й пожежобезпечності електрогідравлічних приводів їх можна розташовувати безпосередньо на кінематичних ланках засобів автоматизації, спрощуючи конструкцію, підвищуючи точність і продуктивність шляхом вимкнення додаткових кінематичних передач. Дискретність позиціонування становить 0,1 мм, або $4 \cdot 10^{-3}$ рад, потужність — 7 кВт. При використанні індустріальних мастил температурний діапазон становить від – 20 до +60 °С, а при застосуванні синтетичних рідин може розширюватися і становити від –60 до +200 °С.

Головними недоліками ГВП є наявність принаймні двох видів енергії, що обумовлює необхідність установа в об'єкті автоматизації громіздкої насосної станції; можливість витікання рідини в робочу зону; необхідність попереднього прогрівання рідини, що зменшує продуктивність устаткування; великий рівень шуму функціонування приводу.

При дросельному способі дозування також доводиться застосовувати спеціальні заходи для охолодження робочої рідини під час експлуатації. ГВП характеризуються складністю конструкцій і низькою технологічністю.

2.1.4. П'єзоелектричні приводи

Останнім часом в мехатронних системах широко застосовуються виконавчі пристрої, побудовані на базі п'єзоелектричних перетворювачів

(ПЕП) [4, 5]. У цьому класі виконавчих пристроїв як електромеханічний перетворювач використовується п'єзоелектрична кераміка, яка здатна деформуватися при змінненні підведеного електричного потенціалу (режим зворотного п'єзоєфекту), а також генерувати на своїх поверхнях електричний потенціал при деформації зовнішньою силою (режим прямого п'єзоєфекту) [31].

На відміну від традиційних електромагнітних перетворювачів, основою роботи яких є зміннення електромагнітного поля, у ПЕП використовується електричне поле, що значно підвищує надійність і завадозахищеність виконавчих пристроїв в умовах зовнішніх збурювальних електромагнітних полів.

Сучасний склад п'єзоелектричної кераміки відрізняється високим значенням ККД, високою механічною міцністю, здатністю працювати в діапазоні температур $-273...+350$ °С, а перетворювачі на основі кобальту — до $+700$ °С, інертністю до агресивних середовищ, нечутливістю до електромагнітних і радіаційних полів.

У виконавчих пристроях на базі п'єзоелектричної кераміки масогабаритні показники порівняно з традиційним електроприводом зменшено в 1,5–100,0 разів, досягнуто високих динамічних і навантажувальних характеристик.

2.1.5. Електромагнітні приводи

Принцип роботи електромагнітних приводів базується на взаємному притяганні м'яких феромагнетиків у магнітному полі [4]. Приводи оснащують тільки однією котушкою, яка створює поле й споживає енергію, що йде на перетворення. Для підвищення індуктивності котушку оснащено залізним осердям.

Оскільки пристрій працює тільки в одному напрямку, потрібен зворотний елемент (пружина або магніт). Прикладами електромагнітних виконавчих механізмів є форсунки з електромагнітним керуванням для подання палива.

Основними перевагами електромагнітних приводів є проста, компактна й дешева конструкція, висока їх динаміка. Недоліками є нелінійна характеристика, мала навантажувальна здатність, тертя й магнітний гістерезис, відносно малі сили, а також великий струм у стані спокою.

Принцип роботи електродинамічних приводів базується на силі, яка діє на рухомий заряд або провідник зі струмом у магнітному полі (сила Лоренца). Котушка або постійний магніт генерують постійне магнітне поле. Електрична енергія, призначена для одержання сили, прикладається до рухомої обмотки ротора (плунжера або імерсійної котушки).

Висока точність виконавчого механізму досягається особливістю конструкції обмотки ротора, що має малі масу й індуктивність. Два

аккумуляційні елементи (один на закріпленому, інший на рухомому компоненті) виробляють сили, що діють у двох напрямках шляхом реверсування струму в обмотках якоря [4].

Сьогодні збільшується різноманітність виконавчих пристроїв [1–6], розробляються й застосовуються нові їх види [4]: такі, що базуються на магнітострикційному ефекті і мають реологічні, термобіметалічні, електрохімічні властивості; із використанням сплавів з пам'яттю тощо.

2.2. Засоби контролю технологічних процесів

Для контролю технологічних процесів у сучасних мехатронних системах необхідно оперативно визначати багато параметрів, а саме *температуру, тиск, хімічний склад, вологість, радіоактивність, лінійні й кутові розміри, швидкість (прискорення)* тощо. Для визначення параметрів технологічних процесів використовують датчики [1– 6, 28, 32].

Датчик – це пристрій, що приймає зовнішні дії та реагує на них зміненням електричних сигналів. Під зовнішньою дією розуміють кількісну характеристику об'єкта контролю й керування, його властивість або якість, які необхідно прийняти й перетворити на електричний сигнал.

Призначення датчиків – реакція на певну зовнішню фізичну дію та перетворення її на електричний сигнал, сумісний із сигналами у схемах систем контролю й керування. Таким чином, датчик – це перетворювач фізичної величини (часто неелектричної) на електричний сигнал.

Вихідними сигналами датчиків є напруга, струм, заряд, які описуються амплітудою, частотою, фазою або цифровим кодом. Цей набір характеристик називають форматом вихідного сигналу. Кожен датчик характеризується набором вхідних (будь-якої фізичної природи) і вихідних електричних параметрів.

Будь-який датчик є перетворювачем енергії. Незалежно від типу вимірюваної величини завжди передається енергія від досліджуваного об'єкта до датчика. Робота датчика – це особливий випадок передання інформації, а будь-яке передання інформації пов'язане з перетворенням енергії.

Поняття «датчик» необхідно відрізнити від поняття «перетворювач». Перетворювач конвертує один тип енергії на інший, тоді як датчик перетворює будь-який тип енергії зовнішньої дії на електричний сигнал. Перетворювачі можуть виконувати також функції приводів, бути частиною складених датчиків (рис. 2.2).

До структури складених датчиків зазвичай входить щонайменше один датчик прямої дії і декілька перетворювачів.

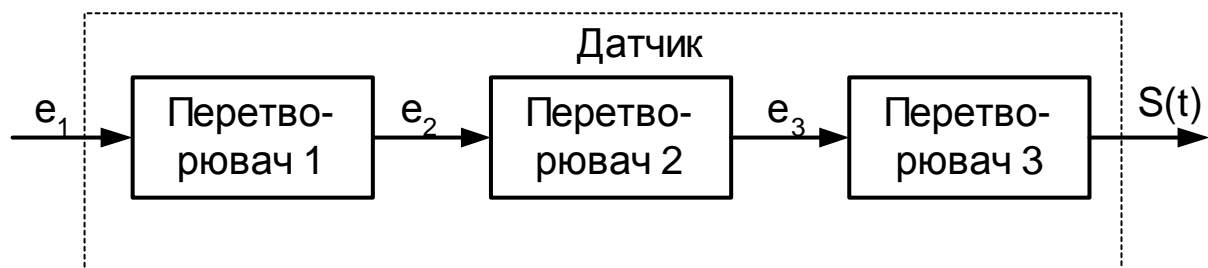


Рис. 2.2. Узагальнена структура датчика

Датчиками прямої дії називають датчики, які побудовано на фізичних явищах, що дають змогу проводити безпосереднє перетворення енергії зовнішньої дії на електричні сигнали. Прикладами таких фізичних явищ є фотоелектричний ефект, ефекти Холла і Зеебека [6].

У табл. 2.1 показано узагальнену класифікацію датчиків [28, 32]. За наявності додаткового джерела енергії всі датчики можна поділити на *пасивні й активні, датчики прямої дії і складені датчики*. Прикладами активних датчиків є термістори і резистивні тензодатчики [3].

Датчики прямої дії перетворюють зовнішню дію безпосередньо на електричний сигнал, використовуючи для цього відповідне фізичне явище, тоді як складені датчики, перш ніж отримати електричний сигнал на виході кінцевого датчика прямої дії, здійснюють декілька перетворень енергії.

Датчики не працюють самі по собі, а тільки у складі систем контролю й керування. У цих системах датчики можуть бути як зовнішніми, так і вбудованими. Їх розташовують на входах вимірювальних приладів для реагування на зовнішні дії та інформування системи щодо змін у навколишньому середовищі.

Пасивний датчик не потребує додаткового джерела енергії. Як реакція на змінення зовнішньої дії на його виході завжди виникає електричний сигнал. Це означає, що такий датчик перетворює енергію зовнішнього сигналу на вихідний сигнал.

Прикладами пасивних датчиків є термопари, фотодіоди й п'єзоелектричні чутливі елементи.

Для роботи активних датчиків потребується зовнішня енергія, що має назву сигналу збудження. При формуванні вихідного сигналу активний датчик так чи інакше впливає на сигнал збудження.

Оскільки такі датчики змінюють свої характеристики, їх іноді називають параметричними. Певні параметри активних датчиків модулюють сигнали збудження, і модульовані сигнали містять інформацію про значення вимірюваної величини.

Активні датчики розміщують усередині складних систем (систем контролю й керування) з метою моніторингу умов їх функціонування. Датчики є невід'ємною частиною систем контролю технологічних процесів. На рис. 2.3 показано блок-схему системи контролю й керування, що

складається із системи збору даних і керувального пристрою (комп'ютера).

Таблиця 2.1

Ознака класифікації	Характеристики датчиків		
Наявність джерела енергії	Активні	Пасивні	
Вибір точки відліку	Абсолютні	Відносні	
Характеристики	Чутливість, швидкодія, вартість, лінійність, переважувальна здатність	Стабільність, наявність гістерезису, габарити, вибірковість, розрізнявальна здатність	Точність, ресурс, вага, наявність мертвої зони, формат вихідного сигналу
Матеріал датчика	Тверде тіло (провідник, напівпровідник, діелектрик)	Рідини, газу, плазма	Біологічні тканини
Засоби детектування	<i>Фізичні</i> (електричні, магнітні й електромагнітні хвилі, тепло й температура, механічні хвилі й переміщення, радіоактивне випромінювання)	<i>Хімічні</i>	<i>Біологічні</i>
Механізми перетворень	<i>Фізичні</i> (термо- і фотоелектрика, електромагнетизм, термо-, фото- й електропружність, термооптика)	<i>Хімічні</i> (хімічні перетворення, фізичні перетворення, електрохімічні процеси, електроскопія)	<i>Біологічні</i> (біохімічні перетворення, фізичні перетворення, спектроскопія)
Зовнішні дії	<i>Акустичні</i> (амплітуда, фаза, поляризація хвилі, спектр і швидкість)	<i>Електричні</i> (заряд, струм, потенціал, напруга, електричне поле, провідність, діелектрична проникність)	<i>Магнітні</i> (магнітне поле, магнітна проникність, магнітний потік)
	<i>Механічні</i> (розташування, сила, прискорення, тиск, деформація, маса, щільність, рух, момент, швидкість потоку, втрата маси, форма, жорсткість, податливість, орієнтація)	<i>Оптичні</i> (амплітуда, фаза, поляризація хвилі, спектр і швидкість, коефіцієнт відбиття, відбивальна здатність, поглинання)	<i>Теплові</i> (температура, потік, тепло, теплопровідність)
	<i>Хімічні</i> (ідентичність, концентрація, стан)	<i>Біологічні</i> (біомаса, вид, концентрація, стан)	<i>Випромінювання</i> (тип, енергія, інтенсивність, потужність)

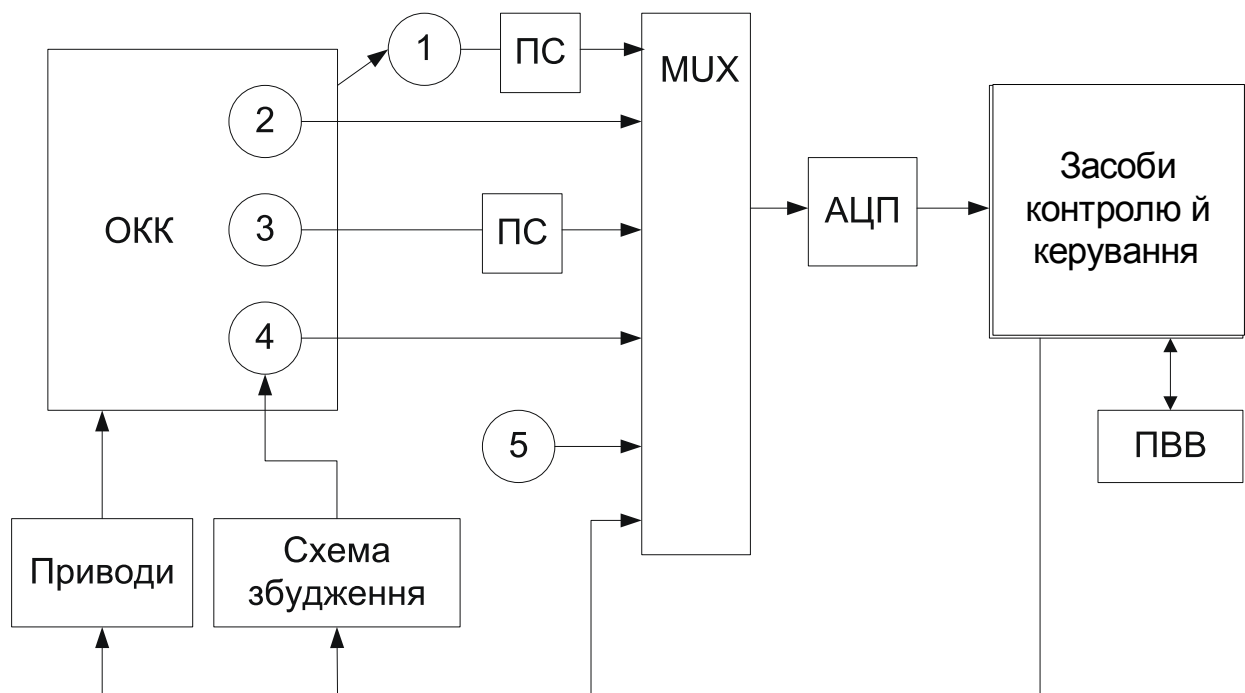


Рис. 2.3. Приклад мехатронної системи

Суб'єктами контролю можуть бути як матеріальні об'єкти, так і технологічні процеси. Інформацію щодо стану контрольованого об'єкта (технологічного процесу) збирають датчики, частину з яких (2, 3 і 4) розташовано на поверхні або усередині об'єкта контролю й керування. Датчик 1 не має безпосереднього зв'язку з об'єктом, тобто є безконтактним. Датчик 5 може виконувати різні функції, наприклад, контролювати умови всередині самої системи. Датчики 1 і 3 не можна безпосередньо приєднати до стандартних електронних схем через невідповідність форматів вихідних сигналів. Для їх підмикання необхідні спеціальні інтерфейсні пристрої (пристрої спряження) — перетворювачі сигналів. Датчики 1, 2, 3 і 5 є пасивними, оскільки для формування вихідних сигналів їм не потрібно додаткової електричної енергії. Датчик 4 є активним, для його функціонування потрібен допоміжний сигнал, який формується схемою збудження. При цьому датчик 4 модулює його значення відповідно до зміннення контрольованого параметра.

Прикладом активного датчика є температурно-чутливий резистор (термістор), який працює від джерела постійного струму, що в цьому випадку є схемою збудження. З виходів датчиків сигнали надходять на мультиплексор. Якщо вихідні сигнали датчиків є аналоговими (неперервними), то вони надходять на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), якщо цифровими — то безпосередньо на комп'ютер.

Комп'ютер (пристрій керування) здійснює керування роботою мультиплексора й АЦП і надсилає керувальні сигнали до приводів.

Приводи безпосередньо впливають на стан об'єктів контролю й керування та підтримують бажану траєкторію їх руху. Як приводи може бути використано електричні двигуни, реле, гідравлічні й пневматичні циліндри тощо. До складу системи контролю можуть входити також периферійні пристрої (накопичувачі інформації контролю, монітори, сигналізатори тощо) та інші компоненти, які не показано на рис. 2.3.

Залежно від вибору точки відліку зовнішнього сигналу датчики можна поділити на *абсолютні й відносні*. Абсолютний датчик визначає зовнішній сигнал в абсолютних фізичних одиницях, тоді як вихідний сигнал відносного датчика в кожному конкретному випадку трактується по-різному. Прикладом абсолютного датчика є термістор. Його електричний опір безпосередньо залежить від абсолютної температури й змінюється за шкалою Кельвіна. Навпаки, термопара є відносним датчиком, оскільки напруга на його виході є функцією ґрадієнта температури на спаю термопари. Іншими прикладами абсолютних і відносних датчиків є датчики тиску.

Показання абсолютного датчика відповідають ненульовим значенням тиску. Для того щоб віднести датчик до тієї або іншої групи, необхідно знати, які величини з його допомогою можна вимірювати, якими є його характеристики, на якому фізичному принципі реалізовано, який механізм перетворень застосовано, з якого матеріалу виготовлено, якою є сфера його застосування. Аналізуючи ці відомості, можна помітити, що датчики різняться видами енергії додаткового джерела, фізичними принципами дії, характером змінення вихідних сигналів (неперервним, імпульсним, релейно-імпульсним тощо).

Важливою властивістю датчика є його здатність розрізняти змінення знака або фази вхідного сигналу. За цією властивістю датчики поділяють на *реверсивні (двотактні)*, знак (фаза) вихідного сигналу яких змінюється у разі змінення знака вхідного сигналу, і *нереверсивні (однотактні)*, знак (фаза) вихідного сигналу яких не залежить від полярності вхідного сигналу.

Наведена узагальнена класифікація датчиків за багатьма з розглянутих ознак не є вичерпною і при вивченні окремих функціональних елементів може уточнюватися. Будь-яка система контролю й керування об'єктів (технологічних процесів) містить (як функціонально необхідні елементи) один або декілька датчиків (рис. 2.4), які призначено для одержання первинної інформації про стан об'єкта контролю й керування.

Вимірювальний перетворювач (рис. 2.4, а) являє собою пристрій, що вимірює дійсне значення керованої або контрольованої координати й перетворює це значення на сигнал, найбільш прийнятний для подальшого його передання через канал керування.

Слід зазначити, що елемент первинної інформації залежно від застосування може виконувати функції вимірювання й перетворення

контрольованого параметра одночасно, а може здійснювати тільки перетворення.

