

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Н.М. Защепкіна, О.В.Шульга, О.А. Наконечний

Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем

Навчальний посібник

*Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю
152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»,
спеціалізацією «Інформаційні вимірювальні технології екологічної безпеки»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 10 від 18.06.2020 р.)
за поданням Вченої ради Приладобудівного факультету
(протокол № 4/20 від 25.05.2020 р.)*

Автори: *Н.М. Защепкіна, д-р. техн. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського
О.В. Шульга, д-р. техн. наук, доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського
О.А. Наконечний, аспірант, КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Рецензенти: Р.В. СорокатиЙ д-р. техн. наук, проф., завідувач кафедри інформаційних технологій проектування, Хмельницький національний університет
*А.С. Зенкін, д-р. техн. наук, проф., Київський національний університет технологій та дизайну
Д.О. Шевчук, д-р. техн. наук, проф., Національний авіаційний університет*

Відповідальний редактор: *В.Г. Здоренко, д-р. техн. наук, проф., Київський національний університет технологій та дизайну*

Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А.

С 3-10 Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем : навч. посіб. для студ. спец. 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / Н. М. Защепкіна, О. В. Шульга, О. А. Наконечний – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 176 с. іл.

ISBN 978-617-7847-16-7

У навчальному посібнику розглянуто питання, що складають теоретичні основи аналізу та синтезу інформаційно-вимірювальних систем, базові елементи технічного і програмного забезпечення, методи визначення їх метрологічних характеристик та особливості нормування. Висвітлено проблему проектування і виготовлення ІВС та їх складових компонентів. Розглянуто завдання, що виконують метрологічні характеристики ІВС, інформаційні характеристики, структуру та алгоритми інформаційно-вимірювальних комплексів (ІВК). Приділено увагу використанню математичного аналізу та синтезу в процесах вимірювання із застосуванням ІВС.

Для студентів, які навчаються за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

УДК 681.518.3:006.91 (075.8)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ПЕРЕДМОВА.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНФОРМАЦІЙНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ (ІВС). ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ЗАДАЧІ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІВС.....	11
1.1. Визначення дефініції «інформаційно-вимірвальна система».	
Типологія ІВС.....	11
1.2. Призначення та особливості метрологічного забезпечення ІВС.....	14
1.3 Структура та класифікація ІВС.....	19
1.4. Задачі та зміст робіт із метрологічного забезпеченню ІВС.	
Загальні положення. Поняття.....	24
1.4.1. Поняття та положення метрологічного забезпеченню ІВС.....	24
1.4.2. Задачі та зміст робіт метрологічного забезпечення ІВС.....	28
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 1.....	32
РОЗДІЛ 2. ЗАВДАННЯ, ЩО ВИКОНУЮТЬ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІВС ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ НОРМУВАННЯ. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	33
2.1. Методи визначення, принципи та особливості нормування метрологічних характеристик ІВС.....	33
2.1.1 Методи визначення метрологічних характеристик ІВС.....	33
2.1.2. Принципи та особливості нормування метрологічних характеристик ІВС.....	34
2.1.3. Визначення метрологічних характеристик ІВС.....	35
2.1.4. Експериментальне визначення метрологічних характеристик ІВС.....	38
2.2. Дослідження та повірка ІВС. Розрахункові методи визначення метрологічних характеристик.....	41
2.2.1. Дослідження характеристик ІВС.....	41
2.2.2. Повірка метрологічних характеристик ІВС.....	45
2.2.3. Розрахункові методи визначення метрологічних характеристик.....	51
2.2.4. Визначення метрологічних характеристик програм розрахунку.....	51
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 2.....	54
РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ. КЛАСИФІКАЦІЯ, ІНФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СТРУКТУРА ТА АЛГОРИТМИ ІВК.....	55
1.1. Основні поняття, класифікація та структурні елементи ІВК.	
Галузь застосування і ознаки ІВК та ІВС.....	55

3.1.1. Основні визначення, область застосування і ознаки інформаційно-вимірювальних комплексів та інформаційно-вимірювальних систем (ІВК та ІВС).....	55
3.1.2. Класифікація ІВК. Основні структурні елементи ІВК.....	57
3.1.3. Основні вимоги до правил і методів випробування ІВК.....	59
3.2. Інформаційні характеристики ІВК.....	64
3.2.1. Приладовий стандартний інтерфейс (стандарт МЕК).....	64
3.2.2. Інтерфейс КАМАК.....	66
3.3. Роботизовані ІВК. Визначення промислового робота та його види. Сучасні концепції комплексної автоматизації ІВС та ІВК, основні визначення та задачі.....	69
3.3.1. Загальні відомості.....	69
3.3.2 Системи керування промисловими роботами.....	70
3.3.3 Сучасні концепції комплексної автоматизації ІВС та ІВК.....	72
3.4. Робот, як складова частина автоматизованого ІВК та об'єкт керування. Особливості взаємодії робота та людини в умовах виробництва.....	75
3.4.1. Робот, як складова частина автоматизованого ІВК та об'єкт керування.....	75
3.4.2 Особливості взаємодії робота та людини в умовах виробництва. Основні поняття, терміни, визначення.....	76
3.5. Основні технічні показники ПР. Системи основних координатних переміщень.....	80
3.5. Функціональна схема ПР.....	80
3.5.2. Класифікація ПР.....	81
3.5.3. Основні технічні показники промислових роботів.....	83
3.5.4. Системи основних координатних переміщень ПР.....	84
3.6. Типові кінематичні схеми роботів різної конструкції для ІВК та особливості їх використання. Поняття прямої та зворотної задач кінематики.....	88
3.6.1 Кінематичні схеми ПР.....	88
3.6.2. Типові кінематичні схеми роботів різної конструкції для ІВК та особливості їх використання.....	92
3.6.3. Поняття прямої та зворотної задач кінематики.....	95
3.7. Дистанційне та автоматичне управління роботами при дослідженнях ІВК. Принципи побудови систем керування.....	99
3.7.1. Системи дистанційного керування роботами.....	99
3.7.2. Системи автоматичного керування ПР.....	103
3.7.3. Циклові системи керування ПР.....	105
3.7.4. Позиційно-контурні та адаптивні системи керування промисловими роботами.....	106
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 3.....	111

РОЗДІЛ 4. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ І ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ІВС І ІВК. СУЧАСНА ЕЛЕМЕНТНА БАЗА КАНАЛІВ ВИМІРЮВАНЬ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ.....	113
4.1. Мікропроцесорні контролери та мікроконтролери. Класифікація мікроконтролерів та мікропроцесорів.....	113
4.1.1 Основні визначення. Класифікація мікропроцесорних контролерів (МПК).....	114
4.1.2. Класифікація однокристальних мікроконтролерів (ОМК).....	115
4.2. Основні архітектури сучасних ОМК.....	119
4.3. Аналогово-цифрові перетворювачі. Розрядність. Типи перетворення. Похибки квантування. Апертурна похибка. Частота дискретизації. Підмішування псевдовипадкового сигналу(dither). АЦП порівняння з пилоподібним сигналом. АЦП із врівноваженням напруги.....	119
4.3.1.Способи вводу аналогового сигналу в мікроконтролер.....	119
4.3.2. АЦП порівняння з пилоподібним сигналом. АЦП із врівноваженням напруги.....	123
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 4.....	126
РОЗДІЛ 5. ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ У ПРОЦЕСАХ ВИМІРЮВАННЯ ЗА УЧАСТЮ ІВС. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИДІВ МОДЕЛЮВАННЯ, МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЗОВАНИХ ІВС....	128
5.1. Математичне моделювання процесу вимірювання. Основні визначення. Класифікація видів моделювання та математичних моделей. Етапи побудови математичних моделей.....	128
5.1.1. Моделювання ІВК та ІВС, як метод наукового пізнання.....	128
5.1.2. Класифікація видів моделювання.....	129
5.1.3. Класифікація математичних моделей.....	130
5.2. Етапи побудови математичних моделей.....	131
5.2. Моделювання ланок автоматичних систем вимірювання. Передавальні функції та частотні характеристики ланок ІВК.....	133
5.2.1 Перетворення Лапласа і його властивості.....	133
5.2.2.Передавальні функції та частотні характеристики ланок.....	135
5.3. Перетворення багатоконтурних структурних схем автоматизованих ІВС. Основні припущення при структурному аналізі. Види з'єднань ланок та їх математичний опис.....	138
5.3.1. Основні припущення при структурному аналізі.....	138
5.3.2. Види з'єднань ланок та їх математичний опис.....	139
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 5.....	142
ДОДАТКИ.....	144
ДОДАТОК А. ПРИКЛАД ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ	144

ДОДАТОК Б. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ	150
ДОДАТОК В. СПОСОБИ ЗАПИСУ ЛІНІЙНИХ ТА КУТОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ОДНОРІДНИХ КООРДИНАТАХ.....	154
ДОДАТОК Г. ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗКУ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ КІНЕМАТИКИ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТУ	156
ДОДАТОК Д. РОЗВ'ЯЗОК ЗВОРотної ЗАДАЧІ КІНЕМАТИКИ МАНІПУЛЯТОРА ПР ТОЧНИМ І НАБЛИЖЕНИМ МЕТОДАМИ.....	161
ДОДАТОК Е. ДИНАМІКА МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПР. ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ. СКЛАДАННЯ РІВНЯНЬ РУХУ МАНІПУЛЯТОРА У ЗАГАЛЬНИХ КООРДИНАТАХ.....	167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	172

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

A – тип оцінки невизначеності із стандартним відхиленням uA ;
B – тип оцінки невизначеності стандартним відхиленням uB ;
ЗВ – засіб вимірювання;
ІВС – інформаційно-вимірювальна система;
ВС – вимірювальна система;
ІС – інформаційна система;
МХ – метрологічні характеристики;
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
ГВС – гнучка вимірювальна система;
МЗ – метрологічне забезпечення;
ВК – вимірювальний канал;
АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом;
НМХ – нормовані метрологічні характеристики;
ТД – технічна документація;
ДМКН – Державний метрологічний контроль і нагляд;
НД – нормативна документація;
МЕ – метрологічна ефективність;
ТЗ – технічне завдання;
ТУ – технічні умови;
ОДМС – органи державної метрологічної служби;
ІВК – інформаційно-вимірювальний комплекс;
ГВС – гнучкі виробничі системи;
ВВ – впливові величини;
 $f_{sa}(x)$ – одиниця вхідного сигналу ВК системи;
 Δ_S – систематичні ефекти;
 Δ_{SP} – допустиме відхилення функції перетворення ВК;
 θ_{BK} – номінальне значення поправки;
 $\sigma(\Delta_S)$ – стандартне відхилення;
 $M(\Delta_S)$ – типова поправка нормування;
 Δ_{BK} – характеристики невизначеності показань;
ДХ – динамічні характеристики;
ММ – математична модель;
ЕД – експлуатаційна документація;

МА – метрологічна атестація;
МПІ – міжповірочний інтервал;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ОЗУ – оперативно – запам'ятовуючий пристрій;
МЕК – міжнародна електротехнічна комісія;
ДСПА – Державна система промислових приладів і засобів автоматизації;
ПР – промисловий робот;
САПР – система автоматизації проектування;
ЗП – задавальний пристрій ПР;
ВП – виконавчий пристрій ПР;
МПК – мікропроцесорний контролер;
МП – мікропроцесор;
ОМП – однокристальний мікропроцесор;
ОМК – функціонально закінчений МПК;
 α_β – похибка введення даних;
 α_m – похибки методу;
 α_n – похибки підрахунку;
 α – сумарна похибка розв'язку;
 $x_{вх.}(t)$ – вхідний сигнал ланки ІВС;
 $x_{вих.}(t)$ – вихідний сигнал ланки ІВС;
 p – оператор Лапласа;
 ω – частота сигналу;
 $W(p)$ – передавальна функція ланки ІВС;
 $X_{зз}$ – сигнал зворотного зв'язку замкненої системи.

ПЕРЕДМОВА

В наведеному матеріалі навчального посібника розглядаються питання, що складають теоретичні основи аналізу та синтезу інформаційно-вимірювальних систем (ІВС).

До тем, що підлягають вивченню, віднесені принципи побудови ІВС та ІВК. Розглянуто завдання, що виконують метрологічні характеристики ІВС та особливості їх нормування. Описано експериментальні і розрахункові методи дослідження метрологічних характеристик та повірки ІВС.

Наведено основні визначення, область застосування та ознаки інформаційно-вимірювальних комплексів та інформаційно-вимірювальних систем (ІВК та ІВС). Приділена увага класифікації ІВК, основним вимогам до правил і методів їх випробування ІВК. Охарактеризовано приладові інтерфейси ІВК. Наведено особливості функціонування роботизованих ІВК і сучасні концепції комплексної автоматизації ІВС та ІВК.

Розглянуто сучасну елементну базу інформаційного забезпечення ІВК та ІВС, основні принципи роботи мікроконтролерів (МК) та мікропроцесорних контролерів (МПК), їх класифікація. Охарактеризовано основні особливості роботи аналогово-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів, наведено основні способи вводу аналогового сигналу в мікроконтролер (МК).

У навчальному посібнику описано загальні положення математичного моделювання процесу вимірювання. Дано основні визначення, класифікація видів моделювання та математичних моделей автоматизованих ІВС. Розглянуто етапи побудови математичних моделей.

Навчальний посібник призначений для студентів-здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня магістр за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні технології екологічної безпеки» спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

ВСТУП

Основна тенденція проведення вимірів в автоматизованому виробництві – це перехід до машинного контролю за адаптивними моделями, використання більш складного керування в інформаційно-вимірювальних системах (ІВС). У зв'язку з цим, різко зростає значення метрологічних характеристик вимірювальних каналів, що враховують метрологічні характеристики не лише всіх включених у вимірювальний канал блоків, але і тимчасові впливи каналів один на одного.

Дисципліна «Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем» включена в учбовий план підготовки фахівця з напрямку спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» освітньої програми «Інформаційна вимірювальна техніка екологічної безпеки», оскільки готує майбутнього інженера-метролога до вирішення завдань аналізу і синтезу інформаційно-вимірювальних систем, знайомить з особливостями технології перетворення вимірюваних величин в цифрову форму та проблемами метрологічного забезпечення ІВС.

Вивчення дисципліни ґрунтується на знаннях, отриманих в результаті вивчення дисциплін: «Вища математика», «Фізика», «Основи електроніки пристроїв інформаційно-вимірювальної техніки», «Методи та засоби вимірювань», «Пристрої інформаційно-вимірювальної техніки», «Перетворювачі фізичних величин», «Вимірювальні перетворювачі», відноситься до групи спеціальних дисциплін та забезпечує подальшу вузькопрофесійну підготовку інженера-метролога за фахом 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

В результаті вивчення дисципліни студент повинен отримати уявлення про проблеми системних вимірів, особливості побудови інформаційно-вимірювальних систем і перспективи їх розвитку; знати і вміти використовувати теоретичні основи аналізу та синтезу інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), організацію взаємодії і передачі інформації між структурними елементами інформаційно-вимірювальних систем, а також способи обробки та відображення інформації в ІВС.

На практичних заняттях студент повинен отримати навички проведення оцінки роботи ІВС та розробки метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем різного складу та призначення.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНФОРМАЦІЙНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ (ІВС). ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ЗАДАЧІ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІВС

1.1. Визначення дефініції «інформаційно-вимірвальна система». Типологія ІВС

Сучасні інформаційні технології, що забезпечують вимірвальні процеси, характеризуються наявністю специфічних інформаційних вимірвальних процедур:

- отримання вимірвальної інформації про досліджуваний об'єкт, що надходить із первинних вимірвальних перетворювачів, які взаємодіють із об'єктом вимірювань;
- процедура первинної обробки інформації про досліджуваний об'єкт із заданою точністю та достовірністю;
- порівняння сигналів вимірвальної інформації із заданими одиницями виміру;
- оцінка невизначеності значень вимірюваних величин та її подання в стандартизованому вигляді.

Завдяки застосуванню сучасних апаратних і програмних засобів вимірвальні інформаційні технології реалізують додаткові властивості. Основними завданнями, у процесі розвитку інформаційних вимірвальних технологій, є розширення діапазону вимірюваних величин та забезпечення точних та достовірних вимірів в умовах навколишнього середовища що змінюється динамічно [6, 9, 26].

Вирішення подібних завдань пов'язано з ускладненням структури засобів вимірювань (ЗВ), які використовуються; створенням комплексів взаємопов'язаних ЗВ і технічних засобів, необхідних для їх функціонування. Сучасні об'єкти дослідження характеризуються великою кількістю параметрів, що змінюються у часі з великою швидкістю.

Для отримання усієї сукупності інформації про конкретний об'єкт вимірювань часто необхідно застосовувати комплексний підхід. При цьому значення вимірюваної величини розраховується із використанням функціональних залежностей між дослідною та розрахунковою величиною.

Зазначені завдання досить успішно вирішуються за допомогою інформаційних вимірвальних систем (ІВС), що набули широкого засто-

сування. Нині немає загальноприйнятого однозначного визначення, що таке ІВС. Серед існуючих підходів до розгляду поняття ІВС слід виділити два основних.

Вимірювальною системою (ВС) можна вважати функціонально об'єднані вимірювальні процеси та вимірювальні прилади що їх забезпечують. У свою чергу вимірювальні прилади включають первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП), аналогово-цифрові (АЦП) та цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі, канали передачі даних, електронні обчислювальні засоби (ЕОМ) та периферійні пристрої. Це дозволяє забезпечити процес визначення властивостей об'єкту вимірювань та їх відображення за допомогою сигналів вимірювальної інформації [10, 11].

1) В залежності від призначення, вимірювальні системи (ВС) поділяють на вимірювальні інформаційні, вимірювальні контролюючі, вимірювальні управляючі системи та ін.

2) Вимірювальну систему, побудовану в залежності від зміни вимірювального завдання, називають гнучкою вимірювальною системою (ГВС).

Будь-яка *інформаційна система (ІС)* може являти собою основу для побудови більш складної структури – *інформаційно-вимірювальної системи (ІВС)*. ІВС дозволяє забезпечити наступні функції: вимірювання (класифікація, розпізнавання, вимірювальний контроль), інформаційну, логічну, діагностики та ін.

Необхідно відзначити один важливий момент – ІС (а також ІВС) розглядаються як різновид ЗВ. Для забезпечення ефективного функціонування складних вимірювальних систем (ІВС) необхідно розмежовувати вимірювальні канали формуючи з них окремі підсистеми.

Окремі складові частини ІВС можуть виготовляватися різними виробниками та мати різну комплектацію, технічну документацію (технічні умови), що регламентують метрологічні вимоги до ІВС. Тому, можуть виникнути труднощі із проведенням випробувань для затвердження типу ІВС. Також, це утруднює масштабування ІВС у процесі експлуатації, та заміну її складових компонентів в залежності від вимірювальних завдань, які вона повинна реалізовувати. Дана вимога необхідна у випадку застосування ІВС як єдиного, закінченого виробу безпосередньо на місці проведення процесу вимірювань [17, 26].

Для забезпечення відповідної регламентації здійснюється виділення підсистем у рамках більш складної ІВС. В подальшому викладі, під

скороченням ІВС буде розумітися термін «Інформаційно-вимірювальна система» як найбільш поширений і застосовуваний.

Назва «інформаційна» вказує:

- на кінцевий продукт, одержаний за допомогою ІВС. Кінцевим продуктом є саме інформація (експериментальна, кількісна) про стан матеріальних об'єктів та про процеси, що протікають в них. Об'єктом може бути сировина, готові промислові вироби, природні процеси або живі організми;
- на приналежність ІВС до ширшої області інформаційної техніки. Ця область має також інші складові частини. До неї можна включити засоби обчислювальної техніки (ЕОМ), засоби зв'язку, зберігання та первинної обробки вимірювальної інформації, що можуть входити до складу ІВС. Важливою функцією ІВС є процес якісного та кількісного відображення властивостей фізичного світу у доступній для кінцевого спостерігача формі.

Основний процес емпіричного пізнання – «вимір», за допомогою якого з'являється первинна кількісна інформація. Тому до поняття «інформаційна» додається уточнююче визначення «вимірювальна» [26, 34].

Однією з умов розгляду ЗВ як системи є необхідність і доцільність змін його структури. Зміни можуть здійснюватися від застосування до застосування (багатофункціональна система), та у процесі застосування (керована або адаптивна системи). Якщо структура ЗВ незмінна і умови його використання залишаються однаковими протягом періоду експлуатації, можливо визначити модель ЗВ типу «вхід-вихід». Наприклад, електронні вимірювальні засоби (засоби вимірювальної техніки – ЗВТ), що мають декілька каналів для вимірювання однієї фізичної величини у строго визначеному діапазоні та мають нормовані метрологічні характеристики (МХ) не можна розглядати із системних позицій.

Автоматизація також не обов'язково пов'язана із структурою ЗВ, тому її трактують як систему. Компактний прилад, що розглядається як єдиний виріб, може бути високоавтоматизованим. Наприклад, при розгляді інформаційних вимірювальних процедур, що можна реалізувати сучасним цифровим вольтметром, в автоматичному режимі задаються діапазон вимірювань, тип вимірювальної фізичної величини та періодичність самодіагностики. Уточнююче поняття «система», у дефініції «ІВС», вказує

на необхідність врахування складності структури ЗВ, навіть в тому випадку, якщо він є одноканальним.

Інформаційні вимірювальні системи (ІВС), у процесі свого розвитку, можна класифікувати на дві підгрупи [10, 11, 36].

До *першої групи* відносяться системи, структура і функції яких однозначно узгоджені. Вимірювальна функція таких систем є головною, в той час як інформаційні функції, що забезпечують відображення результатів вимірювань є допоміжними.

До *другої групи* можна віднести вимірювальні системи що є інформаційно-вимірювальними в широкому сенсі. Такі ІВС дозволяють реалізовувати крім вимірювальної також функції контролю, діагностики, генерації команд для виконуючих пристроїв.

1.2. Призначення та особливості метрологічного забезпечення ІВС

Будь-яка найдосконаліша та інтелектуальна ІВС повинна бути метрологічно коректною а також мати кваліфікацію системи забезпечення єдності вимірювань відповідно до державних законодавчих актів та міжнародних нормативних документів (ISO, OIML та ін.) Виділення ІВС в окремий специфічний різновид систем вимірювань (СВ) обумовлено рядом певних особливостей, що породжують певну специфіку їх метрологічного забезпечення (МЗ).

Актуальними питаннями теоретичної підтримки вирішення проблем метрологічного забезпечення ІВС є: регламентація метрологічних характеристик (МХ) вимірювальних каналів (ВК), експериментальне визначення і контроль МХ, прогнозування та визначення характеристик невизначеності вимірювання.

Сучасний етап розвитку ІВС висуває низку вимог до опису властивостей вимірювальних систем. Це пов'язано з ускладненням вимірювальних завдань та умовами експлуатації засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Більшість вимірювального обладнання, що використовується як самостійні засоби вимірювань, для яких клас точності однозначно визначає їх нормовані метрологічні характеристики, не придатні для системного застосування у складі ВК ІВС [6, 11].

При синтезі вимірювального каналу (ВК) ІВС виникає необхідність застосування ЗВ та допоміжних пристроїв, що формують ВК з нормованими

метрологічними характеристиками, що дозволяє комплексно визначати МХ вимірювального каналу ІВС. Постає важливою можливістю інтелектуалізації ЗВ та ІВС, що забезпечується включенням у їх структуру мікропроцесорних засобів та ЕОМ. Це забезпечує проведення вимірювань у режимі реального часу (або із затримками близькими до реального часу), керування вимірювальними процедурами. В той же час, дана властивість автоматизованих ІВС потребує створення керуючих алгоритмів та спеціалізованого програмного забезпечення, що є важливим метрологічним аспектом. Результати аналізу основних особливостей ІВС і проблеми МЗ ІВС, що виникають у зв'язку з цим, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Взаємозалежність основних особливостей ІВС та проблем їх метрологічного забезпечення [26]

<i>Особливості ІВС</i>	<i>Перелік проблем МЗ ІВС</i>
1. Багатофункціональність	Необхідність вимірювання декількох фізичних величин одночасно, комплексні вимірювання стану об'єкту, прогнозування його властивостей
2. Забезпеченість електронними обчислювальними компонентами	Рішення задач, пов'язаних з оцінкою якості алгоритмів обробки обчислень
3. Наявність великої кількості вимірювальних каналів (ВК)	Спотворення вимірювальної інформації внаслідок взаємодії ВК між собою, складність оцінки впливових факторів
4. Високий ступінь інтеграції зразків ІВС у середовище, що містить об'єкт чи процес вимірювань	Утруднення проведення процедур контролю метрологічних характеристик зразків ІВС
5. Структурна та функціональна складність об'єктів досліджень	Трудомісткість завдань опису параметрів досліджуваних об'єктів та створення їх математичних моделей
6. Агрегатний спосіб побудови ІВС	Дослідження МХ ІВС можливе лише після закінчення її встановлення та запуску
7. Просторова рознесеність складових частин ІВС	Вплив відмінних умов експлуатації компонентів ІВС на її МХ
8. Структурні зміни у складі ІВС під час експлуатації	Необхідність нормування МХ для зразків ІВС різної комплектації
9. Робота ІВС у динамічному режимі	Складність дослідження динамічних параметрів ІВС в режимі реального часу

Вимоги до метрологічного забезпечення ІВС формуються під час їх проектування та залежать від координації дії служб метрологічного контролю, розробників, виробників конкретної ІВС та зворотного зв'язку що надається кінцевими споживачами. Якщо ІВС є частиною більш складної автоматизованої системи, для її ефективного функціонування у складі такої системи застосовують положення технічної документації та вимоги нормативних документів. При розгляді ІВС як частини більш складної системи її можна розглядати на функціональному рівні.

Напрямок метрологічного забезпечення ІВС включає широке коло дослідних робіт:

- метрологічні характеристики (МХ) ІВС повинні мати єдині вимоги;
- необхідність розробки стандартизованих засобів та методів контролю метрологічних характеристик ІВС;
- проведення процедур метрологічної експертизи супровідної технічної документації (ТД) на зразок ІВС;
- проведення випробувань ІВС із метою затвердження її типу;
- забезпечення єдності і достовірності вимірювань отриманих при роботі ІВС;
- проведення випробувань на відповідність ІВС затвердженому типу;
- розробка на основі аналізу стану метрологічного забезпечення ІВС комплексних програм його розвитку;
- забезпечення метрологічного контролю та нагляду за станом і застосуванням ІВС державними контролюючими органами у галузі;
- забезпечення первинної повірки і калібрування ІВС затвердженого типу та атестація її програмного забезпечення;

Процедури контролю метрологічного забезпечення ІВС дозволяють визначати показники метрологічної справності систем у процесі їх експлуатації і їх відповідність вимогам нормативної та технічної документації. Дані положення, також, стосуються ІВС що знаходяться в процесі розробки та виготовлення, і забезпечують заходи направлені на вдосконалення характеристик ІВС та їх метрологічного забезпечення. Важливою умовою ефективності метрологічного забезпечення ІВС є необхідність переліку вимірювальних каналів ІВС та їх МХ в технічній документації на виріб [5, 13, 26].

Органами державного метрологічного контролю і нагляду (ДМКН) регламентуються наступні вимоги до складу та умов роботи ІВС:

- наявність нормативної документації, що визначає порядок розробки, виробництва та умов експлуатації інформаційних вимірювальних систем, забезпечує точність і достовірність вимірів отриманих у процесі їх функціонування та правила і порядок перевірки ІВС в умовах експлуатації;
- забезпечення метрологічної експертизи проектної, конструкторської та технологічної документації;
- контроль умов експлуатації ІВС на всіх етапах її життєвого циклу;
- розробка та стандартизація повірочних схем, вторинних еталонів для забезпечення ефективного функціонування ІВС;
- регламентація процедур повірки інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) під час технічної експлуатації, з дотриманням міжповірочних інтервалів [10, 12, 34].

Головною метою метрологічної експертизи технічної документації ІВС є виконання вимог до метрологічного забезпечення визначеними методами і засобами, із врахуванням цілей МЕ та змістом технічної документації. У процесі життєвого циклу ІВС проводиться метрологічна експертиза:

- *технічного завдання (ТЗ)* що включає вихідні дані для розробки, проектування ІВС на всіх етапах їх проектування (розробки);
- *технічних умов (ТУ)* конструкторської і технологічної документації для широкого спектру ІВС вітчизняного виробництва під час їх розробки та виготовлення;
- *проектної документації на виріб* (на етапі проектування ІВС), що забезпечує виготовлення, комплектування, монтажні та налагоджувальні роботи вибраних ІВС на об'єкті;
- *супровідної документації на виріб*, у випадку коли складова частина ІВС виготовлена стороннім виробником або застосовується в одиничному екземплярі у складі ІВС. У цьому випадку проводиться вивчення технічних характеристик складової частини ІВС та експертиза проектної документації, з метою встановлення доцільності інтеграції вибраного компонента у склад ІВС та регламенту проведення монтажних та налагоджувальних робіт.

Проведення метрологічної експертизи ТД на виробництві забезпечується метрологічними службами (МС) підприємств у процесі розробки, виготовлення та експлуатації ІВС. З боку державних органів метрологіч-

ного контролю метрологічну експертизу проводять органи державної метрологічної служби (ОДМС), організації метрологічної служби в окремих галузях і сферах виробництва та фахівці державних наукових метрологічних центрів (ДНМЦ).

Результатами МЕ технічного завдання на розробку ІВС є перевірка достатності вихідних вимог у проекті технічного завдання на виріб. Виконання даних вимог дозволяє регламентувати метрологічні характеристики вимірювальних каналів (ВК) ІВС під час їх проектування та ефективно формувати їх метрологічне забезпечення під час експлуатації ІВС на об'єкті.

Під час проведення метрологічної експертизи технічних умов (ТУ), проектних та експлуатаційних документів, проводиться перевірка відповідності метрологічних характеристик (МХ) окремих компонентів ІВС (вимірювальних каналів, обчислювальних та периферійних засобів) вказаних у технічній документації на ІВС. У процесі МЕ зазначаються методи та засоби контролю вихідних вимог технічного завдання, норми і правила яким необхідно слідувати під час встановлення відповідності МХ ІВС вказаним у нормативних документах.

Дана перевірка включає:

- перелік вимірювальних каналів із вказаними метрологічними характеристиками (МХ) та їх відповідність вимогам вказаними в технічних умовах (ТУ) та супровідній експлуатаційній документації;
- перевірку конструктивних особливостей ІВС що забезпечують можливість проведення метрологічного контролю у процесі технічної експлуатації;
- наявність нормативних документів що забезпечують монтаж, налагоджування ІВС і контроль її параметрів та характеристик;
- перелік нормативних документів попередніх випробувань ІВС (протоколів, актів та ін.) в яких вказано метрологічні характеристики інформаційно-вимірювальних систем [9, 11, 17].

Важливою умовою ефективного функціонування ІВС у процесі експлуатації є попередня атестація алгоритмів обробки інформації компонентами ІВС. Проводиться перевірка функціональної залежності, що забезпечує передачу значень вимірюваної величини, під час прямих вимірювань, на вході первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) ІВС, у сигнал вимірювальної інформації.

Міра невідповідності відображення вимірюваної величин повинна знаходитися у межах що задані в ТУ на ІВС. Дане явище пов'язане із власними похибками електронних компонентів ІВС та необхідністю спрощень алгоритмів обчислень при взаємодії засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) із вимірювальним об'єктом. У цьому випадку, є необхідною оцінка значення методичної складової невизначеності вимірювань, що спричинена похибками алгоритму. Необхідно забезпечити точність та достовірність отримання класифікаційної інформації, що відповідає результату вимірювань ІВС (наприклад вимірювання, діагностика, класифікація, вимірювальний контроль та ін.)

У процесі затвердження типу ІВС, згідно вимог ДМКН, визначається яка частина із загального числа каналів інформаційно-вимірювальної системи використовується у сфері поширення ДКМН. Випробовуванню підлягає лише та частина ВК ІВС що входить у сферу поширення ДКМН, в той час як інша частина вимірювальних каналів проходить сертифікацію відповідності.

1.3 Структура та класифікація ІВС

Інформаційні вимірювальні системи володіють певною сукупністю характеристичних ознак, за якими їх можна класифікувати відповідно до:

- сфери використання;
- типу та діапазону значень вхідних величин що підлягають вимірюванням;
- виду функціональної залежності сигналу вимірювальної інформації від природи вимірюваних величин;
- алгоритмів обробки даних, властивостей сигналів вимірювальної інформації;
- типу ІВС та класу точності її складових компонентів;
- особливостей комплектування та налагоджування на об'єкті;
- можливістю інтеграції в системи більш високого порядку.

Інформаційні вимірювальні системи в залежності від сфери використання поділяються на:

- ІВС для проведення досліджень у науковій сфері;
- ІВС забезпечення контролю функціонування складних виробів;
- ІВС контролю та керування технологічними процесами в умовах виробництва.

Відповідно до комплектації, виділяють 2 групи інформаційних вимірювальних систем: *агрегатовані* (містять у своєму складі базові модулі широкого спектру застосування) та *не агрегатовані* (що складаються із спеціально розроблених складових частин).

До складу агрегатованих ІВС входить базове вимірювальне ядро, що представлене інформаційно-вимірювальним комплексом (ІВК). При масштабуванні ІВК, у процесі інтеграції первинних вимірювальних перетворювачів, вимірювальних каналів та периферійних пристроїв, з'являється можливість побудови ІВС заданої структури та функціонального призначення [6, 11, 23].

Інформаційні вимірювальні системи за структурними особливостями можна класифікувати на:

- послідовно-паралельні ІВС, що містять вимірювальний канал (ВК) комутований з великою кількістю ВП;
- ІВС з паралельними ВК, вимірювальні сигнали яких комутуються вибраним перетворювачем та аналізуються єдиним пристроєм обробки первинної вимірювальної інформації (АЦП та ЕОМ).

Розрізняють статичний та динамічний режими роботи ІВС відповідно до швидкості зміни сигналів на вході ІВС та її інерційних властивостей. На вході інформаційної вимірювальної системи можуть формуватися сигнали вимірювальної інформації неперервні у часі або дискретні.

ІВС містить у своєму складі вимірювальні компоненти, що являють собою технічні пристрої призначені для проведення процесу вимірювань (збору, обробки та відображення вимірювальної інформації). Компоненти ІВС, в залежності від функціонального призначення, виконують функції вимірювання, з'єднання складових частин ІВС, обробки вимірювальної інформації. Вимірювальні компоненти ІВС можна поділити на аналогово-цифрові (АЦП) та цифро-аналогові (ЦАП) в залежності від перетворення що реалізовує конкретний компонент ІВС.

Будь-яка вимірювальна система (ВС), яка являє собою основну складову частину ІВС, відображує вибрані властивості та поточний стан об'єкту вимірювань (процесу) що змінюються у просторі та часі. ВС містить у своєму складі вимірювальні компоненти що формують вимірювальні канали (ВК) та реалізують процес вимірювань із забезпеченням автоматизованого отримання вимірювальної інформації під час технічної експлуатації інформаційно-вимірювальної системи.

Інформаційна вимірювальна система, як завершений виріб, може бути сформована вимірювальними каналами (ВК) або окремими вимірювальними системами (ВС).

Вимірювальні канали ІВС можуть формувати автономні вимірювальні системи та входити до складу більш складних систем, що забезпечують процедури вимірювального контролю, діагностики, класифікації та систем керування технологічними процесами на виробництві. У випадку масштабування, ВК часто об'єднують в окремі підсистеми, що характеризуються визначеними границями у точках сполучення із вимірюваним об'єктом та на виході вимірювальної інформації [9, 26].

Особливостями ІВС, як завершеного виробу, є можливість її комплектування із компонентів що виготовляються окремими виробниками що мають відмінні метрологічні характеристики і вимоги до умов експлуатації на об'єкті.

На відміну від звичайних вимірювальних систем (ВС), що являють собою вироби із сталими метрологічними характеристиками на момент початку експлуатації, до складу ІВС можуть входити структурні компоненти що мають подібне функціональне призначення але не є тотожними по своїм метрологічним характеристикам (МХ) та вимогам до проведення вимірів.

Для такої ІВС можуть бути відсутні нормативні та технічні документи, необхідні для регламентації метрологічних вимог до ІВС як завершеного виробу, що утруднює завдання випробувань, метрологічної експертизи ІВС та затвердження її типу. Також, це накладає певні обмеження, у випадку розширення функціонального призначення ІВС, її масштабування, зміни її структури та взаємозв'язку вимірювальних компонентів у складі ІВС. Тому, необхідною умовою ефективного функціонування ВС у складі ІВС є виділення її у структурну одиницю, у межах якої вона володіє нормованими метрологічними характеристиками.

В загальному випадку, під терміном інформаційна вимірювальна система (ІВС) розуміється ВС що реалізовує вибране коло інформаційних функції відповідно до сфери застосування.

Визначення «інформаційна» у назві ІВС характеризує загальний результат роботи інформаційної вимірювальної системи, що являє собою експериментальну якісну та кількісну інформацію яка відображає властивості досліджуваних об'єктів та процесів у конкретний момент часу

в конкретній точці (точках) простору. Це дозволяє діагностувати стан досліджуваних об'єктів живої та неживої природи як у статичних умовах так і у динаміці [6, 11, 36].

Інформаційні вимірювальні системи входять до сукупності засобів інформаційної техніки в «широкому розумінні». Засоби інформаційної техніки (електронні обчислювальні машини, засоби зв'язку, зберігання, обробки та відображення інформації) можуть не тільки входити до складу ІВС, але і виступати як отримувачами так і джерелами інформації на основі яких ІВС формує результат своєї роботи.

Інша частина визначення «інформаційна-вимірювальна система» – «вимірювальна» – вказує на визначальний процес емпіричного пізнання «вимір», що характеризує первинну кількісну інформацію отриману від об'єкту досліджень. Особливістю розгляду вимірювальної системи із позицій забезпечення єдності та достовірності проведення вимірювань є можливість її структурних та функціональних змін. Такі зміни можуть проводитися, в залежності від застосованих методик проведення вимірювань (розширення функціонального призначення вимірювальної системи), під час застосування вимірювальної системи у адаптивному або керованому варіанті.

У випадку, коли вимірювальний засіб має сталий структурний склад, функцію перетворення, функціональне призначення та нормовані метрологічні характеристики під час усього життєвого циклу, такий ЗВ не може розглядатися із системоутворюючих позицій, із точки зору кінцевого споживача. Такий електронний вимірювальний засіб відповідає моделі лінійній моделі типу «вхід-вихід», навіть якщо він містить велику кількість вимірювальних каналів.

Дефініція «система» у назві ІВС характеризує складність структури вимірювальної системи, незважаючи на кількість вимірювальних каналів у її складі. ВС може бути одноканальною, в той же час реалізовувати комутоване підключення первинних вимірювальних перетворювачів в один вимірювальний канал.

У процесі становлення інформаційних вимірювальних систем (ІВС) можна визначити окремі етапи, що визначають інтегрованість засобів обчислювальної техніки у її складі.

У першому випадку для ВС визначальною є функція проведення вимірів а інформаційні функції є допоміжними.

У другому випадку ВС отримує функції комплексної обробки та відображення інформації, внаслідок чого з'являється можливість проведення вимірювального контролю та діагностики [26, 37].

Інформаційні вимірювальні системи можуть використовуватися у якості вимірювальних або керуючих ланок автоматичних систем керування технологічними процесами (АСК ТП). Спрощення схема такої моделі застосування наведена на рис. 1.1.

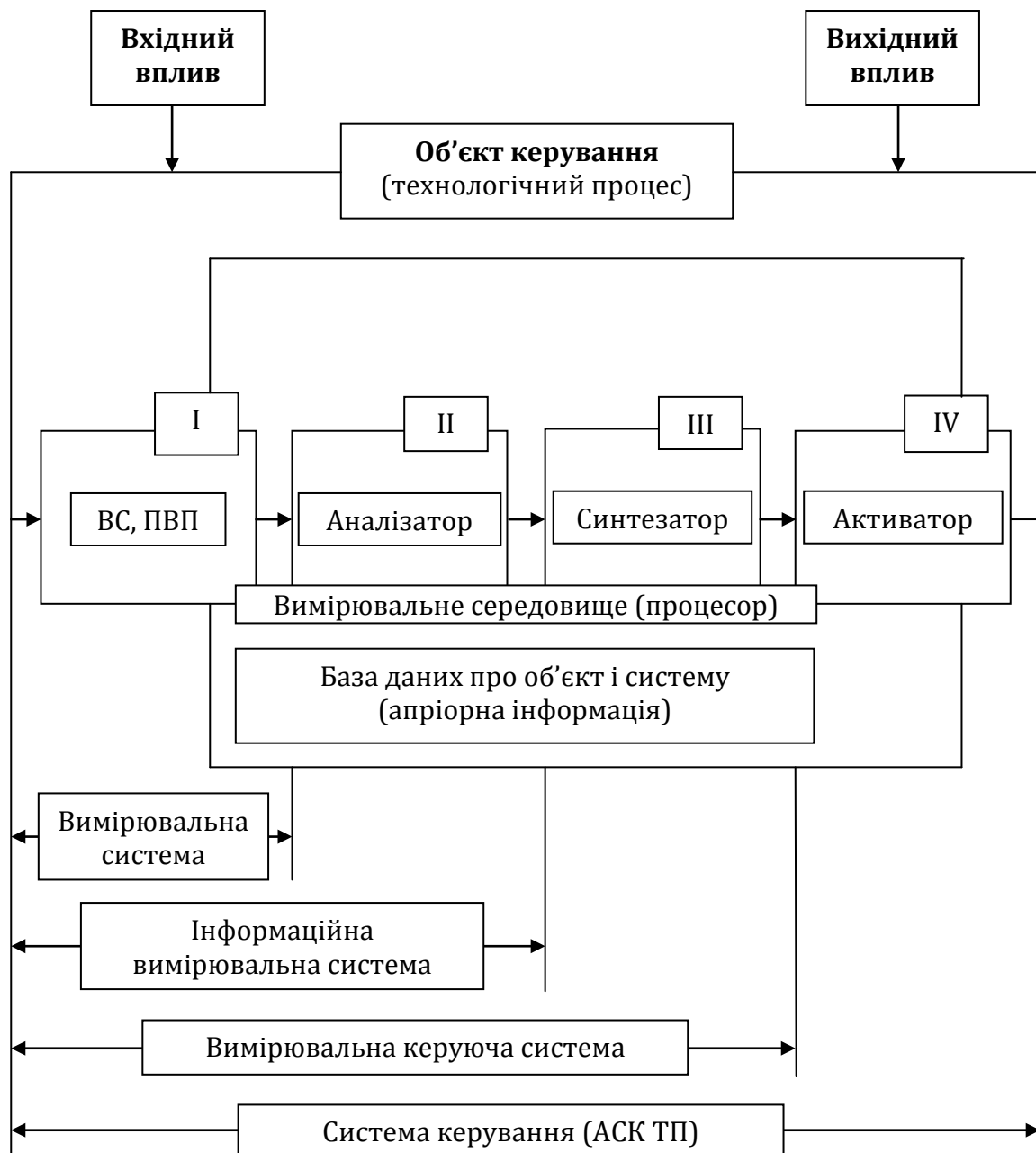


Рис.1.1. Спрощена структура ІВС та АСК ТП: I – вимірювальна підсистема; II – класифікаційна підсистема; III – підсистема керування, IV – виконавча підсистема; ПВП – первинний вимірювальний перетворювач.

1.4. Задачі та зміст робіт із метрологічного забезпеченню ІВС.

Загальні положення. Поняття

1.4.1. Поняття та положення метрологічного забезпеченню ІВС

До основних проблем метрологічного забезпечення ІВС можна віднести фундаментальні, організаційно-правові та прикладні.

Фундаментальні проблеми метрологічного забезпечення ІВС включають:

1) *Регламентацію методів оцінки метрологічних характеристик ІВС під час їх усього життєвого циклу.*

2) *Розробку методик призначених для комплексного дослідження метрологічних характеристик ІВС, що включають первинне випробування, повірку та калібрування на об'єкті. Вирішення даної проблеми дозволяє проводити оптимізацію процедур для визначення достовірності оцінки метрологічних характеристик ІВС.*

3) *Забезпечення метрологічних критеріїв і оптимальних показників точності та достовірності вимірювальних компонентів інформаційно-вимірювальних систем дозволяє проводити синтез ІВС відповідно до заданих норм точності та достовірності.*

Серед прикладних проблем метрологічного забезпечення ІВС можна виділити:

1) *Розробка, стандартизація та апробація автоматизованих методів проведення процедур випробувань, поточного контролю та калібрування інформаційних вимірювальних систем.*

2) *Застосування засобів із програмним керуванням у процедурах випробувань метрологічних характеристик (МХ) ІВС.*

3) *Розробка, практичне впровадження та стандартизація алгоритмів програмно керованих засобів у вибраних процедурах повірки інформаційних вимірювальних систем.*

4) *Комплектація лабораторій державної метрологічної служби та галузевих метрологічних лабораторій відповідними засобами повірки ІВС.*

Організаційно-правові проблеми метрологічного забезпечення ІВС включають:

1) *Розробку спеціалізованої нормативної документації, призначеної для регламентування метрологічного забезпечення ІВС у процесі виробництва та технічної експлуатації;*

2) Координацію робіт із метрологічного забезпечення ІВС як на етапах розробки та проектування, так і у процесі виробництва, проведення монтажних робіт та технічної експлуатації на об'єкті [5, 10, 13].

На даному етапі застосування ІВС необхідно чітко визначати положення їх метрологічного забезпечення, що є досить складною проблемою, зважаючи на їх специфічні особливості. ІВС часто використовуються для проведення вимірювань в динамічному режимі роботи із використанням автоматизованих засобів. Такі ІВС включають системи автокалібрування, внутрішнього контролю та діагностики, мають велику кількість електронних обчислювальних засобів, модульну структуру, широкий перелік вимірюваних величин та алгоритмів обробки виміряних даних та ін.

Це потребує забезпечення точності та єдності вимірів під час різних режимів роботи ІВС та використання окремих методик вимірювань. Принципу відносної інваріантності результатів вимірювання. Ще однією проблемою є неповність вимірюваної інформації при використанні різних методів та засобів вимірювань у складі ІВС. Дана умова викликає деяку «деформацію» властивостей досліджуваного об'єкту у процесі експерименту, тому необхідною є перевірка результатів вимірів на відповідність теоретичній математичній моделі, що покладена в основу роботи ІВС. Неточність відтворюваності результатів вимірів повинна бути обмежена невизначеністю закладеною в математичну модель ІВС.

Додатковим фактором, що ускладнює метрологічне забезпечення ІВС є необхідність розмежування вимірювальних та інформаційних функцій, що часто забезпечується тільки програмно. При розгляді ІВС як закінченої системи часто виникає необхідність розширення границь визначення «метрологічне забезпечення інформаційної вимірювальної системи».

Якщо звернутися до класичного твердження «...метрологічне забезпечення – це встановлення і застосування наукових та організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності вимірювань...» [26], у випадку роботи з ІВС дане положення можна описати наступним чином: «...метрологічне забезпечення вимірювань є діяльністю метрологічних та інших служб, спрямованою на створення в країні необхідних еталонів, зразкових і робочих засобів вимірювань, розробку і встановлення метрологічних правил і норм, виконання ряду інших метро-

логічних робіт, необхідних для забезпечення проведення необхідної якості вимірювань...» [26].

Метрологічне забезпечення інформаційних вимірювальних систем, можна описати відповідно до специфіки «гнучких виробничих систем (ГВС)», до складу яких вони можуть входити як елементи контролю та прийняття рішень. Специфіка МЗ ГВС обумовлена забезпеченням контролю показників точності та достовірності величин що безпосередньо не є вимірюваними. В той же час, забезпечення метрологічного контролю результатів роботи систем, що безпосередньо не приймають участь у процесі вимірювань, часто не проводиться.

В подальшому, було запропоновано визначення «метрологічного забезпечення ІВС» як «...система наукової, технічної, правової та організаційної діяльності, спрямована на досягнення єдності процесів перетворення інформації, що здійснюється в ІВС і необхідної точності результатів її функціонування...» [10, 17, 23, 26].

Метрологічне забезпечення ІВС забезпечує якість процесів обробки та перетворення вимірювальної інформації, результати яких можна порівняти використовуючи метрологічні характеристики структурних елементів ІВС.

Якісною характеристикою інформаційної вимірювальної системи є точність відображення істинних (реальних) властивостей досліджуваного об'єкту чи процесу під час проведення вимірів та залежить від умов функціонування ІВС.

Проведення *метрологічної експертизи ІВС*, що можна вважати окремим етапом метрологічного забезпечення, дозволяє розробити комплекс оптимальних технічних і організаційних рішень для забезпечення точності та достовірності обробки інформації складовими компонентами інформаційно-вимірювальної системи.

Відповідно до повноти реалізації функцій, ІВС можна класифікувати залежно від їх функціональних можливостей при обробці вимірювальної інформації та цільового призначення.

До *першої групи* можна віднести серійні ІВС, що є закінченими виробами (наприклад ІВС-1) та мають стандартизовані алгоритми роботи.

До *другої групи* відносяться ІВС що є одиничними екземплярами чи входять до мілкосерійних партій, мають розширені експлуатаційні можливості (наприклад ІВС-2).

До *третьої групи* можна віднести спеціалізовані інформаційні вимірювальні системи, розроблені для застосування на конкретних об'єктах та мають модульну комплектацію (наприклад ІВС-3). Дані ІВС комплектуються із структурних одиниць що є закінченими виробами та проходять операції монтажу, налагоджування, первинного калібрування та апробації режимів роботи згідно проектної технічної документації та нормативних документів у галузі застосування. Реалізація метрологічного забезпечення таких ІВС є досить складним та тривалим завданням [5, 9, 10, 26].

Вимірювальні системи ІВС можна класифікувати в залежності від основних функцій що вони забезпечують: вимірювання, вимірювання та контроль, діагностика, керування виконуючими пристроями по каналам зворотного зв'язку та ін. Окремо можна виділити гнучкі вимірювальні системи (ГВС), що мають структурні та функціональні особливості для забезпечення вимірювальних завдань, вимоги яких можуть змінюватися.

Прикладом ІВС можуть служити вимірювальні системи що забезпечують складні технологічні та інформаційні процеси:

1) Робота ІВС атомної електростанції, що забезпечує контроль широкого кола фізичних величин та містить у своєму складі значну кількість вимірювальних каналів (ВК) паралельного та паралельно-послідовного типу, під'єднаних до декількох обчислювальних ядер.

2) ІВС у складі системи керування літальними об'єктами містить у своєму складі декілька інформаційно-обчислювальних комплексів (ядер ІВК) і велику кількість рознесених у просторі вимірювальних перетворювачів та вимірювальних каналів. Вимірювальні системи призначені для роботи навігаційних систем відносяться до гнучкого типу, та характеризуються власними (індивідуальними) метрологічними характеристиками (МХ).

3) Інформаційні вимірювальні системи для випробовувального контролю у машинобудуванні та на транспорті (системи що забезпечують роботу вібростендів, системи контролю переміщень об'єктів у просторі, ІВС контролю деформацій об'єктів та ін.) володіють засобами самодіагностики та самоконтролю метрологічних характеристик, мають значну кількість вимірювальних каналів (ВК) паралельного та паралельно-послідовного типу. Такі ІВС характеризуються широким спектром вимірюваних величин та можуть формувати значні масиви вимірювальної інфор-

мації при дослідженні динамічних характеристик досліджуваних об'єктів та процесів.

4) Автоматичні системи керування технологічними процесами на виробництві містять у своєму складі ІВС що мають широке територіальне покриття, вимірювальні канали значної протяжності та складної топології, містять велику кількість ядер ІВК.

В сучасних реаліях, на думку науковців, термін «інформаційно-вимірювальна система» не зовсім точно характеризує структурні, функціональні особливості та призначення ІВС. Зважаючи на метрологічне спрямування ІВС постає доцільність перефразування терміну ІВС із акцентуванням на вимірювальну роль такої системи. Таким чином, більш точною дефініцією поняття системи що виконує «вимірювальну» та «інформаційну» функції можна вважати визначення «вимірювально-інформаційна система (ВІС)». Дане твердження не є сталим та потребує подальшого обговорення.

1.4.2. Задачі та зміст робіт метрологічного забезпечення ІВС

Метрологічне забезпечення ІВС задається у процесі розробки конкретного зразку інформаційної вимірювальної системи відповідно до вимог кінцевого користувача, нормативних положень у галузі застосування та рекомендацій служб державного метрологічного контролю (державних та галузевих).

Якщо у подальшому ІВС призначені для роботи у складі інших систем (автоматичні системи керування технологічними процесами на виробництві, системи контролю та прийняття рішень та ін.), необхідною умовою їх ефективного функціонування є відповідність технічної документації та нормативних документів ІВС технічним умовам та проектній документації систем у складі яких вони застосовуються. В таких складних системах ІВС можна розглядати як окрему структурну одиницю із визначеним функціональним призначенням.

Головними завданнями у сфері метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем можна вважати: розробку засобів та методів контролю метрологічних характеристик (МХ) ІВС, визначення загальних вимог до метрологічних характеристик ІВС та проведення процедури метрологічної експертизи технічної документації зразку ІВС [13, 17, 26, 34].

Важливою умовою метрологічного забезпечення ІВС є затвердження типу інформаційної вимірювальної системи, що проводиться шляхом порівняльних випробувань, та перевірка відповідності ІВС затвердженому типу. Це дозволяє забезпечити точність і достовірність вимірювальної інформації сформованої у процесі роботи ІВС.

До завдань метрологічного забезпечення ІВС можна віднести проведення заходів із повірки та калібрування зразків ІВС. Органами державного метрологічного контролю проводиться нагляд за станом та умовами застосування інформаційних вимірювальних систем, регламентується атестація програмних алгоритмів, що забезпечують результат роботи інформаційно-вимірювальних систем.

Метрологічне забезпечення інформаційних вимірювальних систем проводиться як під час проектування, так і у процесі експлуатації зразків ІВС, та включає контроль метрологічних характеристик (МХ) структурних елементів ІВС: вимірювальних каналів (ВК), первинних та вторинних вимірювальних перетворювачів (ВП), електронних обчислювальних засобів та периферійних пристроїв [18, 26].

У процесі аналізу стану метрологічного забезпечення інформаційної вимірювальної системи контролюється відповідність стану ІВС вимогам нормативної документації на виріб на етапах проектування, виготовлення та у процесі експлуатації. Це дозволяє сформувати комплекс заходів призначених для удосконалення метрологічних характеристик (МХ) ІВС.

Головними завданнями державного метрологічного контролю і нагляду (ДМКН) на всьому життєвому етапі ІВС є перевірка нормативної документації що регламентує порядок та організаційні процеси під час проектування, виготовлення та технічної експлуатації інформаційних вимірювальних систем. Встановлюються вимоги до порядку і правил перевірки відповідності функціонування ІВС згідно технічної документації на виріб. Для забезпечення процесів перевірки контролюється наявність еталонних засобів [10, 12].

Органами ДМКН оцінюється ефективність заходів метрологічної експертизи (МЕ) нормативної документації ІВС (конструкторської, проектної та технологічної). Проводиться перевірка правильності здійснення повірок ІВС та дотримання термінів міжповірочних інтервалів.

Головним завданням метрологічної експертизи (МЕ) технічної документації ІВС є виконання вимог до їх метрологічного забезпечення,

використовуючи найбільш ефективні засоби та методи, із врахуванням призначення та технічної документації на виріб. У процесі метрологічної експертизи (МЕ) проводиться аналіз технічної документації ІВС:

- 1) технічного завдання (ТЗ) на розробку ІВС або еквівалентного документу, що включає вихідні дані для проектування;
- 2) нормативного документу де вказані технічні умови (ТУ) на виріб (ІВС) у процесі його конструювання та виготовлення;
- 3) проектно-конструкторської документації що регламентує комплектування готового виробу (ІВС), монтажні, пускові та налагоджувальні роботи під час установки ІВС на місці роботи;

У процесі метрологічної експертизи технічної документації, що супроводжує виготовлення ІВС, перевіряється відповідність та достатність вихідних даних, наведених у ТЗ, для забезпечення необхідних метрологічних характеристик (МХ) вимірювальних компонентів ІВС та створення способів метрологічного забезпечення структурних одиниць ІВС під час технічної експлуатації [5, 13, 26, 34].

Метрологічна експертиза нормативних документів що містять проектно-конструкторську, технологічну та експлуатаційну документацію, проводиться з метою перевірки відповідності комплексу метрологічних характеристик вимірювальних складових частин ІВС вихідним вимогам наведеним у технічному завданні (ТЗ) на виріб. Крім того, перевіряється доцільність застосування вибраних методів та засобів контролю метрологічних характеристик структурних компонентів ІВС.

При проведенні метрологічної експертизи ТУ на ІВС перевіряється перелік вимірювальних каналів ІВС та правильність вказання їх метрологічних характеристик, конструктивні особливості ІВС що забезпечують або унеможлиблюють контроль вказаних в технічних умовах МХ компонентів ІВС та виробу в цілому. Проектна документація, що регламентує монтажні та налагоджувальні роботи під час встановлення ІВС на об'єкті, повинна містити виключний перелік вимог для забезпечення якості встановлення ІВС та її нормального функціонування.

В загальному випадку, метрологічна експертиза (МЕ) проводиться державними службами метрологічного контролю (органами державної метрологічної служби та державними метрологічними центрами), метрологічними службами підприємств які проектують та виготовляють інформаційні вимірювальні системи, та галузевими організаціями метро-

логічної служби що контролюють застосування зразків ІВС у конкретних галузях виробництва.

Важливою умовою метрологічної експертизи зразків ІВС є оцінка алгоритмів, призначених для обробки вимірювальної інформації структурними компонентами ІВС. У процесі експертизи встановлюється адекватність функції перетворення, що забезпечує відображення властивостей вимірюваного об'єкту у значення вимірювальної інформації під час проведення прямих вимірювань.

Даний процес відображення може відбуватися із певними невідповідностями, що спричинені недосконалістю обробки вимірюваних даних або їх спрощенням відносно заданої математичної моделі. Тому, важливою умовою оцінки адекватності алгоритму обробки даних є встановлення методичної складової невизначеності вимірювань, що виникає внаслідок недосконалості алгоритму. У процесі обробки вимірюваних даних, алгоритм повинен забезпечувати точний і достовірний кінцевий результат отримання інформації, внаслідок вирішення інформаційною вимірювальною системою певного вимірювального завдання.

Затвердження типу ІВС проводиться для усієї системи в цілому, у випадку якщо вона використовується у сферах на які поширюються державний метрологічний контроль та нагляд.

Якщо ІВС або їх окремі частини (вимірювальний канал або сукупність ВК) застосовуються у сферах на які не розповсюджується ДМКН, дані ІВС або їх вибрані структурні елементи підлягають добровільній сертифікації відповідності, відповідно до вимог кінцевого експлуатанта вибраних зразків ІВС. У такому випадку, обов'язковій повірці підлягають лише вимірювальні канали ІВС що застосовуються у сферах поширення державного метрологічного контролю та нагляду. Процедуру калібрування проходять вимірювальні канали ІВС що не застосовуються у сферах на які поширюється ДКМН [6, 10, 17, 26].

Вимірювальні канали ІВС визначають із забезпеченням певних вимог:

- визначенням складу та структурних елементів ВК;
- вказанням точок з'єднання структурних елементів ІВС що визначають вимірювальний канал (ВК);
- описом функціональних залежностей що забезпечують обробку вимірювальної інформації у ВК.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Вкажіть основні завдання під час реалізації метрологічного забезпечення ІВС.
2. Вкажіть особливості вимірювальної функції ІВС у процесі аналізу результатів вимірювань.
3. Охарактеризуйте етапи розвитку ІВС та їх відмінності з точки зору повноти застосування інформаційних функцій.
4. Визначте ключові проблеми у сфері метрологічного забезпечення (МЗ) ІВС.
5. Охарактеризуйте особливості проведення державного метрологічного контролю і нагляду (ДМКН) ІВС.
6. Вкажіть головні вимоги до визначення вимірювального каналу (ВК) як структурної одиниці ІВС.
7. Зазначте основні завдання та процедури метрологічної експертизи технічної документації ІВС.
8. Охарактеризуйте поняття «вимірювальний канал», наведіть його типову структуру.
9. Поясніть зміст дефініцій «інформаційна» та «вимірювальна» у назві ІВС.
10. Наведіть класифікації інформаційно-вимірювальних систем за їх структурними ознаками.
11. Охарактеризуйте поняття «вимірювальна система». Поясніть дане твердження з точки зору застосування у якості вимірювального засобу.
12. Дайте визначення дефініції «гнучка вимірювальна система (ГВС)». Наведіть приклади ГВС та сфери застосування.
13. Поясніть відмінності у підходах до метрологічної експертизи технічного завдання (ТЗ) та технічних умов (ТУ) ІВС.
14. Що можна вважати вимірювальним компонентом ІВС. Наведіть приклади.
15. Охарактеризуйте вимірювальний пристрій типу «вхід-вихід». Чи можна вважати такий пристрій вимірювальною системою (ВС)?
16. Призначення алгоритмів обробки даних ІВС та особливості їх атестації.

РОЗДІЛ 2. ЗАВДАННЯ, ЩО ВИКОНУЮТЬ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІВС ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ НОРМУВАННЯ. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1. Методи визначення, принципи та особливості нормування метрологічних характеристик ІВС

2.1.1 Методи визначення метрологічних характеристик ІВС.

Загальні положення

У процесі нормування метрологічних характеристик інформаційних вимірювальних систем, визначальними постають питання вирішення сучасних проблем метрологічного забезпечення ІВС, що забезпечується:

1) *застосуванням розрахункових (теоретичних) методик* визначення невизначеності вимірювань.

2) *використанням методів що регламентують параметри невизначеностей* та дозволяють проводити їх кількісне визначення під час реалізації обробки вимірювальної інформації складовими компонентами ІВС.

Дані методики регламентуються «Керівництвом по визначенню невизначеності вимірювань». Застосування вищевказаних методик вразовує похибки що виникають при взаємодії вимірювального каналу (ВК) інформаційної вимірювальної системи із об'єктом досліджень.

Керівництво по визначенню невизначеностей вимірювань регламентує способи оцінки невизначеності показань, під час відображення значень вимірюваної величини засобами вимірювальної техніки та встановлює підходи до визначення невизначеностей вимірюваної величини. Згідно положень «Керівництва по визначенню невизначеностей вимірювань» виділяють 2 групи оцінки невизначеностей:

Оцінка невизначеності за типом А (мірою невизначеності якої є стандартне відхилення uA) проводиться методами статистичного аналізу. Вихідними даними для оцінки виступають ряди спостережень що формують масив виміряних даних.

Оцінка невизначеності за типом В (мірою невизначеності якої є стандартне відхилення uB) проводиться методами відмінними від статистичного аналізу. Вичерпний перелік методів придатних для оцінки невизначеності за типом В наведено у «Керівництві....»

Невизначеність результату вимірювання, що виникає у процесі взаємодії засобу вимірювань (ЗВ) та досліджуваного об'єкту і може бути виражена як стандартне відхилення або його еквівалент вважається *стандартною невизначеністю*.

Стандартне відхилення (або його аналог), що виникає під час проведення вимірювання, характеризує невизначеність результату вимірювання та визначає *стандартну невизначеність вимірювання*.

Якщо у процесі проведення вимірювання його результат буде отриманий внаслідок розрахунку із значень ряду інших вимірних величин, мова буде йти про *сумарну стандартну невизначеність*, що є мірою невизначеності величини що виміряна [10, 26, 29].

У випадку, якщо під час проведення вимірювання діє відомий ефект, вплив якого вносить свій вклад у загальну невизначеність, такий ефект вважають систематичним. Поправки, при розгляді значущих систематичних ефектів, входять у оцінку невизначеність за типом В.

2.1.2. Принципи та особливості нормування метрологічних характеристик ІВС

Метрологічна характеристика інформаційної вимірювальної системи, або її складової частини (вимірювального каналу, ядра ІВК), характеризує основні властивості що впливають на результат та точність вимірювань за допомогою ІВС або її структурних одиниць.

Комплекс метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем та способів їх представлення регламентується у процесі *нормування метрологічних характеристик (МХ)*.

Нормування МХ ІВС проводиться із дотриманням певних вимог. Головною вимого нормування МХ ІВС є забезпечення можливості вибору засобів вимірювань (ЗВ) та їх порівняльний аналіз. Необхідно провести вибір доступних методів, призначених для визначення невизначеності вимірюваної величини, із врахуванням нормованих метрологічних характеристик ІВС. Під час нормування МХ ІВС важливо забезпечити можливість визначення оцінки невизначеності результатів вимірювань вибраним засобом вимірювань (ЗВ).

Метрологічні характеристики, що формують комплекс МХ ІВС, повинні бути представлені у доступному для контролю вигляді та вклю-

чати лише ті МХ що є сталими незалежно від режимів роботи ІВС та умов її експлуатації.

Процес нормування метрологічних характеристик ІВС володіє певними особливостями, пов'язаними із специфікою регламентації метрологічних характеристик (МХ) ІВС. Інформаційна вимірювальна система, як закінчений виріб, може включати значну кількість електронних обчислювальних пристроїв, метрологічні характеристики яких можуть відрізнятися, в залежності від режимів роботи ІВС. Складові частини ІВС можуть мати значне просторове рознесення, що утруднює процедуру нормування МХ. Також необхідно врахувати особливості комплектації зразків ІВС, метрологічні характеристики яких нормуються.

1) При нормуванні МХ ІВС, що виробляється і комплектується як закінчений виріб, використовуються вказані у нормативній документації на виріб його МХ із врахуванням методів і засобів їх контролю та перевірки. Нормування МХ агрегатованих ІВС проводиться розрахунковим шляхом, із врахуванням методів розрахунку, використовуючи як вихідні дані МХ його складових частин.

2) Необхідно враховувати умови роботи складових компонентів ІВС. МХ ІВС нормуються як для звичайного засобу вимірювань, якщо його складові частини знаходяться в однакових умовах роботи. У випадку, коли окремі компоненти ІВС працюють у відмінних умовах, для нормування та визначення впливових величин (ВВ) і внесків додаткових складових невизначеності проводиться експеримент.

3) Аналогові обчислювальні пристрої у складі ІВС нормуються аналогічно до інших вимірювальних компонентів ІВС. При нормуванні МХ обчислювальних пристроїв, що містять цифрову частину, постає необхідність регламентації МХ їх алгоритмів [5, 9, 26, 30].

Для повного опису МХ ІВС необхідно провести нормування вимірювальних каналів ІВС, аналогових вимірювальних перетворювачів (ВП) у складі ІВС, цифрових обчислювальних засобів та їх алгоритмів роботи.

2.1.3. Визначення метрологічних характеристик ІВС

В загальному випадку, метрологічні характеристики ІВС можна класифікувати на індивідуальні та типові.

В нормативній документації, що затверджує тип ІВС, вказуються *типові метрологічні характеристики* (МХ) ІВС в цілому та її складових частин.

Зразки ІВС можуть відрізнятися наявністю вимірювальних каналів (ВК), метрологічні характеристики яких не є тотожними. Тоді, їх МХ визначаються під час проведення експерименту, або розраховуються на основі МХ елементів, що входять до їх складу. Такі МХ ІВС вважають *індивідуальними* для вибраного зразку ІВС.

Типові метрологічні характеристики ІВС включають:

1) Номінальну функцію перетворення вимірювального каналу – $f_{sa}(x)$.

У цьому випадку вважається, що ВК має на виході вимірювальний перетворювач (ВП) проградуирований в одиницях відмінних від присутніх на вході ВК.

2) Значення ціни поділок рівномірної шкали ВК та мінімальне значення ціни поділок нерівномірної шкали вимірювального каналу.

3) Для ВК що містять на виході ВП які перетворюють аналоговий сигнал в цифровий оцінюються параметри вихідного коду, його розрядність та номінальне значення одиниці найменшого розряду коду.

4) Значення показників точності і достовірності на виході вибраного вимірювального каналу характеризуються:

а) Мірою невизначеності показів вимірювального каналу що викликана систематичними впливовими факторами (Δ_s). Дані фактори включають:

- вплив систематичних ефектів, що спричиняють допустиме відхилення (Δ_{sp}) функції перетворення від номінальної функціональної залежності у ВК ІВС;
- оцінку номінального значення поправки $\theta_{ВК}$. Це дозволяє визначити очікування $M(\Delta_s)$ і міру його невизначеності що характеризується стандартним відхиленням $\sigma(\Delta_s)$ на виході вимірювального каналу.

б) Впливом випадкових ефектів, що присутні у вимірювальному каналі та обумовлюють невизначеності його показань. До них відносяться:

- міра невизначеності показів вимірювального каналу яка оцінюється за типом А і кількісно відповідає межах допустимих значень стандартного відхилення $\sigma_p(\Delta)$;
- значення нормованої автокореляційної функція $r\Delta(\tau)$. Також, випадкові ефекти ВК можна описати через спектральну щільність $S\Delta_a(\omega)$ межі допустимих відхилень від значень що регламентуються для вибраного ВК.

в) Параметри невизначеності показань Δ_{BK} для вибраного ВК, що включають: оцінку функції перетворення вимірювального каналу та її допустиме відхилення Δ_P від номінальних значень; значення міри невизначеності показів вимірювального каналу $\sigma(\Delta)$ при проведенні оцінки за типом А.

г) Визначення меж в яких знаходяться значення варіації N_P вимірювального каналу.

5) Параметри, що включають вплив інструментальних похибок під час проведення вимірів.

6) Вимірювальний канал володіє динамічними характеристиками (ДХ), серед яких можна виділити наступні: *перехідна характеристики $h_a(t)$, імпульсна перехідна характеристика $g_a(t)$, амплітудно-частотна $A_a(\omega)$ і фазочастотна $\varphi(\omega)$ характеристики та час реакції τ_{ra} вибраного вимірювального каналу.*

7) Важливими властивостями ВК є його чутливість вимірювань, яка визначається *функцією впливу $\psi_a(\xi)$ (характеризує допустимі від регламентованих значень відхилення) та межі змін його метрологічних характеристик $\varepsilon_P(\xi)$* , при зміні нормальних умов вимірювань.

8) При розгляді МХ ВК потрібно враховувати можливу взаємодію ВК між собою та із каналами передачі даних [9, 11, 26, 34].

Якщо відхилення метрологічних характеристик ВК, у процесі вимірювань в робочих умовах, не виходять за межі вказані в нормативній документації на виріб, проводиться нормування показників невизначеності для нормальних умов експлуатації.

Враховуючи структуру, комплектацію та функціональне призначення зразків ІВС можна виділити комплекс *індивідуальних метрологічних характеристик (МХ)* його вимірювальних каналів, до яких відносяться:

1) Функція $f_c(x)$, що характеризує індивідуальні параметри вимірювального каналу та проградуйована в одиницях вимірювань, які відмінні від одиниць вимірювань на вході ВК ІВС.

2) Оцінка показників невизначеності ВК вибраного зразку ІВС:

а) показники невизначеності вимірювань Δ_{SC} , що мають місце внаслідок дії систематичних ефектів, включають границі (верхня Δ_{SIC} і нижня Δ_{SLC}) відхилень функції $f_c(x)$ ВК від номінальних значень, враховуючи поправки та ймовірність $P\Delta_{SC}$ що обумовлює знаходження функції $f_c(x)$ ВК в діапазоні Δ_{SIC} та Δ_{SLC} ;

б) невизначеність показів $\sigma(\Delta_c)$ вимірювального каналу ІВС внаслідок впливу випадкових ефектів: стандартне відхилення $\sigma(\Delta_c)$ та спектральна щільність $S\Delta_a(\omega)$;

в) невизначеність показів вимірювального каналу Δ_c : інтервал відхилень функції перетворення ВК від номінальних значень (його границі верхня Δ_{LC} і нижня Δ_{LC}) та ймовірність $P\Delta_c$ знаходження функції перетворення у даному інтервалі;

3) МХ що характеризують взаємодію вимірювального каналу із об'єктом вимірювань;

4) власні динамічні характеристики та індивідуальна чутливість вимірювального каналу ІВС [6, 17, 26].

2.1.4. Експериментальне визначення метрологічних характеристик ІВС

Під час проектування, виготовлення та технічної експлуатації ІВС часто виникають завдання експериментальних досліджень МХ інформаційних вимірювальних систем.

Значна трудомісткість необхідна при контролі метрологічних характеристик ІВС в макетному виконанні. Це пов'язано з необхідністю вибору методів та засобів призначених для визначення метрологічних характеристик макету ІВС, і зокрема, вибором переліку самих МХ ІВС що підлягають визначенню.

Процедура експериментального визначення МХ ІВС має свої особливості:

- під час експерименту може виникнути нестандартна взаємодія вимірювальних каналів;
- вимірювальні канали ІВС можуть бути значно рознесені у просторі та експлуатуватися у відмінних умовах;
- конструктивні особливості ВК ІВС можуть створювати обмеження для формування тестових сигналів на вході ВК необхідної інтенсивності та частоти [17, 26].

Для процедури визначення метрологічних характеристик ВК ІВС експериментальним шляхом необхідні попередні підготовчі операції, згідно регламенту проведення експерименту. Результатом такого експериментального дослідження є отримання кількісної інформації що характеризує МХ ІВС, або знаходження функціональних закономірностей для їх розрахунку.

У процесі підготовки до експериментального визначення метрологічних характеристик ІВС, забезпечуються наступні вимоги:

1) Проводиться вивчення технічної документації зразку ІВС. Аналізується доступна інформація про конструктивні особливості ІВС та його складові частини, специфіку роботи, умови експлуатації, вимірювальний діапазон та параметри сигналів вимірювальної інформації на виході ВК інформаційно-вимірювальної системи.

2) Необхідною умовою є побудова математичної моделі ВК ІВС та визначення сукупності метрологічних характеристик ВК що визначаються експериментально.

3) Уточнюється вид експериментального дослідження. Вибирається діапазон проведення вимірів, кількість експериментальних точок у вибраному діапазоні та повторюваність вимірів у кожній експериментальній точці. Необхідно провести обґрунтування принципів вибору експериментальних точок у вимірювальному діапазоні та повторюваності вимірів у них.

4) Розглядаються вимоги до методів та засобів задіяних у експериментальному визначенні МХ ІВС та регламентуються умови проведення досліджень.

5) У випадку проведення багатofакторного експерименту, проводиться встановлення факторного простору та оцінюються функції впливу.

6) Регламентуються та задаються режими роботи ІВС у процесі експериментальних досліджень із врахування відомих сторонніх впливів різної природи [5, 13, 18, 26].

Важливою складовою ефективного експериментального визначення МХ ІВС є створення найбільш повної математичної моделі досліджуваного зразку. У процесі підготовчих операцій спочатку створюється *якісна модель* ІВС. Модель повинна пояснювати функціональну залежність вхідної вимірюваної величини та вихідної вимірювальної інформації, чутливість та селективність ВП ІВС по відношенню до вимірюваної величини, вибір відповідного режиму роботи ІВС. Якісна модель повинна включати оцінку випадкової складової невизначеності.

Для створення математичної моделі ІВС необхідно спочатку побудувати модель її складових частин, в першу чергу вимірювальних каналів (ВК). При створенні моделі ВК ІВС найчастіше всього застосовуються *детерміновані та стохастичні моделі*. Відповідно до типу процесу, що описується математичною моделлю, їх можна класифікувати

на *статичні та динамічні*. Динамічні моделі характеризують процеси що змінюються у часі, статичні – пояснюють стаціонарні процеси. У свою чергу, статичні та динамічні моделі можуть відповідати як стохастичному типу так і детермінованому[11, 20].

Побудова математичної моделі вимірювального каналу проводиться за визначеним алгоритмом.

На *першому етапі* створюється змістовний опис ВК із зазначенням його функції перетворення та переліком впливових факторів що супроводжують вимірювальний процес. Опис ВК може бути сформований теоретичним шляхом, у результаті аналізу нормативної документації зразку ІВС, та під час вивчення технічної документації на ВК аналогічного призначення. Також, є можливість створення змістовного опису ВК у процесі безпосереднього спостереження за роботою ІВС та визначення кількісних показників інформації якою він оперує.

Змістовний опис ВК ІВС дозволяє провести вибір придатних для визначення МХ та повинен містити: завдання та мету моделювання; сукупність вимірюваних величин, що вимірюється ВК та точність їх виміру; відому кількісну інформацію що характеризує ВК ІВС та параметри процесу вимірювань. На підставі аналізу змістовного опису уточнюється номенклатура МХ.