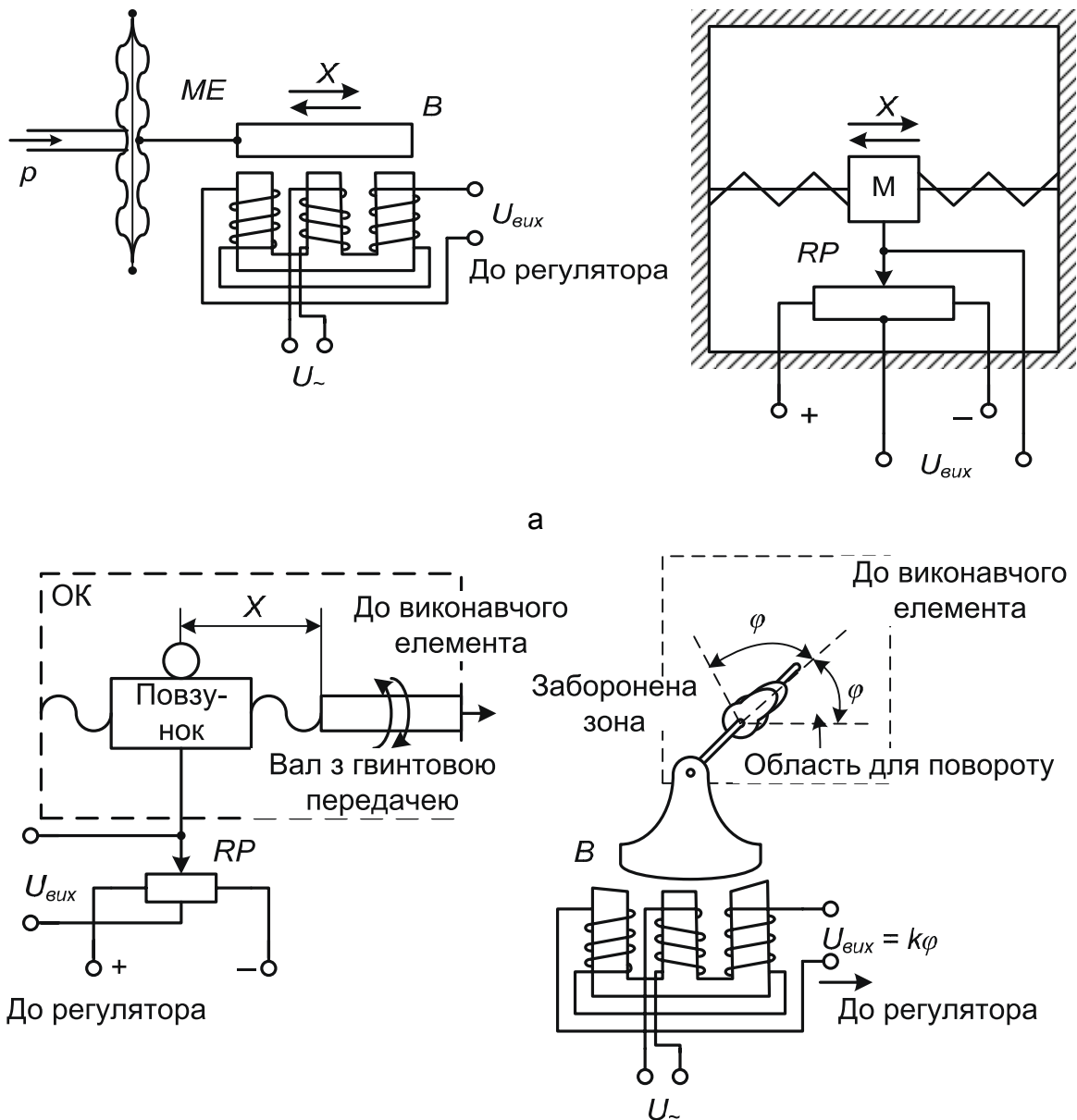


Рис. 2.4. Схеми вмикання потенціометричного й індуктивного датчиків: а – виконання функцій вимірювання й перетворення; б – виконання функції перетворення сигналу; ОК – об'єкт керування, ПЕ – потенціометричний елемент; ІЕ – індуктивний елемент; МЕ – мембранний елемент; М – рухома маса акселерометра

Так, наприклад, елементи потенціометричного й індуктивного типів, що використовуються для одержання інформації про об'єкт, керованою координатою якого є лінійне або кутове переміщення (рис. 2.4, а), потрібно розглядати як датчики, тому що ці елементи виконують функції вимірювання й перетворення керованого параметра одночасно. Однак ці самі елементи автоматики, які використовуються, наприклад, для одержання інформації про інші фізичні параметри керування (тиск,

швидкість або прискорення рухомого об'єкта), будуть виконувати тільки функції перетворювача (рис. 2.4, б), оскільки як датчики застосовуються інші чутливі до змінення цих параметрів елементи (мембранні й сильфонні приймачі тиску, акселерометри тощо).

Датчики сигналів можна поділити на два класи: *параметричні й генераторні*. Основою побудови датчиків параметричного типу є властивість змінення деякого параметра чотириполюсника при змінненні його вхідної величини, унаслідок чого змінюється вихідна величина чотириполюсника. Генераторні датчики перетворюють механічну енергію безпосередньо на енергію електричного сигналу керування.

За видом вимірюваної (перетворюваної) величини розрізняють датчики положення, швидкості, прискорення, тиску, температури й інших фізичних величин, що є технологічними параметрами, керування якими необхідно здійснювати при автоматизації виробничо-технологічних процесів або об'єктів.

За принципом дії розрізняють датчики опору: потенціометричні, тензометричні, фоторезисторні й терморезисторні; датчики індуктивності й взаємоіндуктивності: індуктивні, індукційні, сельсини, мікросини, обертальні трансформатори; магнітоіндукційні, тахогенератори постійного й змінного струму та ін.

До характеристик датчиків ставлять такі вимоги [1—6, 28, 30]: висока динамічна точність (формування сигналу має здійснюватися з мінімальним спотворенням; ця вимога означає, що датчик повинен мати таку передатну функцію, яка в межах смуги пропускання об'єкта контролю й керування зводилася б до постійної величини); висока статична точність роботи; висока надійність роботи в умовах, передбачених виробничо-технологічною і технічною нормувальною документацією; допустимі габарити й маса; високий коефіцієнт перетворення, що забезпечує реагування датчика на відносно невеликі неузгодженості між необхідним і дійсним значеннями керованої величини; достатня потужність вихідного сигналу.

Для контролю технологічних процесів у мехатронних системах важливими є такі характеристики датчиків [4, 5, 28]: чутливість, коротко- й довготермінова стабільність, точність, швидкодія, гістерезис, ресурс, вартість, вага, розміри, діапазон вихідних значень, розрізнявальна здатність, вибірковість, лінійність, наявність мертвої зони та її характеристики, формат вихідного сигналу, характеристики у випадках перевантажень.

Відповідно до наведених вимог при вивченні й застосуванні датчиків різних типів необхідно приділяти суттєву увагу таким властивостям: статична характеристика датчика та її вид; значення чутливості або коефіцієнта перетворення; розрізнявальна здатність; потужність шумів, що генеруються датчиком; потужність вихідного сигналу; потужність вхідного сигналу; динамічні характеристики.

У мехатронних системах є багато датчиків із вбудованими мікропроцесорами. Такі датчики прийнято називати *інтелектуальними* [28]. Узагальнену схему інтелектуального датчика показано на рис. 2.5.

Зовнішній

вплив

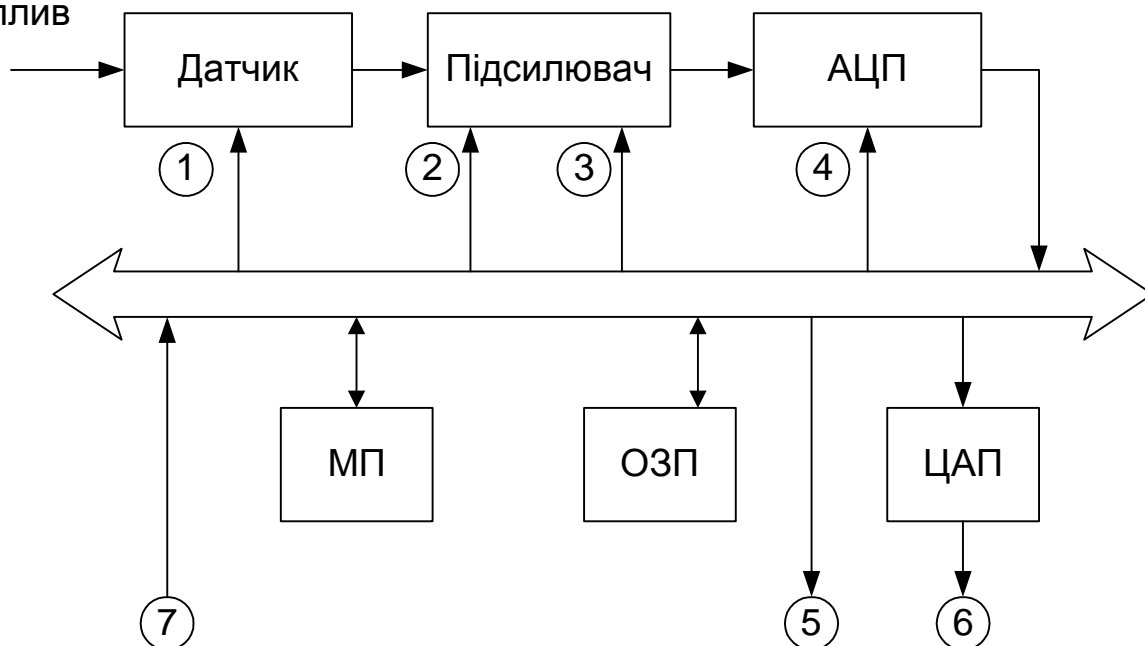


Рис. 2.5. Узагальнена структурна схема інтелектуального датчика

Датчиком керує мікропроцесор. Це дає змогу змінювати рівні збудження так, що перемикання датчика між діапазонами вхідних сигналів буде відбуватися автоматично. Крім того, можуть відслідковуватися температура навколишнього середовища, відносна вологість, тиск та інші параметри, а також коригування показань датчика з використанням аналогового підсилювача або даних, які зберігаються в мікропроцесорі.

Дуже цінною є можливість мікропроцесорного оброблення – отримання лінійного сигналу від нелінійного датчика з використанням таблиць відповідності, які зберігаються в запам'ятовувальному пристрої мікропроцесора. Це дає змогу створювати датчики з дуже низьким значенням коефіцієнта нелінійності.

Виходи датчика можуть бути як аналоговими, так і цифровими. Вхід зовнішнього керування дає змогу включати прилад до складу системи контролю й керування складним об'єктом (технологічним процесом).

З допомогою таких датчиків можна відслідковувати аварійні режими роботи (сигнали тривоги про перевищення заданого значення сигналу, які можна оперативно порівнювати з допусками, що зберігаються в мікропроцесорі).

Окрім того, вбудований запам'ятовувальний пристрій можна використовувати для протоколювання вимірюваних даних з подальшим переданням протоколу на верхні рівні ієрархії системи контролю й керування.

2.3. Засоби оброблення даних у мехатронних системах

2.3.1. Вимоги до способів оброблення даних

Інформація в мехатронних системах обробляється в електронному блоці керування (ЕБК) або у вузлі, що складається із певної кількості таких блоків [4, 5]. Здебільшого блоки керування працюють як комп'ютери: приймають електричні сигнали від датчиків, оброблюють інформацію в реальному часі й генерують керувальні сигнали (рис. 2.6), які надходять на виконавчі пристрої.

Сигнали можуть бути аналоговими, цифровими або імпульсними. Аналогові вхідні сигнали (λ -зонда, датчиків тиску, потенціометрів, датчиків температури та ін.) можуть мати будь-яку величину напруги в межах певного діапазону (зазвичай 1...5 мВ) і перетворюються в електронному блоці керування на цифрові для подальшого оброблення процесором мікроконтролера.

Цифрові вхідні сигнали (наприклад, від датчиків Холла, датчиків положення, магніторезисторних датчиків тощо) мають тільки два стани — логічної одиниці й логічного нуля. Ці сигнали можуть оброблятися безпосередньо в мікроконтролері.

Діапазон напруги — від логічного нуля до логічної одиниці. Імпульсні вхідні сигнали (інформація, що генерується періодично, наприклад сигнали обмеження частоти обертання) обробляються з допомогою спеціальної схеми в електронному блоці керування. Діапазон електричних напруг знаходиться в межах від 0,5 до 100,0 В.

Вхідні сигнали шляхом фільтрації значною мірою очищуються від завад і, якщо необхідно, шляхом підсилення адаптуються до припустимого рівня електричної напруги на вході мікроконтролера (до 5 В). Вхідними сигналами можуть бути не тільки сигнали від датчиків, але й сигнали від інших систем (за наявності декількох *електронних блоків керування*). В електронних блоках керування сигнали зазвичай обробляються в цифровому вигляді.

Під *сигналом* (рос. – сигнал; англ. – signal) у загальному випадку розуміють фізичний процес перенесення інформації в часі й просторі [2]. Обробленням сигналу називають його перетворення з метою подання інформації у найбільш зручній формі. Оброблювати сигнали (signal processing) можна з допомогою різних технічних засобів: аналогових, цифрових і гібридних (комбінація аналогових і цифрових). Історично спочатку сигнали обробляли з допомогою аналогових засобів.

Приблизно з кінця 80-х років їх стали обробляти тільки цифровими методами. Цифрові системи є малочутливими до параметрів навколишнього середовища, їх можна адаптувати й легко перепрограмувати. Цифрові сигнали можна зберігати в незмінному вигляді необмежений

час. Цифрові алгоритми легко перевести з обладнання одного виробника на обладнання іншого і т. ін.

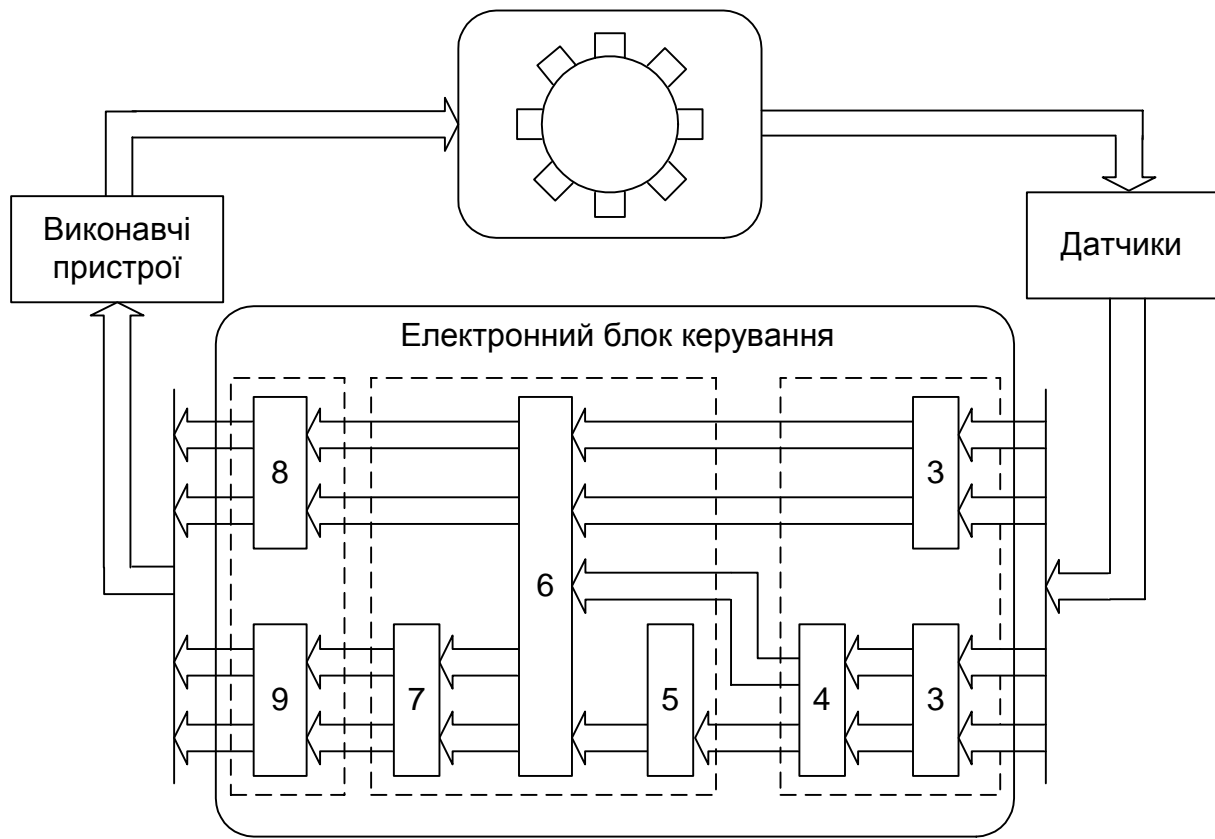


Рис. 2.6. Обмін інформацією між вузлами електронного блока керування мехатронної системи обробного модуля [4]: 1 — входи цифрових сигналів стану; 2 — входи аналогових сигналів стану; 3 — засоби захисту вхідних лагцюгів; 4 — підсилювачі, 5 — аналого-цифрові перетворювачі; 6 — засоби цифрового оброблення сигналів; 7 — цифро-аналогові перетворювачі; 8 — силові виходи; 9 — підсилювачі потужності

Цифрове оброблення сигналів (рос. – цифровая обработка сигналов; англ. – Digital Signal Processing) застосується для вирішення різноманітних завдань, наприклад фільтрації сигналів від завад, передання даних, оброблення й розпізнавання зображень, стиснення й редагування відеосигналів тощо [3].

Цифрові процесори оброблення сигналів (ЦПОС) (рос. – цифровые процессоры обработки сигналов; англ. – Digital Signal Processor – DSP) є програмовними мікропроцесорами [2], які призначено для реалізації алгоритмів цифрового оброблення сигналів. Їх розрізняють між собою за типом використовуваної арифметики, розрядністю і швидкодією.

За типом арифметики всі ЦПОС поділяються на дві групи: з фіксованою і рухомою точками. Відмінними характеристиками ЦПОС є операції, що підтримуються на апаратному рівні: високошвидкісне виконання операції множення з накопиченням MAC (MAC – Multiply Accumulate ($R \leftarrow R + ax$), де R – вміст регістра-акумулятора, a – множник, x

— множене); багатократний доступ до пам'яті (дає змогу процесору звертатися до пам'яті декілька разів за час виконання однієї команди); спеціальні режими адресації; керування циклами; наявність на кристалі додаткових пристроїв уведення-виведення цифрових і аналогових сигналів. Ці особливості архітектури обумовлені специфікою багатьох стандартних алгоритмів цифрового оброблення сигналів, для реалізації яких і розроблюють ЦПОС.

Мікропроцесор (рос. – микропроцессор; англ. – microprocessor) – програмно-керований пристрій, призначений для оброблення цифрової інформації і керування процесом цього оброблення, який виконано у вигляді однієї (або декількох) інтегральної схеми з високим ступенем інтеграції електронних елементів [4].

Мікроконтролер (рос. – микроконтроллер; англ. – microcontroller) – функціонально закінчений мікропроцесорний керувальний пристрій, призначений для безпосереднього вбудовування в об'єкт керування, який має на одному кристалі крім власно мікропроцесора модулі пам'яті програм і даних, а також необхідні інтерфейсні схеми.

Мікроконтролери виконують функції логічного аналізу й керування (тому завдяки виключенню, наприклад, арифметичних операцій можна зменшити їхню апаратну складність або розширити функції логічного керування) [4]. Передусім мікроконтролери є ланцюгом перетворення інформації, що надходить від датчиків, які вмонтовано у складові частини мехатронного об'єкта, до виконавчих пристроїв.

Програмне забезпечення містить необхідні алгоритми. У ньому може встановлюватися майже необмежена кількість логічних операцій для зберігання й оброблення даних у вигляді параметрів, характеристик і багатовимірних програмних карт.

До електронного блока керування ставляться жорсткі вимоги, оскільки ЕБК зазнає великих навантажень через сильні перепади температури, вплив агресивних експлуатаційних матеріалів, вологість і різні механічні (у тому числі вібраційні) навантаження. ЕБК має стабільно працювати як при низькій напрузі бортової мережі, так і при високій зарядній напрузі (коливання напруги в бортовій мережі). Дуже високі вимоги ставлять до чутливості на дію електромагнітних завад і обмеження на рівень випромінювання високочастотних сигналів завад.

2.3.2. Узагальнена структурна схема електронного блока керування

Електронні блоки керування мехатронних систем містять зазвичай як процесор (CPU) для виконання арифметичних і логічних операцій, так і спеціалізовані модулі для оброблення зовнішніх сигналів (сигналів стану) і формування керувальних сигналів (сигналів керування). Ці

периферійні модулі забезпечують повне керування операціями в реальному часі.

Програмно-керований центральний процесор міг би керувати цими операціями тільки шляхом ускладнення й обмеження кількості функцій. На рис. 2.7 показано узагальнену схему ЕБК на базі типового мікрокомп'ютера [4].