На *другому етапі* складається формалізована схема вимірювального каналу із врахуванням точок входу та виходу ВК у складі ІВС. Формалізовану схему доцільно розробляти для ВК що оперують складними функціональними залежностями.

При створенні формалізованої схеми ВК враховують параметри процесів перетворення вимірювальної інформації із врахуванням впливових факторів та режимів роботи ВК ІВС. Формалізована схема повинна містити вичерпне формулювання експериментального дослідження та повний перелік величин що вимірюються

Третій етап включає безпосередній процес створення математичної моделі ВК ІВС. Умовою створення власне математичної моделі, на базі формалізованої, є внесення у математичну модель комплексу співвідношень що описують ВК ІВС в аналітичному вигляді.

На *заключному, четвертому етапі*, проводиться перевірка адекватності створеної моделі вимірювального каналу [17, 20, 26, 34].

2.2. Дослідження та перевірка ІВС. Розрахункові методи визначення метрологічних характеристик

2.2.1. Дослідження характеристик ІВС

З метою забезпечення єдності вимірювань проводять випробування ІВС. Розрізняють наступні види випробувань:

- випробування, що проводяться з метою визнання стандартизованими конкретних зразків ІВС або ІВС певного типу;
- випробування, що проводяться з метою з'ясування метрологічних властивостей ІВС (або окремих ВК ІВС), в першу чергу діапазону вимірювань, чутливості, визначення умов застосування, характеристик точності та інших особливостей.

Для ІВС і ВК ІВС, які застосовуються в сферах поширення ДМКН, проводяться випробування з метою затвердження типу.

Для ІВС, які застосовуються поза сфер поширення ДМКН, проводяться випробування з метою сертифікації.

Випробування та затвердження типу включають:

- випробування для цілей затвердження типу;
- прийняття рішення про затвердження типу;
- державну реєстрацію та видачу сертифіката про затвердження типу засобу вимірювальної техніки;
- випробування на відповідність затвердженому типу;
- інформаційне обслуговування споживачів вимірювальної техніки, контрольних і наглядових органів і органів управління.

Розроблена нормативна база дозволяє повноцінне проведення випробувань і затвердження типу засобів вимірювальної техніки та інформаційно-вимірювальних технологій.

Найбільш важливими етапами повного циклу робіт (починаючи від подачі заявки і закінчуючи державною реєстрацією ІВС), є:

- підготовка до проведення випробувань;
- проведення випробувань;
- оформлення результатів випробувань;
- затвердження типу, державна реєстрація та видача сертифіката.

Етапи «проведення випробувань» і «оформлення результатів випробувань» здійснюються відповідно до програми випробувань, затвердженої

державним центром випробувань засобів вимірювальної техніки (ДЦВ ЗВ) або узгодженої з ДЦВ ЗВ типової програми.

Підготовка до проведення випробувань включає в себе:

- подання заявки на проведення випробувань;
- затвердження (погодження) програми випробувань;
- укладення договору (контракту) про проведення випробувань.

Програма випробувань повинна містити наступні розділи:

- короткий технічний опис ІВС;
- перелік ВК;
- перелік документації, що пред'являється на випробування;
- розгляд ТД на ІВС;
- випробування;
- оформлення результатів випробувань.

У програмі випробувань призводять повний перелік ВК ІВС із посиланням на розділи ТД на ІВС, де дано докладний опис ВК і їх МХ. Якщо до складу ВК входять вимірювальні компоненти затверджених типів, вказують їх номери за державним реєстром [6, 26, 27].

Для ІВС, у яких в сферу розповсюдження ДМКН регламентується тільки частина (із загального числа) ВК, перелік складається тільки для цієї частини ВК. У перелік документів, які вимагаються, крім плану-графіка випробувань і програми випробувань, входять:

- ТЗ з доповненнями та змінами до нього;
- проект ТУ (включаючи ТУ на складові частини);
- проект експлуатаційної документації (ЕД), включаючи ЕД на складові частини;
- проект НД з перевірки при відсутності відповідного розділу в ЕД;
- протоколи і акти попередніх випробувань;
- документи, що засвідчують перевірку ЗВ, що входять до складу ВК, що використовуються в сфері поширення ДМКН;
- додаткові матеріали.

В даний час ТЗ на проектування ІВС може бути відсутнім, оскільки багато розробок проводяться в ініціативному порядку. Однак для таких складних систем як ІВС завжди необхідний документ, що замінює ТЗ при його відсутності. При проведенні випробувань бажано участь представника замовника. В обов'язковому порядку проводиться перевірка відповідності

технічних характеристик, наведених в ТУ і (або) ЕД вимогам ТЗ або документу що його замінює, а також вимогам НД, що розповсюджується на випробувану ІВС. При розгляді документації проводиться перевірка відповідності методів регламентації МХ вимірювальних каналів ІВС, методів і засобів їх визначення і (або) контролю, наведених в ТД на ІВС.

При цьому перевіряється:

- повнота і правильність обліку всіх факторів (особливості випуску компонентів ІВС і їх монтажу на об'єкті, рознесення вимірювальних компонентів у просторі, умови експлуатації ІВС на об'єкті, структура ІВС, особливості алгоритмів обробки результатів вимірювань та ін.) впливають на вибір доцільного способу регламентації МХ ІВС;
- достатність комплексів нормованих або експериментально визначених МХ вимірювальних компонентів ІВС, характеристик точності атестованих алгоритмів і програм обробки даних для розрахунку по ним МХ ВК ІВС;
- наявність і правильність методик розрахунку МХ вимірювальних каналів ІВС за МХ компонентів що входять до них;
- наявність і правильність методів та засобів експериментального визначення і (або) контролю МХ вимірювальних каналів ІВС та (або) їх вимірювальних компонентів, методів визначення достовірності передачі даних в лініях зв'язку ІВС, та ін.;
- достатність регламентованого комплексу МХ вимірювальних каналів ІВС для визначення характеристик точності в реальних умовах її експлуатації [10, 11, 17, 26].

При розгляді ТД на ІВС проводиться оцінка можливості метрологічного обслуговування ІВС в процесі експлуатації; перевіряється наявність в документації вказівок по налаштуванню та усуненню можливих несправностей ІВС; проводиться оцінка забезпеченості ІВС методами і засобами періодичної повірки.

Для ІВС імпортного виробництва встановлюється можливість застосування для повірки ІВС і їх компонентів імпортних еталонів, зазначених в методиці повірки ІВС або заміни їх на еталони вітчизняного виробництва із врахуванням їх конструктивної та іншої сумісності із зразком випробуваної ІВС.

За результатами розгляду ТД на ІВС можуть бути прийняті наступні рішення:

- про доцільність зміни комплексу метрологічних характеристик ВК ІВС (в тому числі необхідності переатестації алгоритмів і програм обробки даних);
- про коригування або доопрацювання представлених методик випробувань зразків ІВС;
- щодо зарахування результатів раніше проведених випробувань зразків представленої ІВС.

Перевірка функціонування зразка ІВС проводиться шляхом виконання ряду перевірок і операцій, спеціальних тестів, які забезпечують можливість роботи зразка в кожному із передбачених режимів роботи в усіх діапазонах вимірювань, відповідно до методик, викладених в експлуатаційній документації на ІВС.

В якості додаткових матеріалів служить технічна документація, яка містить:

- результати дослідницьких випробувань (моделей, макетів та ін.), що проводяться на етапах розробки, проектування;
- результати випробувань, що відносяться до етапу «дослідна експлуатація». В більшості випадків мова йде про системи типу ІВС-3, або ІВС, що входять в якості підсистем в більш складні автоматизовані системи;
- матеріали атестації алгоритмів і програм обробки вимірювальної інформації.

В цілому, в додаткових матеріалах наводяться результати випробувань, що проводяться з метою виявлення метрологічних властивостей ІВС. При відсутності протоколів і актів попередніх та дослідницьких випробувань ДЦВ проводить випробування по кожному пункту програми випробувань та розробляє серію додаткових досліджень, необхідних для визначення метрологічних властивостей ІВС та підтвердження номенклатури контрольованих параметрів і встановлених в ТД норм. В останньому випадку, проведення випробувань з метою затвердження типу може продовжуватися досить тривалий час [9, 26, 34].

При попередніх дослідженнях, проведених розробником (часто із залученням органів ДМС) перевіряється незмінність метрологічних властивостей ВК ІВС у часі, залежно від дії впливових величин і факторів збурення та їх вплив на точність вимірювань і результат функціонування.

На основі результатів попередніх досліджень встановлюється мінімум операцій, які необхідно виконувати в подальшому при перевірці ВК ІВС, а також міжповірочний інтервал (МПІ). Це дає можливість, на етапі випробувань для цілей затвердження типу, вирішити питання про подальше метрологічне обслуговуванні даної ІВС.

При позитивних результатах проведених випробувань ІВС для цілей затвердження її типу ДЦВ ЗВ затверджує (погоджує) методику повірки, погоджує опис типу і складає акт випробувань відповідно до вимог. При цьому в описі типу, що є невід'ємною частиною сертифіката про затвердження типу, вказують ВК (або компоненти, що утворюють ВК), на які поширюється сертифікат [5, 17, 26].

У ряді випадків, при дослідженні та випробуванні ІВС, здійснюють процедури, які відповідають поняттю метрологічна атестація (МА). Метрологічній атестації можуть підлягати засоби вимірювань, які не підпадають під сфери розповсюдження ДМКН.

2.2.2. Повірка метрологічних характеристик ІВС

Згідно з визначенням, ІВС мають всі ознаки ЗВ. Відповідно, всі основні принципи, покладені в основу процедури повірки ЗВ, поширюються на ІВС (як закінчений виріб), ВК і їх складові компоненти.

Повірка засобів вимірювальної техніки – встановлення органом державної метрологічної служби (або іншим офіційно уповноваженим органом, організацією) придатності засобів вимірювальної техніки до застосування, на підставі експериментально визначених метрологічних характеристик та підтвердження їх відповідності встановленим обов'язковим вимогам. Повірці підлягають ЗВ, що регламентуються ДМКН.

При цьому виділяють такі види повірки:

- первинну перевірку;
- періодичну перевірку;
- позачергову перевірку;
- інспекційну перевірку;
- комплектну перевірку;
- поелементну перевірку.

Первинна перевірка виконується при випуску ЗВ у виробництво або після ремонту, а також при ввезенні ЗВ з-за кордону партіями, при продажу.

Періодичній повірці піддаються ЗВ, що знаходяться в експлуатації або на зберіганні. Періодична повірка виконується через встановлені МПІ.

Позачерговою називається повірка, проведена до настання терміну чергової періодичної повірки.

Інспекційна перевірка проводиться органом ДМКН при проведенні державного нагляду за станом і застосуванням ЗВ.

Комплектною називають повірку, при якій визначаються МХ ЗВ, властиві йому як єдиному цілому.

Поелементною називають повірку, при якій значення МХ ЗВ встановлюються за МХ його складових елементів або частин. Поелементна повірка характерна для ЗВ, в тому числі, для більшості зразків ІВС [5, 13, 31].

Як випливає з визначення, повірка являє собою процедуру контролю, невід'ємною частиною якої є експериментальне визначення МХ об'єкта контролю. Найкращим способом контролю та визначення МХ вимірювальних каналів ІВС та їх компонентів є «наскрізний» метод.

При «наскрізному» методі на вхід ВК ІВС подається зразковий сигнал, який імітує вимірювану величину. На виході контрольованого ВК ІВС знімається вихідний сигнал (результат вимірювання). Отримані в результаті експерименту значення МХ служать для порівняння із нормованими МХ контрольованого ВК ІВС.

Необхідними умовами для повноцінного застосування «наскрізного» методу визначення і контролю МХ є:

- наявність доступу до входу ВК. Обмеження доступу може бути обумовлено конструкцією або способами установки первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків), наявністю «середовища завад» в місцях їх розташування, кліматичними умовами та ін.;
- можливість задавання необхідного набору всіх істотних для повірки вимірювальних каналів ІВС значень впливових величин, характерних для умов експлуатації ІВС;
- наявність еталонів і засобів задавання вимірюваних величин.

У тих випадках, коли для ВК ІВС не виконуються перераховані вище умови застосування «наскрізного» методу контролю і визначення МХ ВК ІВС, застосовують *розрахунково-експериментальний метод*.

При роботі із ВК виділяється така його частина, яка складається з компонентів з нормованими МХ, для якої може бути застосований «наскрізний» метод. Бажано, щоб в доступну частину ВК входило якомога

більше число компонентів. Це дозволяє, по можливості, охопити при контролі метрологічних характеристик лінії та пристрої зв'язку, функціональні перетворювачі, обчислювальні пристрої [9, 17, 27].

Метрологічна характеристика ВК в цілому обчислюються за певними експериментальними МХ доступної частини ВК і нормованим або приписаним МХ (за результатами раніше проведених експериментальних досліджень) недоступної частини ВК. Вибір експериментального методу визначення і контролю МХ ВК ІВС залежить від ряду впливових факторів, що визначають умови постановки і проведення експерименту.

На вибір зазначених методів впливає також наявність або відсутність апріорних відомостей про метрологічні властивості ВК ІВС, вид ВК. Апріорні відомості про склад і суттєвості факторів, що впливають, можуть бути отримані з НД та ТД на ІВС. При відсутності апріорних відомостей про складу і природу факторів, які впливають на точність вимірювань, проводять попереднє дослідження метрологічних властивостей ВК ІВС. Такі дослідження зазвичай проводять в рамках дослідницьких або попередніх випробувань, і здійснюються на етапах розробки, проектування ІВС або введення її в експлуатацію. В рамках повірочних робіт подібні дослідження не проводяться.

Методика повірки ВК конкретних зразків ІВС розробляється на стадії розробки і попередніх досліджень, перевіряється та затверджується на стадії проведення випробувань з метою затвердження типу. Розроблено і застосовані узагальнені методи контролю МХ, що використовуються при повірці ВК ІВС. Однак, з огляду на складність складу ІВС, методики повірки, в переважній більшості випадків, є індивідуальними для конкретних зразків або типів ІВС.

Загальні методи контролю МХ можуть бути застосовані у випадку коли переважають впливові фактори, які призводять до закономірного спотворення результатів вимірювань, а стандартним відхиленням (мірою невизначеності, що оцінюється за типом А) можна знехтувати. Структурна схема для виконання повірки аналогових і цифроаналогових ВК приведена на рис.2.1 [11, 23].

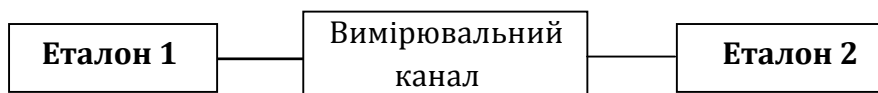


Рис. 2.1. Структурна схема повірки ВК

Еталон 1 задає на вході вимірювального каналу значення вимірюваної величини, відповідні значенням точок діапазону вимірювань. При повірці цифроаналогових ВК як еталон 1 використовується довільний генератор кодових послідовностей.

Еталон 2 зрівнює значення вихідних сигналів ВК (за значеннями N_o вихідного коду) і проводить обчислення значення X_{k1} і контрольних сигналів. Перевіряються точки X вхідного сигналу, обчислюються нижня B_b і верхня B_t границі, в межах яких можуть знаходитися вихідні сигнали ВК (тобто показники еталона 2). Результати зрівняння обчислюються за виразами 2.1 та 2.2.

$$B_b = F_n(X) - D_o \quad X_{k1} = F_{no}(N_o) - D_o, \quad (2.1)$$

$$B_t = F_n(X) + D_o \quad X_{k2} = F_{no}(N_o) + D_o \quad (2.2)$$

де $F_{no}(N_o)$ – значення вхідного сигналу ВК, обчислене для точки, що перевіряється за номінальною зворотною функцією перетворення ВК;

D_o – межа допустимих відхилень вхідного сигналу від номінального значення. При необхідності, може задаватися контрольний допуск, рівний 0,8 значенню границі D_o .

На наступному етапі повірки ВК встановлюють значення величини X , яка подається на вхід ВК, рівним X_{k1} і реєструють вихідний код (показання) N_1 ВК, що перевіряється. Якщо справджується нерівність $N_1 \geq N_o$, ВК визнають таким, що не пройшов процедуру повірки. Далі, встановлюють значення величини X , яка подається на вхід ВК, рівною X_{k2} і реєструють вихідний код (показання) N_2 ВК, що перевіряється. Якщо задовольняється нерівність $N_2 \leq N_o$, ВК, що перевірявся бракує. ВК повинен задовольняти встановленим нормам для всіх контрольованих точок діапазону вимірювань.

Інформаційно-вимірювальні системи і вимірювальні канали ІВС, що не підлягають ДМКН, піддаються калібруванню. Незважаючи на те, що в поділі понять повірка та калібрування основним є законодавчий аспект, зміст робіт з калібрування дещо відрізняється від змісту робіт по повірці.

Калібрування засобів вимірювальної техніки – сукупність операцій, що встановлюють співвідношення між значенням величини, отриманої за допомогою даного засобу вимірювань і відповідним значенням величини, заданої за допомогою еталона, з метою визначення дійсних метрологічних характеристик цього ЗВ. Результати калібрування дозволяють визначати поправки та інші МХ ЗВ.

Досить часто зразки ІВС експлуатуються в технічних умовах недостатньої повноти даних, що описують взаємодію вимірювальної системи та об'єкту досліджень. Це створює певні труднощі при нормуванні МХ вимірювальних каналів ІВС та системи в цілому. Виникає потреба проведення повірочних та калібрувальних процедур, з метою оцінки змін МХ інформаційної вимірювальної системи, у зв'язку із деградацією її складових частин та можливості появи впливових взаємодій між компонентами ІВС. Зразки ІВС (в тому числі затвердженого типу) можуть мати індивідуальні особливості змін МХ з часом у процесі експлуатації. Дані положення необхідно враховувати при проведенні метрологічної експертизи та оцінці МХ вимірювальних каналів та ІВС в цілому [10, 27, 34].

Проблеми і тенденції розвитку в області випробувань та перевірки ІВС. Проблеми проведення випробувань ЗВ і ІВС тісно пов'язані з проблемами їх метрологічної надійності, під якою розуміється здатність ЗВ (ІВС) зберігати встановлені значення МХ протягом заданого часу при певних режимах і умовах експлуатації.

З огляду на унікальність кожної ІВС, проблема зводиться до питання забезпечення постійного моніторингу за характером зміни МХ ІВС і її компонентів на місці експлуатації ІВС, використання отриманої при цьому інформації для коригування МПІ. Один з важливих шляхів вирішення цього завдання є забезпечення розвитку і вдосконалення методів самокалібрування та самодіагностики ВК ІВС.

Для багатьох ІВС характерний автономний – в метрологічному сенсі режим використання, коли не може бути реалізований їх оперативний зв'язок із первинними (за повірочною схемою) засобами. Автономний режим використання ІВС є однією із ключових проблеми децентралізації в системі забезпечення єдності вимірювань. Для класичних засобів вимірювань прив'язка до еталону означає, в кінцевому випадку, переміщення до місця його знаходження. В той же час, перевірка автономної ІВС потребує переміщення еталону до місця її розташування. Відповідно, виникає необхідність розробки та удосконалення «мобільних» еталонів, необхідних для метрологічної перевірки ВК ІВС. При цьому необхідно враховувати, що «мобільні» еталони часто можуть використовуватися в умовах, відмінних від умов зберігання і застосування еталонів в організаціях ДМС і ДНМК. Питання методики застосування мобільних еталонів повинні вирішуватися на стадіях розробки та випробувань ІВС.

У процесі розвитку ІВС проявляються загальні тенденції розвитку інформаційної та вимірювальної техніки:

- зростання точності проведення вимірів, розширення номенклатури вимірюваних величин, переліку вимірювальних завдань та діапазонів вимірювань;
- забезпечення доступу споживачів до засобів вимірювань вищої точності;
- забезпечення вимірювань в умовах впливу «жорстких» зовнішніх факторів (висока температура, тиск, іонізуюче випромінювання, наявність хімічних реагентів та ін.)

Розширення номенклатури вимірюваних величин в рамках однієї ІВС призводить до необхідності «прив'язки» ІВС до кількох повірочних схем. Для вирішення питань самокалібрування необхідна наявність в структурі ІВС вбудованих еталонів, що призводить до зростання вимог забезпечення точності «мобільних» еталонів і створює практичний вихід до вищих ланок повірочних схем [9, 36, 37].

Слід зазначити, що в даний час існують дві протилежні тенденції в розвитку техніки сприйняття вхідних величин. Відповідно до однієї точки зору, максимум операцій, по формуванню найбільш підходящого для подальшого перетворення сигналу, слід виконувати в первинному вимірювальному перетворювачі (датчику). Застосування інтегральних технологій для виготовлення чутливих елементів створює необхідні можливості виробництва різних інтелектуальних датчиків, які являють собою інтегральні системи збору та попередньої обробки результатів вимірювань. Подібні датчики повинні формувати сигнали які не вимагають обов'язкового вторинного посилення, мати слабку чутливість до впливових чинників у процесі вимірювань.

З огляду на необхідність установки таких датчиків на об'єкті, що збільшує кількість важкодоступних до перевірки компонентів ВК ІВС, з'являється необхідність в подальшому покращенні розрахунково-експериментальних методів визначення МХ і їх контролю. Підвищуються вимоги до індивідуального градування датчиків.

В області найбільш масових вимірювань (наприклад температури з допомогою термопар), основне завдання по перетворенню сигналів від датчиків з мінімальними втратами вимірювальної інформації вирішується за допомогою ВК. У якості вимірювальних перетворювачів використовуються

прості датчики з типовими характеристиками. Прикладом може служити випробування реактивного двигуна, при якому в різних точках випробуваного виробу розміщують сотні датчиків, розрахованих на різні діапазони температур. Така схема застосування потребує вдосконалення методів випробувань багатоканальних ІВС.

2.2.3. Розрахункові методи визначення метрологічних характеристик

У випадку застосування агрегатованого принципу побудови ІВС, виникає проблема визначення їх метрологічних характеристик розрахунковими методами.

При застосуванні даних методів властивості ІВС часто ідеалізуються. Тому, для розрахунку МХ такими способами необхідно, виконати збір значного об'єму інформації про режими та умови роботи ІВС. При використанні розрахункових методів визначення МХ ІВС вибирають вимірювальні канали що містять лінійні аналогові компоненти включені послідовно. У випадку наявності у ВК дискретних елементів, розрахунковими методами досліджуються лише ті ВК, у яких дискретні елементи не створюють додаткову невизначеність.

Спочатку створюється математична модель вибраного вимірювального каналу ІВС, аналізується нормативна документація що описує ВК та проводяться експериментальні дослідження, спрямовані на перевірку адекватності моделі ВК. Далі проводять вибір комплексу вихідних даних та функціональних залежностей, що дозволяє визначити МХ на вході та виході ВК ІВС [10, 11, 26].

В подальшому, проводиться розрахунок номінальної функції перетворення та її метрологічних характеристик, шляхом порівняння теоретичних значень із значеннями вимірюваної інформації на виході каналу, та оцінка складових невизначеності показань ВК.

2.2.4. Визначення метрологічних характеристик програм розрахунку

У процесі метрологічної атестації (МА) алгоритмів обчислень проводиться їх оцінка по критеріям складності, точності та надійності.

Точність алгоритму відповідає точності отриманих результатів, при слідуванні закладеній в алгоритм моделі вхідних даних.

Складність алгоритму відповідає кількості одиничних кроків обробки даних, у процесі вирішення завдання із застосуванням даного алгоритму, та кількісно характеризує його трудомісткість.

Під *надійністю алгоритмів* розуміють їх здатність зберігати повну функціональність при наявності завад та накопиченні помилок у процесі роботи.

Під час конструювання та розробки ІВС проводиться вибір оптимального алгоритму для вирішення вибраних завдань. Дана умова забезпечує мету атестації алгоритму.

Характеристики програми обчислень, від яких прямо залежить результат досліджень і можливість появи помилок та втрат у вимірювальній інформації, можна вважати метрологічними. Такі помилки та втрати можуть виникати внаслідок недосконалості як самих алгоритмів так і умов їх застосування, недостовірністю експериментальної інформації, що є вихідною для роботи обчислювальних компонентів, та впливовими факторами невизначеної природи.

При цьому, приймається за даність незмінність програми обчислень у процесі роботи, у випадку незмінності середовища проведення обчислень, сталості складу обчислювальних елементів та програмного коду. Тобто, така програма обчислень, при застосуванні ідентичних умов роботи, сталості обчислювальних компонентів та набору вхідних даних повинна реалізовувати незмінний результат.

Якщо виникають умови, що унеможливають проведення повного комплексу обчислень, вводять функцію зв'язку метрологічних характеристик із наявними обмеженнями. Дана функція враховує особливості алгоритмів та може враховувати часові обмеження, редукцію кроків обчислень або кроків дискретизації. У процесі метрологічної атестації алгоритмів вибирають параметри обмежень що забезпечують мінімальні значення похибок [18, 23, 26, 34].

Дослідження метрологічних характеристик (МХ) програм обчислень, частіше за все проводять шляхом проведення обчислювальних експериментів методами «зразкового заходу» або «зразкового приладу».

При застосуванні методу «зразкового заходу» (рис.2.2, а) застосовується генеруючий пристрій, що має назву «цифровий векторний імітатор». Він задає цифрові сигнали які порівнюються з інформацією на виході обчислювального компоненту за допомогою пристрою порівняння

результатів. Генерована векторним імітатором інформація задається вибраним алгоритмом або відтворюється із визначених баз даних.

Числові дані $\bar{N}^\circ(t_i) \rightarrow a$, що надходять на вхід пристрою порівняння, та значення результатів порівняння a необхідно визначати із заданою точністю, відповідно до умов проведення експерименту.

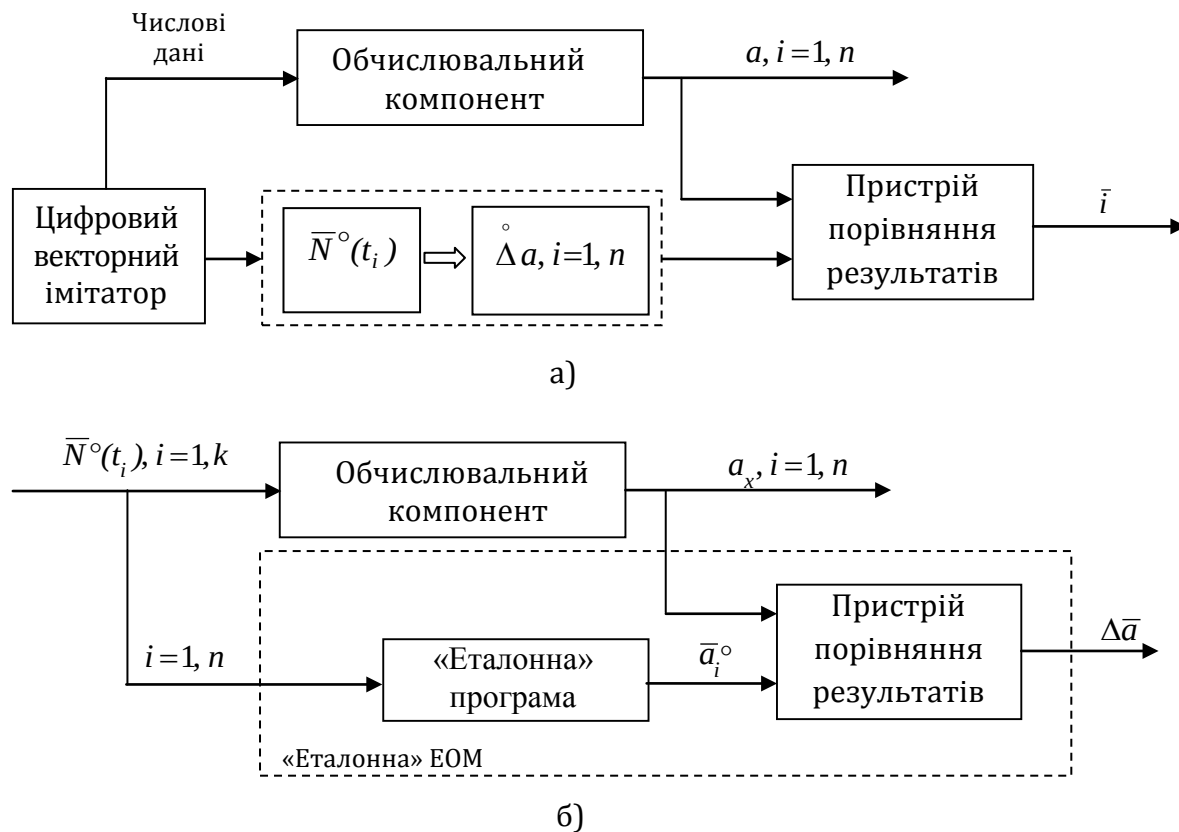


Рис.2.2. Методи визначення МХ програм розрахунку [26]

В основі методу «зразкового приладу» (рис.2.2, б) застосовується імітація прямих вимірювань $\bar{N}^\circ(t_i)$ машинним способом. На вхід пристрою порівняння приходять значення, отримані у результаті роботи програми обчислень a та тестові значення $\bar{a}_i^\circ$ що відповідають ідеальним значенням.

При проведенні порівняння враховуються закони розподілу показів досліджуваних величин. Застосування методу «зразкового приладу» є досить складним та трудомістким. Доцільність його застосування виникає у випадку метрологічної атестації програм обчислень на стадії розробки або у випадку первинної МА новостворених програм [11, 26, 36].

Метрологічну атестацію (МА) програм обчислень необхідно проводити повторно у випадку зміни окремих обчислювальних компонентів та вхідного набору даних.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Обґрунтуйте основні засади нормування МХ ІВС.
2. В яких випадках проводять випробування з метою затвердження типу інформаційно-вимірювальних систем і що вони включають?
3. Від чого залежить вибір експериментальних і розрахункових методів визначення і контролю метрологічних характеристик вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальних систем?
4. Охарактеризуйте основні проблеми і специфічні особливості експериментальних досліджень метрологічних властивостей інформаційно-вимірювальних систем?
5. Перерахуйте основні етапи повного циклу робіт по затвердженню типу інформаційно-вимірювальних систем і дайте коротку характеристику кожного етапу.
6. Проаналізуйте особливості двох етапів у розвитку ВС.
7. Що є номінальною функцією перетворення ВК? Охарактеризуйте методику її розрахунку.
8. Сформулюйте основні принципи, які використовуються при визначенні метрологічних характеристик програм обчислень.
9. Перерахуйте етапи підготовки до проведення експерименту із визначення МХ ІВС. Охарактеризуйте особливості кожного етапу.
10. Розгляньте приклад побудови плану експерименту при наявності трьох впливають величин.
11. Визначте мету та завдання процедури нормування МХ ІВС.
12. Як враховується вплив впливових величин при визначенні метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем?
13. Які завдання вирішуються в процесі побудови моделі вимірювального каналу?
14. Які завдання вирішуються при перевірці відповідності методів і засобів регламентації і контролю метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем вимогам нормативної документації?
15. Особливості опису аналогово-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів при створенні математичної моделі ВК ІВС.
16. Які характеристики вимірювальних каналів визначають його динамічні властивості?

РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ (ІВК). КЛАСИФІКАЦІЯ, ІНФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СТРУКТУРА ТА АЛГОРИТМИ ІВК

1.1. Основні поняття, класифікація та структурні елементи ІВК.

Галузь застосування і ознаки ІВК та ІВС

3.1.1. Основні визначення, область застосування та ознаки інформаційно-вимірювальних комплексів та інформаційно- вимірювальних систем (ІВК та ІВС)

Інформаційно-вимірювальний комплекс (ІВК) являє собою автоматизований засіб вимірювань електричних величин, на основі якого можливе створення ІВС, шляхом приєднання до входу вимірювальних каналів ІВК датчиків з уніфікованим електричним вихідним сигналом і генерації на основі програмних компонентів ІВК програм обробки інформації та управління експериментом. ІВК є уніфікованим ядром ІВС.

ІВК створюється методом проектного компонування із застосуванням системно пов'язаних функціональних блоків і пристроїв, що випускаються в складі агрегатованих комплексів ІВК, вироблених серійно, та пройшли випробування з метою затвердження типу.

Основними ознаками ІВК є: наявність нормованих МХ; блочно-модульна структура, вимірювальні та обчислювальні компоненти якої серійно випускаються як агрегатні ЗВ; наявність процесора або ЕОМ, програмне управління ЗВ; використання типових інтерфейсів для автоматизації та забезпечення взаємодії між ЗВ.

За призначенням ІВК поділяють на типові, проблемні, спеціалізовані (табл.3.1.)

Таблиця 3.1.

Класифікація ІВК за галуззю застосування

Типові	Проблемні	Спеціалізовані
Для вирішення широкого кола завдань автоматизації досліджень, вимірювань і випробувань незалежно від сфери застосування	Для вирішення широко поширеного, але специфічного для конкретної області застосування завдання	Для вирішення унікальних завдань автоматизації та вимірювань

До складу ІВК входять технічні і програмні компоненти, склад яких наведено на рис.3.1, 3.2 [6, 17, 18].



Рис. 3.1. Склад технічних компонентів ІВК

Складові частини ІВК повинні відповідати наступним вимогам:

- бути сумісними у процесі експлуатації;
- взаємодіяти між собою належним чином (відповідно до ТЗ та НД);
- мати нормовані метрологічні характеристики (комплекс МХ) у заданому робочому діапазоні.

Для розробки інформаційно-вимірювальних комплексів використовують системотехнічний підхід із врахуванням ієрархії та взаємозв'язків компонентів у структурі ІВК.

До найвищого рівня структури ІВК входить обчислювальне ядро, при цьому, найнижчі рівні формуються первинними вимірювальними перетворювачами та датчиками, що безпосередньо формують первинний вимірювальний сигнал (відгук). Обмін інформацією між компонентами ІВК може відбуватися у прямому напрямі (від ПВП до обчислювальних засобів) та у зворотному.



Рис. 3.2. Склад програмних компонентів ІБК

Ієрархія компонентів ІБК може розглядатися із принципів функціонального або конструктивного підходу [23, 41].

3.1.2. Класифікація ІБК. Основні структурні елементи ІБК

Існує три варіанти магістрально-модульного принципу побудови ІБК

I – із магістраллю приладового інтерфейсу і використанням серійних автономних приладів та пристроїв (ІБК-7, ІБК-8, ІБК-12, ІБК-15);

II – із магістраллю в стандартах КАМАК (ІБК-2, ІБК-6, ІБК-16, ІБК-18), перший рівень включає локальні вимірювальні комплекси;

III – із машинної магістраллю з використанням системних уніфікованих вузлів (К-750, К-755, К-766).

Розроблено концепцію магістрально-модульного принципу побудови систем вимірювання на базі уніфікованих модулів і стандартних інтерфейсів із застосуванням мікропроцесорних засобів і міні-ЕОМ.

В основу цієї концепції покладено агрегатовані комплекси:

- мікроелектронних засобів електричних вимірювань;

- засобів диспетчеризації, автоматизації і телемеханіки (мікро-ДАТ);
- керуючих обчислювальних комплексів СМ РЕВ.

У концепції магістрально-модульного принципу побудови систем вимірювання прийнята трирівнева ієрархічна структура організації ІВК. Наприклад, ІВК-3 (у виконанні, для проведення оптичних спектральних досліджень), може включати комплект СМ-3, крейт КАМАК з набором функціональних модулів, цифровий ампервольтметр і планшетний плотер [8].

Базовий комплект СМ-3 містить мікропроцесор, оперативний пристрій (ОЗП), алфавітно-цифровий друкуючий пристрій, дисплей, накопичувачі. Крейт КАМАК містить наступні функціональні модулі: два двоканальних ЦАП, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), комутатор, два модуля управління кроковими двигунами (КД), модулі вхідних і вихідних регістрів, лічильники імпульсів, контролер крейта (КК).

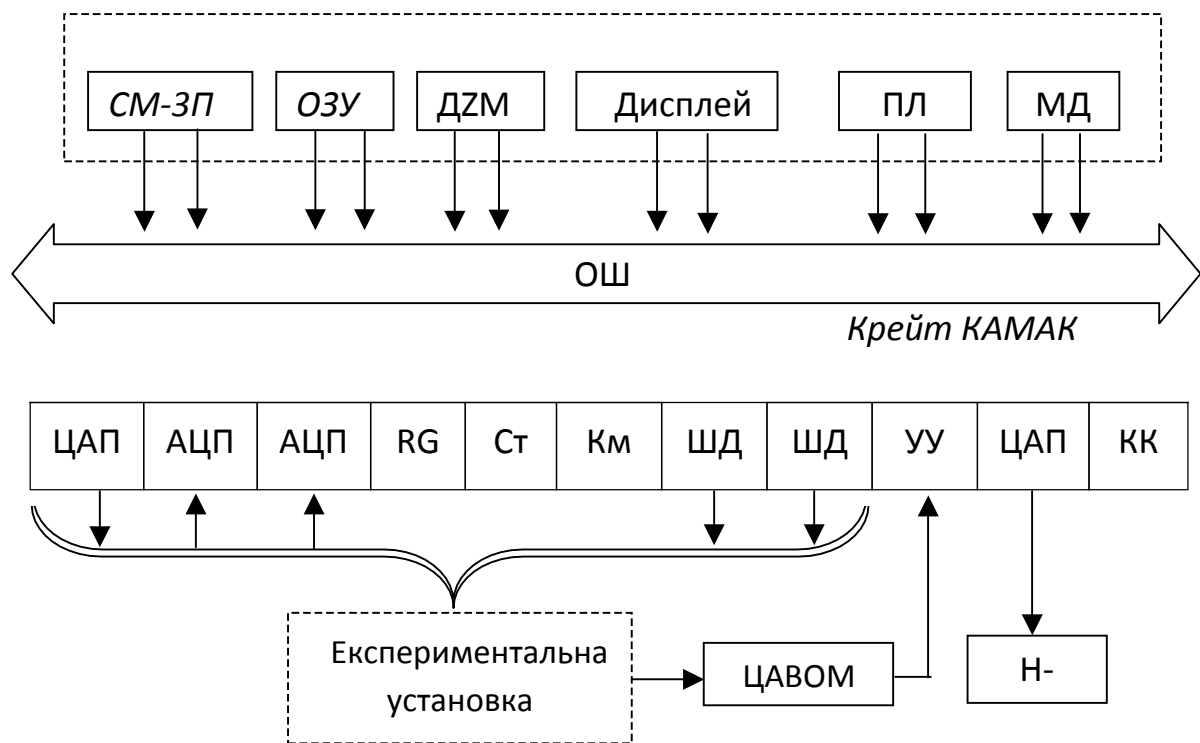


Рис. 3.3. Структура ІВК-3

Нульовий (внутрішньокаркасний) рівень включає малі програмовані контролери, виносні засоби збору і попередньої обробки інформації, вимірювальні підсистеми на основі модулів, локальні регулятори. Середньо-каркасний магістральний інтерфейс – паралельний, асинхронний.