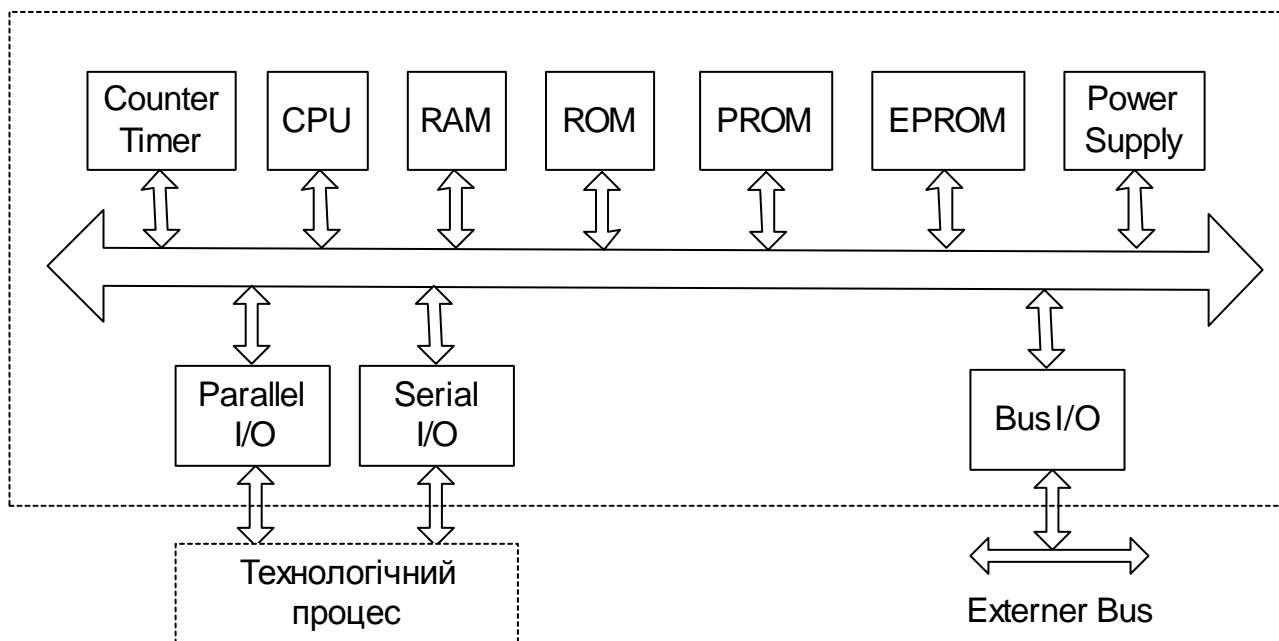


Рис. 2.7. Структурна схема блока цифрового оброблення сигналів (мікрокомп'ютера): Counter Timer – лічильник; CPU – процесор; RAM – пристрій оперативної пам'яті; ROM – пристрій постійної пам'яті; PROM – програмований пристрій оперативно-постійної пам'яті; EPROM – електрично-програмований пристрій постійної пам'яті; Power Supply – блок живлення; Parallel I/O – канал паралельного введення-виведення; Serial I/O – канал послідовного введення-виведення; Bus I/O – шина введення-виведення; Externer Bus – зовнішня шина

Електронний блок керування складається з елементів, які змонтовано на платі як інтегральні цифрові схеми:

- CPU (central processor unit) — мікропроцесор для логічного і математичного оброблення даних (відповідно до програмного забезпечення);

- Counter Timer — лічильник;

- RAM (random access memory) – ОЗП (оперативний запам'ятовувальний пристрій), складається з елементів пам'яті з доступом для читання й запису інформації;

- ROM (read only memory) – ПЗП (постійний запам'ятовувальний пристрій), складається з елементів пам'яті з доступом для читання інформації (вміст цього програмованого запам'ятовувального пристрою визначається під час виготовлення і не може змінюватися);

- PROM (programable ROM) — програмована пам'ять;

- EPROM (erasable PROM) — програмована пам'ять із можливістю стирання шляхом опромінення ультрафіолетовими променями й записуванням даних програмувальним пристроєм;
- EEPROM (electr. erasable PROM) — програмована пам'ять із груповим електричним стиранням;
- Parallele I/O — паралельні входи-виходи;
- Serialle I/O — послідовні входи-виходи;
- Bis I/O — входи-виходи комутації із зовнішніми портами через шину.

Основні елементи ЕБК зображено на рис. 2.8 [4]. Керувальний модуль дешифрує інформацію про коди команд і керує виконанням завдань. Обчислювальний модуль виконує логічні й арифметичні операції над даними.

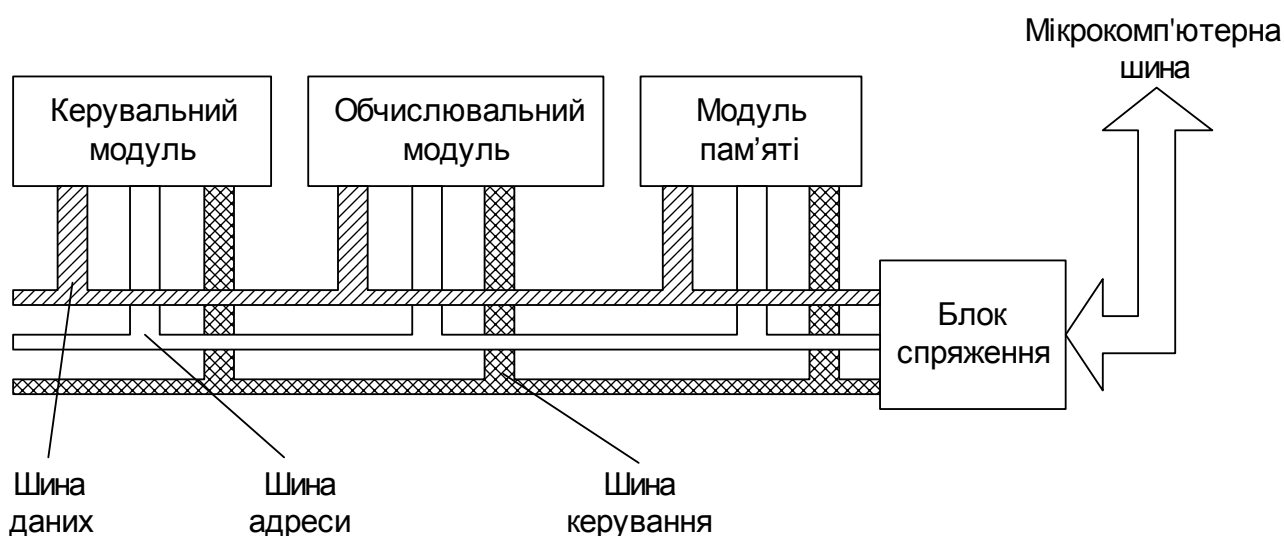


Рис. 2.8. Основні компоненти електронного блока керування

Модуль пам'яті зберігає команди, константи, вхідну, проміжну й вихідну інформацію і працює як швидка проміжна пам'ять під час виконання команд. Блок спряження (інтерфейс шин) — елемент з'єднання шини мікрокомп'ютера, RAM, ROM, I/O.

Сигнали в мікрокомп'ютері передаються через системну шину, яка складається із шини передня даних між компонентами (Datenbus), шини адреси, що активує певні компоненти через адреси (Adressbus), і ліній координації і впорядкування проходження сигналу (передає сигнали керування роботою системи (Steuerbus)) [4].

Продуктивність CPU залежить від значення тактової частоти, середньої кількості тактів, необхідних для виконання однієї команди, довжини слова, кількості кодів команд тощо.

З допомогою вихідних сигналів вмикаються вихідні каскади. Силові виходи й вихідні підсилювачі дають змогу збільшити потужність вихідних

сигналів мікропроцесора до напруг в десятки або сотні вольт, струму в декілька ампер.

Вихідні сигнали також можуть бути аналоговими (для цього потрібні цифро-аналогові перетворювачі) і цифровими.

2.4. Канали обміну інформацією в мехатронних системах

2.4.1. Загальні відомості

Використання інформації в мехатронних системах пов'язане з її переданням від датчиків до ЕБК і від ЕБК до виконавчих пристроїв (приводів) (див. рис. 2.6). Канали передання інформації класифікують за призначенням, властивостями (типами) лінії зв'язку, діапазоном частот, властивостями сигналів на вході і виході тощо.

Визначальним елементом каналу передання є лінія зв'язку – фізичне середовище, у якому передаються сигнали. Лінія зв'язку визначає апаратну реалізацію передавальної і приймальної сторін каналу.

Лініями зв'язку для механічних сигналів є механічні, гідравлічні й пневматичні з'єднання. Для акустичних каналів лініями зв'язку є суцільне середовище (тверде, рідке, газоподібне), для електричних каналів – електричні проводи, для оптичних – оптичне прозоре середовище, для радіоканалів – ефір.

У мехатронних системах застосовують механічні, акустичні, оптичні, електричні й радіоканали, які різняться за лініями зв'язку і фізичною природою сигналів (табл. 2.2). Основною, але не єдиною ознакою каналів є діапазон їхніх робочих частот (смуга пропускання) сигналів.

2.4.2. Механічні канали

Механічні канали застосовують для передання на невеликі відстані (до 500 м) сигналів у вигляді механічних зусиль або тисків. Жорсткі механічні канали передають зусилля або тиски на відстані до декількох десятків метрів, гідравлічні – до декількох метрів через погані динамічні властивості цих каналів.

Пневматичними каналами передаються сигнали шляхом змінення тиску. Довжина пневматичних каналів становить декілька сот метрів. Серед механічних каналів пневматичні набули найбільшого поширення завдяки широкому використанню уніфікованих пневматичних систем контролю і регулювання на підприємствах з вибухово- і пожежо-небезпечним середовищем.

Такі канали передання інформації складаються з пневматичного датчика (або перетворювача-формуваача тиску газу, пропорційного вимірюваному процесу), пневматичної лінії зв'язку і перетворювального приладу (пристрою) на виході системи. Недоліком таких систем є тривалі

перехідні процеси в пневматичних лініях зв'язку, особливо в лініях великої довжини.

Таблиця 2.2

Канали		Робочий діапазон		L, км	Лінія зв'язку
		F, Гц	λ , м		
Механічні	Жорсткі	—	—	До 0,04	Механічні, гідравлічні, пневматичні, з'днання
	Гідравлічні	—	—	До 0,01	
	Пневматичні	—	—	До 0,5	
Акустичні	Звукові	До $20 \cdot 10^3$	До $15 \cdot 10^{-3}$	10	Тверде, рідке, газоподібне середовища
	Ультразвукові	Понад $20 \cdot 10^3$	Понад $15 \cdot 10^{-3}$	До 2	
Електричні	Підтональні частоти	200	Понад $1,5 \cdot 10^6$	10^k ($k < 5$)	Електросередовище
	Тональні частоти	300...3400	$(90...1000) \cdot 10^3$		
	Надтональні частоти	4000...8500	$(32...75) \cdot 10^3$		
	Високочастотні	Понад 10^4	До $3 \cdot 10^4$		
Радіо	ДХ	$0,9 \cdot 10^6$	Понад 10^3	—	Радіо-середовище
	КХ	10^6	200...1000		
	СХ	$(1,5...6) \cdot 10^6$	50...200		
	УКХ	$(6...30) \cdot 10^6$	10...50		
	ДЦХ	$30 \cdot 10^6...10^{12}$	0,0001...10		
Оптичні	Інфрачервоні хвилі	$(3...400) \cdot 10^{12}$	—	—	Оптичне (прозоре) середовище (світловоди)
	Світлові хвилі	$(4...6) \cdot 10^{14}$	—		
	Ультрафіолетові хвилі	$(1...100) \cdot 10^{14}$	—		
	Рентгенівське проміння	$10^{16}...10^{20}$	—		
	Гамма-проміння	$10^{20}...10^{22}$	—		

2.4.3. Акустичні канали

В акустичних каналах інформація передається через коливання у суцільних звукопровідних матеріалах і середовищах. Акустичні системи набули широкого застосування: акустичний контроль механічних об'єктів, ультразвукова дефектоскопія, акустичне виявлення об'єктів (підводних човнів, суден, літаків), гідролокація, акустичний зв'язок та ін.

Акустичні системи підрозділяються на активні й пасивні. У пасивній системі джерелами звуку є контрольовані або виявлені об'єкти. В активних

системах (ультразвукова дефектоскопія, локація, зв'язок) акустичні сигнали формують спеціальні генератори. Як джерела й приймачі звукових (до 20 кГц) та ультразвукових (понад 20 кГц) коливань використовуються магнітострикційні матеріали, а для більш високих частот (до 10^6 кГц) – п'єзоелектричні кристали.

2.4.4. Електричні канали

Електричні канали на провідних лініях зв'язку набули найбільшого застосування. Такі лінії можуть бути повітряними й кабельними. Електрична лінія зв'язку являє собою послідовне з'єднання великої кількості чотиріполіусників. На рис. рис. 2.9 наведено такі позначення:

- R_0 – активний опір проводу на одиницю довжини, $R_0 = R(\rho_0, S, t, \omega)$;
- L_0 – індуктивність на одиницю довжини, $L_0 = L(\rho_0, S, r, t, \omega)$;
- C_0 – ємність витоку на одиницю довжини, $C_0 = C(\rho_0, S, r)$;
- Θ_0 – провідність ізоляції на одиницю довжини, $\Theta_0 = \Theta(b, \rho, \omega)$.

Значення R_0 залежить від питомого опору ρ_0 матеріалу, перерізу S проводу, температури t зовнішнього середовища і частоти ω сигналів. При збільшенні частоти опір R_0 збільшується через наявність поверхневого ефекту. Значення L_0 залежить від від питомого опору матеріалу проводу ρ_0 , перерізу проводів S , відстані між проводами r , частоти ω сигналів і температури t середовища t . Значення C_0 залежить від від питомого опору матеріалу ρ_0 , перерізу проводів S та відстані між ними r . Значення Θ_0 залежить від матеріалу питомої провідності ізоляції b , вологості ρ і частоти сигналів ω .

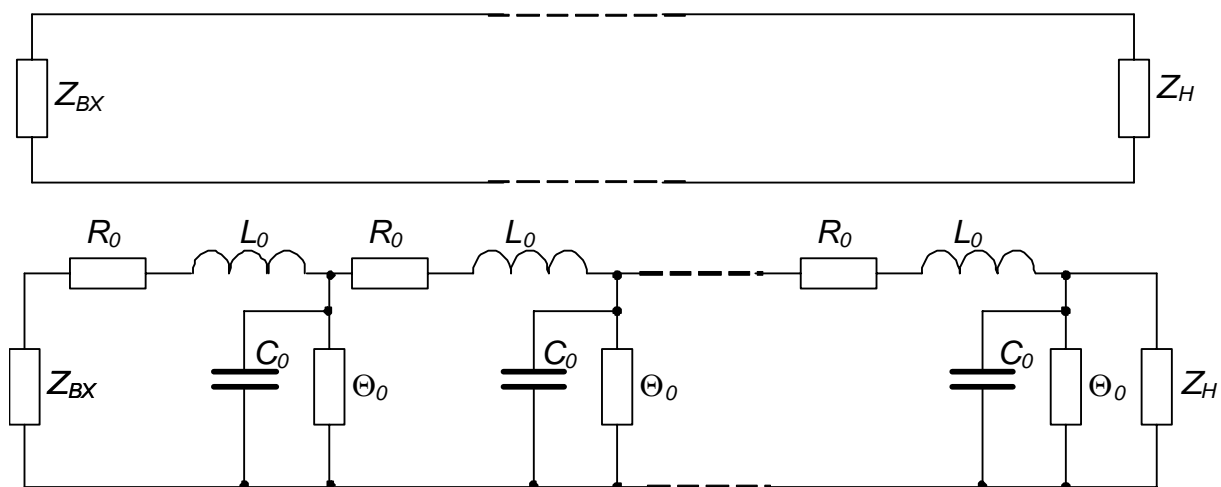


Рис. 2.9. Схема заміщення провідної лінії зв'язку

Параметри R_0 , L_0 , C_0 , θ_0 називають первинними параметрами ліній зв'язку. Деякі з них наведено в табл. 2.3 (діаметр проводу 4 мм). Крім первинних лінії зв'язку характеризуються вторинними параметрами: хвильовим опором Z_0 , загасанням β і коефіцієнтом поширення γ .

Таблиця 2.3

Найменування первинного параметра	Одиниця величини	Тип ліній зв'язку		
		Повітряна		Кабельна
		Мідь	Сталь	
Опір R_0	Ом	2,84	42,2	~0,25
Індуктивність L_0	МГн	~2,0	~9,0	~0,27
Ємність C_0	Ф	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$
Провідність θ_0	Ом ⁻¹	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Примітка: для чистої міді $R_0 = 0,17$ Ом.

2.4.5. Радіоканали

Радіоканали широко застосовуються для передання інформації стану й керування в мехатронних системах [10, 13].

За діапазоном частот сигналів розрізняють такі радіоканали:

- довгохвильовий ($\lambda > 1000$ м);
- середньохвильовий ($200 < \lambda < 1000$ м);
- проміжний ($50 < \lambda < 200$ м);
- короткохвильовий ($10 < \lambda < 50$ м);
- ультракороткохвильовий ($0,0001 < \lambda < 10$ м).

Характеристики радіоканалу визначаються властивостями відбиття й поглинання радіохвиль землею поверхнею та атмосферою. З усіх шарів атмосфери (тропосфера, стратосфера, мезосфера, іоносфера, екзосфера) найбільш істотно впливає на поширення радіохвиль іоносфера (термосфера) (рис. 2.10), яка розташована між висотами 80 і 800 км. Гази в ній здебільшого перебувають у вигляді електронів, іонів, заряджених атомів і молекул. Їх іонізація є результатом впливу сонячних променів, космічного проміння і метеорних часток.

При великій концентрації іонів гази стають електропровідними. У деяких шарах іоносфери концентрація вільних електронів становить трохи більшу величину. Відомо чотири такі шари на висотах 60–80 км (шар D), 100–120 км (шар E), 180–200 км (шар F₁), 300–400 км (шар F₂) (рис. 2.10, криві $n(H)$).

Ступінь іонізації істотно залежить від часу доби й активності Сонця і уночі є набагато меншим, ніж удень. Змінення концентрації іонів з висотою

обумовлює неперервне змінення кута залому радіохвиль. Унаслідок цього хвилі поширюються криволінійно.

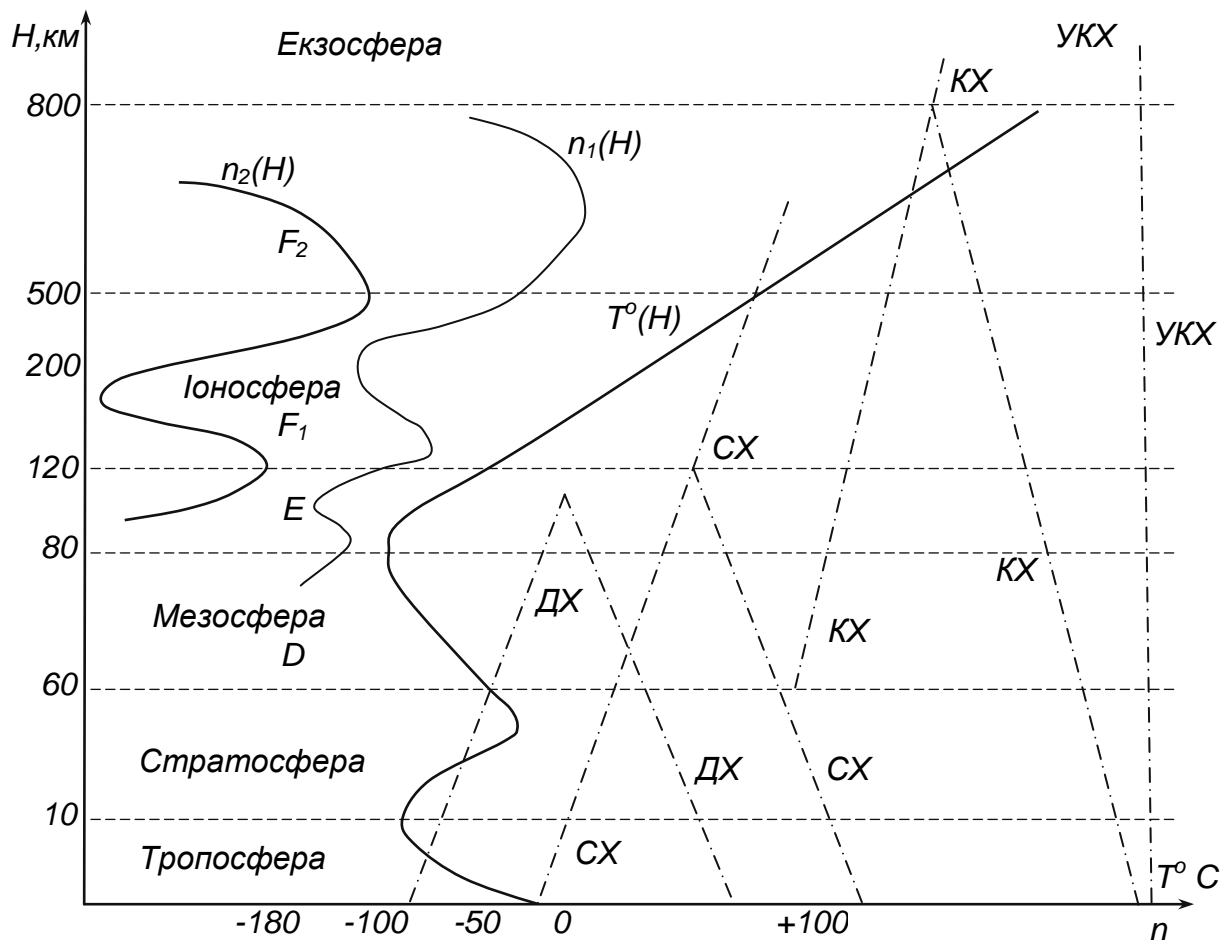


Рис. 2.10. Характеристика атмосфери

Частина хвиль (в основному середні радіохвилі) відбиваються від шару E (рис. 2.10, криві ДХ, СХ), друга частина (в основному короткі хвилі) – від шару F іоносфери (рис. 2.10, крива КХ), третя частина – «пробиває» обидва шари і виходить за межі земної атмосфери (рис. 2.10, крива УКХ).