Перший рівень включає локальні вимірювальні комплекси і системи, що керуються обчислювальними комплексами (здійснюють отримання,

обробку, зберігання та обмін інформацією з нульовим і другим рівнем). Внутрішньосистемний обмін інформацією на цьому рівні між засобами, розташованими компактно (до 20м), здійснюється із застосуванням приладового магістрального інтерфейсу. Вихід на нього з каркасного рівня здійснюється застосуванням відповідного модуля сполучення.

Другий рівень – включає розподілені ІВК і системи, засоби системного обміну з нульовим та першим рівнем. Для внутрішньосистемного обміну на 2-му рівні і міжсистемного обміну застосовується магістральний мережевий інтерфейс [7, 17, 36].

Структури ІВК-1...ІВК-6 аналогічні за виконанням. Розглянута структура ІВК-3, призначеного для автоматизації досліджень із застосуванням спектральних пристроїв може містити широкий перелік модулів розширення: оптичні вимірювачі агрегатованого типу, що містять первинні світло-електричні перетворювачів (СЕР) та пристрої із зарядовим зв'язком (ПЗЗ-матриці), об'єднані у складі окремих ВК паралельного та послідовного типу, заданий перелік периферійних пристроїв, під'єднаних за допомогою блоків спряження. Крейт КАМАК (у складі ІВК-3) дозволяє контролювати переміщення елементів оптики на оптичній лаві, комує сигнали що надходять від виконавчих пристроїв оптичних модулів розширення.

3.1.3. Основні вимоги до правил і методів випробування ІВК

Випробування ІВК, що проводяться з метою забезпечення єдності вимірювань, подібні за основними процедурами до методик випробування ІВС:

- випробування зразків ІВК проводяться, з метою визнання відповідності конкретних зразків ІВК певному типу;
- випробування, що проводяться з метою з'ясування метрологічних властивостей ІВК (або окремих ВК ІВК), в першу чергу діапазону вимірювань, чутливості, визначення умов застосування, характеристик достовірності і повноти вихідної вимірювальної інформації, інших особливостей.

Для ІВК та ВК ІВК проводяться випробування з метою затвердження типу. Для ІВК, які застосовуються поза сфер поширення ДМКН, проводяться випробування з метою сертифікації.

Випробування та затвердження типу включають:

- випробування ІВК для цілей затвердження типу;

- прийняття рішення про затвердження типу ІВК;
- проведення державної реєстрації та видачу сертифіката про затвердження типу ІВК;
- випробування ІВК на відповідність затвердженому типу;
- регламентоване обслуговування кінцевих споживачів вимірювальної техніки, контрольних і наглядових органів і органів управління.

Нормативна база випробувань і затвердження типу засобів вимірювальної техніки та інформаційно-вимірювальних технологій повинна відповідати вимогам ДМС у галузі застосування. Найбільш важливими етапами повного циклу робіт (починаючи від подачі заявки і закінчуючи державною реєстрацією конкретного зразку ІВК), є:

- підготовка до проведення випробувань ІВК;
- проведення випробувань ІВК;
- оформлення результатів випробувань ІВК;
- затвердження типу ІВК, державна реєстрація та видача сертифіката.

Етапи «проведення випробувань» зразків ІВК та «оформлення результатів випробувань» здійснюються відповідно до розробленої програми випробувань, затвердженої державним центром випробувань засобів вимірювальної техніки або типової програми для вибраного зразку ІВК [6, 26, 34].

Етап «Затвердження типу, державна реєстрація та видача сертифікату відповідності на ІВК» включає в себе наступні пункти:

- подання заявки на проведення випробувань конкретного зразку ІВК;
- затвердження (погодження) програми випробувань ІВК;
- укладення договору (контракту) про проведення випробувань.

Програма випробувань повинна містити наступні розділи:

- короткий технічний опис зразку ІВК, що підлягає випробуванням;
- перелік ВК інформаційно-вимірювального комплексу;
- перелік документації, що пред'являється на випробування;
- розгляд нормативної та технічної документації на зразок ІВК;
- власне процедура випробування конкретного зразку ІВК;
- оформлення результатів випробувань.

У програмі випробувань проводять повний та виключний перелік ВК ІВК, та подають докладний опис ВК і їх МХ. Якщо до складу ВК входять вимірювальні компоненти затверджених типів, їх номери вказують відповідно до реєстрації у державному реєстрі ЗВТ. Для зразків ІВК, у яких

присутні ВК що не регламентуються ДМКН (із загального числа) ВК, перелік складається тільки для частини ВК що регламентується ДМКН.

У перелік документів, які вимагають ДМКН, крім плану-графіка випробувань і програми випробувань, входять:

- ТЗ з доповненнями та змінами до нього;
- проект ТУ (включаючи ТУ на складові частини);
- проект експлуатаційної документації (ЕД), включаючи ЕД на складові частини ІВК;
- проект НД з перевірки при відсутності відповідного розділу в ЕД;
- протоколи і акти попередніх випробувань ІВК;
- документи, що засвідчують перевірку ЗВ, що входять до складу ВК, використовуваних в сфері поширення ДМКН;
- додаткові матеріали.

В даний час ТЗ на проектування ІВК може бути відсутнім, оскільки часто конструкторські роботи проводяться в ініціативному порядку. Однак, для складних вимірювальних комплексів (ІВК), необхідно мати у наявності документ, що замінює ТЗ при його відсутності [9, 13, 26].

При проведенні випробувань конкретних зразків ІВК бажано участь представника замовника. В обов'язковому порядку проводиться перевірка відповідності технічних характеристик, наведених в ТУ та експлуатаційній документації вимогам ТЗ, а також вимогам НД, що розповсюджується на випробуваний зразок ІВК. При розгляді документації проводиться перевірка відповідності методів регламентації метрологічних характеристик ВК ІВК, методів і засобів їх визначення та контролю.

При цьому перевіряються наступні вимоги:

- повнота і правильність обліку всіх факторів що впливають на вибір доцільного способу регламентації МХ ІВК. Дані фактори можуть включати: особливості випуску компонентів ІВК та їх монтажу на об'єкті, розміщення компонентів ІВК, умови експлуатації ІВК на об'єкті, структура та особливості функціонування ІВК, особливості алгоритмів обробки результатів вимірювань та ін.);
- достатність комплексів нормованих або експериментально визначених МХ вимірювальних компонентів ІВК і характеристик точності атестованих алгоритмів та програм обробки даних для розрахунку по ним метрологічних характеристик ВК ІВК;

- правильність методик розрахунку метрологічних характеристик ВК ІВК, використовуючи МХ складових компонентів;
- наявність і правильність методів та засобів експериментального визначення, контролю метрологічних характеристик ВК ІВК, їх вимірювальних компонентів, методів та засобів передачі даних із забезпеченням достовірності інформації в протоколах обміну ІВК;
- достатність регламентованого комплексу МХ ВК ІВК для визначення характеристик точності в реальних умовах його експлуатації.

При розгляді технічної документації на конкретний зразок ІВК проводиться оцінка можливості метрологічного обслуговування ІВК в процесі експлуатації; перевіряється наявність в документації вказівок по налаштуванню і усуненню можливих несправностей ІВК; проводиться оцінка забезпеченості ІВК методами і засобами періодичної повірки. Для зразку ІВК закордонного виробництва встановлюється можливість застосування для повірки ІВК і його компонентів закордонних еталонів, зазначених в методиці повірки або заміни їх на еталони українського виробництва з урахуванням їх конструктивної сумісності із зразком ІВК [5, 26, 34].

За результатами розгляду технічної документації на конкретний зразок ІВК можуть бути прийняті наступні рішення:

- необхідності зміни комплексу метрологічних характеристик ВК ІВК (а також положення про необхідність атестації алгоритмів та програм обробки даних);
- коригування або доопрацювання розроблених методик випробувань зразку ІВК;
- зарахування результатів раніше проведених випробувань зразків ІВК що проходить процедуру випробування.

Перевірка функціонування зразка ІВК проводиться шляхом виконання ряду перевірок і операцій, спеціальних тестів, що забезпечують можливість роботи зразку ІВК в заданих режимах роботи для визначених діапазонів вимірювань, відповідно до методик, викладених в експлуатаційній документації для зразку ІВК. В якості додаткових матеріалів може бути використана документація, яка містить:

- результати дослідницьких випробувань (моделей, макетів зразків ІВК та ін.), що проводяться на етапах розробки, проектування;
- результати випробувань, що відносяться до дослідної експлуатації зразку ІВК. Дана перевірка проводиться для ІВК що можуть бути

інтегровані до складу автоматизованих вимірювальних систем більш високого порядку.

- результати атестації алгоритмів і програм обробки вимірювальної інформації для конкретного зразку ІВК.

В цілому, в додаткових матеріалах випробувань наводяться результати, що проводяться з метою виявлення метрологічних властивостей ІВК. При відсутності протоколів, актів попередніх та дослідних випробувань проводяться випробування по кожному пункту програми випробувань. Додатково реалізовується серія експериментальних досліджень, необхідних для визначення метрологічних властивостей зразку ІВК і підтвердження номенклатури контрольованих параметрів і встановлених в ТД норм. В такому випадку, проведення випробувань з метою затвердження типу, займає тривалий проміжок часу та регламентується вимогами ДМКН [10, 11, 26].

При попередніх дослідженнях, проведених розробником (часто із залученням органів ДМС) перевіряється незмінність метрологічних властивостей вимірювальних каналів ІВК у вибрані проміжки часу, за наявності впливових величин та факторів.

З'являється можливість визначити точність вимірювань і результат функціонування конкретного зразку ІВК. На підставі результатів попередніх досліджень встановлюється мінімум операцій, які необхідно виконувати в подальшому при перевірці ВК ІВК, а також визначається міжповірочний інтервал. Це дає можливість вирішити завдання метрологічного забезпечення при обслуговуванні зразку ІВК на етапі випробувань для цілей затвердження типу.

При позитивних результатах проведених випробувань ІВК для цілей затвердження типу державний центр випробувань ЗВ погоджує методику повірки, погоджує опис типу і складає акт випробувань. При цьому в описі типу, що є невід'ємною частиною сертифіката про затвердження типу, вказують ВК (або компоненти, що утворюють ВК), на які поширюється сертифікат. У ряді випадків при дослідженні та випробуванні ІВК здійснюються процедури, які стосуються положень метрологічної атестації.

Зміст метрологічної атестації ЗВТ розкривається у визначенні, наведеному в РМГ 29-99. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки (МА) полягає у визнанні метрологічною службою засобів вимірювань одиничного виробництва (або ЗВТ що є ввезеними одиничними екземплярами з-за кордону) придатним для застосування на підставі ретельних досліджень їх властивостей [17, 26, 36].

3.2. Інформаційні характеристики ІВК.

3.2.1. Приладовий стандартний інтерфейс (стандарт МЕК)

Розробником приладового інтерфейсу є фірма Hewlett-Packard (США).

Інтерфейс забезпечує роботу системи:

- із одним рівнем централізації;
- має роздільні інформаційні шини і шини управління;
- реалізує байт-послідовний, біт-паралельний обмін інформацією;
- не регламентує типи систем, що працюють в системі ЕОМ, а також конструкцію і живлення приладів, що об'єднуються в систему.

З'єднання функціональних блоків (ФБ) здійснюється через магістральний канал (МГК) загального користування (загальною довжиною не більше 20 м). Число блоків приєднаних до МГК може складати 15 (загальна кількість адрес приймачів інформації не більше 31 при одnobайтовій і 961 при двобайтовій адресації).

МГК складається з 18 ліній, вісім з яких (ЛД0 ... ЛД7) використовуються для послідовної побайтової передачі адрес, команд і даних, а інші 8 – для передачі сигналів загального управління.

ШК – шина керування, об'єднує 5 ліній; ШС – шина синхронізації, об'єднує 3 лінії.

Максимальна швидкість обміну інформацією дорівнює 1 Мбайт/с.

Управління передачею інформації по лінії ШД здійснюється за трьома лініями: ДП – готовий до прийому; ШС ДП – дані прийняті; СД – супровід даних. *Рівень активності ліній позначається:* високий стан - лог. «1» низький стан – лог. «0».

Будь-який пристрій стає джерелом інформації, якщо його адреса поміщається на шину даних, коли лінія УП – лог. «0».

У вимірювальній системі дані передаються стандартним кодом у вигляді послідовності байтів: кожен обмін повинен бути завершений перш, ніж почнеться наступний [1, 6, 33].

Розглянемо роботу магістрального інтерфейсу за стандартом МЕК (рис.3.4.). Передавальний пристрій переводить лінію СД в стан лог. «0», вказуючи на достовірність байта на ШД, при цьому обов'язково високий стан лінії ДП (лог. «1»), що свідчить про те, що попередня інформація прийнята і оброблена.

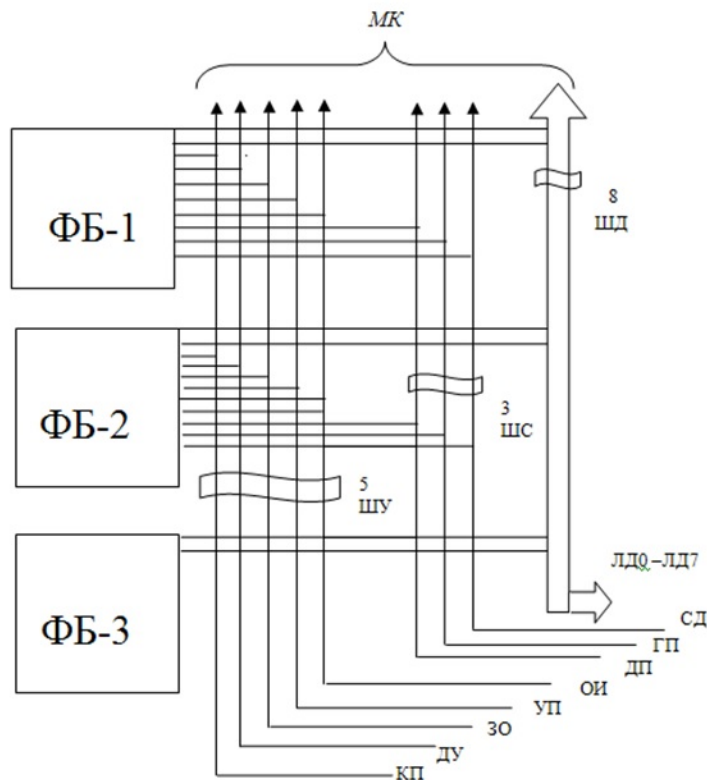


Рис. 3.4. Структура магістрального інтерфейсу у стандарті МЕК

ДП – лог. «1» - означає кінець прийому інформації (при цьому СД «0» і ДП – «0»).

Лінія ДП – лінія обміну сигналами між джерелами і приймачами. ДП – «1» – після закінчення видачі сигналу на лінії ДП. Шина управління ШУ використовується для обміну керуючими сигналами між процесором і всіма іншими пристроями, підключеними до МГК за допомогою наступних ліній:

- УП – управління
- КП – кінець передачі
- ШУ ЗО – запит на обслуговування ОІ – очистити інтерфейс
- ДУ – дистанційне керування

Видача сигналів на лінію УП здійснюється процесором.

Якщо на лінії УП виставляється рівень лог. «0», всі структурні пристрої переходять в режим «Очікування», причому тільки контролер може передавати інформацію.

Якщо УП – лог. «1» – обмін інформацією здійснюється між пристроями, які були адресовані (позначені) при УП-лог. «0» (на передачу включення не більше 1-го пристрою);

КП – лог. «0» – одночасно з передачею останнього байта інформації у вимірювальній системі дані передаються стандартним кодом у вигляді послідовності байтів: кожен обмін повинен бути завершений перш, ніж почнеться наступний.

Якщо ОІ – лог. «0» - припиняється робота МГК. Якщо ДУ – лог. «0» – пристрій перемикається на зовнішнє дистанційне керування. Якщо ДУ – лог. «1» – пристрій знаходиться під місцевим управлінням. ЗО – лог. «0» – якщо будь-який пристрій посилає процесору запит на обслуговування.

Стандарт МЕК розроблений на основі відомого приладового інтерфейсу IEEE-488 фірми США і встановлює основні вимоги на інформаційну сумісність електронних вимірювальних пристроїв [1, 14, 33].

3.2.2. Інтерфейс КАМАК

Система передачі даних КАМАК (САМАС – Computer Automated Measurement and Control) рекомендована до використання Міжнародною електротехнічною комісією. *Інтерфейс (ІФ) КАМАК передбачає:*

- можливість побудови систем з двома і більше рівнями централізації;
- роздільні системи шин для інформаційних і керуючих потоків;
- магістральну систему шин, що працює спільно з декількома радіальними шинами;
- паралельний порядок виконання обміну інформацією;
- синхронний обмін інформацією, роботу з ЕОМ будь-якої архітектури;
- уніфікацію конструкції та інтерфейсів живлення.
- 1-й ступінь централізації управління забезпечується в крейті.
- 2-а ступінь централізації забезпечується в сфері, яка об'єднує до 7 крейтів.

Можливе об'єднання декількох гілок. У крейті використовується змішана магістрально-радіальна система шин. Особливості системи КАМАК (рис.3.5.) – в модульному принципі побудови, що забезпечує можливість створення агрегатованих комплексів; конструктивна однорідність системи, що досягається уніфікацією несучих конструкцій для розміщення функціональних блоків; магістральна структура інформаційних зв'язків між ФБ; застосування програмного управління, що забезпечує гнучкість реалізованих системою алгоритмів.

Основною конструктивною одиницею системи КАМАК є модулі (М), розміщені в одному загальному крейті. Обмін інформацією в крейті відбу-

вається по горизонталі (внутрішньокрейтний обмін) і організовується контролером. Обмін даними між крейтами, а також між ними та зовнішньою ЕОМ здійснюється по вертикалі (міжкрейтний обмін) та організовується центральним розподільником системи (ЦРС). Розміщенні в крейті модулі можуть бути двох типів: робочі модулі М і контролери КК. Обмін інформацією між робочими модулями і контролерами здійснюється через канал даних (КДК), що є частиною структури крейта. У крейті розміщується до 25 модулів. Контролер крейта через 23 лінії вибірки дозволяє здійснювати адресне звернення до окремих модулів [1, 14, 38].

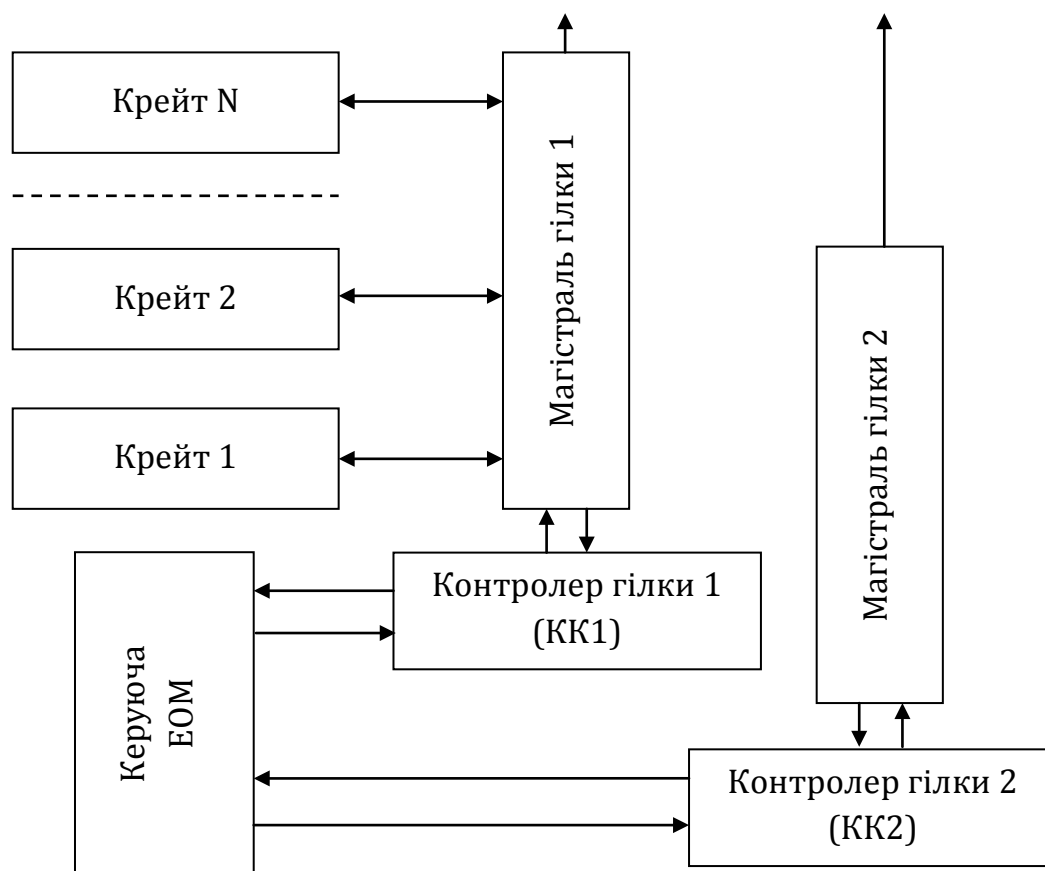


Рис.3.5. Структура системи КАМАК

Внутрішньомодульною адресацією служить магістраль з 4-х субадресних шин, відповідних до всіх модулів.

Системні інтерфейси дозволяють виділити три основні групи сигналів: даних, адреси, управління. Залежно від прийнятої структури ці сигнали можуть передаватися або за допомогою загальних ліній зв'язку з тимчасовим розділенням сигналів, або власними, спеціально виділеними, лініями зв'язку. Дуже важливо дотримуватися часових співвідношень (протокол обміну) між сигналами в магістралі.

Інтерфейс передачі даних КАМАК є по суті об'єднанням декількох інтерфейсів. Невиправдано застосування ІФ КАМАК для створення відносно простих і повільно діючих пристроїв.

Агрегатований комплекс засобів техніки. Принцип агрегатування передбачає створення складних пристроїв методом нарощування і стикування окремих структурних модулів закінченого виконання.

При побудові ВС, ІВС, автоматичних систем керування (АСК) використовуються типові алгоритми вимірювання, контролю, діагностики, керування, реалізовані на обмеженому базисі технічних засобів, що можуть компонуватись методом агрегатування і входять до Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП). Склад, типи пристроїв ДСП і їх характеристики визначаються параметричними рядами виробів (близько 2000 типів промислових приладів і засобів автоматизації, стандартів, агрегатованих комплексів). При проектуванні ІВС використовують каталоги ДСП.

ДСП – сукупність виробів, призначених для отримання, обробки та використання інформації, що забезпечують інформаційне (метрологічне і функціональне), енергетичне та конструктивне сполучення виробів в вимірювальні системи різного призначення, а також їх точність, надійність, довговічність.

ДСП – система, що розвивається. До агрегатних комплексів широкого застосування відносяться:

АКЗТ – агрегатний комплекс засобів техніки;

АКЗТГ – агрегатний комплекс засобів телемеханічної техніки;

АКЗОТ – агрегатний комплекс засобів обчислювальної техніки;

КТЗ Ліуком – комплекс технічних засобів локальних інформаційно-керуючих систем.

АКЗТ ГСП об'єднує пристрої збору і перетворення вимірювальної інформації, електровимірювальні прилади, пристрої відображення інформації, ІВК універсального і спеціального призначення.

В рамках *АКЗТ-3* використовуються БІС, мікропроцесорні комплекти і мікроЕОМ, функціональні блоки, об'єднані за допомогою інтерфейсу КАМАК. Конструктивна сумісність виробів АСЕТ забезпечується введенням системи уніфікованих типових конструкцій (УТК-2) [24, 38].

Інформаційна сумісність таких систем забезпечується застосуванням інформаційних сигналів, а також стандартних приладових інтерфейсів.

Експлуатаційна сумісність визначена в НД на загальні технічні вимоги до виробів. Розроблено системні МХ, що визначають метрологічну сумісність виробів АКЗТ, створюється спеціальна метрологічна література.

Для роботи АКЗТ-3 передбачено виготовлення функціональних блоків за модульним принципом (відповідно вони об'єднуються за допомогою приладового або інтерфейсу КАМАК).

3.3. Роботизовані ІВК. Визначення промислового робота та його види. Сучасні концепції комплексної автоматизації ІВС та ІВК, основні визначення та задачі

3.3.1. Загальні відомості

У сучасному виробництві широко застосовуються роботизовані засоби та виконуючі пристрої (маніпулятори) різного конструктивного виконання та призначення. Використання робототехнічних засобів та промислових роботів (ПР) дозволяє зменшити кількість ручної праці у операціях що проводяться за визначеним алгоритмом (операції переміщення, складання, компонування, з'єднання та ін.) під час виготовлення широкого спектру промислових товарів.

Перші спроби застосування механічних «помічників» для полегшення ручної праці, та для розваг, можна знайти ще у VII–VI ст. до нашої ери. Механізми, що «копіювали» рухи людей або тварин, виготовлялися спочатку виключно для видовищ, та у якості подарунків для вельмож свого часу. Це було викликано складністю виготовлення і точного налаштування рухомих елементів механізмів та їх значною собівартістю, так як вони виготовлялися виключно вручну.

Із появою мануфактур та розвитком промислового виробництва (кінець XVIII - початок XIX ст.) з'явилися передумови застосування механічних виконуючих механізмів для заміни праці людини у певних виробничих операціях. Часом появи перших «справжніх» (у розумінні сучасної людини) роботизованих систем можна вважати початок XX ст., що співпало із впровадженням електромеханічних приладів у виробництві та побуті.

Дефініція «робот» була вперше описана Карелом Чапеком у п'єсі «RUR» (у 1920 р.). Визначення «robot» походило від чеського слова «robota», що означало фізичну працю. У п'єсі «RUR» показано виробництво роботів, які здатні копіювати рухи та функціональні можливості людини під час

ручної праці. Художніми засобами відображено основні питання робототехніки, можливості створення «роботизованої» копії людини та особливості її застосування для виконання виробничих операцій за вибраним алгоритмом.

Застосування промислових робототехнічних систем для заміни людини у шкідливих або небезпечних виробничих умовах відбулося на початку 60-х років XX ст. В першу чергу, це було пов'язано із серійним виробництвом електромеханічних, гідравлічних, пневматичних компонентів виконуючих систем, що дозволило виготовляти перші промислові роботизовані системи із доступною собівартістю. У цей час створюються вузькоспеціалізовані роботи та роботизовані системи для роботи у небезпечних умовах (хімічно агресивне середовище, радіація, космічний простір та ін.).

В 1962-1963 рр. у США були запущені у виробництво перші серійні промислові роботи Unimate (компанії Unimation) та Versatran (компанії AMF, American Machine and Foundry). Робот Unimate був виконаний у вигляді механічного маніпулятора із використанням гідравлічного приводу та мав 5 ступенів свободи. Маніпулятор використовувався у металообробці та ливарному виробництві, забезпечуючи операції із заготовками максимальною масою до 35 кг. В 60-70-х роках були створені перші вітчизняні промислові роботи: УПК-1, УМ1, Універсал-50 [21, 41].

Еволюційний процес розвитку промислових роботів та маніпуляторів можна розділити на декілька етапів:

- роботи I покоління, що мають жорстку програму дій;
- роботи II покоління – з адаптивним керуванням;
- роботи III покоління мають певний інтелект;
- роботи IV покоління матимуть адаптивний «штучний інтелект».

До першого покоління відносяться усі розроблені до початку 80-х років XX ст. промислові роботи. Роботи другого покоління використовуються в сучасній промисловості. Роботи III-го покоління проходять випробуванням в багатьох країнах, частково застосовуються у складних виробничих операціях, медицині, військовій сфері. Розробка роботів IV-го покоління поки що триває.

3.3.2. Системи керування промисловими роботами

Система керування промисловим роботом розробляються із врахуванням функціонального призначення ПР. Такі системи включають програмні та апаратні засоби, що формують підсистему програмного керування

(СПК), інформаційну підсистему (ІС), що може бути представлена інформаційно-вимірювальною системою (ІВС), та виконавчу підсистему (ВС), що забезпечує роботу кінцевих пристроїв.

До складу СПК входить обчислювальне ядро ПР та програмно керувана підсистема формування виконавчих команд. Інформаційна система (ІС) у складі ПР контролює умови робочого середовища, стан промислового робота та процес виконання ним маніпуляцій відповідно до заданого алгоритму.

Система програмного керування ПР (СПК). СПК ПР виконує операційно-логічні і обчислювальні функції обробки інформації, приймає рішення, формує керуючі дії, забезпечує запис, зберігання та виведення інформації, що забезпечує алгоритм керування та ін. СПК ПР залежно від структурного складу мають певні спільні і подібні властивості (рис. 3.6) [41].

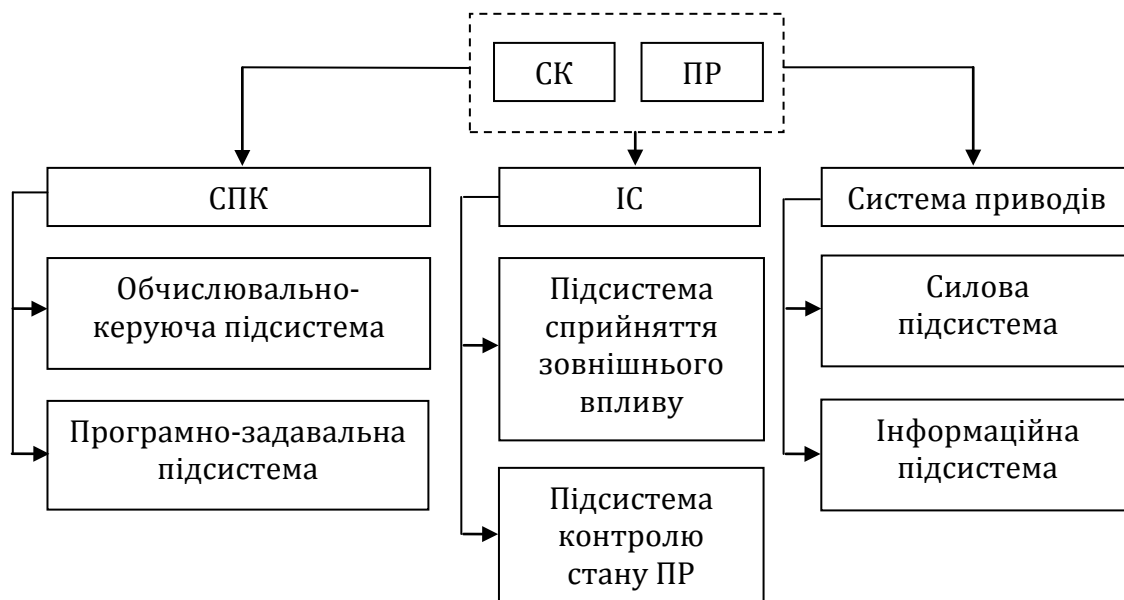


Рис.3.6. Склад системи керування ПР

Інформаційна система ПР (ІС). ІС ПР у своїй підсистемі, що сприймає зовнішнє середовище, розв'язує завдання: пошук об'єкта, маніпулювання, контроль наявності об'єкта у хваті, надійність утримання об'єкта у хваті, виконання виробничих операцій, виявлення перешкод у робочій зоні, розпізнавання місцезнаходження, форми і орієнтації об'єкта, визначення фізичних параметрів об'єкта, самонавчання та ін.

Розрізняють контактну та дистанційну ІС відповідно до типу маніпуляцій ПР із об'єктами, складу і структури первинних перетворювачів ІС, що взаємодіють із робочим середовищем.

У якості сенсорів контактної ІС застосовуються електромеханічні та механічні контактні ПВП переміщень, контролю положення виконуючих пристроїв ПР та об'єктів маніпуляцій у просторі.

Датчиками дистанційної ІС можуть бути прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ матриці), у складі телевізійної інформаційно-вимірювальної системи (ТІВС), радіо-, ультразвукові та магнітні перетворювачі різного виконання та способу формування первинної вимірювальної інформації.

Важливу функцію виконує підсистема що забезпечує самодіагностику ПР. Вона призначена для контролю положення промислового робота у просторі та режимів його роботи.

Виконавча підсистема (ВС) ПР містить приводи (гідравлічні, електро-механічні та ін.) що безпосередньо забезпечують рухи маніпулятора промислового робота. Склад та структура ВС визначається конструкцією ПР, його класом точності, кількістю ступенів свободи, системою координат у якій працює маніпулятор ПР, механізмом формування керуючих команд, взаємодією елементів приводу та ін. [15, 25, 41].

Електроприводи в системах керування ПР завоювали міцні позиції. У якості силових виконавчих елементів найбільш широке розповсюдження отримали двигуни постійного струму, вентильні і крокові двигуни, а у якості керованих електричних перетворювачів – тиристорні і транзисторні перетворювачі та комутатори.

Інформаційна система ПР містить аналогові та дискретні компоненти що забезпечують формування вхідних даних для системи програмного керування. Вона може бути інтегрована з обчислювальним ядром ІВК, містити ВК, канали зворотного зв'язку та вимірювального контролю, що забезпечує адаптивне керування ПР в залежності від змін умов виробництва.

3.3.3. Сучасні концепції комплексної автоматизації ІВС та ІВК

Сучасний стан розвитку електронно-обчислювальної техніки, виконуючих пристроїв різної будови та функціонального призначення дозволяє широко застосовувати роботизовані засоби у виробництві та побуті. Це дозволяє покращити умови праці робітників та зменшити кількість часу на виготовлення продукції. Особливо важливим є впровадження робото-технічних систем при роботі із великою кількістю мікро- та макрооб'єктів. Це дозволяє забезпечити гнучкість виробництва та більш компактне розміщення виробничих ліній.

В той же час, застосування роботів у виробництві має свої особливості. Часто впровадження роботів виявлялося економічно збитковим завдяки некомплексному і неконцентрованому їх застосуванню в цехах і виробничих ділянках.

Робітник, на відміну від робота, може проводити із деталями додаткові операції, не закладені алгоритмом, якщо це є необхідним. Він здатний своєчасно реагувати на зміни, що відбуваються у виробничому процесі, використовуючи свої знання та набутий досвід.

Дійсно, роботи можуть бути малоефективні і навіть збиткові, якщо їх включити в існуючу схему виробництва продукції і недооцінити серйозності проблем при їх впровадженні. Очевидно, що будь-яку техніку доцільно застосовувати тільки там, де вона економічно вигідна.

Важливим є впровадження роботизованих засобів що мають адаптивне керування, варіативні алгоритми прийняття рішень та здатність адекватно реагувати на зміни у робочій зоні. Для цього ПР застосовуються у складі інформаційних вимірювальних систем (ІВС) та інформаційних вимірювальних комплексів (ІВК) що мають високий ступінь інтеграції з ІС та СПК роботизованого засобу. Із збільшенням кількості та якості вимірювальної інформації, що надходить у систему програмного керування ПР, з'являється можливість його гнучкої адаптації до змін у робочій зоні. Виникають передумови створення ПР, обчислювальне ядро яких володіє певним «штучним інтелектом» при прийнятті рішень.

В останній час, часто звертають увагу на необхідність машинної синхронізації при впровадженні роботів та створення нового типу роботизованих виробничих структур. Роботи широко використовуються для оптимізації виробничих процесів у багатьох галузях виробництва. В той же час, застосування роботизованих засобів вимагає застосування певних підходів до організації виробництва: організація техніки безпеки, проектування автоматизованих технологічних ліній, створення каналів зворотного зв'язку у складі системи керування виробничими процесами. Це забезпечується інтеграцією роботів у складі ІВС та ІВК різного складу та призначення, що дозволяє контролювати технологічні операції.

Збільшення ефективності інтеграції робототехнічних засобів у виробничі процеси можливе лише із забезпеченням необхідного рівня надійності існуючих конструкцій роботів та маніпуляторів, якості їх комплектації та правильної концепції роботизації. Необхідний комплексний підхід, який

зумовлює охоплення усіх суміжних ділянок та цехів виробництва. У такій постановці хорошу перспективу отримує роботизація збирання і допоміжних виробництв, ліквідація живої праці в яких вимагає у два-три рази менше затрат, ніж в основних цехах.

В сучасних умовах виробництва найбільш поширені ПР типу «механічна рука», що здатні до хвату, переміщення і точного позиціонування деталей та робочого інструменту із заданою швидкістю та точністю переміщень. Такі маніпулятори мають набір первинних сенсорів для контролю переміщень у вибраній системі координат.

Розрізняють 2 основних типа автоматизації виробництва із застосуванням робототехнічних засобів, залежно від наявності в них людини та ступеня її включення у певний виробничий процес. У випадку повної автоматизації (повного виключення людини із технологічного процесу виробництва) можна говорити про застосування машинного способу виробництва. Якщо людина необхідна у виробничому процесі як елемент контролю та регулювання – мова йде про людино-машинний спосіб, спільно реалізований людиною та роботом.

Можна виділити декілька рівнів автоматизації виробництва:

- локальна автоматизація представляє собою автоматизацію окремих технологічних операцій;
- автоматизація сукупності технологічних процесів, що виникає при утворенні зв'язків між декількома робочими одиницями які реалізують окремі операції (оброблювальні центри, транспортно-завантажувальні роботи та ін.);
- автоматизація інженерно-технологічної діяльності полягає у автоматизації проектування, конструювання нових виробів і технологічній підготовці виробництва за допомогою САПР;
- автоматизація керування виробництвом забезпечується створенням автоматизованих систем планування і керування із використанням ЕОМ різного складу та призначення [2, 15, 35, 41].

При застосуванні робототехнічних засобів у складі ІВС та ІВК застосовують локальні та групові системи керування, а також інформаційні керуючі системи (ІКС).

Локальні системи керування. Дані системи характерні як для промислових, так і непромислових (екстремальних) роботів і автоматизованого технологічного обладнання. Це різноманітні автоматичні пристрої

регулювання, контролю, керування процесами і обладнанням, вузькостеціалізовані за призначенням автоматичні регулятори і широко універсальні системи, що використовують сучасні методи цифрового керування. Функціональна гнучкість локальних систем керування роботами визначає їх широку універсальність і комплексність застосування у різних сферах автоматизації процесів.

Системи групового керування забезпечують автоматичну роботу комплексів технологічного обладнання. Це дозволяє координувати роботу сукупностей локальних керуючих систем та створює умови для комплексної автоматизації функціональних ділянок технологічного обладнання.

Інформаційні керуючі системи застосовуються при керуванні технологічними об'єктами та процесами із високим ступенем автоматизації. Застосування ІВС та ІВК у складі таких систем дозволяє створювати гнучкі адаптивні системи прийняття рішень. Для автоматизації обробки інформації при розв'язку таких завдань широко використовується обчислювальна техніка, засоби зв'язку, що дозволяє створювати автоматизовані системи керування виробництвом (АСКВ) [3, 41].

3.4. Робот, як складова частина автоматизованого ІВК та об'єкт керування. Особливості взаємодії робота та людини в умовах виробництва

3.4.1. Робот, як складова частина автоматизованого ІВК та об'єкт керування

При розгляді ПР як структурної одиниці інформаційно-вимірювального комплексу (ІВК) його можна вважати об'єктом керування. Зазвичай, такий робот має певний набір компонентів (рис.3.7):

- систему приводів, що включає електромеханічні, гідравлічні або електромагнітні компоненти, які забезпечують переміщення у просторі виконавчих частин робототехнічного засобу;
- електронну систему керування, яка формує набір команд відповідно до заданого алгоритму роботи та відгуків що надходять із зовнішнього середовища;
- перетворювальні компоненти та підсилювачі виконавчих сигналів, що транслюють сформовані СПК команди до виконавчих пристроїв, забезпечуючи необхідний рівень та форму сигналів керування.

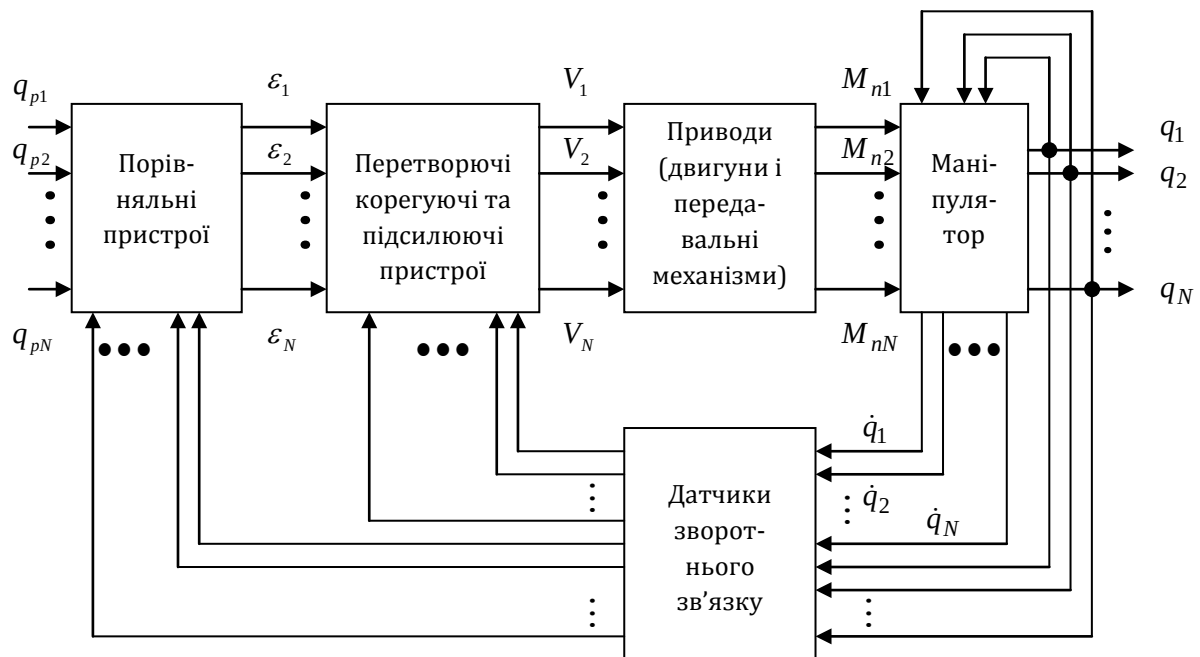


Рис.3.7. Функціональна схема виконавчої системи керування ПР: $q_{p1}...q_{pN}$ – вхідні сигнали, що виробляються СК; $\varepsilon_1... \varepsilon_N$ – сигнали розузгодження, отримані на виході порівняльного пристрою; $V_1...V_N$ – керуючі сигнали; $M_{n1}...M_{nN}$ – сили і моменти, створювані двигунами на ланках маніпулятора; $q_1...q_N$ – поточні значення відносного положення ланок маніпулятора [41].

Виконавчий елемент ПР безпосередньо взаємодіє із об'єктами у робочій зоні, коректуючи свою роботу залежно від інформації, що надходить по каналам прямого і зворотного зв'язку, відповідно до алгоритму роботи. Відпрацювання виконуючим пристроєм промислового роботу алгоритму роботи вважається функціонально достовірним якщо він виконує задану просторову траєкторію із встановленою точністю у визначені алгоритмом відліки часу [3, 35, 41].

3.4.2 Особливості взаємодії робота та людини в умовах виробництва. Основні поняття, терміни, визначення

Конфігурація промислових роботів, що застосовуються на виробництві, може значно відрізнятися від руки людини. Головною умовою ефективності їх роботи є забезпечення подібного людській руці функціоналу. Основними операціями які здатні виконувати маніпулятори робототехнічних засобів є переміщення у просторі та перенесення корисного вантажу.

Корисний вантаж ПР визначається масою захватного пристрою маніпулятору із заготовкою, деталлю, вимірювальним або оброблюваним інструментом або іншим предметом маніпулювання.

По методу керування, маніпулятори промислових роботів поділяються (рис.3.8.) на біотехнічні (з ручним керуванням) і автоматичні.



Рис. 3.8. Класифікація маніпуляторів по методам керування [41]

Особливістю роботи *біотехнічного маніпулятора* є виконання команд що безпосередньо надходять від оператора. При цьому маніпулятор може бути виконаний по збалансованій схемі (із урівноваженими по масі виконавчими елементами) та служить виконувачем рухів та маніпуляцій оператора. Збалансована схема дозволяє ПР утримувати максимально допустимий вантаж (відповідно до нормативної документації на зразок ПР) у стані рівноваги для заданого положення виконавчих ланок робототехнічної системи. Таким чином, оператор може маніпулювати значними по масі та габаритам об'єктами в межах робочої зони ПР без значних затрат власної м'язової енергії. Це дуже зручно при завантажувально-розвантажувальних і такелажних роботах.

Підвидом біотехнічних маніпуляторів є *екзоскелетони*. Дані технічні системи повторюють людську кінцівку не тільки функціонально, але й структурно. Такий маніпулятор може бути безпосередньо об'єднаний із кінцівкою людини та має ланки що повторюють суглоби та важелі людської кінцівки, виконані приводами (механічними, гідравлічними та ін.), що дозволяє повністю копіювати рухи людини. Екзоскелетони застосовуються

якщо необхідно збільшити м'язову потужність кінцівки людини та можуть її замінювати, якщо слугують протезом [2, 41].

Механізм роботи *командних маніпуляторів* полягає у інтерпретації та виконанні керуючих сигналів що надходять від пульта керування або задаючих пристроїв (джойстиків, трекболів, сенсорних поверхонь та ін.).

Дистанційно-керовані маніпулятори (ДКМ) містять керуючі канали (дротовий, радіочастотний, оптичний та ін.) об'єднані із ІС та СПК, та забезпечують можливість виконання команд оператора на значній відстані. Одними із головних критеріїв ефективності роботи таких маніпуляторів є міра часової затримки керуючого сигналу та ступінь його спотворення. Серед ДКМ розрізняють командні, копіювальні та напіваавтоматичні маніпулятори.

Дистанційно-керовані командні маніпулятори (рис 3.9) забезпечують виконання команд оператора що задаються органами керування. Вони включають підсилювальні пристрої, перетворювачі різного виконання та функціонального призначення, що транслюють сигнали керування до приводів виконуючих пристроїв. Прикладом такого виконання можна вважати екскаватори, крани та ін.

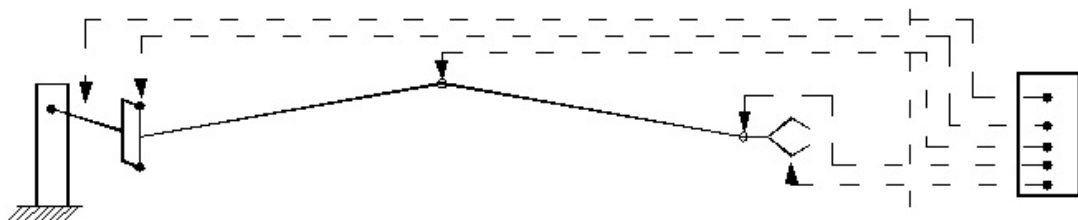


Рис.3.9. Дистанційно керований командний маніпулятор

Копіювальні маніпулятори (рис. 3.10.) мають у своєму складі задаючу та виконавчу системи що об'єднані різними видами зворотних зв'язків. Це дозволяє керуючій системи робототехнічного засобу отримувати відгуки що відповідають взаємодії виконавчого пристрою із об'єктами в робочій зоні.

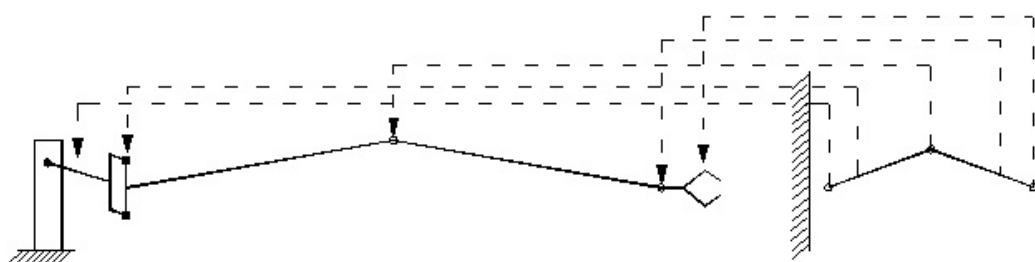


Рис.3.10. Дистанційно керований копіювальний маніпулятор

Такий тип зв'язків покладено в основу системи відображення зусиль (СВЗ) активного або пасивного типу. СВЗ пасивного типу є системами односторонньої дії, оскільки зворотний тракт, що відображає зусилля, не впливає при цьому на роботу основної слідкуючої системи. Первинними вимірювальними перетворювачами такої системи є контактні датчики різного виконання та принципу дії, що формують сигнали корекції для задаючої системи.

У випадку застосування активної СВЗ, відгуки що надходять по каналам зворотного зв'язку, приймаються та обробляються СПК маніпулятора та забезпечують зміну положень його виконавчого органу відносно задаючої осі. Такі системи складаються з двох взаємозв'язаних слідкуючих систем. Задавальний орган є вхідною віссю для прямого (основного) тракту слідкування, а виконавчий орган – вхідною віссю для зворотного тракту слідкування [15, 21, 41].

Напіваавтоматичні маніпулятори включають задаючий пристрій, що дозволяє оператору керувати сукупністю виконуючих ланок маніпулятора. Це дозволяє задавати складні траєкторії руху. При цьому, розрахунок сигналів керування, що надходять на приводи, забезпечується електронним обчислювальним пристроєм по заданому алгоритму.

Існують маніпулятори з інтерактивним керуванням, в яких сполучаються елементи біотехнічного і автоматичного керування. Вони мають пристрої пам'яті для автоматичного виконання операцій.

Автоматичні маніпулятори можна розділити на автооператори та промислові роботи (ПР).

Автооператором називається автоматична машина, що складається із виконавчого механізму у виді маніпулятора, або сукупності маніпулятора з механізмом переміщення, виконавчих приводів і пристрою керування без можливості перепрограмування.

Промисловим роботом (ПР) називається автоматична машина (стаціонарна або пересувна), що складається з маніпулятора, додаткових приводів і перепрограмованого пристрою програмного керування (СПК), та призначена для виконання робочих функцій у виробничому процесі.

Промислові роботи (із можливістю перепрограмування) часто входять до складу ІВК із різним ступенем інтеграції. Це дозволяє формувати канали керування (КК) ПР об'єднані зворотним зв'язком із вимірювальними

каналами ІВК. В такому випадку, інформаційна система (ІС) та СПК роботизованого засобу отримують змогу коректувати свою роботу на основі сигналів обчислювального ядра ІВК в режимі реального часу. З'являється можливість створення динамічних вимірювальних каналів контролю роботи виконавчих елементів ПР, залежно від параметрів об'єктів маніпулювання та змін у робочій зоні [3, 25].

Промислові роботи, на відміну від автооператорів, можуть виконувати широкий спектр функціональних операцій, внаслідок можливості зміни алгоритмів керування. Керуючі алгоритми можуть бути змінені оператором (у процесі роботи або регламентованого технічного обслуговування) та автоматично, при наявності адаптивної системи керування. Це дозволяє змінювати послідовність, траєкторію рухів виконавчих пристроїв, інтенсивність зусиль на приводах, швидкість та точність переміщень рухомих елементів ПР забезпечуючи виконання визначених завдань.

3.5. Основні технічні показники ПР. Системи основних координатних переміщень

3.5.1. Функціональна схема ПР

Головним функціональним призначенням промислового робота (ПР) (рис.3.12) є взаємодія із об'єктами в робочій зоні відповідно до заданих алгоритмів роботи.

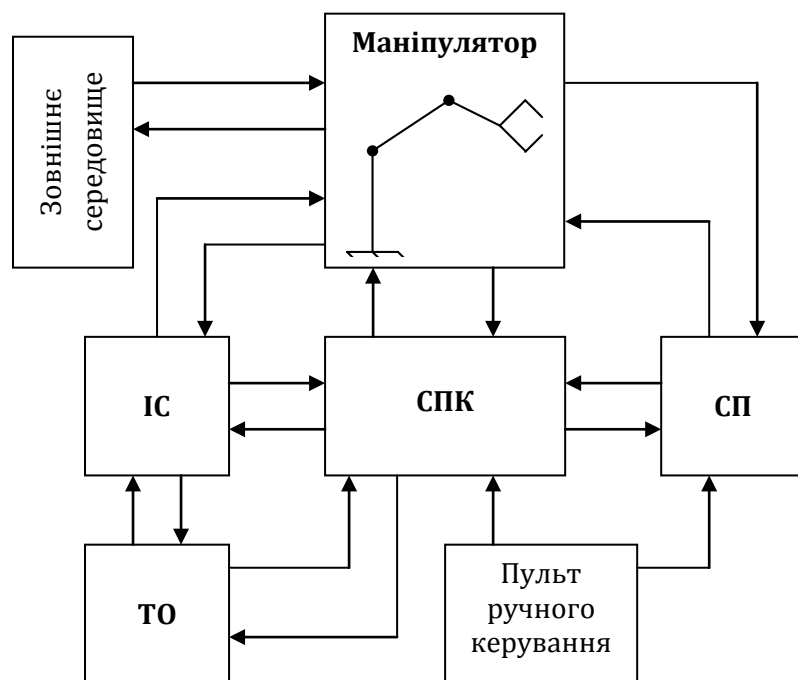


Рис. 3.11. Функціональна схема ПР [41]

Типова структура ПР включає: виконавчу систему (маніпулятор), систему програмного керування (СПК), інформаційну систему (ІС), систему приводів (СП), пульт ручного керування.

За допомогою системи програмного керування (СПК) проводиться налаштування алгоритмів роботи та контролюється їх виконання виконавчими пристроями промислового робота. СПК зберігає, відтворює заданий набір керуючих програм та коректує роботу ПР відповідно до змін у робочій зоні.

Застосування пульта ручного керування необхідно у випадку ручного керування ПР, первинного налагоджування, калібрування та програмування шляхом навчання. Програмування ПР можливо здійснювати методом навчання, розрахунку на ЕОМ керуючої програми та методами самонавчання.

Метод навчання полягає у відпрацюванні оператором визначеної кількості повних одиничних циклів роботи ПР із заданою точністю та швидкістю переміщень виконавчих елементів. Інформація про траєкторії руху маніпулятора у визначені проміжки часу інтерпретується СПК, що формує набір команд які відповідають послідовності операцій.

Метод розрахунку на ЕОМ полягає в моделюванні траєкторій переміщень виконавчих елементів ПР із використанням мови високого рівня. Отримані функціональні залежності транслуються в машинний код та записуються в СПК ПР.

Самонавчання ПР може проходити за механізмами адаптивного керування, у випадку наявності у складі ІС ПР обчислювальної ЕОМ необхідної швидкодії. У цьому випадку, керуючі сигнали для СПК задаються після обробки відгуків датчиків інформаційної системи ПР [2, 38, 41].

Застосування ПР як складової частини ІВК та ІВС дозволяє проводити їх швидко та ефективно самонавчання у режимі реального часу, використовуючи розрахункові дані обчислювального ядра ІВС та ІВК.

3.5.2. Класифікація ПР

Промислові роботи (ПР) класифікуються по наступним 13 основним ознакам: характер виконуваних робіт, ступінь спеціалізації, область застосування, використання типу системи робочих координатних переміщень, кількість ступенів свободи, вантажопідйомність, склад та структура основних компонентів ПР, мобільність, схема розміщення приводів, характер

програмування швидкості і дискретності переміщень, реалізація системи програмного керування.

Зовнішнє середовище, у якому працює ПР, може бути *детермінованим* і *недетермінованим*. У детермінованому середовищі об'єкт маніпулювання завжди знаходиться у заздалегідь відомому положенні, робота із ним однозначно визначена. У недетермінованому середовищі об'єкт маніпулювання може бути орієнтований довільним чином, тому робота ПР визначається зовнішніми умовами.

По *характеру виконуваних робіт (операцій)* промислові роботи можна розподілити на 3 групи:

1) Виробничі (технологічні) роботи використовуються в якості конвеєрних або точкових обробляючих машин, та виконують основні операції технологічного процесу (зварювання, збирання, фарбування та ін.)

2) Промислові роботи, що застосовуються в допоміжних виробничих операціях, автоматично обслуговують технологічне обладнання певного виробничого циклу. Вони виконують операції встановлення та зняття заготовок, деталей та інструментів на автоматичній лінії виробництва.

3) ПР що володіють функціоналом виробничих та допоміжних роботів є універсальними.

Спеціалізація ПР залежить від його функціональних можливостей. Відповідно до даного критерію розрізняють спеціальні, цільові та багатоцільові промислові роботи. Спеціальні ПР мають вузьку спеціалізацію та призначені для виконання вибраних технологічних операцій за строго визначеним алгоритмом. Промислові роботи, що виконують певну групу технологічних операцій подібних за змістом або працюють із різними за складом та структурою об'єктами, виконуючи певний тип маніпуляцій, називаються спеціалізованими. Багатоцільові ПР не обмежені у видах маніпуляцій із різними об'єктами та мають гнучкі алгоритми роботи, часто із адаптивним керуванням.

У сучасних ПР для побудови траєкторій руху виконавчих елементів використовуються різні *системи робочих координатних переміщень*, найбільш розповсюдженими з яких є прямокутна просторова, сферична та циліндрична. ПР можуть мати від 1 до 7 *ступенів свободи* у вибраній системі координатних переміщень [3, 21, 41].

По *мобільності* ПР розподіляються на стаціонарні і пересувні. По *конструктивному виконанню* вони бувають вбудовані в технологічне

обладнання (стаціонарні по мобільності), підвісні, тощо. У ПР застосовуються наступні *типи силового приводу*: електромеханічний, пневматичний, гідравлічний та комбінований.

По *типу системи програмного керування* ПР бувають жорстко-програмовані, адаптивні і гнучкопрограмовані. Найпростішим та найдешевшим виконанням є жорсткопрограмований ПР, що керується строго заданим набором команд. У випадку застосування в ІС ПР датчиків та каналів зворотного зв'язку, з'являється можливість адаптації алгоритмів роботи ПР до змін у робочій зоні. Гнучкопрограмовані ПР мають ІС та СПК які здатні формувати програму дій на основі поставленої мети, відповідно до інформації про об'єкт та стан зовнішнього середовища, що надходять від сенсорів ІС. Промислові роботи із гнучким програмуванням часто входять до складу ІВС та ІВК у якості виконавчих систем та можуть використовувати інформацію, що формується обчислювальним ядром ІВС та ІВК, у процесі самонавчання.

В залежності від *виду переміщень* у робочій системі координат, що виконує маніпулятор, промислові роботи класифікують на позиційні (рухаються по реперним точкам), контурні (рухаються за вибраною траєкторією) та комбінованого типу.

По *реалізації системи програмного керування* бувають цифрові, аналогові та аналогово-цифрові ПР. Аналогові СПК формують керуючі сигнали у вигляді значень фізичних величин із заданого діапазону, що змінюються неперервно під час роботи ПР. Керуючі системи ПР із числовим програмним керуванням задають керуючі команди у вигляді машинного коду визначеної розмірності. Аналогово-цифровий тип керування поєднує зазначені вище види у заданих комбінаціях [3, 15, 21].

3.5.3. Основні технічні показники промислових роботів

Масштаби застосування промислових роботів на виробництві та у суміжних галузях постійно збільшуються. Постає завдання правильного вибору зразків ПР відповідно до завдань, що вони повинні вирішувати, у вибраному технологічному процесі. Вибір типу ПР для технологічного процесу проводять відповідно до його технічних показників, що вказані в нормативній документації на виріб.

Технічні показники ПР враховують не лише при виборі зразку ПР із доступних на ринку. Часто виникає необхідність розробки та виготовлення

зразків ПР на базі вже існуючих моделей, для застосування у визначеній області виробництва, що задає свої технологічні вимоги.

Основними технологічними вимогами, за якими можна класифікувати ПР є вантажопідйомність, кількість ступенів свободи, розміри робочої зони та показники мобільності в межах конкретного виробничого процесу.

Вантажопідйомність маніпулятора ПР визначається сумарним вантажем, із врахуванням власної маси, яким він здатний маніпулювати відповідно до заданих алгоритмів роботи (траєкторія руху, швидкість переміщення, виліт захватного пристрою та ін.).

Важливим технічним показником ПР є обертовий момент приводів маніпулятора вздовж визначених робочих осей маніпулятора. Він характеризує зусилля яке розвивається на елементах хвату, робоче зусилля руки маніпулятора вздовж поздовжньої осі та обертальний момент при ротації маніпулятору із об'єктом маніпулювання.

Кількість ступенів свободи промислового роботу визначає загальне число рухів у робочій системі координат відносно опори (нульової точки). Якщо ПР використовується у складних операціях збирання, число ступенів свободи може визначатися для окремих елементів хвату маніпулятора відносно точки їх кріплення.

Похибка позиціонування промислового роботу задається значеннями відхилення положення виконавчого механізму від нормованих значень у конкретний момент часу одиничного циклу спрацювання або у заданих точках траєкторії руху. Вона оцінюється в кутових або лінійних одиницях виміру, в залежності від робочої системи координат маніпулятора ПР.

Робоча зона ПР – простір, у якому при роботі може знаходитися робочий орган маніпулятора. При роботі кількох ПР, у якості характеристики роботизованого комплексу наводиться зона спільного обслуговування – частина простору, у якому переміщення об'єкта маніпулювання можуть виконуватися кількома ПР [3, 21].

Показники мобільності ПР задаються сукупністю рухів його маніпулятора відносно опорної системи та переміщень опорної системи у просторі.

3.5.4. Системи основних координатних переміщень ПР

Основні координатні переміщення включають усі орієнтуючі рухи механічної системи і додаткові переміщення ПР без урахування рухів хвату.

Система робочих координат може бути плоска і просторова.

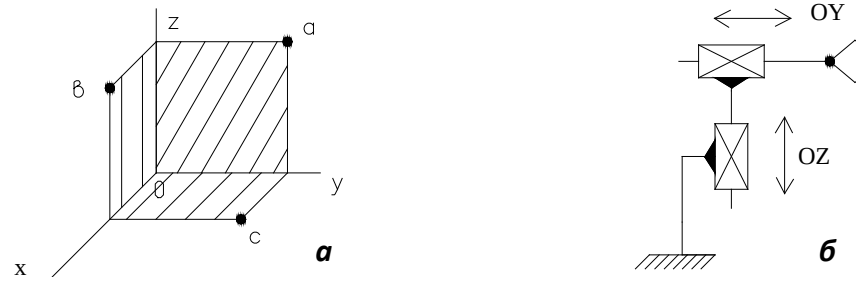


Рис.3.12. Прямокутна плоска система координат (а), структурна кінематична схема ПР (б); форма робочих зон (а)

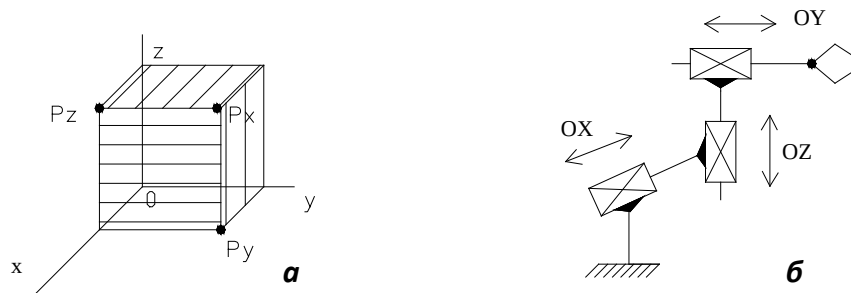


Рис.3.13. Прямокутна просторова система координат (а), структурна схема ПР (б), форми робочих зон (а)

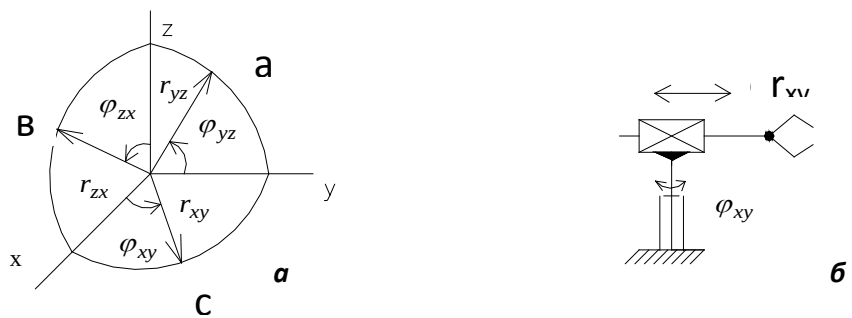


Рис.3.15. Полярна плоска система координат (а), структурна кінематична схема ПР (б), форми робочих зон (а)

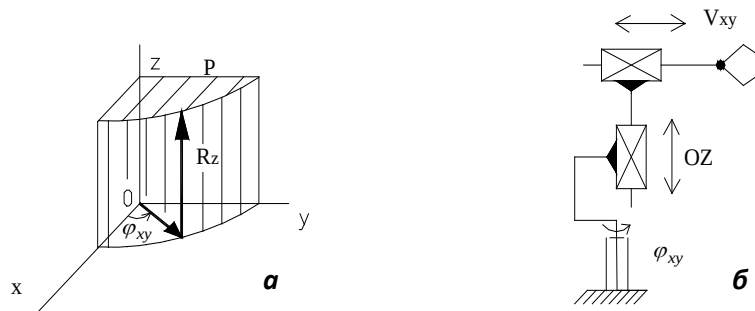


Рис.3.16. Полярна циліндрична система координат (а), структурна кінематична схема ПР (б).

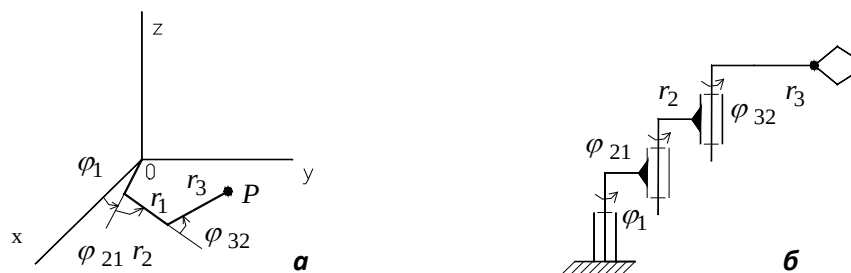


Рис.3.17. Полярна сферична система координат (а), форми робочих зон з урахуванням обмежень координат (а), структурна кінематична схема ПР (б)

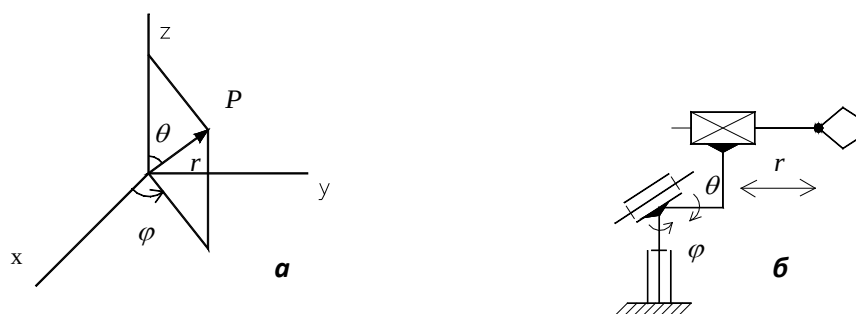


Рис.3.18. Ангулярна плоска система координат (а), форми робочих зон з урахуванням обмежень координат (а), структурна кінематична схема ПР (б)

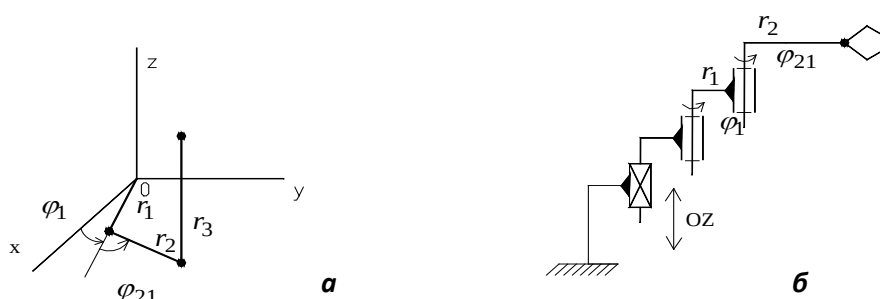


Рис.3.19. Ангулярна циліндрична система координат (а), форми робочих зон з урахуванням обмежень координат (а), структурна кінематична схема ПР (б)

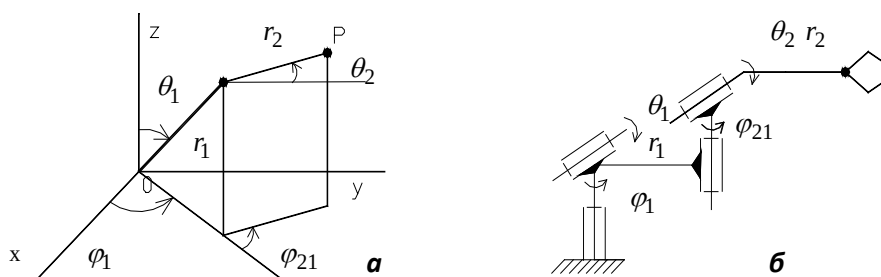


Рис.3.20. Ангулярна сферична система координат (а), форми робочих зон із урахуванням обмежень координат (а), структурна кінематична схема ПР (б)

Із усієї сукупності робочих систем координат промислових роботів можна виділити прямокутні та криволінійні координатні системи (КС).

Для *прямокутних систем* координат характерне поступальне прямо-лінійне переміщення рухомих елементів маніпулятора промислового роботу відповідно по 2-м (рис. 3.12) або по 3-м (рис. 3.13) осям (0_x , 0_y , 0_z) що є перпендикулярними між собою.

При позиціонуванні рухомих елементів ПР у *криволінійній системі* координат є можливим забезпечення обертальних рухів маніпулятора ПР вздовж осей 0_x , 0_y , 0_z . Серед криволінійних КС можна виділити плоску (рис. 3.15, 3.18), циліндричну (рис. 3.16, 3.19) та сферичну (рис. 3.17, 3.20) системи координатних переміщень.

У випадку застосування *плоскої полярної* КС (рис. 3.15), координатні переміщення механізму хвату, із об'єктом маніпулювання, реалізуються в одній із координатних площин $x0y$, $y0z$, $z0x$ за напрямком вектору руху r або кута переміщень φ . *Циліндрична система* робочих координат (рис. 3.16) забезпечує позиціонування рухомих елементів відносно основної координатної площини $x0y$ в напрямках r і φ та у напрямку осі 0_z відносно основної осі $x0y$.

Більшість ПР що мають складні маніпулятори з великою кількістю ланок (шарнірні з'єднання із власними приводами) працюють в ангулярних системах координат, що є різновидами криволінійної КС.

Ангулярна плоска КС (рис. 3.18) дозволяє визначати просторове переміщення об'єктів позиціонування у вибраній координатній площині (наприклад $x0y$) внаслідок кутових поворотів окремих ланок маніпулятора при їх незмінених лінійних розмірах.

Ангулярна циліндрична КС (рис. 3.19) забезпечує можливість додаткових зміщень ланок маніпулятора ПР відносно основних координатних площин у напрямку перпендикулярному до основної координатної осі (вісь 0_z на рис. 3.19).

Для *ангулярної сферичної* системи робочих координат (рис. 3.20) розраховуються переміщення рухомих ланок маніпулятора внаслідок виключно кутових зміщень його структурних елементів. Для цього необхідно задати можливість повороту однієї із ланок на кути φ і θ у двох взаємно перпендикулярних площинах [3, 15, 41].

Більшість промислових роботів, що присутні на ринку, працюють саме в циліндричній та сферичній системах координат. Це викликано

необхідністю переміщень рухомих елементів ПР по складних траєкторіях, які простіше всього задавати одиничними обертальними рухами вздовж основних осей рухомих ланок. В той же час, такі маніпулятори ПР обмежені у ступенях свободи та переліку можливих траєкторій руху, для взаємодії із об'єктами робочої зони, порівняно із системами що використовують різні підвиди ангулярної КС. Застосування ангулярної КС дозволяє будувати більш «плавні» траєкторії рухів та є особливо ефективним у процесі само-навчання ПР, при його інтеграції до складу ІВС та ІВК.

3.6. Типові кінематичні схеми роботів різної конструкції для ІВК та особливості їх використання.

Поняття прямої та зворотної задач кінематики

3.6.1 Кінематичні схеми ПР

Кінематична схема (КС) промислового робота, як складової частини ІВК, визначає сукупність елементарних переміщень рухомих елементів маніпулятора ПР та траєкторій руху його елементів, необхідних для точного позиціонування робочих частин маніпулятора у заданій точці простору.

Для забезпечення ефективного позиціонування виконавчих частин ПР в просторі робочої зони його КС повинна відповідати наступним вимогам:

- необхідно, по можливості, задавати рухи малої інтенсивності для проміжних кінематичних елементів;
- забезпечити можливість автоматичного слідкування за траєкторіями руху та їх корекції при необхідності;
- виключити можливість самовільного спрацювання робочого циклу маніпулятора ПР (наявність обмежувачів у схемі);
- можливість роботи в складних виробничих умовах (запиленість, підвищена або понижена температура чи вологість);
- Кінематична схема ПР повинна бути простою і надійною.

В загальному випадку, при розробці КС промислового робота потрібно враховувати вимоги до параметрів робочої зони, траєкторій рухів елементів маніпулятора у вибраній системі робочих координат, необхідну кількість ступенів свободи виконавчих елементів, мобільності готового зразку ПР, його металоємності і складності розробки та виготовлення.

У більшості ПР кінематичні схеми побудовані по типу розімкненого ланцюга, у якому присутні рухомі ланки з'єднані послідовно. Тип з'єднання

ланок визначає клас ПР та кількість ступенів свободи рухомих елементів його маніпулятора.

Кінематична схема ПР, що входить до складу ІВК, може містити замкнений тип з'єднання рухомих ланок. Якщо застосовується 4 ланки замкнутого типу (за схемою паралелограма), такий ПР буде мати лише одну ступінь свободи. Найчастіше, замкнені ланки застосовуються для задавання траєкторій руху, так як володіють високою механічною жорсткістю. Використання в КС маніпулятора замкнених ланок забезпечує відносно стабільні метрологічні характеристики переміщень та позиціонування рухомих елементів в просторі робочої зони. Такі маніпулятори мають гарну точність при застосуванні в позиційних промислових роботах.

Число ступенів свободи, відносно ланки що є нерухомою, визначає функціональні можливості маніпулятора ПР, тобто його універсальність, та визначається рівнянням Соснова-Малишева (3.1) [35, 41]:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (3.1)$$

де n – число рухливих ланок кінематичного ланцюга,

p_5, p_4, p_3, p_2, p_1 – число кінематичних пар відповідно I, II, III, IV і V класу.

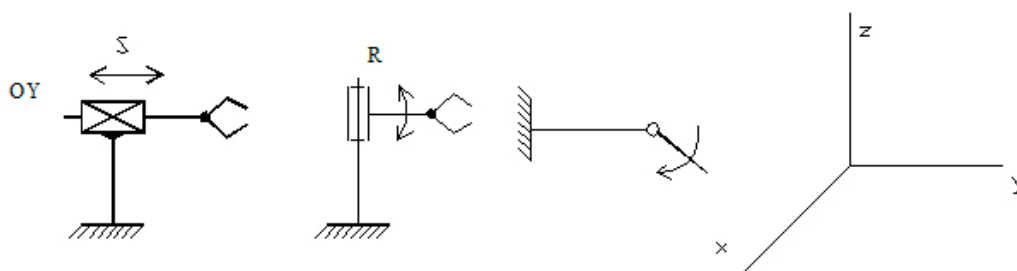


Рис.3.21. Схеми кінематичних пар, що застосовуються в ПР

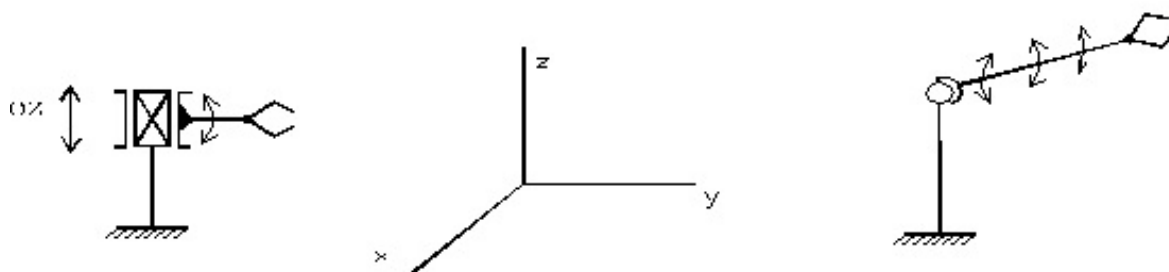


Рис.3.22. Приклади кінематичних пар IV (а) і III (б) класу

В промислових роботах, що забезпечують циклічні та сталі за типом маніпуляції широко застосовуються кінематичні пари V класу що здійснюють рухи 3-х основних видів:

- рух у поступальному напрямку (S-типу);
- ротаційний рух, внаслідок обертання рухомої ланки відносно своєї поздовжньої осі (R-типу);
- згинальний рух, що задається обертанням рухомої ланки по осі що є перпендикулярною до основної поздовжньої осі (P-типу).