Заломлювальна здатність іоносфери є неоднаковою для різних типів хвиль і зменшується зі зменшенням довжини хвилі. Хвилі, які поширюються внаслідок відбиття від іоносфери, мають назву просторових. Завдяки дифракції (властивості обгинання поверхні Землі) також мають місце поверхневі хвилі. Чим менше довжина хвилі, тим швидше згасає поверхнева хвиля (унаслідок утрат у земній поверхні) і повільніше – просторова.

Довгі хвилі повністю відбиваються від шару E (рис. 2.10, крива ДХ). Ультракороткі хвилі не відбиваються і виходять за межі земної атмосфери (рис. 2.10, крива УКХ). Сигнали інших діапазонів відбиваються іонізованими шарами E і F (рис. 2.10, криві СХ, КХ).

На практиці широко застосовуються радіорелейні канали передавання інформації на УКХ. Приймально-передавальні станції для таких ліній передавання розташовуються в межах прямої видимості.

У діапазоні дециметрових радіохвиль застосовуються хвилевідні лінії зв'язку (крім радіо- і радіорелейних). Хвилевід являє собою порожнисту металічну трубу, яка використовується для передачі електромагнітної енергії на частотах $35 \cdot 10^9 \dots 80 \cdot 10^9$ Гц.

Під час передавання у хвилеводі збуджуються кругові хвилі, які наводять у його стінках кільцеві струми. Ці струми забезпечують екранізацію, тобто перешкоджають виходу електромагнітної енергії за межі хвилеводу. Відмітною особливістю хвилевідних каналів є зменшення втрат зі збільшенням частоти. Це дає змогу передавати інформацію на дуже високих частотах і з меншими втратами порівняно з іншими видами ліній зв'язку.

2.4.6. Оптичні канали

В оптичних каналах передавання інформації за лінії зв'язку використовують закриті напрямні оптичні системи (світловоди) [7]. За діапазоном використовуваних довжин хвиль оптичні канали поділяються на такі:

- інфрачервоних хвиль ($0,75 \cdot 10^{-6} < \lambda < 10^{-4}$ м або $0,75 < \lambda < 100$ мкм);
- світлових хвиль (видимого спектра) ($0,38 < \lambda < 0,75$ мкм);
- ультрафіолетових хвиль ($0,005 < \lambda < 0,38$ мкм).

Властивості оптичних каналів визначаються оптичним середовищем. Створення оптичних каналів дасть змогу в майбутньому передавати інформацію великих обсягів і на надзвичайно великі відстані.

У мехатронних системах застосовують оптичні канали, які працюють з інфрачервоним промінням. Максимум інтенсивності випромінювання більшості тіл припадає на область інфрачервоних хвиль. Цю їхню властивість широко використовують, наприклад, у вимірювальній техніці.

Контрольні запитання

1. Що називають мехатронікою?
2. Назвіть основні елементи мехатронної системи.
3. Які вимірювальні величини використовуються в мехатронних системах?
4. У чому полягає перевага мехатронного підходу?
5. Якими є основні рівні інтеграції мехатронних систем?
6. Дайте означення закону керування.
7. Назвіть склад узагальненої схеми КІВ.
8. Обґрунтуйте призначення приводів у складі мехатронних систем.
9. Обґрунтуйте призначення датчиків у складі мехатронних систем.

3. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

Сьогодні підтримувати вузли МС у стані готовності неможливо без точних вимірювань і достовірного контролю параметрів і характеристик. Це стало невід'ємною частиною повсякденної діяльності в комп'ютерно-інтегрованому виробництві. Метрологічне забезпечення багато в чому визначає стан тактико-технічних характеристик мехатронних систем, можливість грамотного й повного їх використання, контроль якості й витрачання матеріально-технічних засобів. Без виконання точних вимірювань неможливе виконання жодного технологічного завдання.

Враховуючи, що значення метрології все більше зростає, обслуговий персонал МС повинен приділяти більше уваги правильності експлуатації і підтримці засобів вимірювань у працездатному стані. Під час конструювання, виробництва, експлуатації і ремонту МС в комплексі заходів з підвищення точності (або з підтримки точності на заданому рівні) завжди проводяться вимірювання величин її параметрів та оцінюється відповідність значень заданим вимогам.

При вимірюванні параметрів вузлів МС і їх складових елементів надзвичайно важливого значення для забезпечення необхідної точності набуває обґрунтований вибір допустимих похибок при застосуванні засобів і методів вимірювань.

Надмірне завищення вимог до характеристик точності засобів вимірювання веде до підвищення їх складності. У цьому випадку збільшуються їхні вартість, час і трудовитрати на вимірювання; відповідно потрібна більш висока кваліфікація як налагоджувальників і контролерів на виробництві, так і відповідного персоналу в експлуатації. Занижені вимоги до похибок при застосуванні засобів вимірювання призводять до зниження характеристик точності МС, знижує надійність та ефективність їх застосування за призначенням.

Весь комплекс питань, пов'язаних з вимірюванням, забезпеченням єдності й достовірності вимірювань, а також переданням одиниць вимірювань від еталонів до МС, називають метрологічним забезпеченням.

Під *метрологічним забезпеченням* МС розуміють комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення єдності й достовірності вимірювань параметрів вузлів МС з метою підтримки готовності й ефективності застосування МС за призначенням на необхідному рівні.

Основні заходи щодо метрологічного забезпечення МС згідно з ДСТУ:

- оцінювання ефективності метрологічного забезпечення МС та засобів їх контролю (метрологічна експертиза);
- оптимізація оснащення метрологічних служб КІВ засобами вимірювань;

– розроблення методів оцінювання й забезпечення точності функціонування МС;

– організація й технічне оснащення метрологічних об'єктів (ланцюгів);

– організація експлуатації засобів вимірювань;

– організація перевірки та нагляд за засобами вимірювань;

– підготовка фахівців для метрологічних служб;

– розроблення нормативних та експлуатаційних документів;

– розроблення наукових основ метрологічного забезпечення;

– організаційно-адміністративні питання метрологічного забезпечення.

Заходи метрологічного забезпечення закладаються на всіх етапах життєвого циклу: розроблення, випробування, виробництва й експлуатації вузлів МС КІВ.

Розглянемо більш детально основні складові метрологічного забезпечення процесу експлуатації вузлів МС. Основними передумовами для вдосконалення метрологічного забезпечення МС КІВ є такі: велика кількість видів вимірювань і різноманітність вимірюваних фізичних величин; різке зростання вимог до точності вимірювань параметрів; підвищення складності й обсягу вирішуваних вузлами МС задач, що спричиняє різке збільшення об'єму й часу проведення інструментального контролю з використанням вимірювальних приладів і систем контролю; необхідність збереження метрологічних характеристик робочих і зразкових вимірювальних засобів та еталонної апаратури в жорстких умовах експлуатації; подальше вдосконалення технічної бази засобів вимірювання для підвищення точності, швидкодії, автоматизації вимірювальних операцій і т. ін. Навіть цей неповний перелік передумов свідчить про те, що необхідно й надалі вдосконалювати *наукові основи* метрологічного забезпечення [30].

Під *метрологічною експертизою* розуміється оцінювання ефективності метрологічного забезпечення МС КІВ і засобів її контролю, що використовуються у виробництві, під час випробування й експлуатації. Метрологічну експертизу мають проходити всі нові МС (і які знаходяться на етапі експлуатації, якщо не пройшли її раніше), починаючи з розроблення технічного завдання на створення й узгодження технічних вимог, а також на всіх етапах розроблення, випробувань, виробництва й експлуатації. Метрологічна експертиза проводиться на основі аналізу технічної документації, перевірки правильності вибору вихідних даних для розрахунку й розрахункових матеріалів, порівняння технічних та експлуатаційних характеристик і вибраних методів технічної реалізації вимог до методів і засобів вимірювань і контролю з раніше розробленими типами МС того самого або аналогічного призначення, вивчення даних лабораторних і натурних випробувань [30].

- Під час проведення метрологічної експертизи оцінюються:
- правильність вирішення всіх питань, пов'язаних з технічною можливістю використання наявних засобів вимірювання і контролю;
 - економічна доцільність створення нових засобів, призначених для технічного обслуговування і випробувань розроблюваних МС та їх метрологічного забезпечення під час експлуатації;
 - відповідність ефективності засобів контролю вимогам, установленим для показників надійності МС КІВ з урахуванням часу, який витрачається на всі види вимірювань при технічному обслуговуванні МС в умовах експлуатації і кваліфікації обслугового персоналу;
 - відповідність умов експлуатації засобів вимірювань і контролю умовам експлуатації МС;
 - відповідність складності й обсягу технічної документації на всі види й засоби метрологічного забезпечення.

За результатами метрологічної експертизи робиться відповідний висновок. Необхідно мати на увазі, що недоліки метрологічного забезпечення, виявлені на найперших етапах створення вузлів МС, легко усунути; якщо ж їх виявляють на більш пізніх етапах життєвого циклу, то в деяких випадках їх неможливо виправити. Тому велика увага має приділятися метрологічній експертизі експлуатаційної, ремонтної і технологічної документації на вузли мехатронних систем КІВ.

Метрологічна експертиза документації — це аналіз та оцінювання технічних рішень з вибору параметрів, що підлягають вимірюванню, встановлення норм точності і забезпечення методами і засобами вимірювання процесів розробки, виготовлення, випробування, експлуатації і ремонту вузлів МС.

Вибір номенклатури вимірюваних параметрів і норм точності їх вимірювання. При виробництві вузлів МС КІВ вимірюється багато параметрів, проводиться вхідний і вихідний контроль параметрів елементів, вузлів, блоків і т. ін.

Однак в експлуатації МС мають місце суперечливі вимоги. З одного боку, для забезпечення високої точності функціонування МС бажано вимірювати якомога більше параметрів, але, з іншого боку, це приведе до створення великої кількості вимірювальних приладів, збільшаться трудовитрати на вимірювання, знизиться готовність МС до застосування за призначенням. Тому під час експлуатації вузлів МС потрібно вибрати необхідний мінімум контрольованих параметрів. Передусім вибирають параметри життєво важливих підсистем, що впливають переважно на виконання функціональних операцій [21]. Вибір таких параметрів — досить складне й відповідальне завдання. Сьогодні його вирішують на основі аналізу й узагальнення досвіду експлуатації раніше розроблених вузлів МС. Уважається, що під час підготовки і роботи МС КІВ треба використовувати тільки вбудовані системи контролю без застосування інших вимірювальних приладів [31]. При проведенні всіх видів технічного

обслуговування зазвичай застосовують виносні вимірювальні пристрої, а обсяг контрольованих параметрів вибирають з умови забезпечення необхідної (потрібної) методичної достовірності контролю, показником якої є коефіцієнт методичної достовірності

$$K_{м.д} = \frac{n}{N},$$

де n – кількість елементів вузла МС, відмови яких можна виявити під час контролю вибраних параметрів;

N – загальна кількість елементів контрольованого пристрою.

При цьому контрольовані параметри X_i вибирають таким чином, щоб кожний з них контролював різні елементи n_i і не було б пересічних областей. При виборі контрольованих параметрів на етапі експлуатації необхідно вибирати взаємозалежні параметри. Якщо, наприклад, два параметри X_1 і X_2 є взаємозалежними (взаємкорельованими), то достатньо контролювати один із них, а стан іншого можна оцінити із цієї ж залежності. Це дає змогу зменшити обсяг контрольованих параметрів.

Експлуатаційні допуски на контрольовані параметри. Одним із етапів метрологічної експертизи є ретельна перевірка відпрацювання експлуатаційних контрольних допусків, оскільки від величини допуску на контрольований параметр залежить вибір засобів вимірювань і їхніх характеристик точності.

Після установлення необхідних характеристик точності під час метрологічної експертизи [21] визначають тип вимірювальних засобів, рекомендований для етапу експлуатації МС КІВ. Насамперед розглядають можливість застосування вже існуючих вимірювальних приладів загального застосування. Якщо за якимись характеристиками існуючі прилади загального застосування не відповідають необхідним вимогам, то розробляють спеціальні (нестандартні) прилади.

Обмеження за кількістю приладів, вартістю і трудовитратами на контроль параметрів. При проведенні метрологічної експертизи МС КІВ перевіряють виконання таких обмежувальних вимог для умов експлуатації вузлів: $N_n \leq N_n^{доп}$; $M_n \leq M_n^{доп}$; $L_n \leq L_n^{доп}$; $S_n \leq S_n^{доп}$ тощо, де N_n – кількість вимірювальних приладів; M_n – маса всіх приладів; L_n – сумарна кількість приладів; S_n – сумарні трудовитрати на контроль усіх параметрів мехатронних систем КІВ.

Зазначені обмежувальні умови необхідно враховувати під час вибору кількості контрольованих параметрів і проведення метрологічної експертизи.

Забезпечення перевірки контрольовано-вимірювальної апаратури. Особливу увагу метрологи мають приділяти перевірці вимірювальних

приладів, які застосовуються в МС. Така перевірка здійснюється силами й засобами відомчих перевірних органів експлуатаційних організацій. При цьому для кожного вимірювального приладу має бути складено метрологічний ланцюг (перевірна схема) від робочого приладу до еталона.

Перевіряється також можливість оснащення метрологічних ланцюгів зразковими вимірювальними засобами у відомчих органах перевірки, які забезпечують передання необхідної точності вимірювань від еталонів до робочих засобів вимірювання параметрів об'єкта контролю.

В експлуатаційних документах на вимірювальні прилади мають бути інструкції і методики з перевірки, у яких зазначено необхідне обладнання робочих місць, пристосування, перехідні пристрої і т. ін.

Забезпечення ремонту, настроювання і юстування вимірювальної апаратури є одним із найважливіших факторів метрологічного забезпечення МС КІВ під час їх тривалої експлуатації. У цьому випадку при проведенні метрологічної експертизи перевіряють наявність інструкцій із настроювання і юстування, технології ремонту, оцінюють ремонтпридатність вимірювальних приладів, необхідність спеціальних пристосувань, інструмента, запасних частин, а також повноту комплектації з номенклатури і кількість запасних частин.

На перших етапах життєвого циклу повноту комплектації запасними частинами оцінюють на основі розрахунків надійності вимірювальних приладів, а при проведенні метрологічної експертизи на етапі експлуатації — за результатами узагальнення досвіду експлуатації і ремонту вимірювальних приладів, а також аналізу статистики їх відмов.

Організація перевірки, метрологічний нагляд, ремонт і облік засобів вимірювань під час виробництва здійснюється на основі відповідних керівних документів.

Контрольні запитання

1. Дайте означення метрологічного забезпечення.
2. Назвіть джерела похибок у засобах і методах вимірювань.
3. Назвіть основні заходи з метрологічного забезпечення експлуатації мехатронних систем.
4. Обґрунтуйте наукові основи метрологічного забезпечення.
5. Що розуміють під метрологічною експертизою?
6. Яким чином здійснюють вибір номенклатури вимірюваних параметрів і норм точності їх вимірювань?
7. Чому під час експлуатації вузлів МС потрібно вибрати необхідний мінімум контрольованих параметрів?
8. Яким чином визначається методична достовірність контролю?
9. Обґрунтуйте заходи з перевірки контрольно-вимірювальної апаратури.

4. ВИБІР ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ

4.1. Методика вибору засобів вимірювальної техніки для контролю параметрів вузлів мехатронних систем

Вибір засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), що забезпечує необхідну достовірність контролю технічного стану об'єктів контролю (ОК), є найважливішим завданням на всіх етапах створення вузлів МС і при їх експлуатації. Необхідне значення достовірності контролю обґрунтовується в період формування вимог до вузла МС і записується в технічне завдання на його розроблення.

Розглянемо таке завдання: провести контроль параметра X з номінальним значенням $X_{ном}$. Дійсні значення контрольованого параметра із заданою ймовірністю мають бути в межах визначеного допуску $\Delta_{п}$. Нехай $X_{н}$ і $X_{в}$ – нижня і верхня межі поля допуску; $\Delta_{н}$ і $\Delta_{в}$ – нижнє і верхнє допустимі відхилення контрольованого параметра.

Допуски на параметр на практиці поділяються на односторонні й двосторонні, двосторонні – на симетричні ($\Delta_{нп} = \Delta_{вп} = \Delta_{п}$) і несиметричні ($\Delta_{нп} \neq \Delta_{вп}$).

У загальному випадку можливі значення контрольованого параметра X розподілено в межах поля допуску за випадковим законом зі щільністю ймовірності $f(x)$ і середнім квадратичним відхиленням σ_x .

Похибка результату вимірювання через похибки вибраного ЗВТ з урахуванням додаткових похибок, що визначаються умовами, у яких здійснюється вимірювання, у загальному випадку також має випадковий характер:

$$\Delta = y - x, \quad (4.1)$$

де y – результат вимірювання параметра;

x – фактичне значення контрольованого параметра.

Закон розподілу похибок (щільність розподілу ймовірності) результатів вимірювань позначимо через $f(\Delta)$. Результат вимірювання поблизу меж поля допуску $X_{н}$ і $X_{в}$ контрольованого параметра дає невизначеність (випадковість оцінки фактичного значення контрольованого параметра) і не дає змоги вірогідно стверджувати, чи знаходиться контрольований параметр в межах поля допуску.

Уважаючи, що випадкові величини x і y є незалежними, розглянемо повну групу випадкових подій H_{xy} , $H_{\overline{xy}}$, $H_{x\overline{y}}$, $H_{\overline{x}y}$ (рис. 4.1), що будуть мати місце за умови контролю параметра залежно від положень

фактичного значення контрольованого параметра x і результату його вимірювання у відносно меж поля допуску X_H і X_B .

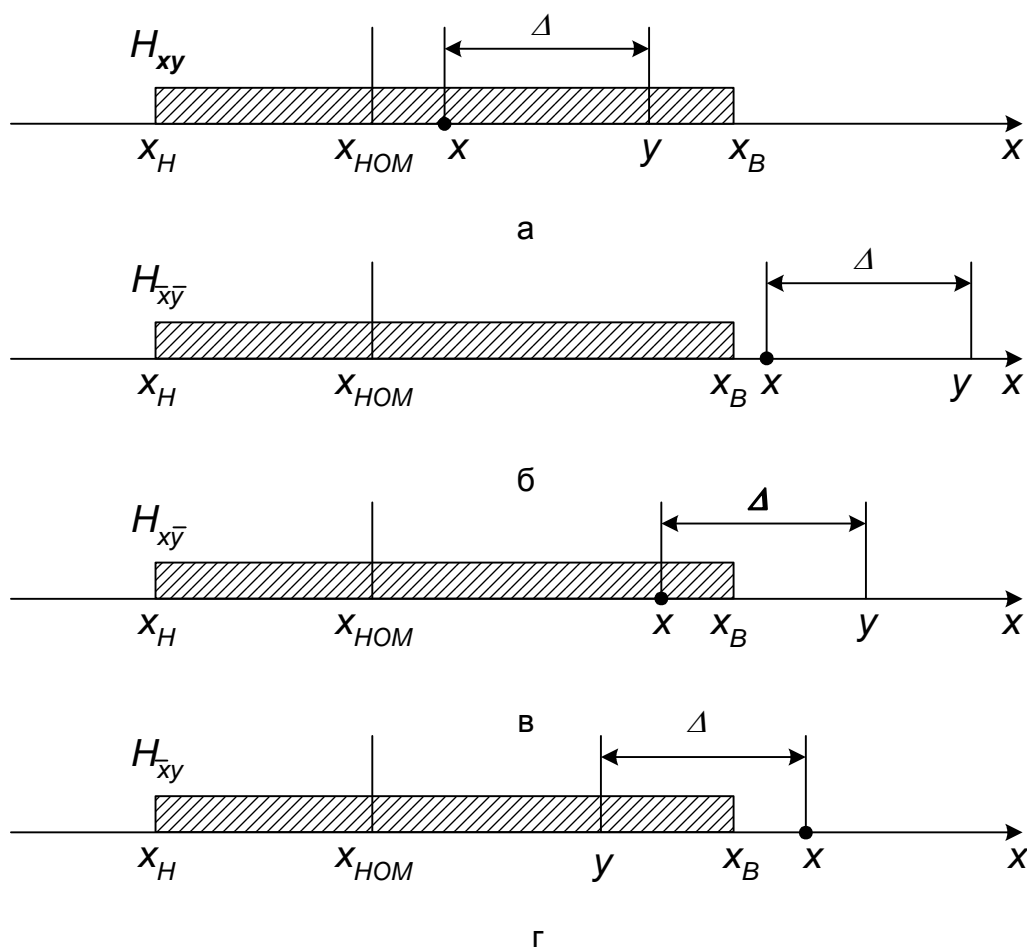


Рис. 4.1. Варіанти подій за результатами вимірювання параметра x

Подія H_{xy} має місце, коли значення параметра x знаходиться в межах поля допуску, і про це свідчить результат вимірювання y (рис. 4.1, а). Подія $H_{x\bar{y}}$ має місце, коли значення параметра x знаходиться поза межами поля допуску, і про це свідчить результат вимірювання y (рис. 4.1, б). Подія $H_{\bar{x}y}$ має місце, коли значення параметра x знаходиться в межах поля допуску, результат вимірювання y є показником того, що параметр знаходиться поза межами поля допуску, тобто відбулася хибна відмова (рис. 4.1, в). Подія $H_{\bar{x}\bar{y}}$ має місце, коли значення параметра x знаходиться в полі допуску, результат вимірювання y є показником того, що параметр знаходиться в межах поля допуску. У цьому випадку має місце невиявлена відмова (рис. 4.1, г).

Сума ймовірностей $P(H_{xy})$, $P(H_{\bar{x}\bar{y}})$ виникнення подій H_{xy} , $H_{\bar{x}\bar{y}}$ дає змогу оцінити ймовірність правильного висновку про стан контрольованого параметра x за результатом вимірювань y , тобто $P_{BB} = P(H_{xy}) + P(H_{\bar{x}\bar{y}})$, а

сума ймовірностей $P(H_{xy}^-)$, $P(H_{xy}^-)$ виникнення подій H_{xy}^- , H_{xy}^- дає змогу оцінити ймовірність неправильного (хибного) висновку про стан контрольованого параметра за результатом вимірювання y , тобто $P_{HB} = P(H_{xy}^-) + P(H_{xy}^-)$.

Очевидно, що ймовірності хибної і невиявленої відмов (ймовірності прийняття неправильних рішень) будуть збільшуватися зі збільшенням похибок вимірювань (а отже, і похибок ЗВТ).

Оскільки події, що полягають у прийнятті правильних і неправильних рішень, складають повну групу подій, то $P_{ев} + P_{не} = 1$. Тоді ймовірність правильного висновку про стан контрольованого параметра

$$P_{ев} = 1 - P_{нз} = 1 - (P_{хв} + P_{нев}), \quad (4.2)$$

де $P_{хв} = P(H_{xy}^-)$ – ймовірність хибної відмови, тобто ймовірність отримання рішення «непридатний» під час контролю параметра, значення якого насправді відповідає вимогам технічної документації;

$P_{нев} = P(H_{xy}^-)$ – ймовірність невиявленої відмови, тобто ймовірність отримання рішення «придатний» під час контролю параметра, значення якого насправді не відповідає вимогам технічної документації.

Події, що полягають у знаходженні параметра (з нормальним законом розподілу) у допуску або поза допуском (рис. 4.2), є випадковими, і похибка засобу вимірювальної техніки (з рівноймовірнісним ЗР) теж є випадковою, тому ймовірності відмов хибної (похибка першого роду) і невиявленої (похибка другого роду) можна знайти як добуток незалежних випадкових подій.

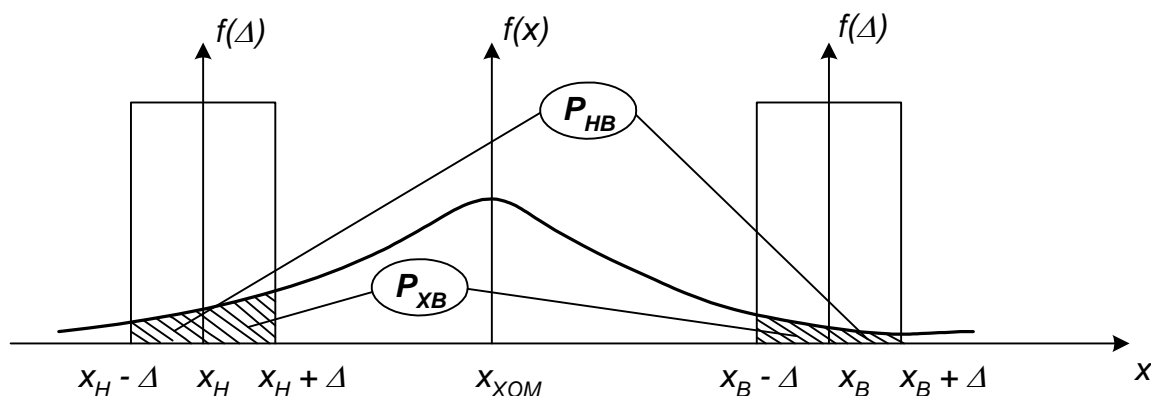


Рис. 4.2. Межі знаходження вимірюваного параметра

Невиявлена відмова є можливою, якщо відхилення параметра і похибка ЗВТ мають різні знаки, її ймовірність

$$P_{HB} = \int_{-\infty}^{x_H} f(x) \int_{x_H-x}^{x_в-x} f(\Delta) d\Delta dx + \int_{x_в}^{\infty} f(x) \int_{x_H-x}^{x_в-x} f(\Delta) d\Delta dx. \quad (4.3)$$

За формулами (4.3) і (4.4) для різних комбінацій законів розподілу параметра $f(x)$ і похибки вимірювання $f(\Delta)$ побудовано графіки (номограми), наведені у ГОСТ 8.051–81 і на рис. Д.1.1 – Д.1.5. На графіках позначено: $\Delta_{\text{п}}$ – допуск на параметр; σ_x – середньоквадратичне відхилення параметра; $R = \Delta_{\text{ЗВТ}}/\Delta_{\text{п}}$, де $\Delta_{\text{ЗВТ}}$ – абсолютна похибка ЗВТ. Графіки дають змогу звести розрахунки, пов'язані з визначенням $P_{\text{хв}}$ і $P_{\text{нв}}$, а також з вибором ЗВТ для контролю параметра виробу, до елементарних операцій.

Вибір ЗВТ може здійснюватися за наявності або відсутності повних вихідних даних.

Повні вихідні дані, необхідні для вибору ЗВТ, мають містити:

- перелік параметрів об'єкта, що підлягають контролю;
- значення допустимих відхилень $\Delta_{\text{п}}$ для кожного параметра;
- закон розподілу $f(x)$ відхилень кожного контрольованого параметра для генеральної сукупності об'єктів вимірювань;
- середнє квадратичне відхилення σ_x контрольованого параметра;
- закон розподілу $f(\Delta)$ відхилень похибки ЗВТ;
- допустимі значення ймовірностей хибної $P_{\text{хв}}$ і невиявленої $P_{\text{нв}}$ відмов на кожен з контрольованих параметрів;
- умови, у яких будуть вимірюватися параметри.

При виборі засобу вимірювальної техніки необхідної точності використовується метод послідовних наближень.

Методика вибору ЗВТ є такою.

1. За заданими значеннями $P_{\text{хв}}$, $P_{\text{нв}}$ або R і максимально допустимого відхилення $\Delta_{\text{п}}$ контрольованого параметра визначається сумарна допустима похибка вимірювання

$$\Delta_{\Sigma \text{доп}} = \Delta_{\text{п}} R, \quad (4.4)$$

де R – допустиме співвідношення між похибкою вимірювання і допустимим відхиленням контрольованого параметра, що визначається на основі відомих $P_{\text{хв}}$ і $P_{\text{нв}}$ за графіками (див. рис. Д.1.1 – Д.1.5).

2. Для визначення R за заданими законом розподілу значень контрольованого параметра $f(x)$ і законом розподілу відхилень $f(\Delta)$ похибки ЗВТ вибираємо відповідний графік.

3. За відомими значеннями Δ_{π} і σ_x обчислюємо відношення Δ_{π}/σ_x , відкладаємо отримане значення на осі абсцис вибраного графіка і через цю точку проводимо пряму лінію, паралельну до осі ординат.

Якщо допуск є двостороннім симетричним, тобто $\Delta_{\pi H} = \Delta_{\pi B} = \Delta_{\pi}$, то на осі ординат відкладаємо задане допустиме значення $P_{xв}$ і через цю точку проводимо пряму лінію, паралельну до осі абсцис, до перетинання з лінією, проведеною через точку Δ_{π}/σ_x . За наведеними кривими та отриманою точкою перетину двох прямих визначаємо R' (рис. 4.3). Якщо точка перетину не лежить ні на одній з кривих графіка, то значення R' визначається методом лінійної інтерполяції.

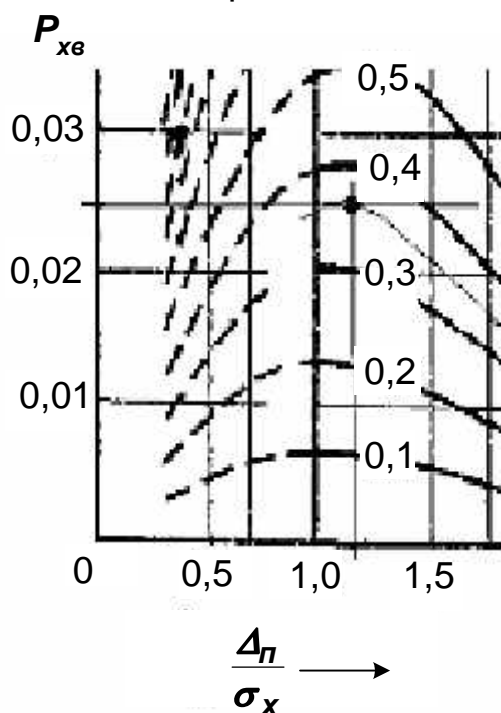


Рис. 4.3. Графіки допустимих співвідношень

4. За відповідними графіками з урахуванням заданого $P_{Hв}$ аналогічно визначаємо R'' .

5. Із двох значень R' і R'' , визначених для $P_{xв}$ і $P_{Hв}$, за шукане беремо менше:

$$R = \min \{R', R''\}.$$

За відсутності повної вхідної інформації, необхідної для визначення R за графіками, можливі такі випадки спрощених його розрахунків:

– задано всі вхідні дані, окрім середнього квадратичного відхилення контрольованого параметра σ_x (допустиме значення R визначаємо за заданими значеннями $P_{xв}$ і $P_{Hв}$ з табл. 4.1);

– не визначено вигляд і характеристику закону розподілу значень контрольованого параметра $f(x)$ (допустиме значення R за заданими $P_{xв}$ і $P_{нв}$ знаходимо за табл. 4.1 для рівномірнісного закону;

– не задано значення $P_{xв}$ і $P_{нв}$ або закони розподілу значень контрольованого параметра $f(x)$ і похибок результатів вимірювань $f(\Delta)$ не є нормальними або є невідомими; перший і другий випадки розрахунків є недоцільними (допустиме значення R залежно від важливості контрольованого параметра вибираємо з ряду 0,5; 0,4; 0,3; 0,25; 0,2; 0,15; 0,1; найчастіше використовується значення $R = 0.3$).

Таблица 4.1

R	$P_{xв}$		$P_{нв}$	
	НЗР	ПЗР	НЗР	ПЗР
0,1	0,006	0,012	0,004	0,011
0,2	0,013	0,026	0,010	0,021
0,3	0,020	0,039	0,015	0,032
0,4	0,030	0,052	0,021	0,040
0,5	0,035	0,066	0,026	0,049
0,6	0,044	0,079	0,031	0,056
0,7	0,053	0,093	0,036	0,063
0,8	0,061	0,106	0,061	0,070
0,9	0,071	0,120	0,046	0,076
1,0	0,081	0,130	0,050	0,082

6. Виходячи з відомого значення $\Delta_{\Sigma доп}$, заздалегідь вибираємо ЗВТ і розраховуємо похибку вимірювання параметра цим засобом у реальних умовах з урахуванням можливих додаткових похибок таким чином:

1) при прямих вимірюваннях, коли основні й додаткові похибки вибраного засобу вимірювальної техніки є незалежними і підлягають нормальному закону розподілу,

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{ор}^2 + \sum_{j=1}^r \Delta_{jp}^2}, \quad (4.5)$$

де $\Delta_{ор}$ – межа абсолютної основної допустимої похибки ЗВТ;

Δ_{jp} – межа абсолютної j -ї допустимої додаткової похибки ЗВТ при заданих робочих умовах проведення вимірювань;

r – кількість додаткових похибок, що підсумовуються;

2) при прямих вимірюваннях, коли похибки є незалежними, але закон розподілу хоча б однієї із похибок відрізняється від нормального,

$$\Delta_{\Sigma} = k_{\Sigma} \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{сер}}}{k_0}\right)^2 + \sum_{j=1}^r \left(\frac{\Delta_{\text{сер } j}}{k_j}\right)^2}, \quad (4.6)$$

де k_{Σ} , k_0 , k_j – коефіцієнти переходу похибок Δ_{Σ} , Δ_{op} і Δ_{jp} до відповідних середніх квадратичних відхилень σ_{Σ} , σ_{op} і σ_{jp} (табл. 4.2); якщо похибок більше трьох і серед них немає такої, що превалює, то допускається брати $k_{\Sigma} = 3$, а за наявності похибки k_{Σ} визначається коефіцієнтом переходу похибки, що превалює;

Таблиця 4.2

Закон розподілу похибки	Значення коефіцієнтів k_{Σ} , k_0 , k_j
Нормальний	3,00
Рівноймовірнісний	1,73
Трикутний	2,45
Трапецієподібний	2,30
Антимодальний 1	1,40
Антимодальний 2	1,20
Релея	3,30

3) при прямих вимірюваннях, наявності кореляційних зв'язків між похибками і відмінності закону хоча б однієї з похибок від нормального

$$\Delta_{\Sigma} = k_{\Sigma} \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{сер}}}{k_0}\right)^2 + \sum_{j=1}^r \left(\frac{\Delta_{\text{сер } j}}{k_j}\right)^2 + 2 \sum_{j < \xi}^r k_{j\xi}}, \quad (4.7)$$

де $k_{j\xi}$ – кореляційний момент, що характеризує зв'язок між j -ю та ξ -ю похибками.

Кореляційні моменти розраховуємо за формулою

$$k_{j\xi} = \left(\frac{\Delta_{\text{сер } j}}{k_j}\right) \left(\frac{\Delta_{\text{сер } \xi}}{k_{\xi}}\right) r_{j\xi}, \quad (4.8)$$

де $r_{j\xi}$ – коефіцієнт кореляції;

4) при прямих вимірюваннях, коли межі абсолютних допустимих основних похибок для систематичних і випадкових складових нормуються окремо, формули (4.6) – (4.8) відповідно набувають такого вигляду:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{os_p}^2 + \left(3\sigma_p[\Delta_o^o]\right)^2 + \sum_{j=1}^r \Delta_{\text{сер } j}^2}, \quad (4.9)$$

$$\Delta_{\Sigma} = k_{\Sigma} \sqrt{\left(\frac{\Delta_{osp}}{k_0}\right)^2 + \left(\sigma_p[\Delta_o^o]\right)^2 + \sum_{j=1}^r \left(\frac{\Delta_{cepj}}{k_j}\right)^2}, \quad (4.10)$$

$$\Delta_{\Sigma} = k_{\Sigma} \sqrt{\left(\frac{\Delta_{osp}}{k_0}\right)^2 + \left(\sigma_p[\Delta_o^o]\right)^2 + \sum_{j=1}^r \left(\frac{\Delta_{cepj}}{k_j}\right)^2 + 2 \sum_{j>\xi}^r k_{j\xi}}, \quad (4.11)$$

де Δ_{osp} – межа допустимої систематичної складової похибки ЗВТ;

$\sigma_p[\Delta_o^o]$ – межа квадратичного відхилення випадкової складової похибки ЗВТ;

Δ_{op} , Δ_{cepj} , Δ_{osp} і $\sigma_p[\Delta_o^o]$ – значення, що беруться з експлуатаційної документації на засоби вимірювальної техніки, а якщо такої немає, то з технологічної і проектної;

5) при опосередкованих вимірюваннях, коли параметр Y є функцією m аргументів (параметрів), які визначаються шляхом прямих вимірювань, тобто $Y = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_m)$, похибку вимірювання параметра Y при незалежних окремих похибках аргументів визначаємо за формулою

$$\Delta_{\Sigma} = k_{\Sigma} \sqrt{\sum_{k=1}^m \left[\frac{\partial (X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_k} \right]^2 \left(\frac{\Delta_{xk\Sigma}}{k_{xk}} \right)^2}, \quad (4.12)$$

де $\Delta_{xk\Sigma}$ – сумарна похибка прямого вимірювання аргументу, що визначається за однією із формул (4.6) – (4.12);

k_{xk} – коефіцієнт переходу від сумарної похибки вимірювання аргументу X до його середнього квадратичного відхилення, що визначається з табл. 4.2;

6) значення $\Delta_{\Sigma_{доп}}$ порівнюємо із сумарною похибкою вимірювання параметра Δ_{Σ} вибраним орієнтовно ЗВТ; результати порівняння можуть мати кілька висновків:

– якщо $\Delta_{\Sigma_{доп}} < \Delta_{\Sigma}$, то клас точності ЗВТ вибрано неправильно; слід взяти засіб більш високого класу точності й для нього ще раз розрахувати значення Δ_{Σ} ;

– якщо $\Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} > \Delta_{\Sigma}$, то вибраний ЗВТ має завищену точність; слід взяти засіб більш низького класу точності й для нього ще раз розрахувати значення Δ_{Σ} .

Операції з вибору ЗВТ проводять доти, доки не буде досягнуто оптимального варіанта, коли Δ_{Σ} дещо менше $\Delta_{\Sigma_{\text{доп}}}$: $\Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} \approx \Delta_{\Sigma}$.

Якщо не буде засобу вимірювальної техніки більш високого (низького) класу (для вибраних типу ЗВТ і меж вимірювань), то вибирають ЗВТ, у якому використовується інший, більш (менш) точний метод вимірювань.

Приклад 4.1. Вибрати ЗВТ для контролю змінної напруги $U = 250$ В з абсолютною похибкою вимірювань ΔU , яка не перевищує ± 25 В, для заданих $P_{\text{хв}} = 0,04$, $P_{\text{не}} = 0,015$. Закон розподілу значень контрольованого параметра $f(x)$ і закон розподілу похибок результатів вимірювань $f(\Delta)$ є нормальними, $\sigma_U = 16,7$ В.

Розв'язання

1. Розраховуємо відношення

$$\Delta U / \sigma_U = 25 / 16,7 \approx 1,5.$$

2. За графіками для нормального закону розподілу $f(x)$ і $f(\Delta)$ (рис. Д.1.1, Д.1.2)

$$R' \approx 0,58; R'' \approx 0,42,$$

Звідки

$$R = \min \{R', R''\} = \min \{0,58; 0,42\} = 0,42.$$

3. За виразом (4.5) для нормальних умов застосування

$$\Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} = \Delta_n R = \Delta U R = 25 \cdot 0,42 = \pm 10,5 \text{ В} .$$

4. Абсолютна похибка $\Delta U = \gamma U_N / 100$, де γ – зведена похибка (клас точності ЗВТ); U_N – межа вимірювання.