Хоча набір кінематичних пар, при розробці КС промислового роботу є обмеженим, існує велика кількість їх поєднань, що забезпечує створення ПР із заданими функціональними можливостями, траєкторіями рухів та кількістю ступенів свободи. При розробці КС промислового робота, з'єднання кінематичних пар задають у вигляді символічної формули (наприклад R-S-P) [3, 15, 41].

Кінематичні пари IV і III класів забезпечують відповідно 2 та 3 ступені свободи, та застосовуються частіше всього в позиційних ПР.

Для розрахунку кількості рухомих ланок маніпулятора застосовується рівняння виду:

$$n = \sum_{i=1}^5 p_i \quad (3.2)$$

що показує відповідність рухомих пар числу ланок.

Тоді, при підстановці у рівняння для визначення числа ступенів рухомості, вираз спрощується:

$$W_M = p_5 + 2p_4 + 3p_3 + 4p_2 + 5p_1 \quad (3.3)$$

або з урахуванням, що у ПР $p_1 = p_2 = 0$,

$$W_M = p_5 + 2p_4 + 3p_3. \quad (3.4)$$

Маніпулятор ПР, що призначений для роботи із об'єктами довільної орієнтації, повинен володіти 6-ма ступенями свободи або більше. Для точного позиціонування об'єкту, що має довільну орієнтацію, необхідно щоб виконавчий елемент маніпулятора мав не менше 3-х ступенів свободи в заданій точці простору. Також, не менше ніж 3-ма ступенями свободи повинен володіти проміжний (транспортний) елемент маніпулятора, для грубого позиціонування виконавчого елемента у зоні взаємодії із об'єктом маніпулювання.

Проміжні транспортні елементи маніпулятора ПР виконуються у вигляді кінематичних ланцюгів що задаються у прямокутній, циліндричній або сферичній системах робочих координат. Наприклад, якщо є необхідність створення КС за формулою S-S-S, застосовується прямокутна

система координат x, y, z . Для такої робочої КС положення виконавчого елемента задається координатами виду x_c, y_c, z_c . При цьому робоча зона відповідає схемі на рис. 3.12 (а).

Циліндрична КС дозволяє застосування кінематичної схеми типу $R-S-S$. При цьому, положення цільової точки виконавчого елемента визначається радіусом, ℓ – визначає відстань до осі обертання, φ – кут повороту відносно осі основної осі, z – висота точки від початку координат. Робоча зона за такою схемою наведено на рис. 3.16 (а).

Якщо необхідно провести перенесення цільових точок позиціонування виконавчого елемента маніпулятора із циліндричної системи координат до прямокутної (для визначення лінійних переміщень) застосовуються формули приведення, що мають для одиничної точки вигляд:

$$x_c = \ell \cdot \cos \varphi; \quad y_c = \ell \cdot \sin \varphi; \quad z_c = z. \quad (3.5)$$

Провівши диференціювання функцій за часом, можна записати вирази для визначення швидкостей по заданих осях:

$$\begin{aligned} V_{xc} = \dot{x}_c &= V_\ell \cos \varphi - \ell \sin \varphi \dot{\varphi} = V_\ell \cos \varphi - V_\tau \sin \varphi; \\ V_{yc} = \dot{y}_c &= V_\ell \sin \varphi + \ell \cos \varphi \dot{\varphi} = V_\ell \sin \varphi + V_\tau \cos \varphi; \\ V_{zc} = \dot{z}_c &= V_z \end{aligned} \quad (3.6)$$

Вирази для знаходження прискорень по осях мають вигляд:

$$\begin{aligned} a_{xc} &= a_\ell \cos \varphi - 2V_\tau \sin \varphi - \ell \dot{\omega}^2 \cos \varphi - \varepsilon \ell \sin \varphi; \\ a_{yc} &= a_\ell \sin \varphi + 2V_\tau \cos \varphi - \ell \dot{\omega}^2 \sin \varphi + \varepsilon \ell \cos \varphi; \\ a_{zc} &= a_z \end{aligned} \quad (3.7)$$

де $V_\ell = \ell \dot{\varphi}$ – радіальна швидкість;

$V_\tau = \ell \cdot \omega$ – трансверсальна швидкість;

$\omega = \dot{\varphi}$ – кутова швидкість;

$a_\ell = \dot{V}_\ell$ – лінійне прискорення;

$\varepsilon = \dot{\omega}$ – кутове прискорення, при цьому радіальне прискорення $a = a_\ell - \ell \cdot \omega^2$, трансверсальне прискорення $a_\tau = \ell \cdot \varepsilon + 2V_\ell \omega$.

Таким чином, можна розрахувати траєкторії руху виконавчого елемента маніпулятора ПР [21, 25, 41].

В промислових роботах кінематична формула $R-S-S$ (циліндрична робоча СК) найчастіше застосовується в проміжних (транспортних) ланках маніпулятора. Це дозволяє створити досить габаритну робочу зону (вздовж та перпендикулярно основній робочій осі) для грубого позиціонування виконавчого елемента.

При застосуванні в ПР сферичної робочої КС, застосовується кінематична схема за формулою $R-P-S$. Вона визначається набором координат, що включає поворот руки φ , коливання руки θ і висування руки ℓ . Робоча зона за такою схемою, буде мати вигляд що приведений на рис. 3.17 (а). Для визначення лінійних переміщень, можна перейти із сферичної системи координат до прямокутної, за виразами 3.8:

$$x_c = \ell \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi; y_c = \ell \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi; z_c = \ell \cdot \sin\theta. \quad (3.8)$$

Провівши диференціювання функцій за часом, можна отримати вирази для визначення швидкостей і прискорень по заданих осях, що дозволяє визначити траєкторію та відносні переміщення виконавчого елемента маніпулятора ПР.

Кінематична формула виду $P-P-S$ схема має відносно низьку точність позиціонування та застосовується в схемах ПР компактного виконання. Призначення таких ПР – взаємодія із об'єктами що не потребують високої точності відпрацювання траєкторій рухів виконавчої ланки маніпулятора. Для проміжних ланок у такій схемі застосовуються обертальні пари. Розрахунок траєкторій переміщень для такої КС (якщо прийняти $\ell = const$, $z = const$) подібні до виразів для циліндричної робочої системи координат [41].

Більшість промислових роботів, що застосовуються в даний час в технологічних операціях, мають від 3-х до 5-ти (рука людини має 27) ступенів свободи, що є достатнім для елементарних циклічних виробничих операцій. Збільшення загальної кількості ступенів свободи ПР забезпечує йому кращі функціональні можливості та показники універсальності, в той же час висуває підвищені вимоги до апаратних та програмних компонентів, в першу чергу до ІС та СПК робототехнічного засобу. Частково, це завдання можна вирішити інтеграцією ПР до складу ІВК та ІВС, із використанням інформації їх обчислювального ядра для побудови траєкторій руху маніпулятора.

3.6.2. Типові кінематичні схеми роботів різної конструкції для ІВК та особливості їх використання

Кінематичні схеми ПР, як складової частини ІВК, досить різноманітні, залежно від сфери застосування та технологічних вимог виробництва. Нижче наведені кінематичні схеми класичних моделей промислових роботів (рис.3.23 - 3.29) із зазначенням можливих ступенів свободи та системи

робочих координат, що придатні до застосування у якості виконавчої системи у складі ІВК [2, 15, 41].

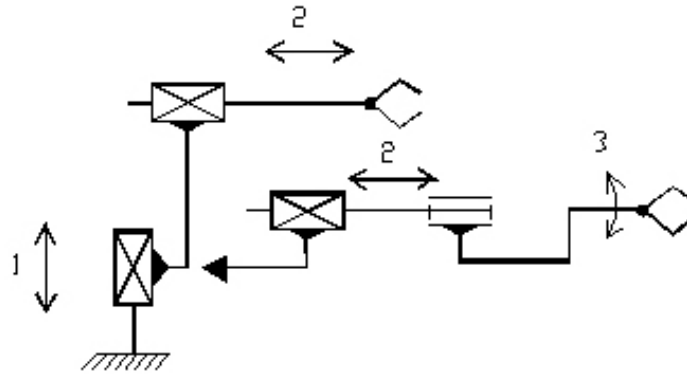


Рис.3.23. ПР РО/1В; «Authohand» АН-60-3 ($W_m = 2$ або 3; прямокутна плоска система координат)

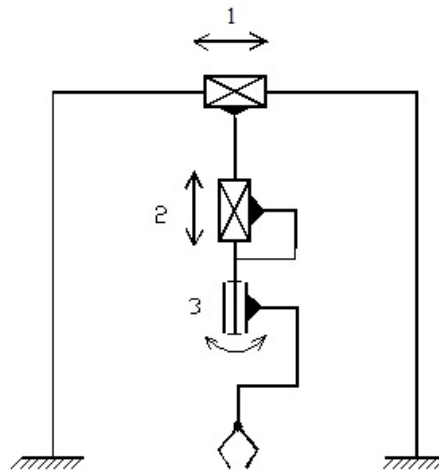


Рис.3.24. ПР СМ80Ц25.01; СМ80Ц48.01; ТРТ-1-250, М63-0L ($W_m = 3$ або 2, прямокутна плоска система координат)

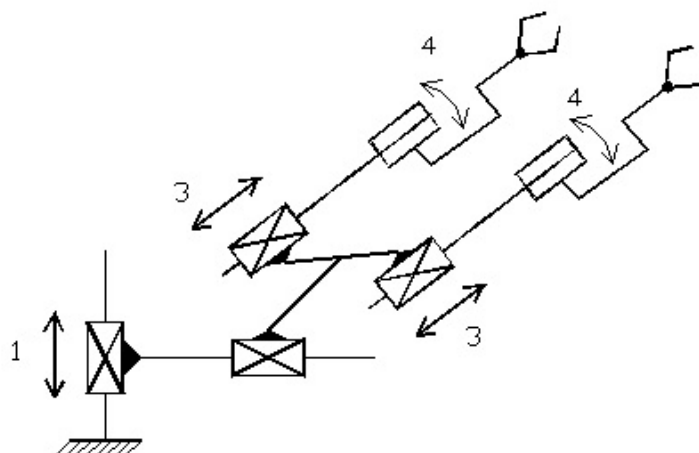


Рис.3.25. ПР «Autohand» АН-40/40-2 ($W_m = 4$, прямокутна просторова система координат)

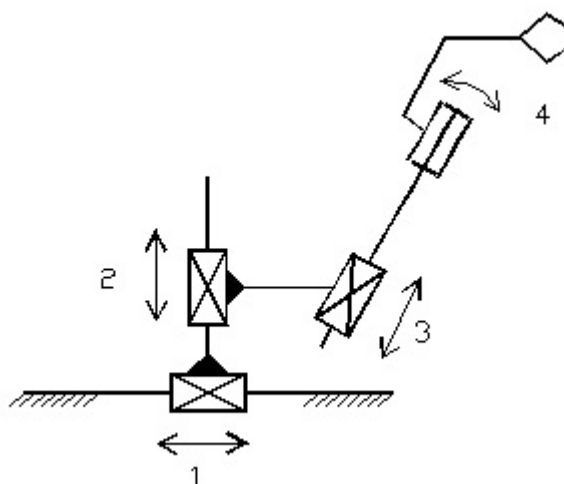


Рис.3.26. ПР «Toyota BBS» ($W_m = 5$, прямокутна просторова система координат)

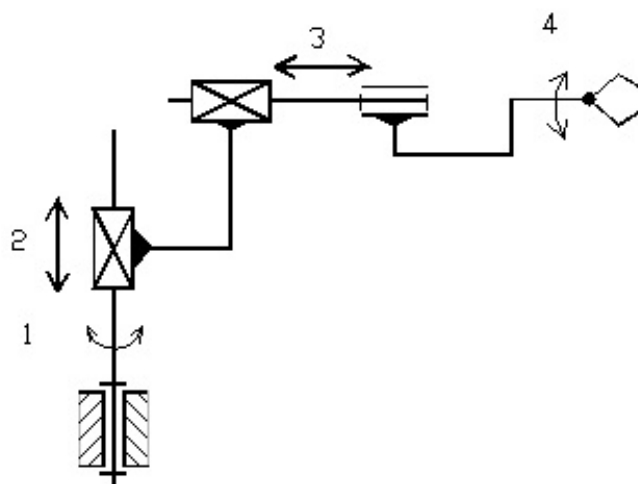


Рис.3.27. ПР КМ102842.31, «Motbac JBC-30» ($W_m = 4$, полярна циліндрична система координат)

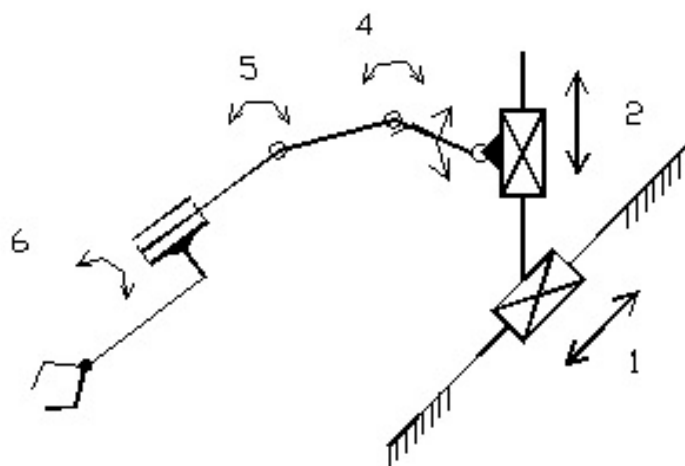


Рис.3.28. ПР CM4002.08.01 ($W_m = 6$, ангулярна циліндрична система координат)

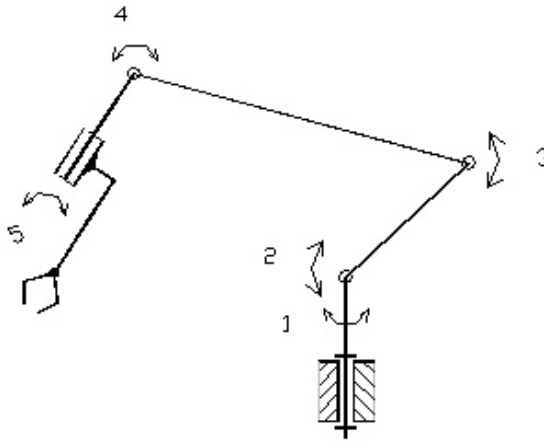


Рис.3.29. ПР ТУР-10 ($W_m = 5$, ангулярна сферична система координат)

3.6.3. Поняття прямої та зворотної задач кінематики

Функціонування ПР, придатних до застосування у складі ІВК та ІВС, забезпечується вирішенням прямої та зворотної задач кінематики.

При розв'язку *прямої задачі кінематики*, положення виконавчої та транспортних ланок маніпулятора визначається у просторі шляхом визначення узагальнених координат. Безпосереднє визначення поточних координат виконавчого органу маніпулятора є складним вимірювальним завданням. В той же час, використання датчиків зворотного зв'язку дозволяє точно визначати узагальнені координати окремих ланок маніпулятора ПР, що забезпечує точне вирахування результуючих координат виконуючого пристрою.

Зворотна задача кінематики дозволяє визначити узагальнені координати окремих ланок маніпулятора. Це викликано тим, що траєкторії рухів виконавчого пристрою маніпулятора задаються в декартовій системі координат, що має точку відліку прив'язану до центру основи маніпулятора ПР. В той же час, переміщення окремих ланок (в залежності від типу приводів) задаються узагальненими координатами.

Кінематична схема ПР характеризується узагальненими координатами (Лагранжа), що визначаються у процесі визначення незалежних параметрів та відповідають положенню маніпулятора у просторі. З'являється можливість визначення та відображення координат точок маніпулятора ПР, як механічної системи, у декартовій системі координат та визначення кількості його ступенів свободи [3, 41].

Типовий розв'язок прямої задачі кінематики для визначення узагальнених координат проводиться у декілька етапів:

На першому етапі проводиться вибір рівнянь що відображають зв'язок робочого органу маніпулятора із значеннями лагранжевих координат. Далі, вираховуються швидкість руху робочого органу, що задається відповідними функціями узагальнених координат (із врахуванням їх швидкостей). На останньому етапі визначається прискорення робочого органу ПР, що є функцією узагальнених координат, їх швидкостей та прискорень.

У якості прикладу розв'язку *прямої задачі кінематики* можна навести випадок, коли нерухома основа маніпулятора ПР прив'язана до системи координат $0_0x_0y_0z_0$ (співпадає з абсолютною КС), що показано на рис 3.30. При цьому, перша ланка маніпулятора ПР буде зв'язана із КС $0x_1y_1z_1$ причому її положення буде визначатися координатами першого ступеня свободи. Друга ланка виконавчого органу буде зв'язана із КС $0_1x_1y_1z_1$. В такому випадку, її взаємне положення відносно КС $0x_1y_1z_1$ буде визначатися 2-им ступенем свободи, і т.д. Таким чином можна відобразити зв'язки усіх ланок виконавчого органу ПР із відповідними КС та їх узагальнені координати у вибраних робочих координатних системах [25, 35, 41].

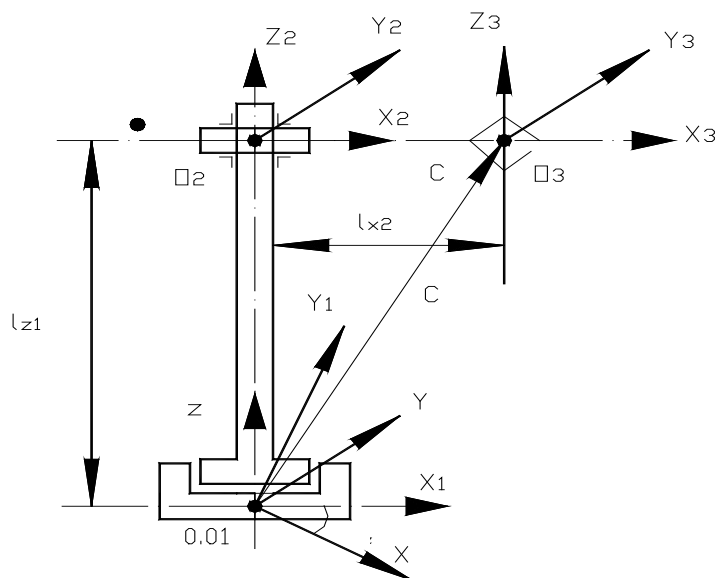


Рис.3.30. Схематичне зображення КС маніпулятора ПР, що працює в циліндричній системі координат

Якщо деяку точку C у системі координат, зв'язаній з $(i+1)$ -ою ланкою, представити у вигляді радіус-вектора C_{i+1} , то між цим вектором і вектором C_i , що являє собою дану точку у системі координат, зв'язаній з i -тою ланкою, існує зв'язок:

$$C_i = T_{(i+1)i} \cdot C_{i+1}, \quad (3.8)$$

де $T_{(i+1)i}$ – матриця перетворень координат із системи $O_{i+1}X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1}$ до системи $O_iX_iY_iZ_i$.

Матриці перетворення для рухів кінематичних пар V класу можуть бути записані в наступному виді:

- для обертання навколо осі Ox : $T_{\theta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x & 0 \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;
- для обертання навколо осі Oy : $T_{\theta_y} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;
- для обертання навколо осі Oz : $T_{\theta_z} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;
- для лінійного переміщення вздовж осі Ox : $T_{\ell_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \ell_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;
- для лінійного переміщення вздовж осі Oy : $T_{\ell_y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \ell_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;
- для лінійного переміщення вздовж осі Oz : $T_{\ell_z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ell_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Знайшовши відносне положення виконавчого органу C_n у заданій КС $O_nX_nY_nZ_n$, із якою він зв'язаний, можна вирахувати його положення C_0 приведене до абсолютної КС, що зв'язана із основою ПР, використавши залежність виду:

$$C_0 = T_{10}T_{21}...T_{n(n-1)}C_n \quad (3.9)$$

Для визначення будь-якої точки, що задана радіус-вектором R_i i -тої системи координат, залежність 3.9 можна представити у вигляді:

$$R_0 = \Gamma_i R_i, \quad (3.10)$$

де $\Gamma_i - T_{10}T_{21}...T_{i(i-1)}$ – відповідно матриця перетворення i -тої ланки, що характеризує її положення у КС $O_0x_0y_0z_0$.

При розв'язку зворотної задачі кінематики для вибраної ланки виконуючого пристрою ПР розв'язується рівняння $C_z = T_{32}C_3$ відносно вектора лагранжевих (узагальнених) координат:

$$Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T. \quad (3.11)$$

Знаходження положення та орієнтації хвату виконуючого пристрою у абсолютній КС, що прив'язана до основи ПР, проводять шляхом вирішення матриці перетворення виду:

$$\Gamma_n = T_{10}T_{21}...T_{n(n-1)} = \prod_{i=1}^n T_i(i-1) \quad (3.12)$$

Дана матриця має вигляд:

$$\Gamma_n = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} & \Gamma_{24} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} & \Gamma_{34} \\ \Gamma_{41} & \Gamma_{42} & \Gamma_{43} & \Gamma_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A \times B)_x & A_x & B_x & C_x \\ (A \times B)_y & A_y & B_y & C_y \\ (A \times B)_z & A_z & B_z & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

де C – вектор початку відліку системи координат $O_nx_ny_nz_n$, що зв'язана з центром хвату;

A – вектор орієнтації;

B – вектор підходу хвату;

$A \times B$ – векторний добуток.

Взаємне розташування вказаних векторів наведено на рис.3.31 [41].

Елементи матриці Γ_i визначають дванадцятимірний вектор-стовпець (вираз 3.14) що задає вектор положення i -тої ланки маніпулятора:

$$X_i = [\Gamma_{11}, \Gamma_{12}, \Gamma_{13}, \Gamma_{14}, \Gamma_{21}, \Gamma_{22}, \Gamma_{23}, \Gamma_{24}, \Gamma_{31}, \Gamma_{32}, \Gamma_{33}, \Gamma_{34}, \Gamma_{41}, \Gamma_{42}, \Gamma_{43}, \Gamma_{44}] \quad (3.14)$$

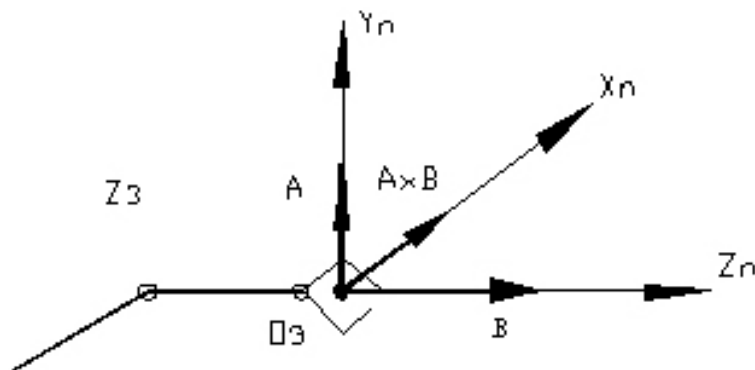


Рис.3.31. Розташування векторів підходу і орієнтування хвату маніпулятора

Розрізняють точний та наближений методи розв'язку зворотної задачі кінематики, що забезпечують різну достовірність визначення координат.

Застосування *точного методу розв'язку зворотної задачі кінематики* включає розв'язок системи нелінійних рівнянь що характеризують зв'язок заданого вектора положення X_{i3d} у декартовій системі координат (абсолютна КС) із вектором положення $X_i(q)$ що задається в лагранжевих (узагальнених) координатах:

$$X_{i3d} = X_i(q), \quad (3.15)$$

Це можна виконати шляхом зіставлення аргументів вектору положення X_{i3d} . відповідно до виразу:

$$\Gamma_{jk,3d} = \Gamma_{jk}(q); j = 1,2,3; k = 1,2,3,4. \quad (3.16)$$

В основі наближених методів розв'язку зворотної задачі кінематики лежить розв'язок рівняння виду $X_{i3d} = X_i(q)$ шляхом мінімізації функціоналу розугодження за виразом 3.17:

$$I^2(Q) = |X_{3d} - X(Q)|^2, \quad (3.17)$$

де X_{3d} – вектор положення у системі координат $0_0x_0y_0z_0$;

(Q) – вектор положення в узагальнених координатах, що функціонально залежить від вектора узагальнених координат $Q = [q_1, q_2, \dots, q_i]^T, i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Мінімізація даного виразу, як правило, проводиться градієнтним методом із кінцевим кроком. Для цього, у векторному просторі допустимих значень узагальнених координат Q вибирають можливі напрямки і крок зміни вектора Q , при дотриманні умови $Q \in Q$, та будують послідовність $Q^{[0]}, Q^{[1]}, \dots, Q^{[k]}, \dots, Q^{[m]}$, яка є мінімізуючою для функціоналу $I^2(Q)$, тобто:

$$I^2(Q^{[0]}) > I^2(Q^{[1]}) > \dots > I^2(Q^{[k]}) > I^2(Q^{[m]}), \quad (3.18)$$

На кожному кроці ітерації задають приріст $\Delta q_i^{[k]}$, знаходять величину $I^2(Q_i^{[k]})$ і перевіряють виконання послідовності. По мірі зменшення модуля градієнту зменшують величину кроку $\Delta q_i^{[k]}$. Такий спосіб дозволяє із прийнятною достовірністю розв'язати зворотну задачу кінематики для маніпуляторів будь-якої кінематичної схеми ПР [3, 25, 41].

3.7. Дистанційне та автоматичне управління роботами при роботі у складі ІВК. Принципи побудови систем управління

3.7.1. Системи дистанційного керування роботами

Системи дистанційного командного керування є найбільш простими за виконанням. В основі такої схеми лежить передача команд оператора, що формуються задавальним пристроєм, через систему підсилювачів та перетворювальних пристроїв до виконавчої ланки ПР. Оператор може

вибирати черговість включення приводів окремих ланок маніпулятора ПР забезпечуючи необхідні переміщення виконавчого пристрою у просторі.

Системи із командним керуванням мають відносно низькі показники точності позиціонування, у випадку відсутності каналів зворотного зв'язку, що контролюють положення виконавчих ланок ПР. Рухи ланок маніпулятора ПР можуть обмежуватися кінцевими вимикачами.

Такі системи знайшли застосування у дистанційно керованих апаратах для проведення маніпуляцій в складних або небезпечних виробничих умовах та середовищах що унеможливають роботу людини (космічний простір, середовища із несприятливою для роботи людини атмосферою, підводні маніпуляції та ін.)

Конструктивними особливостями систем *дистанційного копіювального керування* ПР є наявність задавального пристрою що кінематично повторює його виконавчий пристрій. Це дозволяє точно відтворювати команди задаючого пристрою. За структурою, системи дистанційного копіювального керування діляться на системи одно- та двосторонньої дії.

Для систем дистанційного копіювального керування односторонньої дії характерний напрямлений вплив до виконуючих пристрої ПР зі сторони оператора тільки у прямому напрямку. Задаючий пристрій при такій схемі не отримує відгуки з боку об'єкту маніпулювання.

У системах двосторонньої дії присутні канали зворотного зв'язку, що дозволяють отримувати інформацію про стан об'єкту маніпулювання, шляхом створення відповідних відгуків на задавальному пристрої. Системи двосторонньої дії часто застосовуються для керування ПР у складі ІВК. При цьому вимірювальні канали ІВК можуть формувати додаткову вхідну інформацію про поточний стан об'єкту маніпулювання та параметри робочої зони. Отримані дані обробляються обчислювальним ядром ІВК і можуть коректувати роботу алгоритмів ІС та СПК ПР та відображатися оператору в доступному для сприйняття вигляді (символьна, графічна, тактильна або звукова інформація), що дозволяє ефективно контролювати дії що виконує ПР [2, 21, 41].

В основу системи двосторонньої дії при застосуванні схеми дистанційного керування покладено роботу зворотних слідкуючих систем. Оператор, при керуванні ПР що має в основі вищезазначену схему керування, може раціонально планувати траєкторії переміщення виконуючого пристрою ПР в режимі реального часу. Структурна схема системи дистан-

ційного копіювального керування маніпулятором двосторонньої дії наведена на рис. 3.32.

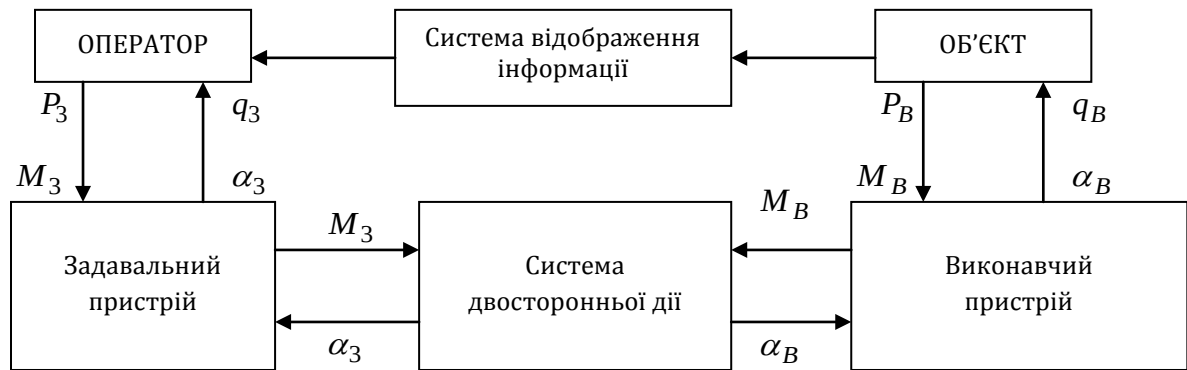


Рис. 3.32. Структурна схема СК копіювального маніпулятора двосторонньої дії: $P_3 = (P_{31}, \dots, P_{3r})$; $P_6 = (P_{61}, \dots, P_{6r})$ – вектори зусиль, відповідно на задавальному і виконавчому пристроях (r – число ступенів рухомості); $M_3 = (M_{31}, \dots, M_{3r})$; $M_6 = (M_{61}, \dots, M_{6r})$ – вектори моментів на задавальному і виконавчому пристроях, q_3, q_6 – узагальнені координати переміщення, α_3, α_6 – кутові узагальнені координати [41].

При роботі із ПР за схемою двосторонньої дії оператор за допомогою задавального пристрою імітує просторові рухи руки людини. Положення і орієнтація керуючих елементів ЗП визначаються координатами q_3 та α_3 , до яких прикладаються зусилля і моменти P_3 та M_3 . Це, в свою чергу, викликає переміщення виконуючого пристрою ПР за координатами α_{3i}, M_{3i} , ($i = 1 \dots r$). Відгук, у процесі взаємодії виконуючого пристрою із об'єктом маніпулювання, надходить до задавального пристрою по каналам системи двосторонньої дії. У випадку застосування ПР у складі ІВК, отримана по каналам двосторонньої дії інформація уточнюється на основі вимірювальної інформації що надходить по ВК інформаційно-вимірювального комплексу.

Зі збільшенням кількості інформації, про взаємодію об'єкту маніпулювання із виконуючим пристроєм ПР, забезпечується ефект максимальної подібності проведення людиною операції маніпулювання за допомогою робототехнічної системи порівняно із безпосереднім виконанням.

Зворотні слідкуючі системи, що застосовуються в сучасних ПР можуть бути симетричного та асиметричного типу.

Системи напівавтоматичного керування характеризуються наявністю обчислювального засобу (мікропроцесор, ЕОМ тощо) що керує заданими маніпуляціями виконавчого пристрою на основі команд що постійно задаються оператором. При такому керуванні, оператор задає команду на виконання багатостадійної маніпуляції або задає траєкторію у робочому

просторі, при цьому ІС та СПК промислового роботу відпрацьовують алгоритми, що забезпечують необхідні траєкторії руху ланок маніпулятора для виконання команди оператора [3, 21, 35].

Поточний стан ланок маніпулятора та положення його елементів у просторі розраховується на основі інформації від датчиків ІС або вимірювальних каналів ІВК, якщо ПР інтегровано до складу інформаційно-вимірювального комплексу.

ПР із системами напіваавтоматичного (НА) керування не володіють кінематичною відповідністю між задавальним та виконуючим пристроєм.

Існує декілька способів НА керування роботою ПР, з яких можна виділити:

- швидкісний (керування за вектором швидкості);
- силовий (керування за вектором сили);
- позиційний (керування положенням задавального пристрою).

Одним із найбільш розповсюджених способів НА керування є задавання оператором вектору швидкості та напрямку руху виконуючої ланки маніпулятора за допомогою задавального пристрою, що забезпечує керування за 6-ма ступенями свободи. Задавальний пристрій для такого типу керування часто представлений джойстиком. Система керування ПР розраховує кінцеві швидкості ланок виконуючого пристрою.

При застосуванні силового способу НА керування, виконуючий пристрій ПР відтворює команди що відповідають силі впливу і моменту сили що задається оператором за допомогою елемента керування. Обчислювальний засіб НА промислового роботу визначає моменти які відтворюються приводами маніпулятора відповідно до зусиль прикладених до задавального пристрою.

Позиційний спосіб НА керування подібний по своїй структурі до схеми копіювального керування. Він забезпечується шляхом переміщенням оператором задаючого елемента за певною траєкторією, що відповідно задає траєкторію руху виконуючого пристрою маніпулятора. Задавальний елемент виконується багатоступеневим, та може керувати поворотами пристрою хвату [21, 41].

Наведені способи НА керування ПР мають свої переваги та недоліки. Ступінь універсалізації ПР визначається можливістю його інтеграції до складу ІВК та ІВС та здатністю працювати за різними схемами керування, в залежності від вимог до точності позиціонування захватного пристрою.

3.7.2. Системи автоматичного керування ПР

Системи автоматичного керування (САК) ПР дозволяють їх повноцінне функціонування без участі людини. Оператор проводить лише навчання ПР за певною схемою, забезпечує його налаштування та проводить контроль відпрацювання промисловим роботом заданих робочих циклів.

Сучасні роботи, в залежності від типу системи керування та покоління, можуть мати жорстку програму дій, адаптивну систему керування, та керуючі системи із певним «штучним інтелектом».

Для класифікації САК промислових роботів можна виділити наступні параметри, що визначають функціональні можливості ПР:

- тип траєкторії, що відтворює виконуючий пристрій ПР;
- структура та зміст циклів керування;
- отримання інформації про стан ПР, об'єкт маніпулювання та стан робочої зони;
- зміст закону керування та шляхи його синтезу;
- структура алгоритмів керування;
- способи програмування САК.

Відповідно до траєкторії руху, що відтворює виконуючий пристрій, системи АК промисловими роботами підрозділяються на циклові, позиційні, контурні, адаптивні та інтелектуальні [2, 19].

Циклові САК забезпечують рух виконуючого пристрою ПР по дискретним траєкторіям руху. Дискретні точки траєкторії відповідають певній комбінації взаємних положень окремих ланок маніпулятора. Такі керуючі системи дозволяють точно позиціонувати виконавчий елемент ПР в заданій дискретній точці, але не дозволяють його переміщення в довільну точку робочої зони.

Застосування *позиційних САК* дозволяє виконавчому пристрою відтворювати траєкторії, утворені ламаними відрізками, що з'єднують крайні дискретні точки. Точне позиціонування можливе лише в дискретних точках. Із збільшенням кількості дискретних точок відбувається «згладжування» траєкторії руху, що відповідає неперервній функції заданого виду. Точність позиціонування в довільній точці траєкторії залежить від кількості визначених дискретних значень неперервної функції, відстані між ними, обчислювальних можливостей ІС та СПК конкретного зразку промислового роботу.

Контурні, адаптивні та інтелектуальні САК дозволяють точно позиціонувати виконавчий пристрій маніпулятора в заданій точці робочого простору із врахуванням параметрів переміщення.

Цикли керування ПР класифікують залежно від типу системи автоматичного керування. У циклових САК керуючі сигнали надходять до приводів маніпулятора через задані дискретні проміжки часу. Для позиційних систем автоматичного керування є характерною робота у замкнутому циклі для дискретних точок та у розімкнутому циклі під час переміщення між ними. Контурні САК задають замкнутий цикл роботи на основі даних, що відповідають динамічним станам робочих ланок ПР. Системи автоматичного адаптивного керування, що забезпечують замкнутий цикл роботи, включають додаткові інформаційні канали (або вимірювальні канали ІВК) що надають інформацію про зміни в робочій зоні. Інтелектуальні САК подібні по структурі до адаптивних систем, включають обчислювальне ядро (інтегроване з ІС та СПК), динамічно пов'язані зовнішню та внутрішню ланки та працюють у замкненому циклі.

Інформаційне забезпечення САК. Циклові САК зазвичай не містять інформаційних сенсорів, але можуть включати обмежувачі кінцевих положень ланок маніпулятора. Позиційно-контурні САК контролюють положення виконавчих ланок маніпулятора на основі сигналів, що надходять із датчиків положення, шляхом формування сигналів розугодження. Адаптивні системи автоматичного керування включають додаткові сенсори контролю зовнішнього середовища. Інтелектуальні САК дозволяють агрегувати інформацію, що формується внутрішніми та зовнішніми сенсорами ПР, та аналізувати її за допомогою власної бази даних.