Для $U_N = 300$ В

$$\gamma = \Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} \cdot 100 / U_N = 10,5 \cdot 100 / 300 = \pm 3,5.$$

5. Основна похибка ЗВТ не повинна перевищувати розраховане значення ($\gamma_{\text{осн}} \leq \gamma$), тобто треба вибрати вольтметр, для якого $\gamma_{\text{осн}} = \pm 2,5$, $U_N = 300$ В.

6. Імовірність правильного висновку за виразом (4.2)

$$P_{\text{вв}} = 1 - (P_{\text{хв}} + P_{\text{нв}}) = 1 - (0,04 + 0,015) = 0,945.$$

Приклад 4.2. Вибрати ЗВТ для контролю змінної напруги $U = 250$ В з відносною похибкою вимірювань, яка не перевищує ± 10 %, для заданих $P_{\text{хв}} = 0,04$, $P_{\text{нв}} = 0,03$.

Розв'язання

1. Відносна похибка $\delta U = \Delta U \cdot 100 / U$, звідки

$$\Delta U = \delta U U / 100 = 10 \cdot 250 / 100 = \pm 25 \text{ В.}$$

2. Оскільки вигляд і характеристику закону розподілу значень контрольованого параметра $f(x)$ не визначено, допустиме значення R за заданими значеннями $P_{\text{хв}}$ і $P_{\text{нв}}$ знаходимо за табл. 4.1 для рівноймовірного закону, звідки

$$R = \min \{R', R''\} = \min \{0,3; 0,3\} = 0,3.$$

За виразом (1.5)

$$\Delta_{\Sigma \text{доп}} = \Delta_{\text{п}} R = \Delta U R = 25 \cdot 0,3 = \pm 7,5 \text{ В.}$$

3. Абсолютна похибка $\Delta U = \gamma U_N / 100$, де γ – зведена похибка (клас точності – ЗВТ); U_N – межа вимірювання.

Для $U_N = 300$ В

$$\gamma = \Delta_{\Sigma \text{доп}} \cdot 100 / U_N = 7,5 \cdot 100 / 300 = \pm 2,5.$$

4. Основна похибка ЗВТ не повинна перевищувати розраховане значення, тобто $\gamma_{\text{осн}} \leq \gamma$. За таких умов вибираємо вольтметр Ц4315 (див. дод. 2), для якого $\gamma_{\text{осн}} = \pm 1,5$, $U_N = 300$ В.

5. Імовірність правильного висновку за виразом (4.2)

$$P_{\text{вв}} = 1 - (P_{\text{хв}} + P_{\text{нв}}) = 1 - (0,04 + 0,03) = 0,93.$$

Висновок: Вольтметр Ц4315 забезпечить контроль заданого параметра з достовірністю 0,93.

Приклад 4.3. Для умов з прикладу 4.2 врахувати, що температура навколишнього середовища становить $+4$ °С.

Розв'язання

1. Для вольтметра Ц4315 додаткова похибка γ_{∂} через змінення температури навколишнього середовища становить 0,5 % на кожні 10 °С. Відхилення від нормальної температури

$$\Delta t = |t_{\text{вум}} - t_{\text{норм}}| = |4 - 20| = 16 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 20 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

тобто необхідно врахувати значення похибки $2\gamma_{\partial}$.

Сумарна зведена похибка

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{осн}} + \gamma_{\partial} = 1,5 + 2(0,5) = \pm 2,5 \text{ } \%$$

Абсолютна похибка

$$\Delta_{\Sigma} = \gamma_{\Sigma} U_N / 100 = 2,5 \cdot 300 / 100 = \pm 7,5 \text{ В.}$$

2. Аналогічно пп. 2 і 3 прикладу 4.2

$$\Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} = \Delta_{\Pi} R = \Delta_{\Sigma} R = 7,5 \cdot 0,3 = \pm 2,25 \text{ В.}$$

Для $U_N = 300 \text{ В}$

$$\gamma = \Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} \cdot 100 / U_N = 2,25 \cdot 100 / 300 = \pm 0,75.$$

3. За таких умов вибираємо вольтметр Ц4311 (див. дод. 2), для якого $\gamma_{\text{осн}} = \pm 0,5$, $U_N = 300 \text{ В}$, а додаткові похибки за рахунок температури такі ж самі, як і у вольтметра Ц4315.

Висновок: Вольтметр Ц4311 забезпечить контроль заданого параметра з достовірністю 0,93.

Приклад 4.4. Для умов із прикладу 4.2 визначити робочий еталон для коефіцієнта точності $K_{\text{мп}} = 5,0$.

Розв'язання

При калібруванні, тобто в нормальних умовах експлуатації, додаткових похибок вимірювання немає. Згідно з п. 2 прикладу 4.3

$$\Delta_{\text{пЗВТ}} = \Delta_{\Sigma_{\text{доп}}} = \pm 7,5 \text{ В.}$$

Коефіцієнт точності – аналог допустимого співвідношення R , що визначається за відповідними графіками на основі відомих $P_{\text{хв}}$ і $P_{\text{нв}}$ або з виразу (4.5). Запишемо:

$$K_m = \Delta_{\text{пЗВТ}} / \Delta_{\text{РЕ}} = 5,0;$$

$$\Delta_{PE} = \Delta_{пЗВТ} / K_m = 7,5 / 5,0 = \pm 1,5 \text{ В.}$$

Згідно з п. 2 прикладу 4.2 для $U_N = 300$

$$\gamma = \Delta_{PE} \cdot 100 / U_N = 1,5 \cdot 100 / 300 = \pm 0,5.$$

Із дод. 2 визначеним даним відповідає вольтметр Ц4311.

Висновок. Для калібрування вольтметра Ц4515 як робочий еталон можна використовувати вольтметр Ц4311.

4.2. Завдання для самостійної роботи

Вибрати ЗВТ для контролю параметра виробу відповідно до вихідних даних, наведених в табл. 4.3, де позначено: n – нормальний закон розподілу; $p\gamma$ – рівноймовірнісний закон розподілу; t – температура повітря, H – напруженість магнітного поля.

Таблиця 4.3

Номер варіанта	U, В	Δ_n , В	f(x)	σ_U , В	f(Δ)	P _{хв}	P _{нв}	Умови вимірювань	
								t °C	H, А/м
1	12	1,5	n	0,86	n	0,02	0,01	5	80
2	12	1,5	pγ	–	n	0,04	0,02	5...25	100
3	12	2	–	1,33	–	0,03	0,01	15	–
4	12	2	n	0,57	pγ	0,02	0,01	15...30	50
5	12	2	pγ	1	pγ	0,02	0,005	–	80
6	12	2	–	0,5	–	0,02	0,005	5	100
7	12	2	n	–	n	0,03	0,01	5...25	150
8	12	1	pγ	0,67	n	0,04	0,02	15	–
9	12	1	–	0,67	–	0,04	0,02	15...30	50
10	12	1	n	0,5	pγ	0,03	0,01	–	80
11	12	1	pγ	–	pγ	0,033	0,015	5	100
12	12	1	–	0,57	–	0,03	0,015	5...25	150
13	12	1	n	0,5	n	0,03	0,01	15	–
14	12	1	pγ	0,5	n	0,03	0,01	15...30	50
15	12	1	–	–	–	0,03	0,01	–	80
16	27	3	n	2	pγ	0,04	0,02	5	100
17	27	5	pγ	2,85	pγ	0,03	0,01	5...25	150
18	27	5	–	2,5	–	0,03	0,01	15	–
19	27	4	n	–	n	0,04	0,02	15...30	50
20	27	5	pγ	2,85	n	0,03	0,015	–	80
21	45	4	–	2,28	–	0,03	0,01	5	100
22	45	3	n	2	pγ	0,04	0,02	5...25	150
23	45	4	pγ	2,28	pγ	0,04	0,02	15	–
24	45	5	–	3,34	–	0,04	0,02	15...30	50
25	45	5	n	2,5	n	0,025	0,01	–	80

Для вибраного ЗВТ визначити робочий еталон для заданого коефіцієнта точності $K_{m\pi} = 3,0$. Характеристики застосовуваних приладів наведено в дод. 2.

Контрольні запитання

1. Які існують допуски на параметри?
2. Наведіть вираз для визначення похибки результату вимірювання.
3. У яких випадках мають місце події H_{xy} , $H_{\overline{xy}}$, $H_{\overline{xy}}$, $H_{\overline{xy}}$?
4. Яким чином оцінюють імовірність правильного висновку про стан контрольованого параметра X за результатом вимірювань?
5. Яким чином оцінюють імовірність неправильного (хибного) висновку про стан контрольованого параметра за результатом вимірювання Y ?
6. Назвіть умови виникнення хибних і невиявлених відмов.
7. Обґрунтуйте зміст методики вибору засобів вимірювальної техніки.
8. Наведіть порядок визначення похибки при опосередкованих вимірюваннях параметра, коли параметр Y є функцією m аргументів параметрів)?

5. БУДУВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ЛАНЦЮГІВ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ

5.1. Методика будівництва метрологічних ланцюгів контрольованих параметрів об'єкта контролю

Для оцінювання якості системи контролю за правильністю рішень з метрологічного забезпечення експлуатації вузлів мехатронних систем КІВ будують метрологічні ланцюги контрольованих параметрів у вигляді графічних зображень (рис. 5.1), які складаються з декількох ланок.

Перша ланка метрологічного ланцюга (МЛ) охоплює параметр вимірюваного (контрольованого) об'єкта (ПО) і засіб вимірювальної техніки, призначений для контролю цього параметра (ЗВК).

Друга ланка охоплює параметр засобу вимірювань (ПЗВ), який калібрується (перевіряється), і робочий еталон (РЕ), що використовується для його калібрування (перевірки). Метрологічні ланцюги складаються від контрольованого параметра об'єкта до першого РЕ або доки не буде виявлено переривання метрологічного зв'язку (ПМЗ). Подальший зв'язок РЕ з еталонами вищих розрядів визначається перевірними схемами.

Перша метрологічна ланка характеризується допустимими значеннями ймовірностей хибної $P_{хвд}$ і невиявленої $P_{невд}$ відмов (що задаються замовником об'єкта контролю у межах від 0,001 до 0,2 виходячи із заданої надійності й значущості контрольованих параметрів), а також фактичними значеннями цих ймовірностей $P_{хвф}$ і $P_{неф}$.

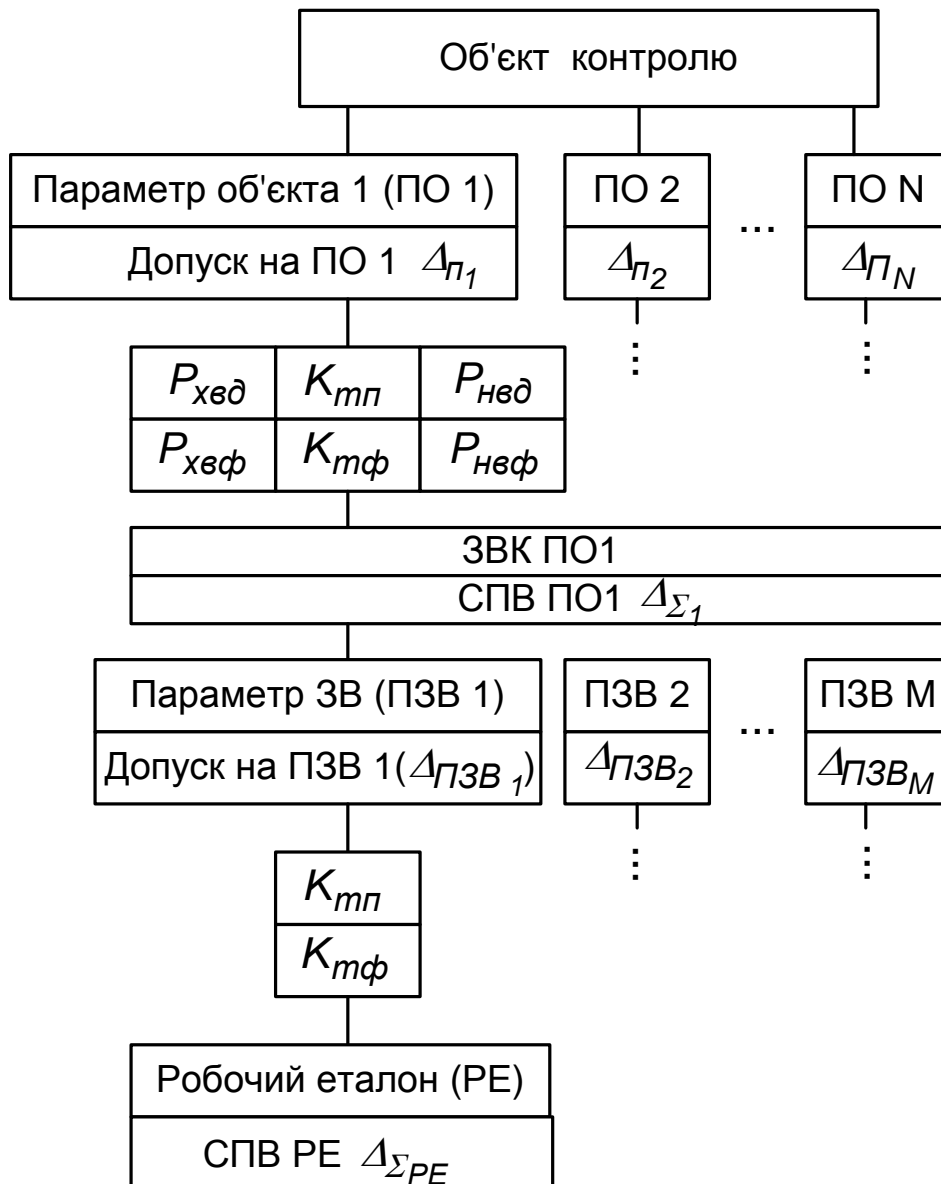


Рис. 5.1. Метрологічні ланцюги контрольованих параметрів

Значення $P_{хвф}$ і $P_{нвф}$ розраховують за відомими значеннями допустимих відхилень Δ_{π} , середнього квадратичного відхилення контрольованого параметра σ_x , за законами розподілу значень контрольованого параметра $f(x)$ і похибок результатів вимірювань $f(\Delta)$ таким чином:

1) знаходять сумарну похибку вимірювань (СПВ) контрольованого параметра Δ_{Σ} з урахування умов застосування;

2) обчислюють співвідношення між сумарною похибкою вимірювань і допустимим відхиленням

$$R = \Delta_{\Sigma} / \Delta_{\Gamma}; \quad (5.1)$$

3) відповідно до законів розподілу $f(x)$ і $f(\Delta)$ вибирають графіки $P_{xв}$ і $P_{нв}$ (дод. 1);

4) розраховують відношення $\Delta_{\Gamma} / \sigma_x$, відкладають отримане значення на осі ординат вибраних графіків, через отримані точки перпендикулярно до осі абсцис проводять прямі до перетинання з відповідними кривими, що визначаються розрахунковим значенням R (рис. 4.3); на осях ординат вибраних графіків відраховують отримані фактичні значення ймовірностей хибної і невиявленої відмов $P_{хвф}$ і $P_{нвф}$.

Вимірювання параметрів вважається достовірним, якщо $P_{хвф} \leq P_{хвд}$ і $P_{нвф} \leq P_{нвд}$.

Якщо інформації про значення ймовірностей хибної і невиявленої відмов $P_{хвд}$ і $P_{нвд}$ недостатньо, то допускається характеризувати метрологічні ланки потрібним $K_{мп}$ і фактичним K_{mf} значеннями коефіцієнтів точності, що відображують відношення між допустимими відхиленнями Δ_{Γ} і сумарною похибкою вимірювання параметра Δ_{Σ} .

Необхідне значення коефіцієнта точності K_m залежно від значущості контрольованого параметра вибирається з ряду 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0. Більшій значущості параметра має відповідати найбільше значення коефіцієнта точності. Переважним вважається значення $K_m = 3$. При вимірюванні частоти та часу значення $K_m \approx 10$.

Фактичне значення коефіцієнта точності визначається як

$$K_{mf} = \Delta_{\Gamma} / \Delta_{\Sigma}. \quad (5.2)$$

Вимірювання параметра вважається достовірним, якщо $K_{mf} \geq K_{мп}$.

Друга метрологічна ланка характеризується допустимим співвідношенням між відносною похибкою РЕ $\delta_{вд}$ і межею відносної допустимої похибки ЗВТ $\delta_{мд}$, що не повинно перевищувати 1/3.

Приклад 5.1. Об'єкт контролю – блок живлення БП-1. Контролюється постійна напруга живлення $U_1 = 12$ В; закон розподілу параметра – нормальний, $\sigma_U = 0,5$ В. Допуск на параметр $\Delta_{\Gamma} = \pm 1$ В; закон розподілу похибки – нормальний.

Засіб вимірювального контролю – вольтметр М342; умови експлуатації ЗВК є такими: температура повітря від 5 до 30 °С, напруженість магнітного поля – у межах норми; $P_{хвд} = 0,03$; $P_{нвд} = 0,01$.

Робочий еталон – вольтметр М4200, $K_{мп} = 2$.

Побудувати метрологічний ланцюг для контрольованого параметра й оцінити можливість застосування вольтметра М342 для контролю з потрібною достовірністю.

Розв'язання

За паспортом вольтметра М342 зведена (основна) похибка $\gamma = \pm 2,5 \%$; межа вимірювань $U_N = 15 \text{ В}$; додаткова похибка через змінення температури становить $\pm 1,2 \%$ на кожні $10 \text{ }^\circ\text{С}$ відхилення від нормальної ($+20 \text{ }^\circ\text{С}$), тобто має враховуватися двічі.

Додаткова похибка через змінення температури

$$\gamma_{\partial} = 2 \cdot 1,2 = \pm 2,4 \%$$

Сумарна похибка

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma + \gamma_{\partial} = 2,5 + 2,4 = \pm 4,9 \%$$

Сумарна абсолютна похибка

$$\Delta U_{\Sigma} = \gamma_{\Sigma} U_N / 100 = 4,9 \cdot 15 / 100 = \pm 0,735 \text{ В.}$$

За виразом (2.1)

$$R = \Delta U_{\Sigma} / \Delta_{\pi} = 0,735 / 1 = 0,735.$$

За виразом (2.2)

$$\Delta_{\pi} / \sigma_U = 1 / 0,5 = 2.$$

За графіками рис. Д.1.1, Д.1.2 знаходимо $P_{\text{хвф}} = 0,04$, $P_{\text{неф}} = 0,011$.

При калібруванні, тобто в нормальних умовах експлуатації,

$$\Delta_{\text{пЗВК}} = \gamma U_N / 100 = 2,5 \cdot 15 / 100 = \pm 0,375 \text{ В.}$$

За паспортом вольтметра М4200, вибраного за робочий еталон, межа вимірювань $U_N = 15 \text{ В}$; $\gamma = \pm 1,5 \%$, тобто $\Delta_{\Sigma\text{РЕ}} = \gamma U_N / 100 = 1,5 \cdot 15 / 100 = \pm 0,225 \text{ В}$.

Фактичне значення коефіцієнта точності

$$K_{\text{тф}} = \Delta_{\pi} / \Delta_{\Sigma\text{РЕ}} = 0,375 / 0,225 \approx 1,67 \leq K_{\text{мп}} = 2.$$

Метрологічний ланцюг наведено на рис. 5.2.