Алгоритми керування САК. Циклові САК задають лінійний алгоритм, що представляє собою послідовність одиничних команд спрацювання робочих ланок. Для позиційних САК застосовується інтерполяція, що дозволяє задавати переміщення між дискретними точками. Алгоритми керування контурними, адаптивними та інтелектуальними системами будуються шляхом вирішення відповідних диференціальних рівнянь руху. У випадку застосування адаптивних та інтелектуальних САК, для ПР що є складовою частиною ІВК, для обробки вимірювальної інформації часто застосовується матричне числення.

Способи програмування САК. Циклові системи автоматичного керування потребують ручного внесення програм та їх прив'язки до положень

виконуючих ланок маніпулятора. Позиційні САК можуть мати можливість внутрішньосистемного програмування та дозволяють використання програм написаних на мові високого рівня. Адаптивні та інтелектуальні САК можуть програмуватися автоматизованим, автоматичним способами та методами машинного навчання [38, 41].

3.7.3. Циклові системи керування ПР

В основу циклового керування промисловими роботами покладено точне позиціонування ланок маніпулятора відносно обмежуючих елементів. Циклові системи керування (ЦСК) ПР мають певні особливості:

- послідовність рухів ланок виконавчого пристрою та тривалість їх позиціонування у заданих дискретних точках визначається окремими логічними командами (кадрами);
- рухи ланок маніпулятора за визначеними ступенями свободи задаються використанням обмежуючих елементів, та, у деяких випадках, датчиків положення рухомих ланок;

Типова структурна схема пристрою циклової системи керування містить керувально-обчислювальний модуль, засіб зберігання та відтворення програмного коду, периферійні компоненти, що забезпечують зв'язок ЦСК із ПР та допоміжним технологічним устаткуванням (блок спряження) та пульт ручного керування (рис. 3.33) [41].

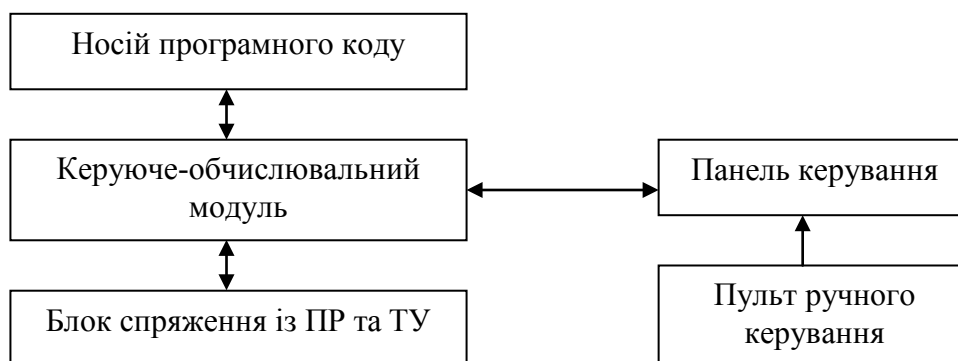


Рис. 3.33. Загальна структура системи циклового керування

Керувально-обчислювальний модуль задає набір керуючих сигналів що відтворюють робочий алгоритм ПР. Набір керуючих сигналів транслюється у відповідні операційні вузли та системи приводів ПР. У якості керувально-обчислювального модулю можуть застосовуватися мікроконтролерні та мікропроцесорні системи, та промислові ЕОМ, у

випадку необхідності обробки значного масиву даних що, є необхідним для роботи промислового роботу у складі ІВК.

Програмний код включає алгоритм керування ПР та зберігається у напівпостійних запам'ятовувальних пристроях (НПЗП) з електричним перезаписом інформації.

Блок спраження містить периферійні компоненти та інтерфейси, що забезпечують зв'язок ЦСК із ПР та технологічним устаткуванням. Він забезпечує задавання логічних команд що надходять на приводи виконуючого пристрою, формує масив інформації що надходить від датчиків ПР, отримує інформацію про відпрацювання циклів роботи ПР та стан технологічного обладнання що має зв'язки із промисловим роботом.

Панель ручного керування дозволяє оператору задавати, при необхідності, робочі режими роботи ПР, команди запуску та зупинки робочих циклів. У випадку оснащення пульта керування індикаторами, можна контролювати хід виконання поточного робочого циклу ПР в цілому, та стан його окремих ланок [19, 41].

Задавання інформації керування проводиться окремими логічними командами (кадрами) у певній послідовності. У випадку автоматичного виконання програми, команди зчитуються покадрово із носія програмного коду в керувально-обчислювальний модуль, що задає виконуючі сигнали для керування виконавчим пристроєм ПР.

3.7.3. Позиційно-контурні та адаптивні системи керування промисловими роботами

В загальному випадку, керування переміщенням виконуючого пристрою ПР по заданій траєкторії руху, у випадку застосування позиційно-контурної СК, проводиться у процесі розрахунку значень програмної траєкторії $q(t_k)$ за дискретних відліків часу $t_0, t_1, \dots, t_m$. Крок дискретності керування (і відповідно точність позиціонування) вибирається згідно нормативних умов для вибраних технологічних операцій. У позиційно-контурній СК застосовується зворотний зв'язок по положенню рухомих ланок маніпулятора ПР.

Позиційні та контурні системи керування відрізняються за способом подання програмних траєкторій $q(t_k)$ до приводів виконуючого пристрою промислового роботу.

а) у позиційних системах керування ПР програмна траєкторія $q(t_k)$ задається після того, як приводи виконуючого пристрою виконали із заданою точністю позиціонування усі етапи попередньої траєкторії $q_i(t_{k-1})$, (при $i = 1 \dots N$).

б) контурні СК характеризуються циклічним задаванням програмних траєкторій $q(t_k)$, із заданою періодичністю. Причому, результуюча точність позиціонування визначається в кінцевій точці програмної траєкторії $q(t_m)$.

Для виконання точного та достовірного переходу між дискретними значеннями траєкторії руху, (характеризує її асимптотичну стійкість) необхідно вирішити завдання стабілізації програмної траєкторії, що забезпечується синтезом керуючих алгоритмів.

Позиційно-контурні СК використовуються у випадках коли необхідно точно позиціонувати виконуючий елемент маніпулятора за заданими дискретними відліками. Такі системи керування зазвичай мають слідкуючий або дискретний тип приводу, від 3 до 8 керованих робочих координат та дозволяють застосовувати широкий перелік зовнішніх та внутрішніх сенсорів (аналогові, кодові, фазового зсуву, положення, та ін.)

Системи керування позиційно-контурного типу класифікують, залежно від способу обробки координатних переміщень (паралельна або послідовна), на СК що містять центральний обчислювальний модуль (ЦОМ) та системи децентралізованого типу, у яких кожен координатний блок має власний субобчислювач.

Виконання СК за децентралізованою схемою є типовою для цільових систем, що мають обмежену універсальність за функціоналом. При застосуванні схеми керування із ЦОМ, з'являється можливість підвищити функціональні можливості ПР шляхом оптимізації апаратного забезпечення та приладових інтерфейсів [21, 35, 41].

У якості типового зразку СК промисловим роботом із ЦОМ можна навести класичний пристрій числового позиційного керування УПМ-772 (рис.3.34). Він дозволяє керувати ПР що має слідкуючі приводи замкненого типу. Система керування створена за принципом мікропрограматорного автомата (МПА), має скінченну кількість станів та жорсткий цикл керування. Команди на відпрацювання програмних траєкторій задаються за алгоритмом, що керує переміщеннями окремих ланок виконуючого пристрою.

У структурі пристрою числового позиційного керування можна виділити елемент, що представлений операційно-логічним блоком. Він

виконує функції загального керування пристроєм та обробку інформації. Логічний зв'язок між функціональними блоками пристрою керування забезпечується інформаційними шинами А, В, С.

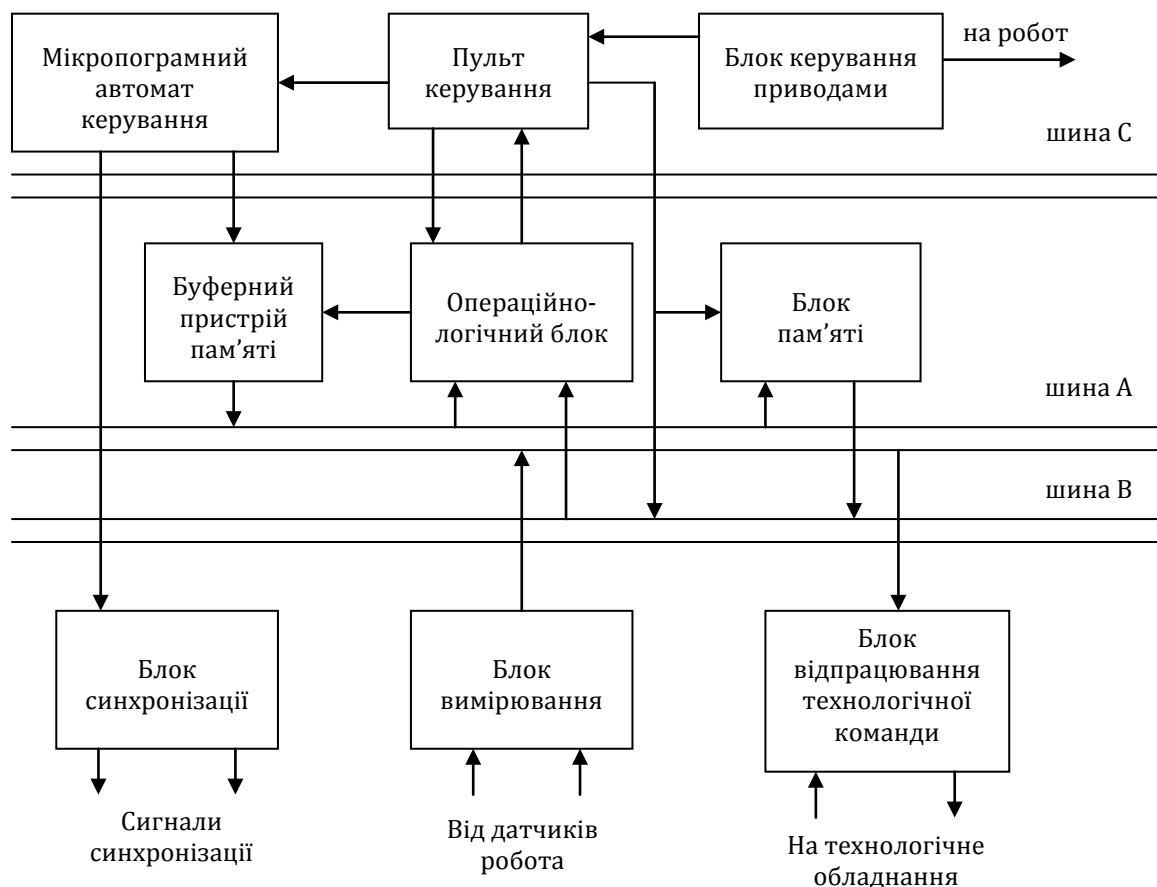


Рис. 3.34. Структурна схема уніфікованого керуючого пристрою ЧПК УПМ-772 [38]

Збереження та задавання програм керування, по запиту мікропрограчного автомату, відбувається за допомогою напівпостійного запам'ятовуючого пристрою. У подальшому, програма надходить у буферний напівпровідниковий запам'ятовуючий пристрій для оперативного відтворення.

Блок синхронізації виконує функції зв'язку складових частин пристрою, формує керуючі сигнали що задають дискретні часові відліки та частоти роботи вимірювальної підсистеми.

Вимірювальний блок призначений для контролю та керування рухів маніпулятора на основі даних що надходять по вимірювальним каналам ПР, шляхом виконання алгоритму що задається у коді. Він отримує інформацію від первинних перетворювачів, містить аналогово-цифрові перетворювачі що формують інформацію про положення рухомих ланок маніпулятора в просторі у вигляді коду.

Особливістю блоку керування (БК) пристрою числового позиційного керування УПМ-772 є наявність фазових цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП), що задають керуючі сигнали до рухомих ланок маніпулятора, та здатні запам'ятовувати значення вихідних напруг, які надходять на приводи рухомих ланок. Швидкість та точність позиціонування рухомих елементів маніпулятора забезпечується керуючим алгоритмом у коді, що знаходиться на вході БК.

Пристрій ЧПК УПМ-772 оснащено пультом ручного керування, що використовується для введення команд пуску та зупинки окремих циклів роботи. Він забезпечує корекцію робочих алгоритмів ручним способом та контроль режимів роботи ПР у процесі інтерпретації даних що надходять від вимірювального блоку та первинних вимірювальних перетворювачів.

Наведена СК має жорсткий цикл керування, причому, для забезпечення логічних зв'язків головних модулів керуючого пристрою і периферійного обладнання та заданих алгоритмів керування, використовується, в основному, апаратний спосіб.

У випадку застосування у складі контурно-позиційних керуючих систем цифрового обчислювального ядра (мікропроцесорні системи, ЕОМ) з'являється можливість перепрограмування керуючих алгоритмів. Таке програмне забезпечення (ПЗ) часто будується за модульним принципом та дозволяє керувати рухомими ланками маніпулятора у контурному та позиційному режимах із заданою точністю та швидкодією.

Особливостями застосування *адаптивних систем керування* є вирішення завдань інформаційного забезпечення у керуванні ПР. Для цього, у складі СК промисловим роботом, застосовують апаратні та програмні компоненти що дозволяють синтез та контроль відпрацювання адаптивних законів керування. Вимірювальні підсистеми адаптивної СК містять значну кількість датчиків різного виконання та призначення. Важливою є умова правильної обробки та інтерпретації вимірювальної інформації що надходить із первинних вимірювальних перетворювачів ІС промислового роботу [35, 41].

Ефективним методом вирішення цих завдань є інтеграція ПР із адаптивною СК до складу ІВК. Це вирішує більшість завдань інформаційного забезпечення при керуванні ПР, та дозволяє синтезувати керуючі алгоритми та контролювати їх відпрацювання при динамічних змінах у робочій зоні. Вимірювальні канали ІВК дозволяють формувати необхідний

додатковий масив вимірювальної інформації в режимі реального часу, що відповідає критеріям повноти та достовірності, при синтезі керуючих алгоритмів в адаптивних системах керування ПР. Це може бути однією із визначальних умов, у випадку значного просторового рознесення виконавчої та інформаційно-вимірювальної частин ПР інтегрованого до складу інформаційно-вимірювального комплексу.

Важливою умовою правильного функціонування ПР, інтегрованих до складу ІВК, є достовірне визначення метрологічних характеристик утвореної системи. Для цього визначаються типові метрологічні характеристики (МХ) ІВК в цілому та МХ його складових частин (виконавчої, інформаційно-вимірювальної, підсистем передачі інформації та ін.) Метрологічні характеристики, що утворюють комплекс МХ утвореного ІВК, повинні включати лише ті МХ, що є постійними незалежно від режимів роботи ІВК та ПР у його складі при заданих умовах експлуатації [17, 37, 38].

Ключовими положеннями забезпечення адаптивного керування ПР є застосування апаратних та програмних компонентів, що дозволяють СК промислового робота задавати певний закон керування (відповідно до умов), співвідносити розташування рухомих елементів ПР із об'єктами у робочій зоні, фіксувати та оцінювати правильність результатів маніпуляцій.

Для контролю стану ПР застосовуються масив сенсорів що визначають взаємне положення рухомих ланок маніпулятора, їх результуючі швидкості та прискорення, силу хвату виконуючої ланки (вимірювання зусиль та моментів на захватному пристрої) та ін. Сенсори зовнішнього зв'язку можуть контролювати геометричні розміри, структуру і текстуру об'єктів у робочій зоні, фізичні та хімічні властивості оточуючого середовища.

У керуючих системах із адаптивним керуванням особливо важливою є інтерпретація інформації що надходить від вимірювальної підсистеми контролю геометричних розмірів. Вона може включати тактильні, оптичні, ультразвукові, радіочастотні (локаційні) вимірювальні перетворювачі та системами технічного зору (телевізійні вимірювальні системи) [17, 41].

Отримана в результаті роботи внутрішніх та зовнішніх сенсорів вимірювальна інформація формується у вигляді аналогових (із певними значеннями струму та напруги) та цифрових (кодова послідовність) вимірювальних сигналів. Сформовані вихідні дані використовуються для синтезу закону керування та повинні відповідати критеріям повноти та достовірності вимірювальної інформації.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 3

1. В яких випадках проводять випробування з метою затвердження типу інформаційно-вимірювальних систем і що вони включають?
2. Вкажіть які покоління роботів отримані по мірі розвитку робототехніки. Які особливості кожного покоління та галузь їх застосування?
3. Дайте визначення автоматизації виробничих процесів. Які сучасні концепції комплексної автоматизації ІВС та ІВК?
4. Дайте визначення дистанційного та автоматичного управління роботами при дослідженнях у ІВК. Що таке позиційно-контурні системи керування та адаптивні системи керування ? Пояснити їх роботу.
5. Дайте визначення дистанційного та автоматичного управління роботами при дослідженнях у ІВК. Що таке системи напівавтоматичного (н/а) керування та системи автоматичного керування роботами? Пояснити їх роботу.
6. Дайте визначення дистанційного та автоматичного управління роботами при дослідженнях у ІВК. Що таке системи командного та копіювального керування? Поясніть принцип роботи схеми двосторонньої дії.
7. Дайте визначення кінематичної схеми ПР і вимог до них. Охарактеризуйте кінематичні схеми ПР різної конструкції та призначення.
8. За яким принципом класифікуються роботи? Приведіть класифікацію роботів за основними ознаками та за характером робіт, що вони виконують.
9. Наведіть схему системи управління промисловими роботами і поясніть призначення її складових частин. Які засоби вимірювань використовуються в системі управління?
10. Охарактеризуйте автоматичні маніпулятори і вкажіть галузь їх застосування. Чим відрізняються автооператори від промислових роботів ?
11. Охарактеризуйте програмні компоненти що забезпечують роботу вимірювально-обчислювальних комплексів.
12. Охарактеризуйте систему КАМАК.
13. Охарактеризуйте апаратні компоненти у складі вимірювально-обчислювальних комплексів.

14. Перерахуйте основні етапи повного циклу робіт по затвердженню типу інформаційно-вимірювальних систем і дайте коротку характеристику кожного етапу.
15. Перерахуйте розділи, які повинна містити програма випробувань інформаційно-вимірювальних систем і дайте коротку характеристику кожного розділу.
16. Поясніть класифікацію промислових роботів. Охарактеризуйте біотехнічні маніпулятори і вкажіть галузь їх застосування
17. Поясніть функціональну схему робота, як складової частини автоматизованого ІВК. Які засоби вимірювань використовуються для його функціонування ?
18. Розгляньте основні варіанти побудови, особливості архітектури і структурних схем вимірювально-обчислювальних комплексів.
19. Скільки існує рівнів автоматизації виробництва ? Охарактеризуйте кожний рівень та наведіть галузь застосування.
20. Що таке основні координатні переміщення промислових роботів? Які бувають системи основних координатних переміщень?
21. Що таке вимірювально-обчислювальний комплекс ?
22. Що таке кінематичний аналіз в робототехніці ? Дайте визначення прямої та зворотної задачі кінематики.
23. Що таке промисловий робот ? Яке його призначення у виробництві та в ІВС?
24. Що таке універсальність ПР? Яким чином розраховується кількість ступенів рухомості маніпулятора ПР ?
25. Що являє собою приладовий стандартний інтерфейс (стандарт МЕК) ?
26. За якими критеріями вимірювально-обчислювальні комплекси поділяються за призначенням?
27. Вкажіть вид документації що служить в якості додаткових матеріалів та подається замовником при проведенні випробувань для цілей затвердження типу ІВК та ІВС?
28. Які завдання вирішуються при перевірці відповідності методів і засобів регламентації та контролю метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем вимогам НД ?
29. Які класи кінематичних пар використовуються у ПР?

РОЗДІЛ 4. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ І ІНФОРМАЦІЇ ІВС ТА ІВК. СУЧАСНА ЕЛЕМЕНТНА БАЗА КАНАЛІВ ВИМІРЮВАНЬ ТА ІНФОРМАЦІЇ

4.1. Мікропроцесорні контролери і мікроконтролери. Класифікація мікроконтролерів та мікропроцесорів

Історія розвитку мікропроцесорних засобів. Поява перших мікропроцесорів в 1971 році зробила революцію в області цифрової електроніки і обчислювальних машин. Мікропроцесор розроблявся як елемент, що здатний замінити велику кількість мікросхем процесорної плати ЕОМ. В результаті, в одному корпусі були скомпоновані лічильники, регістри, логічні блоки та інші елементи. Для отримання готового комп'ютера, до мікропроцесора необхідно було додати пристрої вводу/виводу, пам'ять і деякі периферійні елементи. При цьому майже відразу виникло питання, яким чином можна вказані обчислювальні компоненти розмістити на кристалі мікропроцесора? Через деякий час такий елемент був створений і отримав назву «мікроконтролер».

Мікроконтролер – мікропроцесорна система, що містить на одному кристалі процесорне ядро, довготривалу і оперативну пам'ять, пристрої вводу/виводу і призначена для побудови систем управління, датчиків та компактних пристроїв обробки інформації.

На відміну від мікропроцесора, мікроконтролер має меншу універсальність. Також, пам'ять мікроконтролерів в багатьох випадках не перевищує 512 Кб, що унеможлиблює їх роботу з сучасними операційними системами. Тим не менше, ці мікропроцесорні пристрої одержали значне поширення. Якщо взяти інформацію щодо поширення, то вони складають 90% усіх випущених мікропроцесорних систем. Мікроконтролери сьогодні використовуються в усій побутовій техніці, промислових установках і верстатах, датчиках, регуляторах та інших застосуваннях, де не потрібна велика обчислювальна потужність. Наприклад, у кожному сучасному автомобілі є кілька мікроконтролерів, керуючих двигуном, підвіскою, кондиціонером, акустичною системою, панеллю приладів, та ін. [16, 40].

Величезна популярність мікроконтролерів пов'язана, насамперед, з закінченістю цього пристрою і простотою розробки готових конструкцій. Контролери використовуються не тільки у великих системах, але і у

малогабаритних пристроях. Дані пристрої повинні відповідати умовам мініатюризації та мати можливість інтеграції в більш складні пристрої, володіти широкими експлуатаційними властивостями. Для прикладу, можна навести перелік мікроконтролерних засобів керування та контролю сучасного автомобіля (рис. 4.1)

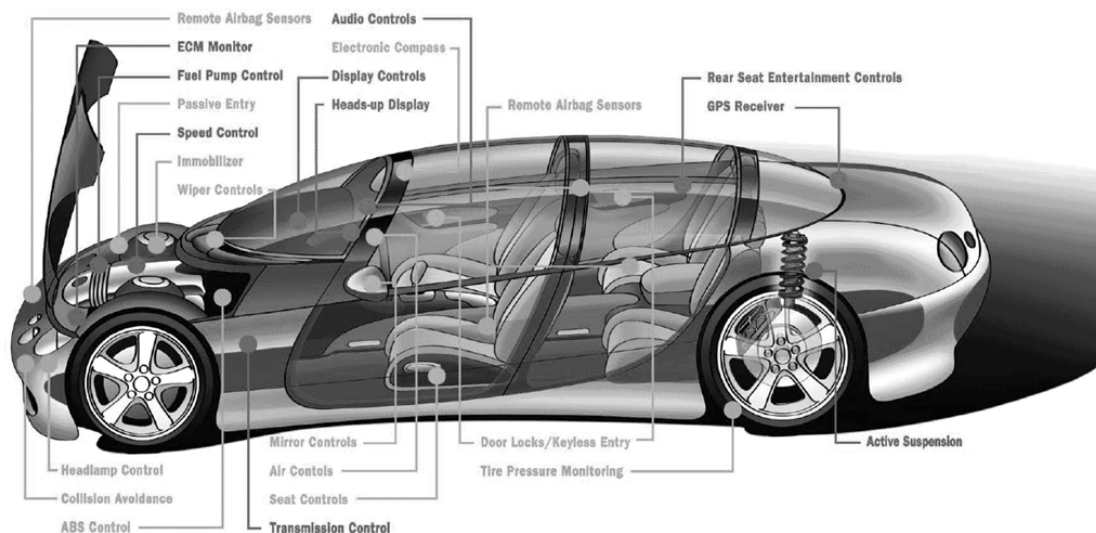


Рис.4.1. Розміщення мікроконтролерів у сучасному автомобілі

Для використання мікроконтролеру достатньо забезпечити підключення до нього необхідних датчики, виконавчих елементів і написати програму роботи. Розробка керуючих програм здійснюється на персональних комп'ютерах, при цьому більшість виробників пропонує безкоштовні засоби програмування і налагодження проектів. В якості мов програмування мікроконтролерів, сьогодні використовуються Асемблер, С, С++, Pascal, Basic. У підсумку, створення програм практично нічим не відрізняється від створення програм для звичайних ПК. Другою перевагою використання МК є досить низька вартість мікросхем. Ціни на МК рідко перевищують декілька тисяч гривень, а для багатьох моделей складають сотні гривень.

4.1.1. Основні визначення. Класифікація мікропроцесорних контролерів (МПК)

Мікропроцесор (МП) – функціонально закінчений процесор електронно-обчислювальної машини, реалізований у вигляді однієї або декількох ІС і призначений для обробки цифрової інформації за заданими програмами.

Мікропроцесорний контролер (МПК) – функціонально закінчена мікро-ЕОМ, призначена для цілей контролю і управління.

МПК може реалізовуватися на наступній елементній базі:

- однокристальних мікропроцесорах (ОМП);
- секційних (багатокристальні) МП;
- однокристальних мікроконтролерах (ОМК);
- складних матричних програмованих логічних схемах (ПЛІС, PLD, CPLD та ін.) [24, 28, 40].

ОМК – функціонально закінчений МПК, реалізований у вигляді однієї НВІС (над-ВІС). ОМК містить у своєму складі: процесор, ОЗУ, ПЗУ, таймери, порти введення/виведення, що дозволяють підключення периферійних компонентів. ОМК може включати модулі розширення, що забезпечують можливість введення аналогових сигналів та можливість підключення за допомогою одного чи декількох приладових інтерфейсів. Найпростіший ОМК являє собою ВІС (велику інтегральну схему) площею не більше 1 см² із вісьмома виводами.

4.1.2. Класифікація однокристальних мікроконтролерів (ОМК)

За сучасною класифікацією ОМК виділяють:

1) Однокристальні мікроконтролери, що забезпечують елементарні функції керування в мікроконтролерних системах. Такі ОМК класифікують як *інтерфейсні (периферійні) мікроконтролерні засоби*. Вони мають малу продуктивність і габаритні розміри. Зокрема, можуть використовуватися периферійними пристроями ЕОМ (клавіатура, миша тощо).

2) Другу групу складають *універсальні ОМК що застосовуються у вбудованих системах*. Зазвичай, вони мають 8-10 розрядну архітектуру та є складовими компонентами портативних засобів керування. Вони можуть застосовуватися у лініях зв'язку та системах керування, що забезпечують роботу зовнішніх пристроїв. Такі однокристальні мікроконтролери не здатні забезпечувати складні процеси управління, містять обмеження по набору команд і швидкодії їх виконання. В той же час, вони є закінченими обчислювальними компонентами із низькою ціною та матеріалоемністю, та застосовуються для вирішення широкого кола інформаційних завдань.

Типовий ОМК включає перелік компонентів:

- генератор тактових імпульсів;
- процесор та схему його запуску/вимкнення;
- програмний інтерфейс;

- пам'ять даних та пам'ять програм (EEP)ROM;
- засоби вводу-виводу даних;
- таймери, що фіксують число командних циклів.

Структурну схему однокристального мікроконтролеру наведено на рис 4.2.

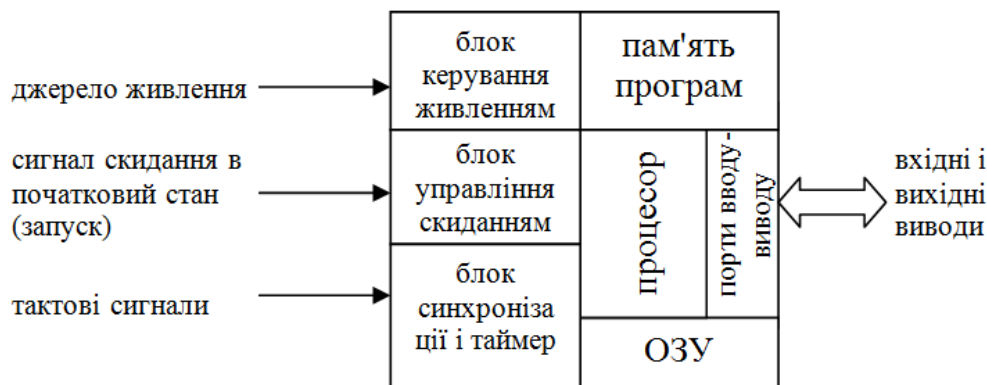


Рис.4.2. Склад та структура ОМК малої та середньої розрядності

Спеціалізовані однокристальні мікроконтролери мають значно розширений функціонал, що може включати:

- наявність індикаторної рідкокристалічної панелі (РК) для контролю процесу виконання алгоритму та його відладки;
- можливість внутрішньосистемного програмування, без вилучення із схеми включення керуючого пристрою, до складу якого він входить;
- можливість введення/виведення аналогових сигналів, що є вагомим фактором для роботи АЦП та ЦАП у складі більшості вимірювального обладнання;
- розширений перелік портів введення/виведення (синхронного та асинхронного типу);
- можливість роботи із зовнішньою пам'яттю у мікропроцесорному режимі;
- стандартні комутаційні порти послідовного та паралельного типу, що дозволяють пряме підключення до інших мікропроцесорних засобів та EOM (RS-232, RS-485, I²C шина) [4, 40].

Розглянуті розширені властивості ОМК забезпечують широке коло інформаційних завдань, дозволяють проектувати гнучкі системи на базі мікроконтролерів, спрощують процеси комплектування та застосування у складі інформаційних систем більш високого порядку.

Типові значення максимальної частоти тактових сигналів для різних вбудованих ОМК знаходяться у межах 10...20 МГц. Одним із факторів, що впливає на швидкість обробки інформації ОМК, є швидкість обміну інформацією між процесорним ядром та вбудованою пам'яттю ОМК та її місткість.

3) *Універсальний 16-розрядний ОМК.* Призначений для керування у системах що виконують операції середньої продуктивності у режимі реального часу. Такі мікроконтролери мають складну структуру, розширений перелік інтерфейсів та портів введення/виведення, та дозволяють системам керування оперативно реагувати на зовнішні події. Широке використання вони мають в системах керування електродвигунами ПР (мехатронні системи).

4) *Спеціалізовані 32-розрядні ОМК* реалізують високопродуктивну ARM архітектуру і призначені для систем телефонії, передачі інформації, телебачення та інших сфер, дозволяють високошвидкісну обробку інформації.

Однокристальні мікроконтролери у 16...32 розрядному виконанні часто забезпечуються зовнішньою пам'яттю (ЗП). Вона включає власну пам'ять програм (ROM) та розширену пам'ять даних (RAM) для обробки масивів даних заданої розмірності [16, 28, 40].

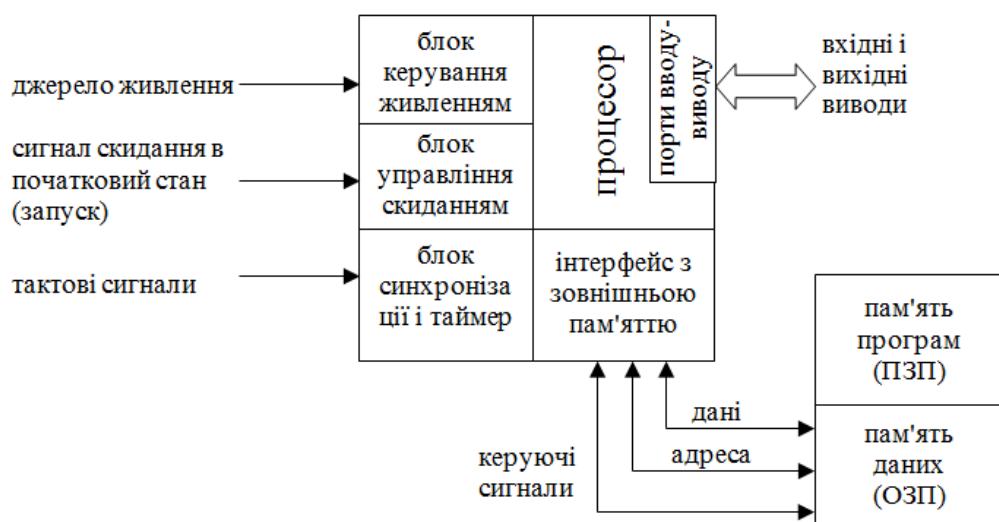


Рис.4.3. Схема будови 16...32-розрядних ОМК

Мікроконтролери із зовнішньою пам'яттю призначені для інших застосувань, ніж ОМК, що вбудовуються. Ці застосування зазвичай вимагають великого об'єму власної пам'яті програм (ROM) та пам'яті даних (RAM) при незначній кількості портів введення/виведення та приладових інтерфейсів.

Мікроконтролери із ЗП широко використовуються у засобах обробки та зберігання масивів даних великої розмірності. Типовою реалізацією такого схемного рішення є мікроконтролери керування роботою жорстких дисків (HDD) електронних обчислювальних машин.

5) *Цифрові сигнальні процесори (DSP)* – відносно нова категорія процесорів. Призначення DSP полягає в тому, щоб отримувати поточні дані від аналогової системи і формувати відповідний відгук. DSP містять у своєму складі ALU (Arithmetic Logic Unit - арифметико-логічний пристрій), який є апаратним компонентом для обробки інформації. Такі мікропроцесорні контролери мають виключно високі тактові частоти та швидкість арифметико-логічних операцій. Сфери застосування цифрових сигнальних процесорів (*DSP*) – засоби обробки аудіо- та відеоінформації, аналіз радіо- та телевізійних сигналів в режимі реального часу, створення спеціальних ефектів у студіях звукозапису, тощо. DSP як компоненти зазвичай застосовуються лише у складі систем заданого функціонального призначення, та не є засобами що використовуються для автономної роботи [28, 32, 40].

Розробка DSP алгоритмів – це спеціальний розділ теорії управління. Виклад цієї теорії вимагає використання вельми складної математики. У різноманітних DSP можна знайти особливості, властиві як мікроконтролерам, що вбудовуються, так і мікроконтролерам із зовнішньою пам'яттю. Основними відмінностями DSP є підвищена розрядність оброблюваних слів (16, 32, 64 біта) та значна швидкодія.

4.2. Основні архітектури сучасних ОМК

Розглянемо більш детально архітектурні рішення що знайшли застосування у сучасних однокристальних мікроконтролерах. У даний час, на світовому ринку поширені ОМК трьох основних архітектурних виконань:

- класичної архітектури із розширеним набором команд (*Complex Instruction Set Commands*) – так звані *CISC контролери*;
- *RISC мікроконтролери* (*Reduce Instruction Set Commands*), що призначені для вбудованих рішень та мають скорочений набір команд;
- *мікроконтролери архітектури ARM* (*Advanced RISC-machine*) класичної RISC архітектури, що володіють розширеним функціоналом та особливостями які забезпечують підвищену швидкодію.

Мікроконтролери, що відносяться до CISC-архітектури мають широкі можливості адресації команд та їх великий набір. Такі властивості дають змогу проводити вибір команд для реалізації відповідних функцій керування та обробки інформації на етапі розробки системи, що містить ОМК. Така архітектура спрощує написання, тестування та відладку алгоритмів що забезпечують роботу мікроконтролеру, але потребує наявності в ОМК пам'яті програм (EEP)ROM необхідного об'єму.

Мікроконтролери RISC-архітектури мають мінімально можливий набір команд. Тому, при розробці алгоритмів керування для таких ОМК, виникає необхідність оптимізування і комбінування команд та способів їх адресації. В той же час, мікроконтролери RISC-архітектури дозволяють забезпечити максимальну продуктивність при обмеженні апаратних можливостей ОМК. Такі контролери мають збільшену розрядність (12..16 біт) та значну кількість (тисячі) загальних регістрів, і можуть повністю виконувати окремі команди на протязі декількох тактів або машинних циклів. Скорочення команд та оптимізація алгоритму керування по коду дає можливість значно скоротити кількість машинних циклів, необхідних для арифметично-логічних операцій [28, 32].

4.3. Аналогово-цифрові перетворювачі. Розрядність. Типи перетворення. Похибки квантування. Апертурна похибка. Частота дискретизації. Підмішування псевдовипадкового сигналу (dither). АЦП порівняння з пилоподібним сигналом. АЦП із врівноваженням напруги

4.3.1.Способи вводу аналогового сигналу в мікроконтролер

Застосування сучасних мікроконтролерів поширюються практично у всі сфери виробництва та побуту людини. Вони є універсальним засобом керування будь-яким електронним виробом.

Важливими завданнями, які можна вирішувати із застосуванням мікроконтролерних засобів, при застосуванні у складі інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), є можливість введення/виведення аналогової інформації що містить вимірювальні та керуючі сигнали.

Типовою схемою вимірювального каналу ІВС є послідовне розміщення аналогового первинного вимірювального перетворювача (ПВП), попереднього підсилювача (ПП) та дискретних мікроконтролерних елементів (АЦП) що призначені для переведення аналогового сигналу вимі-

рювальної інформації в код певної розмірності (в залежності від розрядності АЦП). В подальшому, такий «оцифрований» сигнал вимірювальної інформації може зберігатися, оброблятися та відображатися за допомогою вбудованих арифметично-логічних пристроїв ІВС та засобами сторонньої електронної обчислювальної машини.

В загальному випадку, у мікроконтролер можна вводити аналогові сигнали 3 різними способами.

Один із варіантів – застосування первинного перетворювача (потенціометра), який визначає зміну потенціалів що відповідають різним рівням аналогового сигналу.

Інший спосіб - включення аналогового компаратора, який визначає, чи знаходиться значення напруги, що надходить до аналогового входу мікроконтролеру, вище або нижче заданого рівня (опорної напруги).

Третій спосіб – застосування ОМК із вбудованим АЦП (*ADC – Analog-to-Digital Converter*), який забезпечує вимірювання значення напруги, що надходить на вхід. Кожен з цих способів має певні переваги для різних областей застосування [14].

1) При використанні потенціометру у якості формувача вхідного аналогового сигналу, значення його опору відображаються у код через порти введення/виведення. Реалізація такої схеми наведено на рис 4.4. Вона має *RC-контур* що напряму під'єднується до одного із портів ОМК.