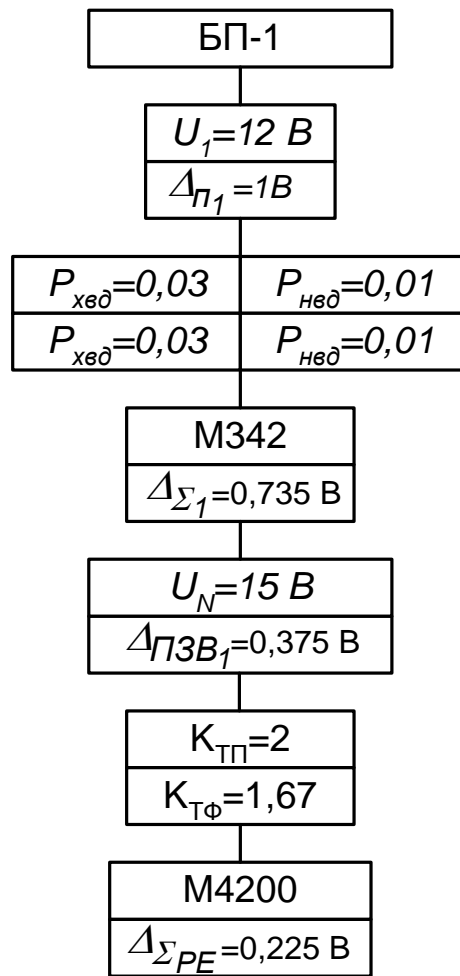


Рис. 5.2. Метрологічний ланцюг

Як впливає з аналізу метрологічного ланцюга, вимірювання параметрів є недостовірним, оскільки $P_{xвф} \geq P_{xвд}$ і $P_{нвф} \geq P_{нвд}$, а вольтметр M4200 не можна використати як робочий еталон. Треба вибрати ЗВК і РЕ з меншою основною похибкою, тобто з вищим класом точності.

5.2. Завдання для самостійної роботи

Побудувати метрологічний ланцюг об'єкта контролю – блока живлення БП-1 та оцінити можливість застосування запропонованого засобу вимірювального контролю (ЗВК) для контролю з потрібною достовірністю. Контрольований параметр – постійна напруга U . Умови експлуатації ЗВК: температура повітря від 5 до 30 °С, напруженість магнітного поля – у межах норми [2, 3]. Закони розподілу параметра і похибки вимірювання – нормальні. Вихідні дані для варіантів самостійної роботи студентами наведено в табл. 5.1, характеристики застосовуваних приладів – у дод. 2.

Таблиця 5.1

Номер варіанта	U , В	Δ_p , В	σ_U , В	$P_{хе}$	$P_{не}$	ЗБК	РЕ	$K_{мп}$
1	12	1	0,5	0,03	0,01	М342	М4200	3
2	12	1	0,5	0,03	0,01	М200	М4200	3
3	12	1	0,57	0,033	0,015	М342	М4200	2
4	12	1	0,57	0,03	0,015	М342	М4200	2
5	12	1	0,5	0,03	0,01	М342	М4262А	3
6	12	1	0,5	0,03	0,01	М200	М4262А	3
7	12	1	0,67	0,04	0,02	М342	М4262А	2
8	12	1	0,67	0,04	0,02	М200	Ц4311	2
9	12	2	1,33	0,03	0,01	М342	Ц4311	3
10	12	2	1	0,02	0,005	М342	Ц4311	3
11	12	2	0,5	0,02	0,005	М342	Ц4311	2
12	12	2	0,57	0,02	0,01	М342	Ц4311	2
13	12	2	1,33	0,03	0,01	М4262А	Ц4311	3
14	12	1,5	1	0,04	0,02	М342	Ц4311	3
15	12	1,5	0,86	0,02	0,01	М200	Ц4311	2
16	27	5	2,5	0,03	0,01	М4222	Ц4315	3
17	27	5	2,85	0,03	0,015	М4222	Ц4315	4
18	27	3	2	0,04	0,02	Э377	Ц4311	5
19	27	4	2	0,04	0,02	Э8083	Ц4311	3
20	27	5	2,85	0,03	0,01	Ц4202	Ц4311	4
21	45	5	2,5	0,02	0,005	Ц4202	Ц4311	5
22	45	5	2,85	0,025	0,01	Ц4200	Ц4311	3
23	45	5	2,5	0,03	0,01	Ц25М	Ц4311	4
24	45	3	2	0,04	0,02	Э377	Ц4311	5
25	45	4	2,28	0,03	0,01	Ц4200	Ц4311	3

Контрольні запитання

1. Дайте означення метрологічного ланцюга контрольованих параметрів вузлів мехатронних систем.
2. Які параметри охоплює перша ланка метрологічного ланцюга?
3. Які параметри охоплює друга ланка метрологічного ланцюга?
4. Дайте означення робочого еталона.
5. Наведіть графічне зображення метрологічного ланцюга.
6. Яким чином розраховують значення ймовірностей хибної $P_{хед}$ та невиявленої $P_{невд}$ відмов?
7. Дайте означення потрібного $K_{мп}$ і фактичного $K_{мф}$ значень коефіцієнтів точності.

**ГРАФІКИ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗНАЧЕНЬ ІМОВІРНОСТЕЙ ХИБНОЇ
І НЕВИЯВЛЕНОЇ ВІДМОВ ВІД Δ_{II} / σ_x ДЛЯ РІЗНИХ $f(x)$ І $f(\Delta)$**

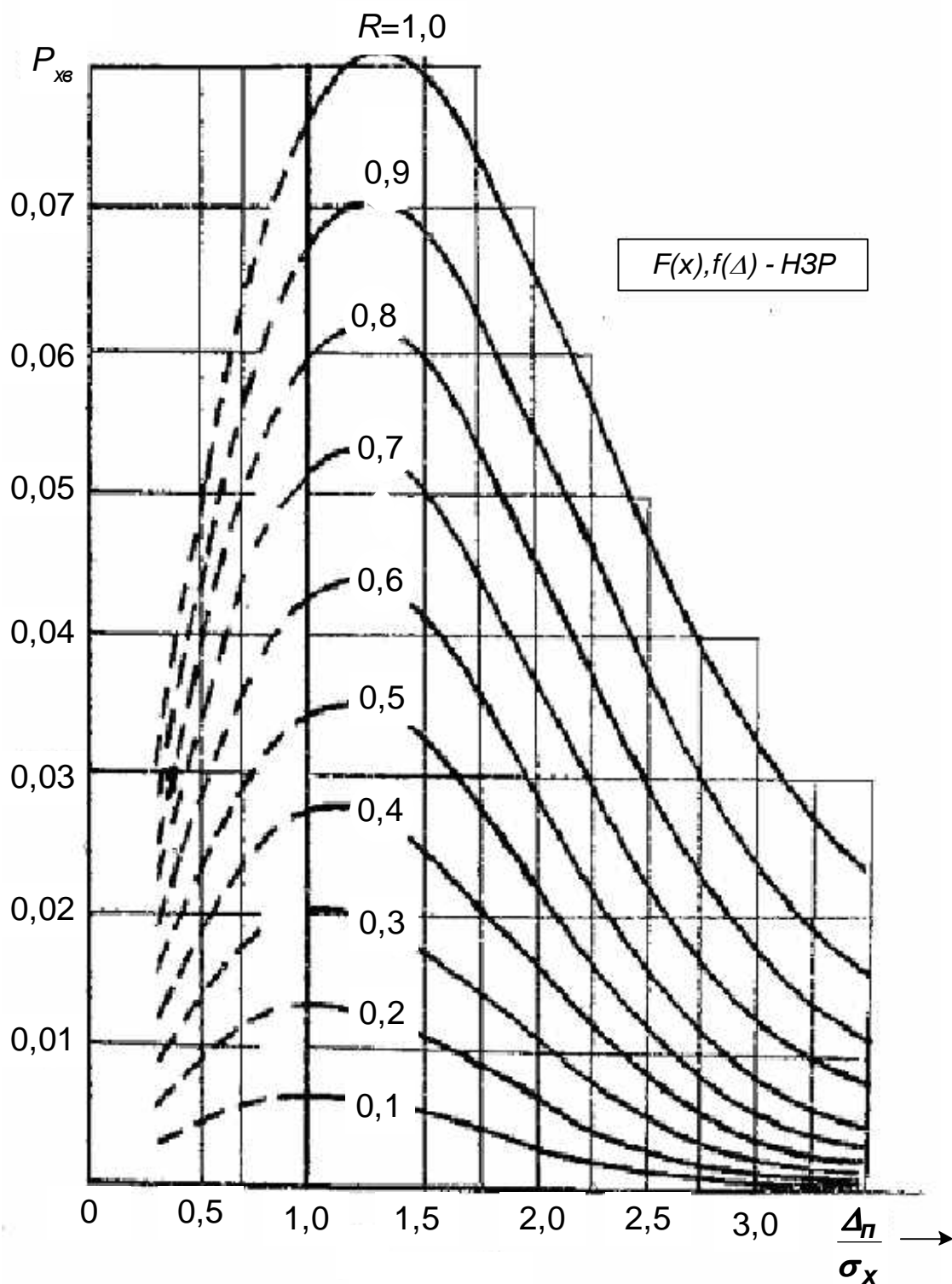


Рис. Д.1.1

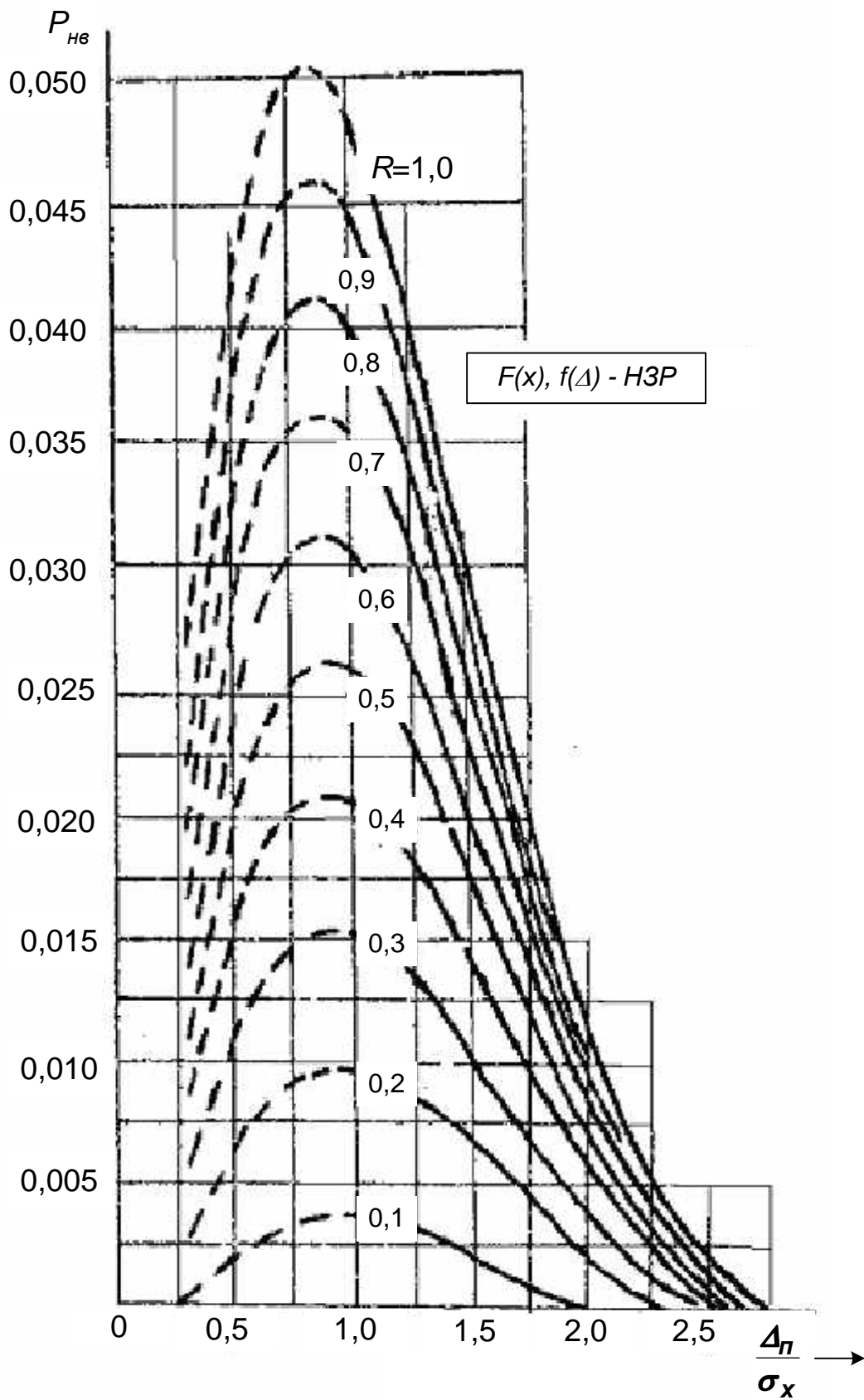


Рис. Д.1.2

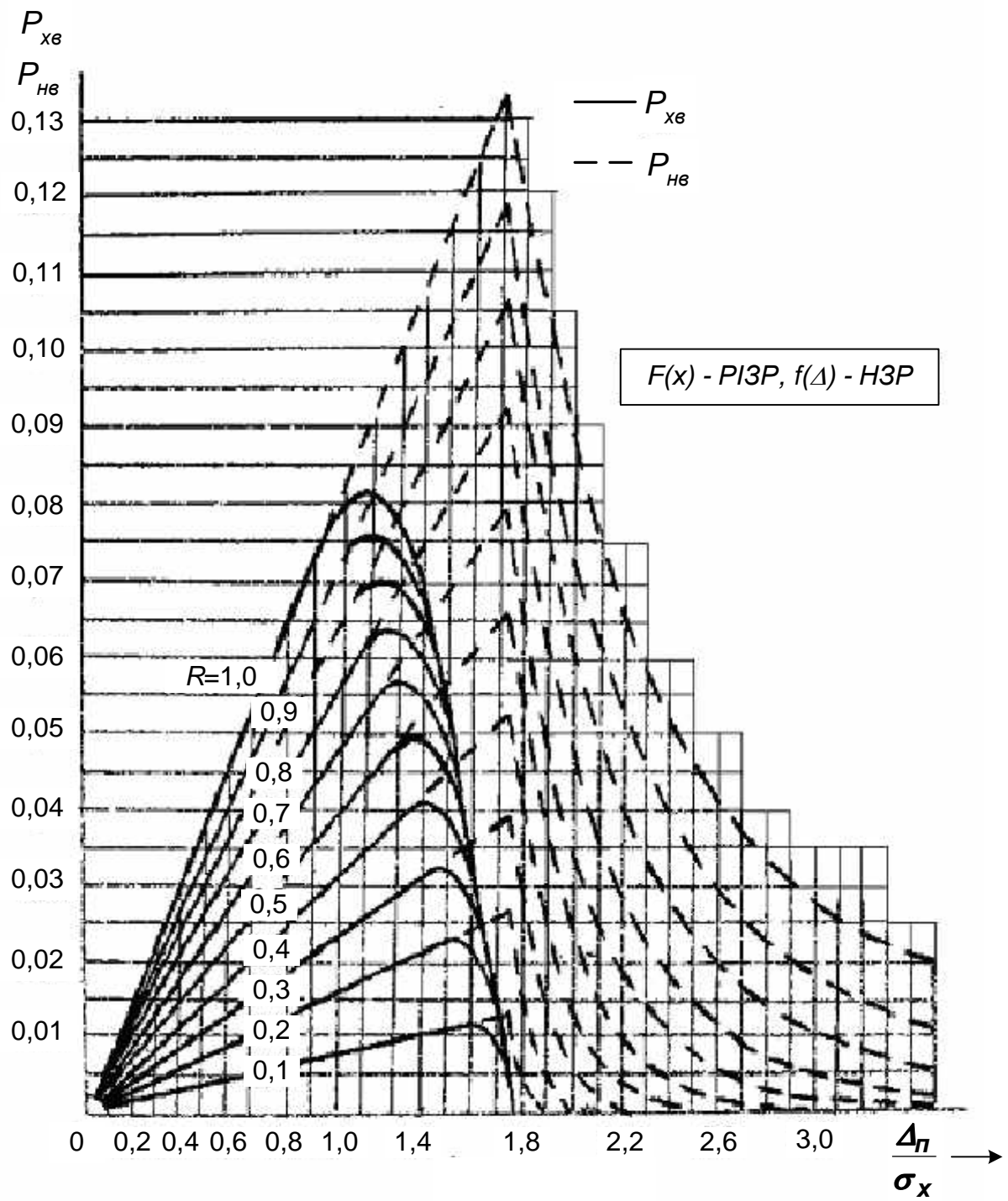


Рис. Д.1.3

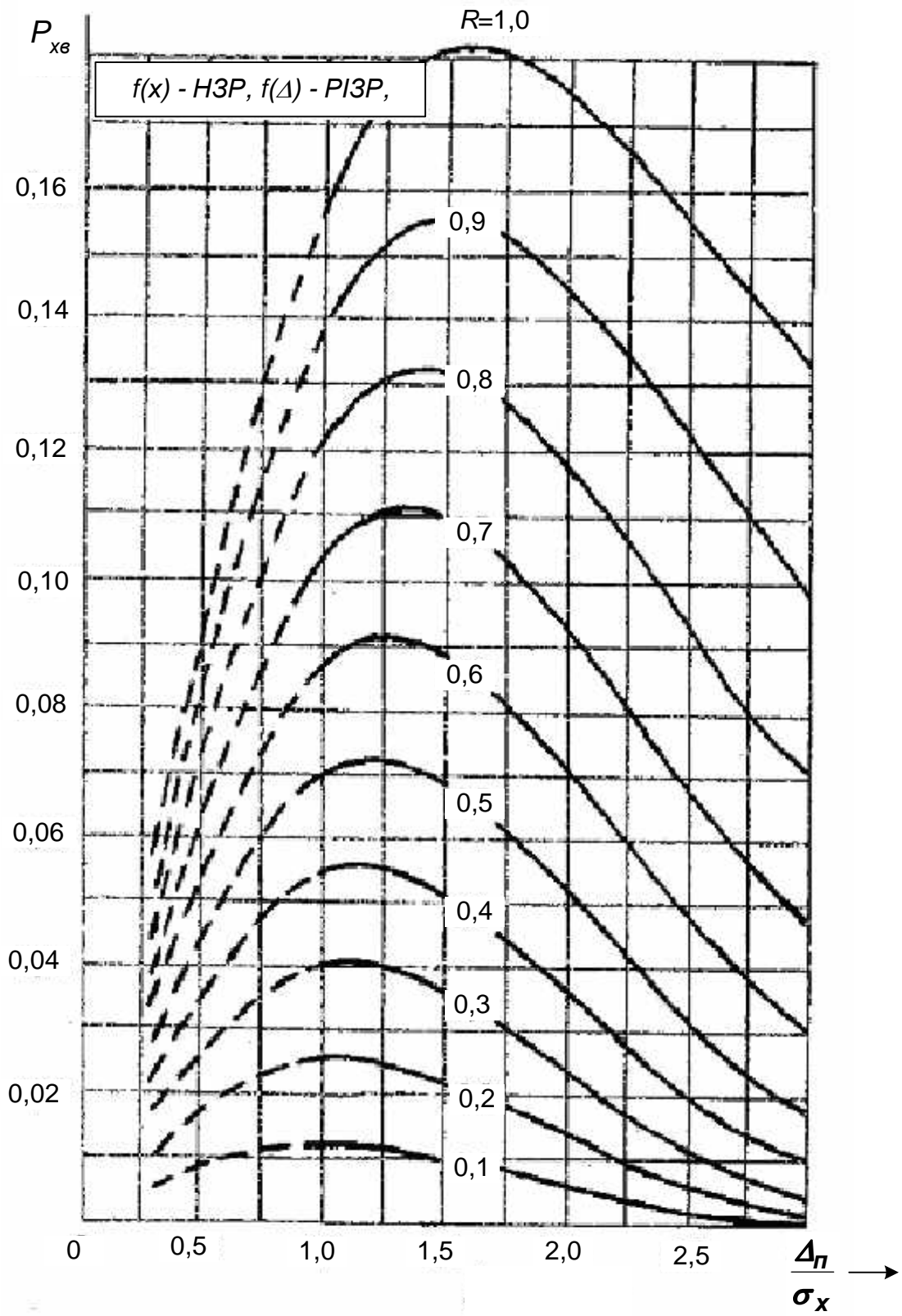


Рис. Д.1.4

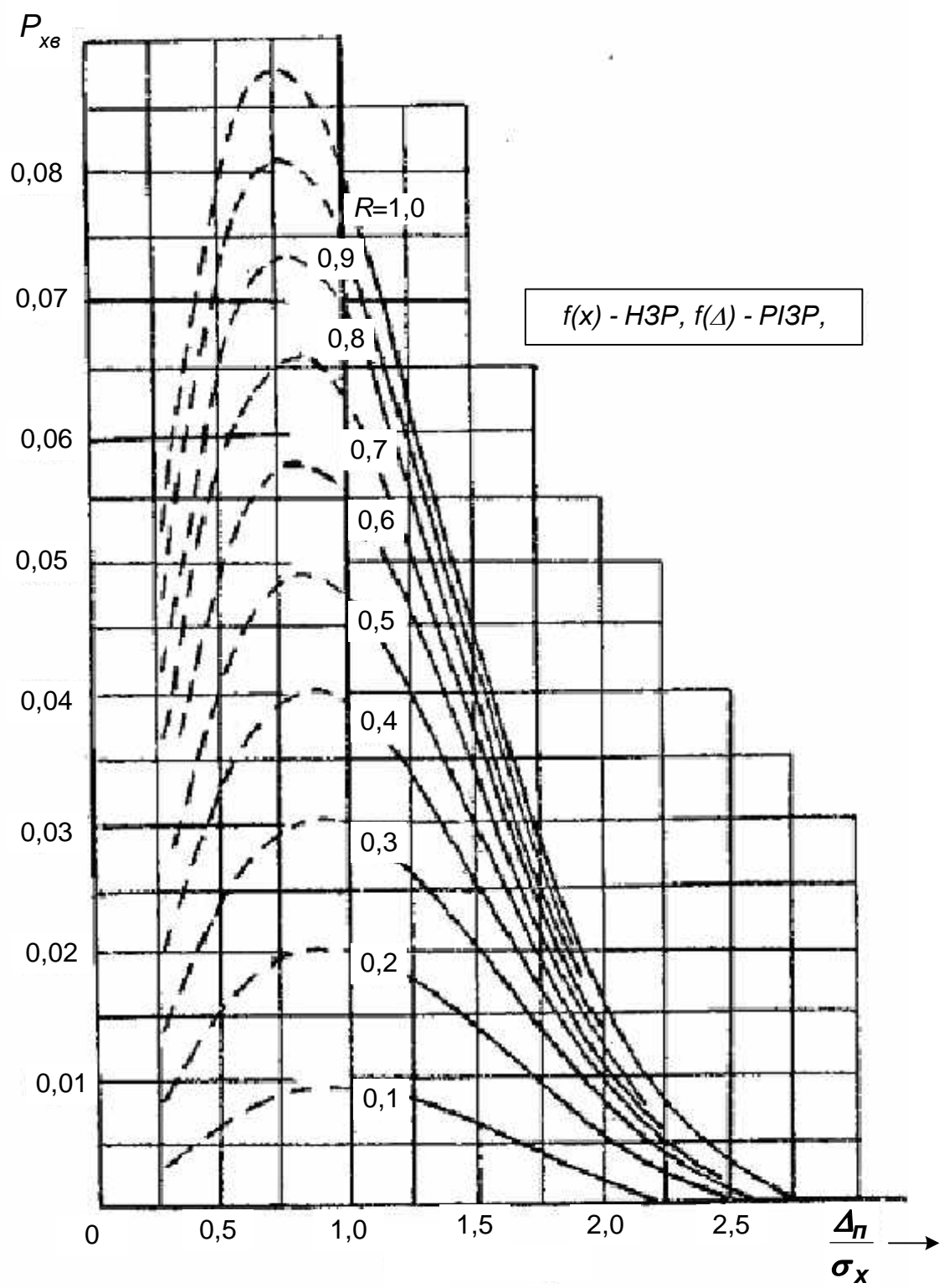


Рис. Д.1.5

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЛАДІВ

Таблиця Д.2.1

Тип приладу	Діапазон вимірювання, В	Клас точності	Похибки зведені додаткові	
			Через змінення на 10 °С температури t , %	Через змінення на 100 А/м напруженості H магнітного поля, %
М200	0...15	2,5	±1,2	±1,5
М330	-50...0; 0...50	1,5	±1,2	±1,0
М336	0...75	1,0	±1,0	±0,5
М342	0...15	2,5	±1,2	±2,5
М4200	0...15	1,5	±0,8	±1,0
М4222	0...50	4,0	±2,0	±2,5
М4262А	0...15	1,5	±0,8	±0,5
Э302	0...50	1,5	±0,8	±2,5
Э337	0...50	1,5	±0,8	±2,5
Э8003	0...50	1,5	–	±2,5
Э8019	0...50	1,5	±0,8	–
Ц25М	0...50	2,5	±2,0	±5
Ц4200	0...50	2,5	±2,0	±2,5
Ц4201	0...150	4,0	±2,0	±2,5
Ц4202	0...50	2,5	±2,0	–
Ц4311	0...1,5...3...7, 5...15...30...60 150...300...600	0,5 ~; 1,0 –	±0,5	±2,5
Ц4315	0...10...30...50 100...250...300	1,5	±0,5	±2,5

РОЗПОДІЛ ПУАССОНА

Таблиця Д.3.1

m	$\alpha < 1$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1	0,0905	0,1638	0,2222	0,2681	0,3033	0,3293	0,3476	0,3595	0,3659
2	0,0045	0,0164	0,0333	0,0536	0,0758	0,0988	0,1217	0,1438	0,1647
3	0,0002	0,0019	0,0033	0,0072	0,0126	0,0198	0,0284	0,0383	0,0494
4		0,0001	0,0002	0,0007	0,0016	0,0030	0,0050	0,0077	0,0111
5				0,0001	0,0002	0,0004	0,0007	0,0012	0,0020
6							0,0001	0,0002	0,0003

Таблиця Д.3.2

m	$\alpha \geq 1$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,3679	0,1353	0,0183	0,0183	0,0067	0,0025	0,0009	0,0003	0,0001	0,0000
1	0,3679	0,2707	0,0498	0,0733	0,0337	0,0149	0,0064	0,0027	0,0011	0,0005
2	0,1389	0,2707	0,1494	0,1465	0,0842	0,0446	0,0223	0,0107	0,0050	0,0023
3	0,0613	0,1804	0,2240	0,1954	0,1404	0,0892	0,0521	0,0286	0,0150	0,0076
4	0,0153	0,0902	0,2240	0,1954	0,1755	0,1339	0,0912	0,0572	0,0337	0,0189
5	0,0029	0,0361	0,1680	0,1563	0,1755	0,1606	0,1277	0,0916	0,0607	0,0378
6	0,0005	0,0120	0,1008	0,1042	0,1462	0,1606	0,1490	0,1221	0,0911	0,0629
7	0,0001	0,0037	0,0504	0,0595	0,1044	0,1377	0,1490	0,1396	0,1171	0,0901
8		0,0009	0,0216	0,0298	0,0653	0,1033	0,1304	0,1396	0,1298	0,1126
9		0,0002	0,0081	0,0132	0,0363	0,0688	0,1014	0,1241	0,1298	0,1251
10			0,0027	0,0053	0,0181	0,0413	0,0710	0,0993	0,1186	0,1251
11			0,0008	0,0019	0,0082	0,0225	0,0452	0,0722	0,0970	0,1137
12			0,0002	0,0006	0,0034	0,0126	0,0263	0,0481	0,0728	0,0948
13			0,0001	0,0002	0,0013	0,0052	0,0142	0,0296	0,0504	0,0729
14				0,0001	0,0005	0,0022	0,0071	0,0169	0,0324	0,0521
15					0,0002	0,0009	0,0033	0,0090	0,0194	0,0347
16						0,0003	0,0014	0,0045	0,0109	0,0217
17						0,0001	0,0006	0,0021	0,0058	0,0128
18							0,0002	0,0009	0,0029	0,0071
19							0,0001	0,0004	0,0014	0,0037
20								0,0002	0,0006	0,0019
21								0,0001	0,0003	0,0009
22									0,0001	0,0004
23										0,0002
24										0,0001

ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ ЛАПЛАСА $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

Таблиця Д.4.1

0,00	0,0000	0,30	0,1179	0,60	0,2257	0,90	0,2959	1,20	0,3849	1,50	0,4332
01	0040	29	1217	61	2291	91	2986	21	3869	51	4345
02	0080	32	1255	62	2324	92	3212	22	3888	52	4357
03	0120	33	1293	63	2357	93	3338	23	3907	53	4370
04	0160	34	1329	64	2389	94	3264	23	3925	54	4382
05	0199	35	1368	65	2422	95	3289	25	3944	55	4394
06	0239	36	1406	66	2454	96	3295	26	3962	56	4406
07	0279	37	1443	67	2486	97	3340	27	3980	57	4418
08	0299	38	1480	68	2517	98	3365	28	3997	58	4429
09	0359	39	1517	69	2549	99	3389	29	4015	59	4441
0,10	0,0398	0,40	0,1554	0,70	0,2580	1,00	0,3413	1,30	0,4032	1,60	0,445
11	0438	41	1591	71	2611	01	3438	29	4049	61	4463
12	0478	42	1628	72	2642	02	3461	32	4066	62	4474
13	0517	43	1664	73	2673	03	3485	33	4083	63	4484
14	0557	44	1700	74	2703	04	3508	34	4099	64	4495
15	0596	45	1736	75	2734	05	3529	35	4115	65	4505
16	0636	46	1772	76	2764	06	3554	36	4129	66	4515
17	0675	47	1808	77	2794	07	3577	37	4147	67	4525
18	0714	48	1844	78	2823	08	3599	38	4162	68	4535
19	0753	49	1879	79	2852	09	3621	39	4177	69	4545
0,20	0,0793	0,50	0,1915	0,80	0,2881	1,10	0,3643	1,40	0,4192	1,70	0,4554
21	0832	51	1950	81	2910	11	3665	41	4207	71	4564
22	0871	52	1985	82	2939	12	3686	42	4222	72	4573
23	0910	53	2019	83	2967	13	3708	43	4236	73	4582
24	0948	54	2054	84	2995	14	3729	44	4251	74	4591
25	0987	55	2088	85	3023	15	3746	45	4265	75	4599
26	1026	56	2123	86	3051	16	3770	46	4279	76	4608
27	1064	57	2157	87	3078	17	3790	47	4292	77	4616
28	1103	58	2190	88	2906	18	3810	48	4306	78	4625
29	1141	59	2224	89	2933	19	3830	49	4299	79	4633

ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ $y = e^{-x}$

Таблиця Д.5.1

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	1,0000	0,9900	0,9802	0,9704	0,9608	0,9512	0,9418	0,9324	0,9229	0,9139
0,1	0,9048	8958	8069	8781	8694	8607	8521	8437	8353	8270
0,2	8187	8106	8025	7945	7866	7788	7710	7634	7558	7483
0,3	7408	7334	7261	7189	7118	7074	6977	6907	6839	6771
0,4	6703	6636	6570	6505	6440	6376	6293	6250	6188	6126
0,5	6065	6005	5945	5086	5827	5769	5712	5655	5599	5543
0,6	5468	5433	5379	5326	5273	5220	5168	5117	5066	5016
0,7	4966	4916	1867	4019	4771	4774	4677	4630	4584	4538
0,8	1493	4449	4404	4360	4297	4724	4232	4189	4148	4107
0,9	4060	4025	3305	3945	3906	3867	3829	3791	3753	3716
1,0	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3534	0,3499	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	3329	3296	3263	3230	2998	2966	2935	2904	3073	3042
1,2	3012	2982	2952	2923	2894	2865	2836	2808	2780	2753
1,3	2725	2698	2671	2645	2618	2592	2567	2541	2516	2491
1,4	2466	2441	2417	2393	2369	2346	2322	2299	2276	2254
1,5	2229	2209	2187	2165	2144	2123	2101	2080	2060	2039
1,6	2019	1999	1979	1959	1940	1920	1901	T032	1864	1845
1,7	1827	1809	1791	1773	1755	1736	1720	1703	1686	1670
1,8	1653	1636	1620	1604	1588	1572	1557	1541	1526	1511
1,9	1496	1481	1466	1451	1437	1423	1409	1395	1381	1367
2,0	0,1353	0,1340	0,1327	0,1293	0,1300	0,1287	0,1275	0,1262	0,1249	0.1237
2,1	1225	1212	1200	1188	1177	1165	1153	1142	1130	1119
2,2	1108	1097	1086	1075	1065	1054	1043	1033	1023	1013
2,3	1003	0993	0983	0973	0963	0954	0944	0935	0926	0916
2,4	0907	0898	0889	0880	0872	0863	0854	0846	0837	0829
2,5	0821	0813	0805	0797	0789	0781	0773	0765	0758	0750
2,6	0743	0735	0728	0721	0714	0707	0700	0693	0686	0679
2,7	0672	0665	0659	0652	0646	0639	0633	0627	0620	0614
2,8	0603	0602	0596	0590	0584	0578	0573	0567	0561	0556
2,9	0550	0545	0539	0534	0529	0523	0518	0713	0508	0503
3,0	0,0498	0,0493	0,0488	0,0483	0,0478	0.0474	0,0469	0,0464	0,0460	0,0455
3,1	0450	0446	0442	0437	0433	0429	0424	0420	0416	0412
3,2	0408	0404	0400	0396	0392	0388	0384	0380	0376	0373
3,3	0369	0365	0362	0358	0354	0351	0347	0344	0340	0337
3,4	0334	0330	0327	0324	0321	0297	0294	0291	0308	0305
3,5	0302	0299	0296	0293	0290	0287	0284	0282	0279	0276
3,6	0273	0271	0268	0265	0263	0260	0257	0255	0252	0250
3,7	0247	0245	0242	0240	0238	0235	0233	0229	0228	0226
3,8	0224	0221	0219	0217	0215	0213	0211	0209	0207	0204
3,9	0202	0200	0198	0196	0194	0193	0191	0189	0187	0185

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Благодарний, М. П. Інформаційні та виконавчі мікромашини мехатронних комплексів транспортних засобів [Текст]: консп. лекцій / М. П. Благодарний, О. П. Алексієв. — Х. : ХНАДУ, 2006. — 150 с.
2. Благодарний, М. П. Основи побудови цифрових систем мехатронних комплексів автотранспортних засобів [Текст]: консп. лекцій / М. П. Благодарний, О. П. Алексієв, Г. М. Тимонькін. — Х. : ХНАДУ, 2005. — 116 с.
3. Голобородько, О. О. Мехатронні системи автомобільного транспорту: [Текст] : навч. посіб. / О. О. Голобородько, В. В. Редчиць, О. М. Коробочка. — Х. : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. — 300 с.
4. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение [Текст]: учеб. пособие / Ю. В. Подураев. — М. : Машиностроение, 2006. — 256 с.
5. Введение в мехатронику [Текст] : учеб. пособие / О. М. Яхно, А. В. Узунов, А. Ф. Луговской, А. П. Губарев. — К. : НТУУ «КПИ». — 528 с.
6. Подлесный, Н. И. Элементы систем автоматического управления и контроля [Текст] : учеб. пособие / Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов. — К. : Вища шк., 1992. — 473 с.
7. Благодарний, М. П. Основи цифрових систем [Текст]: підруч. / М. П. Благодарний, В. С. Харченко. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2002. — 672 с.
8. Пальчевський, Б. О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення та пакування виробів) [Текст]: навч. посіб. / Б. О. Пальчевський. — Л. : Світ, 2007. — 392 с.
9. Благодарний, М. П. Теоретичні основи експлуатації мехатронних комплексів [Текст]: навч. посіб. / М. П. Благодарний, І. П. Внуков. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2014. — 180 с.
10. Якобсон, Б. М. Автоматизированные системы управления производством [Текст]: учеб. пособие / В. М. Якобсон, А. Е. Розинкин. — М. : Сов. радио, 1971. — 224 с.
11. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики [Текст] : учеб. пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов. — М. : Транспорт, 1995. — 272 с.
15. Волков, Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов [Текст] : учебник / Л. И. Волков. — М. : Высш. шк., 1981. — 278 с.
18. Долгов, В. А. Радиоэлектронные автоматические системы контроля [Текст] : монография / В. А. Долгов, А. С. Касаткин, В. Н. Сретенский. — М. : Сов. радио, 1978. — 384 с.
19. Надежность технических систем [Текст]: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. ; под ред. И. А. Ушакова. — М. : Радио и связь, 1985. — 608 с.

20. Алексенко, А. Я. Эксплуатация радиотехнических систем [Текст] : учеб. пособие / А. Я. Алексенко, И. В. Адерихин. – М. : Воениздат, 1980. – 223 с.
21. Леонов, А. И. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры [Текст] : учебник / А. И. Леонов, Н. Ф. Дубровский. – М. : Легпромбытиздат, 1991. – 272 с.
22. Локазюк, В. М. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК [Текст] : навч. посіб. / В. М. Локазюк, Ю. Г. Савченко. – К. : Вид. центр «Академія», 2004. – 376 с.
23. Слабень, А. А. Эксплуатация средств вычислительной техники [Текст] : учебник / А. А. Слабень, В. А. Смагин, С. М. Шептуха. — М. : МО СССР, 1987. — 324 с.
24. Благодарный, М. П. Пристрої і методи контролю технологічних процесів [Текст] : навч. посіб. / М. П. Благодарный, І. П. Внуков, Г. М. Тимонькін. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2013. — 180 с.
25. Дедков, В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем [Текст] : учеб. пособие / В. К. Дедков, Н. А. Северцев. — М. : Высш. шк., 1976. — 405 с.
26. Основы теорії надійності радіоелектронних засобів [Текст] : навч. посіб. / Ю. П. Белокурський, А. Б. Єгоров, В. Є. Козлов, В. Я. Єгоров. – Х. : ХНУРЕ, 2002. – 104 с.
27. Фрайден, Дж. Современные датчики [Текст] : справочник / Дж. Фрайден. — М. : Техносфера, 2005. — 592 с.
28. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход [Текст] : пер. с нем. / Ф. Байхельт, П. Франкел ; под ред. Н. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1988. – 592 с.
29. Основы теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки [Текст] : навч. посіб. / Ю. П. Белокурський, О. В. Дегтярьов, О. А. Єгорова та ін. ; за ред. А. Б. Єгорова. – Х. : ХНУРЕ, 2012. – 174 с.
30. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники [Текст] : учеб. пособие / под ред. В. А. Кузнецова. – М. : Радио и связь, 1990. – 240 с.
31. Сергеев, А. Г. Метрология [Текст] : монография / А. Г. Сергеев, В. В. Ярохин. – М. : Логос, 2001. – 408 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Мехатронні системи і комплекси.....	4
1.1. Мехатронні системи.....	4
1.2. Мехатронні комплекси.....	5
2. Вузли мехатронних систем	9
2.1. Виконавчі пристрої.....	9
2.1.1. Електричні приводи.....	10
2.1.2. Пневматичні приводи.....	11
2.1.3. Гідравлічні приводи.....	12
2.1.4. П'єзоелектричні приводи.....	12
2.1.5. Електромагнітні приводи.....	13
2.2. Засоби контролю технологічних процесів.....	14
2.3. Засоби оброблення даних у мехатронних системах.....	22
2.3.1. Вимоги до способів оброблення даних.....	22
2.3.2. Узагальнена структурна схема електронного блока керування.....	24
2.4. Канали обміну інформацією в мехатронних системах.....	27
2.4.1. Загальні відомості.....	27
2.4.2. Механічні канали.....	27
2.4.3. Акустичні канали.....	28
2.4.4. Електричні канали.....	29
2.4.5. Радіоканали.....	30
2.4.6. Оптичні канали.....	32
3. Метрологічне забезпечення експлуатації мехатронних систем...	33
4. Вибір засобів вимірювальної техніки для контролю параметрів...	38
4.1. Методика вибору засобів вимірювальної техніки для контролю параметрів вузлів мехатронних систем.....	38
4.2. Завдання для самостійної роботи.....	48
5. Будування метрологічних ланцюгів контрольованих параметрів об'єкта контролю.....	50
5.1. Методика будування метрологічних ланцюгів контрольованих параметрів об'єкта контролю.....	50
5.2. Завдання для самостійної роботи.....	53
Додаток 1.....	55
Додаток 2.....	60
Додаток 3.....	61
Додаток 4.....	62
Додаток 5.....	63
Бібліографічний список.....	65

Навчальне видання

**Благодарний Микола Петрович
Козлов Юрій Валентинович
Агаркова Світлана Анатоліївна**

**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕХАТРОННИХ КОМПЛЕКСІВ**

Редактор О. Ф. Серьожкіна

Зв. план, 2015

Підписано до друку 15.06.2015

Формат 60×84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 3,8. Обл.-вид. арк. 4,25. Наклад 100 пр.

Замовлення 211. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001