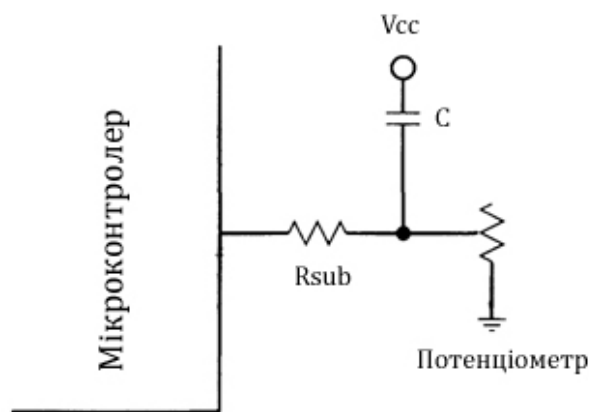


Рис. 4.4. Використання цифрового входу для визначення опору потенціометра

Для визначення опору потенціометру рахуються проміжок часу, що відповідає рівню заряду конденсатора *RC-контру* вище порогу перемикання. Кількісно, значення опору визначає кількість відліків (одиниць) що відображаються на вході ОМК (рис. 4.5).

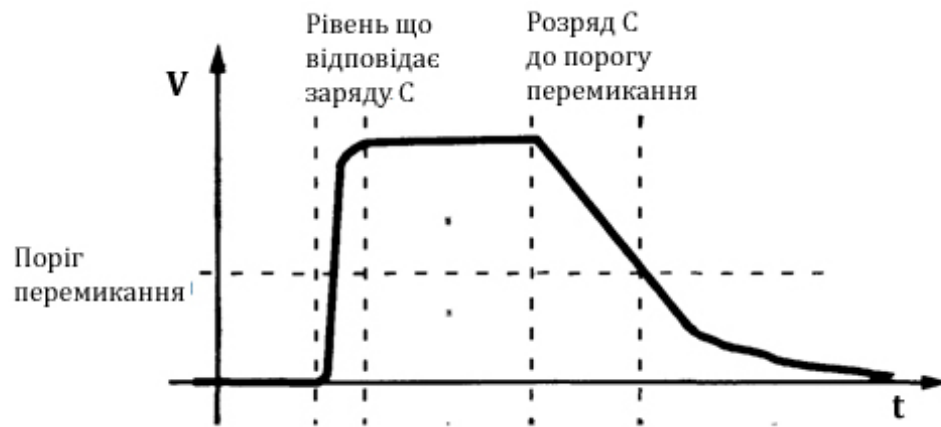


Рис. 4.5. Зміна входного потенціалу при зміні опору потенціометра

Щоб виконати вимір, необхідно сформувати на виводі паралельного порту високий рівень сигналу (логічна 1), шляхом його переведення у режим виходу. При розрядженні конденсатору RC-контур до мінімального порогового значення закривається вихідний драйвер мікроконтролера. Після чого, конденсатор знову починає цикл заряджання через схему потенціометру. Розрядження конденсатору відбувається через опір R_{sub} (рис. 4.5). Це дозволяє уникнути короткого замикання при розряді.

Зазвичай, для вимірювання часу використовується таймер. Процес формування сигналу завершується при падінні напруги на виводі ОМК нижче порогу перемикання. При підключенні осцилографу до входу ОМК буде відображено сигнал показаний на рис. 4.5 [14, 16, 28].

Для розрахунку кількісних значень опору і ємності конденсатору RC-контур можна застосувати співвідношення $t = 2,2RC$ (де t – час заряду конденсатору). Опір R_{sub} , зазвичай, вибирається в діапазоні від 100 Ом до 200 Ом. На практиці ця схема використовується у рішеннях із відносно низькою точністю вимірів, але володіє простотою виконання та низькою собівартістю. До засобів що використовують таке схемне рішення можна віднести широке коло маніпуляторів, джойстиків та ін., що є периферійними пристроями IBM сумісних комп'ютерів. У таких пристроях у код відображаються зміни опору потенціометру що відповідає зміні положення рухомих елементів пристрою.

2) Застосування *компаратору* при поданні аналогових сигналів на вхід ОМК дозволяє застосовувати аналогово-цифрове перетворення. Функціонально компаратор являє собою пристрій зрівняння напруг, одна із яких є опорною (V_{ref}). У випадку, коли входна напруга є вищою за опорну, значення V_{ref} задається на виході рівним логічній 1 (рис. 4.6).

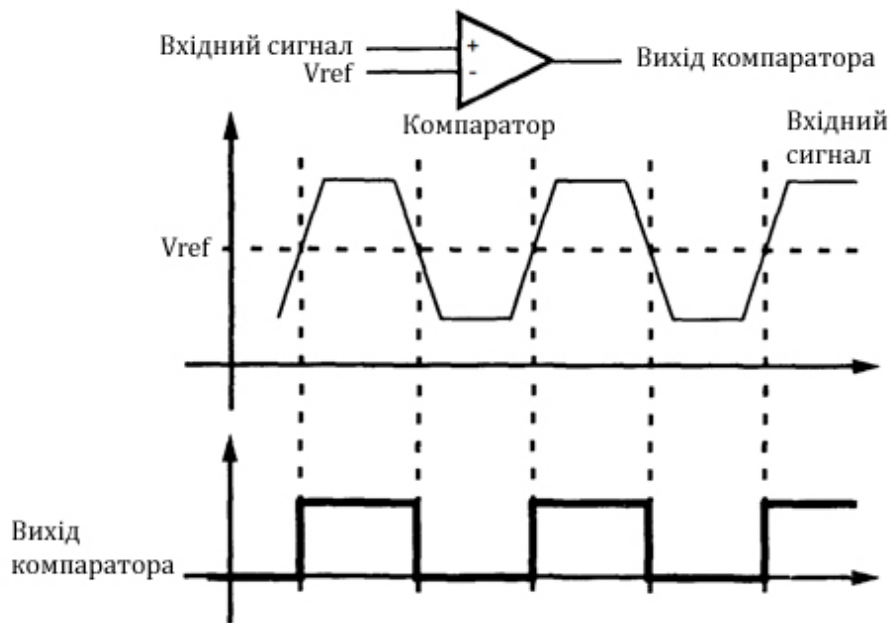


Рис. 4.6. Сигнали на вході і виході компаратора

Компаратор використовується у пристроях що формують сигнали які можна привести до значення опорної напруги, наприклад реалізувавши схему диференційного зрівняння вихідного та опорного сигналів. Наприклад, у вимірювачах рівня рідин, сипучих речовин та при контролі габаритних розмірів об'єктів. Це дозволяє визначати рівень сигналу що відповідає вимірюваній величині [24, 28, 32].

Існують мікроконтролери із вбудованим компаратором (набором компараторів), для яких рівень вихідної напруги визначається роботою аналогового мультиплексора та резистивним дільником (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Отримання опорних напруг за допомогою резистивного дільника

Така схема забезпечує отримання деякого набору опорних напруг. Використовується простий алгоритм перебору вибраних напруг V_{ref} що забезпечує включення компаратору. Вхідна напруга, при якій відбувається спрацювання компаратору, визначається як опорна.

Дана схема дає наближене значення вхідної напруги, так як зазвичай напруга V_{ref} визначається із певним кроком. Якщо прийняти діапазон напруг рівним 5 В для схеми що має 8 опорних рівнів V_{ref} , в такому випадку крок складе близько 700 мВ ($5/7 \approx 714$ мВ).

Існує спосіб забезпечення аналогово-цифрових перетворень паралельним включенням компараторів (рис. 4.8). Така схема включення володіє значною швидкістю, та кількісно визначається затримками сигналу у компараторах і роботою пріоритетного дешифратора.

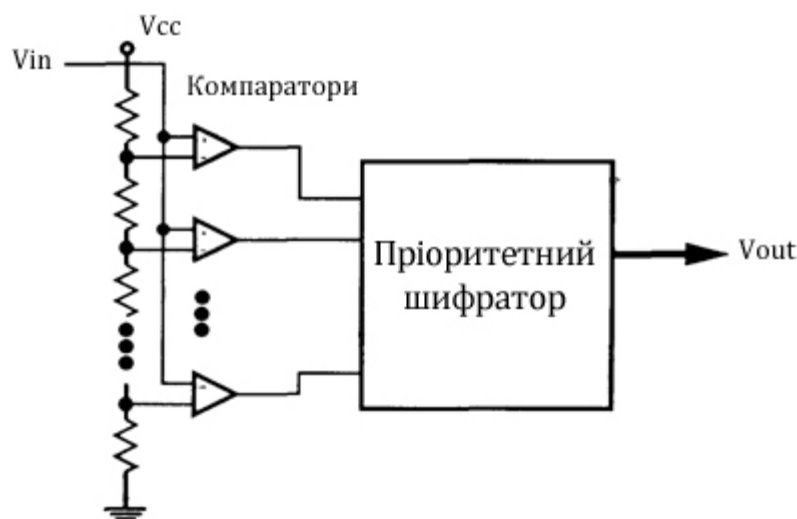


Рис. 4.8. Структура АЦП із паралельним включенням компараторів

Схема аналогово-цифрового перетворення із паралельним включенням компараторів є складною у проектуванні та потребує значну кількість окремих компараторів для реалізації [16, 28, 32].

4.3.2. АЦП порівняння із пилоподібним сигналом. АЦП із врівноваженням напруги

Для забезпечення високої точності аналогово-цифрового перетворення застосовується *інтегруюча схема АЦП*, що зображена на рис. 4.9. Для цього використовується генератор пилоподібних імпульсів (аналогове джерело напруги) та компаратор. Напруга, що задається генератором може лінійно змінюватися у діапазоні від 0 В до максимальних значень, що відповідають напрузі живлення схеми (V_{cc}).

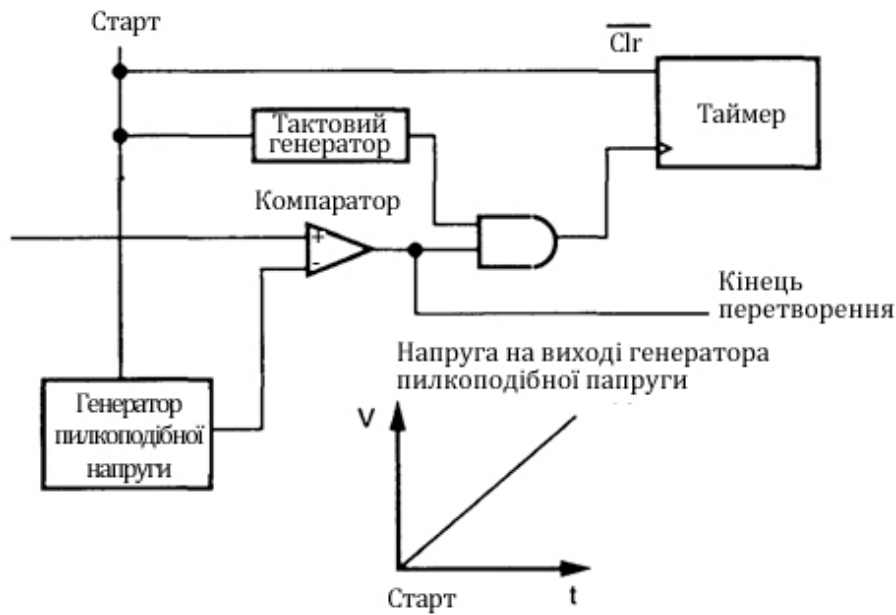


Рис 4.9. Інтегруючий аналогово-цифровий перетворювач

При реалізації аналогово-цифрового перетворення, на першому кроці реалізовується скидання таймеру МК, при цьому напруга на виході генератору складає 0 В. Далі відбувається синхронний запуск таймеру ОМК та генератору пилоподібної напруги. При перевищенні напруги деякого порогового значення V_{in} спрацьовує команда ADC_{stop} , внаслідок зупинки таймера. Напруга V_{in} стає еквівалентною значенню записаному у таймері. Таким чином, забезпечується переривання МК, що відповідає закінченню процесу аналогово-цифрового перетворення [4, 14, 28].

Реалізація аналогово-цифрового перетворення із використанням інтегруючої схеми забезпечує гарну точність перетворення, внаслідок пропорційності напруг на вході відлікам таймеру МК. Хоча даний метод володіє деякими недоліками.

Один із них – значний час перетворення, що залежить від ширини діапазону напруг $V_0 \dots V_{cc}$. Із збільшенням напруги живлення – відповідно збільшується час необхідний для реалізації одиничного АЦП перетворення. Для усунення даної залежності МК можуть використовувати набір генераторів пилоподібної напруги для різних діапазонів перетворень, або включати генератор що має динамічний діапазон та швидкість наростання імпульсів для вибраних значень V_{in} .

Вагомим фактором при застосуванні інтегруючих схем АЦП є врахування змін рівнів V_{in} у процесі перетворення. Дана проблема вирішується включенням у схему зрівноважуючого конденсатора, що заряджається до

значень V_{in} . Напруга на виході конденсатору (V_C) зрівнюється із напругою генератору пилоподібних сигналів.

Необхідно також правильно задавати час одиничного перетворення і, відповідно, частоту вибірки сигналу. Це пов'язано із характером сигналів та їх формою. У випадку неправильного вибору цих факторів форма сигналу після перетворення суттєво спотворюється (рис. 4.10).

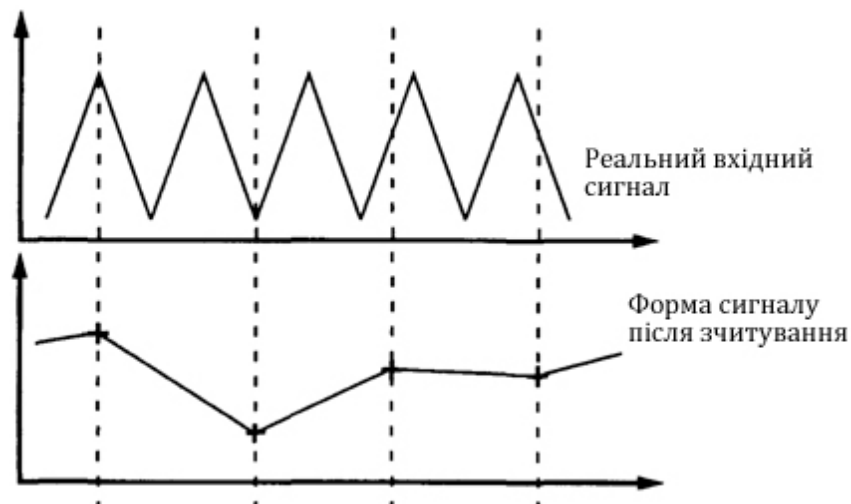


Рис. 4.10. Невірна вибірка сигналу

Склад та структура мікроконтролерних засобів прямо залежить від їх функціонального призначення та галузі застосування. Більшість присутніх на ринку МК здатні формувати вихідні значення використовуючи опорну напругу, що задається резистивним дільником, та не мають аналогового виходу. Це пов'язано із тим, що аналогові виконуючі пристрої, що потребують керування МК, мають різні вимоги до параметрів сигналів керування (часові, частотні характеристики та робочі діапазони по струму та напрузі). Для ефективної роботи МК необхідна якісна опорна напруга V_{cc} , що потребує, у деяких випадках, застосування опорного джерела напруги (ОДН) виконаного на окремій мікросхемі. Також, необхідно враховувати ефекти відбиття у вихідному ланцюзі МК при швидких змінах напруги, що спричиняють спотворення сигналу V_{out} .

Для формування аналогового виконуючого сигналу із потрібними параметрами застосовуються зовнішні АЦП (цифро-аналогові перетворювачі), потенціометри (при схемі включення як дільники напруги). Таким чином, у схемі забезпечується малий крок зміни аналогового сигналу на виході (у межах одиниць мілівольт) при широкому діапазоні значень вихідної напруги V_{out} . [7, 14, 28, 40]

Для прикладу, можна навести схему реалізації аналогового вихідного сигналу із застосуванням МК, що показана на рис. 4.11.

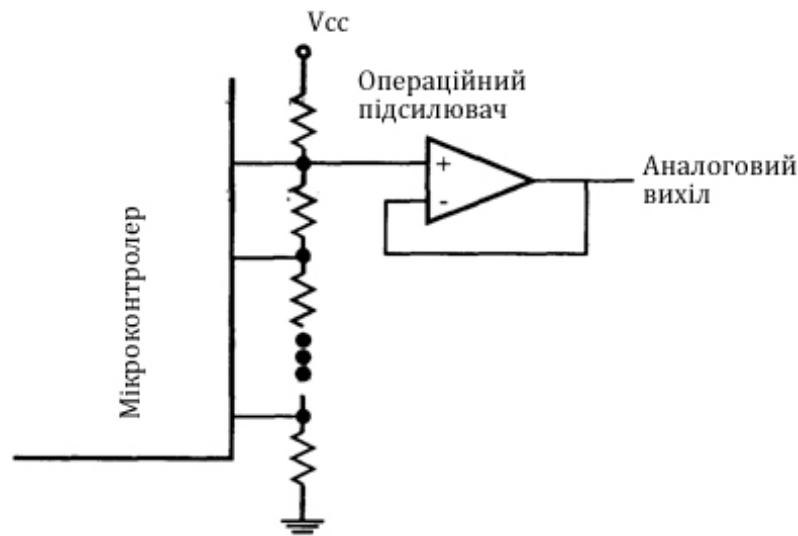


Рис. 4.11. Схема реалізації аналогового виходу

У даній схемі включення операційний підсилювач (ОП) виконує функцію повторювача аналогових сигналів що формуються на виході МК та створює розв'язку у колі навантаження резистивного діляника. На вхід ОП подаються сигнали від виходів МК, що працюють як виводи. Значення напруги на вході ОП залежить від рівнів сигналу на виводах МК в конкретні проміжки часу. Це дозволяє задавати на вході ОП необхідні значення напруги, в залежності від того який вивід МК формує вихідний сигнал. Номінали резисторів ланцюга діляника напруги підбираються емпірично, в залежності від рівнів сигналу що необхідно задати для ОП [24, 28].

Наведена вище схема формування аналогової напруги дозволяє використовувати широке коло неспеціалізованих МК, але має певні вимоги до швидкості зміни аналогової напруги на виході. Якщо необхідно забезпечити високу швидкодію, часто застосовується паралельна схема включення АЦП що включає цифрові процесори сигналів (DSP).

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Дайте визначення і призначення аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Охарактеризуйте три способи вводу аналогового сигналу в мікроконтролер.
2. Дайте визначення однокристального мікроконтролерах(ОМК). Наведіть класифікацію ОМК і поясніть функціонування та призначення кожного класу.

3. Дайте визначення мікропроцесора та мікроконтролера. Охарактеризуйте їх параметри та відмінності.
4. Дайте визначення способу аналого-цифрового перетворення з використанням паралельно включених компараторів.
5. Дати визначення компаратора напруг. Пояснити спосіб аналого-цифрового перетворення, у якому використовується аналоговий компаратор напруг згідно наведеної схеми.
6. На якій елементній базі реалізуються мікропроцесорні контролери? Охарактеризуйте складові частини та їх призначення.
7. Охарактеризуйте цифрові сигнальні процесори (DSP). Особливості будови, призначення та особливості обробки даних.
8. У яких випадках використовуються компаратори? Поясніть його роботу згідно схеми.
9. У якому випадку використовуються зовнішні цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП)? Поясніть роботу ЦАП згідно схеми.
10. У якому випадку вивід паралельного порту переводиться в режим виходу, на якому встановлюється логічна (1) (високий потенціал)?
11. Що таке інтегруючий аналогово-цифровий перетворювач? Поясніть роботу схеми.
12. Що таке мікроконтролери із зовнішньою пам'яттю? Особливості будови та призначення.
13. Які архітектури процесорів застосовуються у сучасних ОМК? Приведіть характеристики архітектур, які найбільш часто зустрічаються в ОМК.

РОЗДІЛ 5. ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ В ПРОЦЕСАХ ВИМІРЮВАННЯ ЗА УЧАСТЮ ІВС. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИДІВ МОДЕЛЮВАННЯ, МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЗОВАНИХ ІВС

5.1. Математичне моделювання процесу вимірювання. Основні визначення. Класифікація видів моделювання та математичних моделей. Етапи побудови моделей

5.1.1. Моделювання ІВК та ІВС як метод наукового пізнання

Процес пізнання будь-якого об'єкта завжди відбувається за такою схемою: споглядання і спостереження – абстрактне мислення і побудова теорії або моделі – експериментальна перевірка та використання на практиці. Усе те, на що спрямована людська діяльність, називається «об'єктом» (лат. *Objectum* – предмет).

У наукових дослідженнях велику роль відіграють методи гіпотези та аналогії. Це дозволяє відображати властивості реальних об'єктів та процесів. Таке відображення повинно мати наочність або зводитися до зручних логічних схем. Логічні схеми що спрощують міркування та логічні побудови і забезпечують проведення експериментальних досліджень, із врахуванням властивостей явищ та об'єктів, називаються моделями.

Модель (лат. *modulus* – міра) – це об'єкт, що є заміником об'єкта-оригіналу, та забезпечує опис стану, властивості або поведінки об'єкта-оригіналу – з необхідним ступенем точності.

В загальному випадку, під моделювання розуміють процес заміщення одного об'єкту іншим. Це дозволяє отримати інформацію про ключові властивості об'єкту-оригіналу, шляхом відображення цих особливостей із певною точністю та достовірністю.

Для побудови моделей застосовують теорію подібності. Відповідно до тверджень даної теорії, абсолютно подібними можна вважати об'єкти що є ідентичними по своїм особливостям. Моделювання дозволяє відобразити основні особливості досліджуваного об'єкту із певною достовірністю, але не претендує на відтворення його абсолютної копії. Достатньо, щоб модель досить добре відображала досліджувані властивості об'єкта-оригіналу. Якщо це так, то говорять, що модель адекватна об'єктові [6, 9, 20].

5.1.2. Класифікація видів моделювання

Залежно від характеру досліджуваних процесів в об'єкті моделювання може бути розділене на такі види:

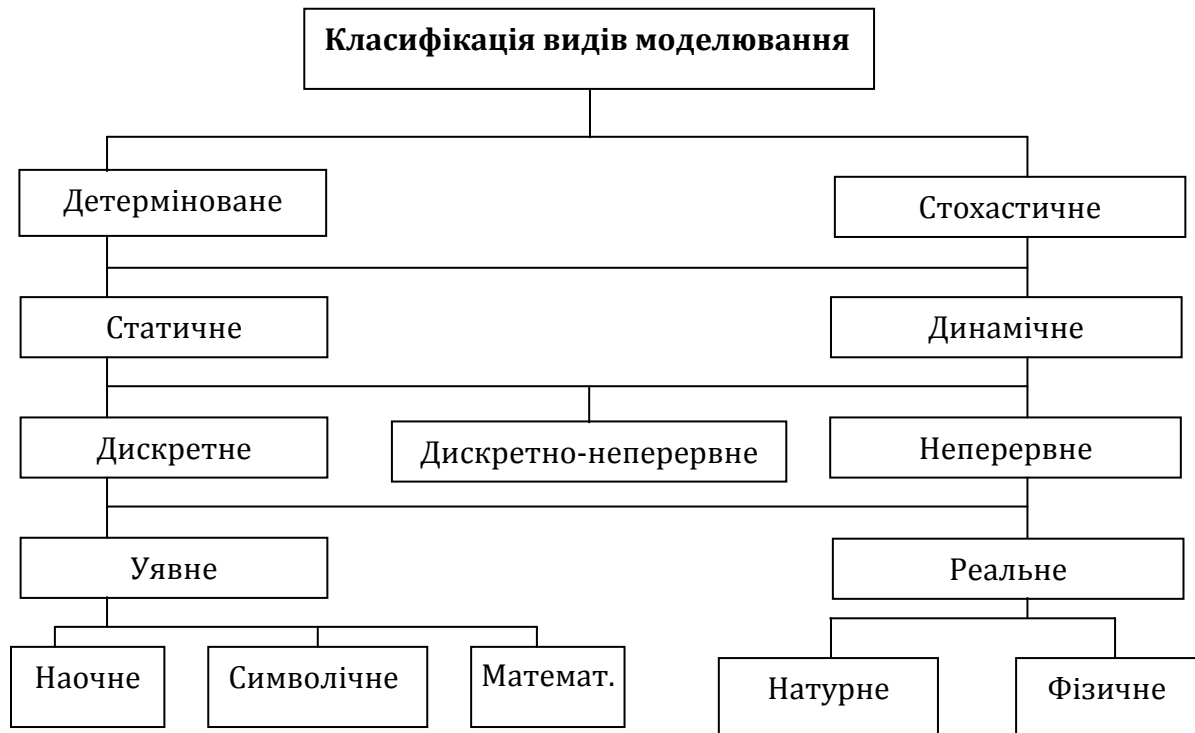


Рис. 5.1. Класифікація видів моделювання

Уявне моделювання часто є єдиним способом моделювання об'єктів, що або практично не можуть бути реалізовані людиною, або існують в умовах, неможливих для їхнього фізичного створення.

Особливостями *наочного моделювання* є створення наочних моделей реальних об'єктів, на основі реального досвіду. Вони відображають явища і процеси, які відбуваються в об'єкті, наприклад, модель пульсуючого Всесвіту, модель сонячної системи, модель атома, моделі мікрочастинок та ін.

Символічне моделювання – це штучний процес створення логічного об'єкта, що заміщає реальний і виражає основні властивості за допомогою визначеної системи знаків або символів, наприклад, моделювання мови за допомогою букв (символів).

Під математичним моделюванням потрібно розуміти процес створення математичної моделі, котрим є будь-яке формалізоване представлення об'єкта, що відображає його стан або поведінку з необхідним ступенем точності, наприклад, опис руху об'єкта за допомогою диференціального рівняння, алгоритм, схема заміщення, текст програми, тощо.

Натурним моделюванням називають проведення досліджень на реальному об'єкті з наступною обробкою результатів: виробничі випробування верстата, технологічної лінії, випробовування літака в польоті, тощо.

Фізичне моделювання відрізняється від натурального тим, що дослідження проводяться на моделях реальних об'єктів, які зберігають природу явищ і мають фізичну подібність (так звана $p(ni)$ -теорема), наприклад, випробування моделі крила літака в аеродинамічній трубі [18, 22, 39].

У свою чергу, кожне з перерахованих видів моделювання може ще поділятися на підвиди. В курсі «Метрологічне забезпечення ІВС» розглянуто основні методи математичного моделювання.

5.1.3. Класифікація математичних моделей

Математичною моделлю об'єкта називається будь-яке формалізоване його уявлення, що відображає його стан або поведінку з необхідним ступенем точності.

За способом представлення моделі, типом вираження, характером залежності, рівнем розгляду та рівнем опрацювання математичні моделі можна класифікувати наступним чином (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Класифікація математичних моделей

При опрацюванні математичної моделі будь-якого процесу або явища завжди проходять певні етапи розроблення [20].

5.2. Етапи побудови математичних моделей

Процес створення математичної моделі (ММ) складається із декількох послідовних етапів.

I. На першому етапі об'єкт представляється, наприклад, у вигляді структурних блоків, модулів, що зв'язані певним чином, тобто складається структурна схема об'єкта.

II. На другому етапі будується математична модель об'єкта, наприклад, процеси, що відбуваються в окремих модулях, зв'язки між модулями описуються звичайними, диференціальними, інтегральними або логічними рівняннями.

III. Створюється алгоритм розв'язання математичної задачі, після чого вона розв'язується, наприклад, на ЕОМ при визначених початкових та граничних умовах.

IV. Проводиться порівняння характеристик і поведінки об'єкта-оригіналу з характеристиками й поведінкою моделі.

Етапи побудови математичної моделі зображені на рисунку 5.3.

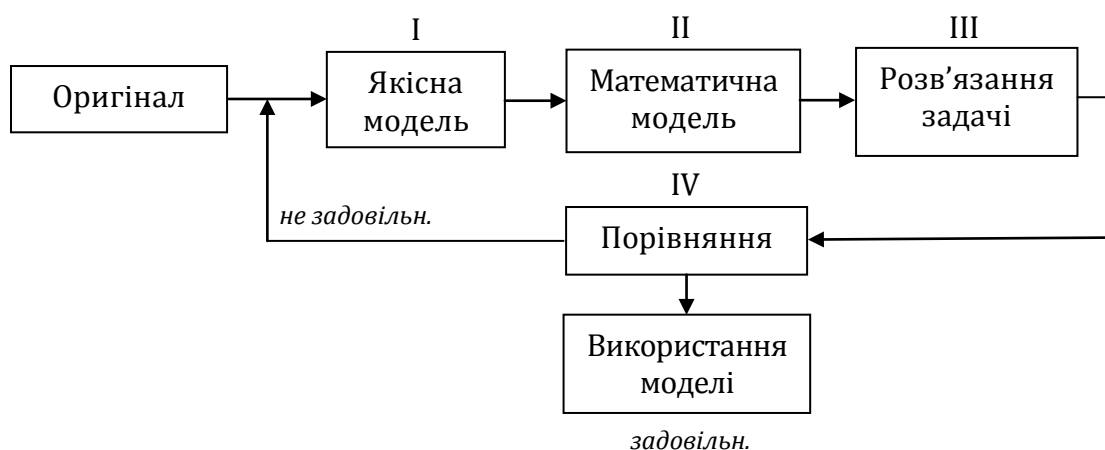


Рис. 5.3. Етапи побудови математичних моделей

Якщо відхилення характеристик моделі *відповідає необхідній точності опису об'єкту*, то модель вважається адекватною об'єктові-оригіналові й далі використовується на практиці. В іншому випадку, складається нова якісна модель і процес повторюється до одержання необхідної точності.

Чим вища точність математичної моделі досліджуваного об'єкту, тим меншою є похибка. *Похибки рішень на ЕОМ мають такі складові:*

- *похибки введення даних α_β* , що являють собою різницю між дійсним значенням величини та величиною, що вводиться в алгоритм розв'язання завдання моделювання;
- *похибки методу α_m* , які викликаються лінеаризацією задачі та різними спрощуючими припущеннями;
- *похибки підрахунку α_n* , які виникають при заданій точності обчислень математичної моделі.

Сумарна похибка розв'язку на ЕОМ α складається із суми всіх похибок:

$$\alpha = \alpha_\beta + \alpha_m + \alpha_n \quad (5.1)$$

Отже, основними джерелами похибок є округлення даних та похибки апроксимації [6, 20, 22].

Приклади розробки математичної моделі.

Приклад 1

Нехай структурна схема автоматичної системи керування має вигляд як на рисунку 3.5. Потрібно знайти еквівалентну передавальну функцію системи $W = X_{вих}/X_{вх}$.

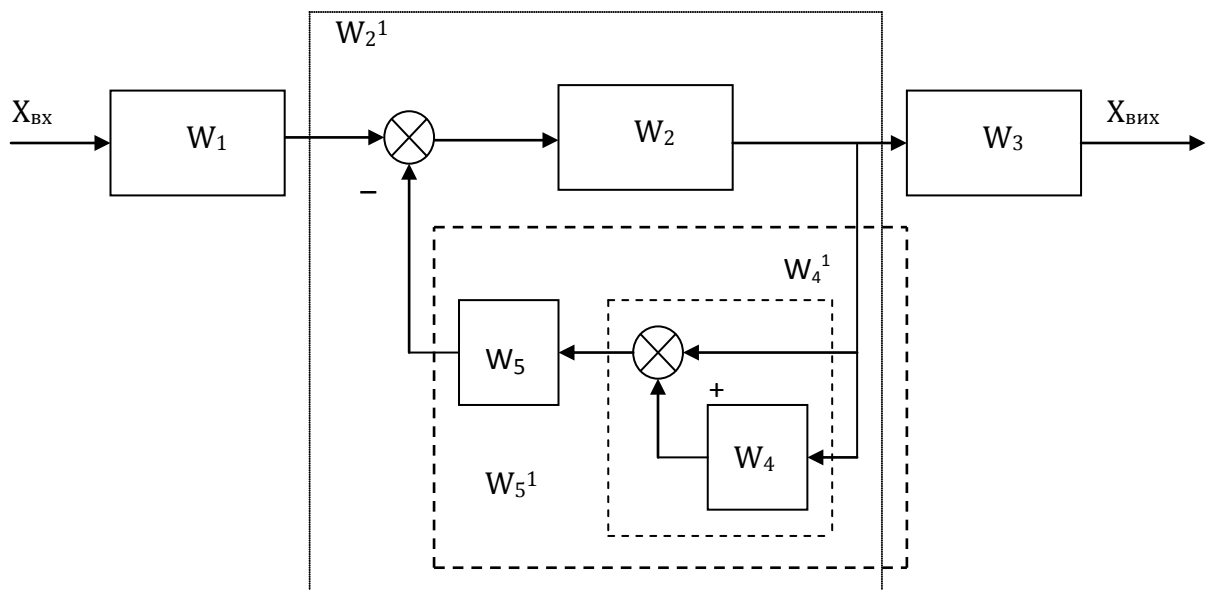


Рис. 5.4. Задана структурна схема

Знайдемо еквівалентну передавальну функцію:

- 1) за правилом 2 маємо $W_4^1 = 1 + W_4$;
- 2) за правилом 1 можна записати $W_5^1 = W_4^1 W_5 = (1 + W_4) W_5$;
- 3) за правилом 3 отримаємо

$$W_2^1 = \frac{W_2}{1 + W_2 \cdot W_5^1} = \frac{W_2}{1 + W_2(1 + W_4) \cdot W_5} ;$$

4) за правилом 1 еквівалентна передавальна функція всієї системи дорівнює :

$$W = W_1 W_2^1 W_3 = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{1 + W_2 \cdot W_5 (1 + W_4)}.$$

Таким чином ми знайшли еквівалентну передавальну функцію системи

5.2. Моделювання ланок автоматичних систем вимірювання. Передавальні функції та частотні характеристики ланок ІВК

5.2.1 Перетворення Лапласа і його властивості

При складанні математичної моделі складної автоматизованої вимірювальної системи (якими є ІВК та ІВС), їх спочатку розділяють на прості ланки, що допускають найбільш простий, стандартний опис. У загальному випадку, ланка або частина досліджуваної системи може математично описуватися алгебраїчним, трансцендентним, диференціальним, інтегральним рівняннями або їхньою довільною комбінацією.

Нехай ланка ІВК (рис. 5.5) має вхідний сигнал як функцію від часу $x_{вх}(t)$ і вихідний сигнал $x_{вих}(t)$, причому в загальному випадку ця залежність може бути записана так:

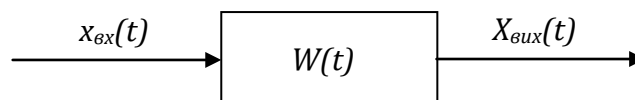


Рис. 5.5. Зображення ланки автоматизованого ІВК

$$F\left(x_{вх}, \frac{dx_{вих}}{dt}, \frac{d^2 x_{вих}}{dt^2} \dots \int_0^{\infty} x_{вих} dt\right) = G\left(x_{вх}, \frac{dx_{вх}}{dt}, \frac{d^2 x_{вх}}{dt^2} \dots \int_0^{\infty} x_{вх} dt\right) \quad (5.2)$$

Для того, щоб звести це складне інтегрально-диференціальне рівняння до звичайного алгебраїчного рівняння, використовують методи операційного обчислення, тобто використовують перетворення Карсона або Лапласа. Ми будемо розглядати перетворення Лапласа, як найбільш використовуване. Перетворення Лапласа полягає в тому, що функції від дійсної змінної часу t : $x_{вх}(t)$, $x_{вих}(t)$ замінюються функціями від комплексної змінної $X_{вх}(p)$, $X_{вих}(p)$ за допомогою співвідношень:

$$\begin{aligned} X_{вх}(p) &= \int_0^{\infty} x_{вх}(t) \cdot e^{-pt} dt; \\ X_{вих}(p) &= \int_0^{\infty} x_{вих}(t) \cdot e^{-pt} dt, \end{aligned} \quad (5.3)$$

де $p = j \cdot \omega$ – оператор Лапласа; ω – частота сигналу; $j = \sqrt{-1}$.

Зміст перетворення Лапласа полягає у тому, що за його допомогою всі обчислення переносяться в комплексну площину, при цьому у вихідних рівняннях диференціали та інтеграли зводяться до множення й ділення на оператор p . В іноземній науковій літературі оператор Лапласа p часто позначають символом s .

При цьому, функції від дійсної змінної: $x_{ex}(t)$, $x_{ex}(t)$ називаються *оригіналом*, а функції від комплексної змінної p : $X_{ex}(p)$, $X_{ex}(p)$ – їх *зображенням*. Перетворення Лапласа в науковій літературі позначається:

$$x_{ex}(t) \xrightarrow{Z} X_{ex}(p) \text{ або } X_{ex}(p) = [x_{ex}(t) - \quad (5.4)$$

це еквівалентно запису:

$$X_{ex}(p) = \int_0^{\infty} x_{ex}(t) \cdot e^{-pt} dt \quad (5.5)$$

Перетворення Лапласа має таку властивість, що диференціювання й інтегрування функції $x_{ex}(t)$, призводить відповідно, до множення і ділення зображення $x_{ex}(t)$, на оператор p , тобто:

$$\begin{aligned} \left[\int_0^t x_{ex}(t) dt = \frac{X_{ex}(p)}{p}; \right. \\ \left. \left[\frac{dx_{ex}(t)}{dt} = pX_{ex}(p). \right. \right] \end{aligned} \quad (5.6)$$

Формули (5.5-5.6) можна довести за допомогою інтегрування частинами:

$$pX_{ex}(p) = \int_0^{\infty} p \cdot e^{-pt} x_{ex}(t) dt = -e^{-pt} x_{ex}(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{dx_{ex}}{dt} dt = x_{ex}(0) + \left[\frac{dx_{ex}}{dt} \right],$$

де, відповідно: $\int u dv = uv - \int v du; v = e^{-pt};$
 $dv = -pe^{-pt} dt; u = x_{ex}(t)$

При $x_{ex}=0$ маємо: $pX_{ex}(p) = \frac{dx_{ex}}{dt}$.

2) Для інтеграла $\int_0^t x_{ex}(t) dt$ перетворення Лапласа буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} e^{-pt} \left(\int_0^t x_{ex}(t) dt \right) dt &= \left[-\frac{1}{p} e^{-pt} \int_0^{\infty} x_{ex}(t) dt \right]_0^{\infty} + \frac{1}{p} \int_0^{\infty} e^{-pt} x_{ex}(t) dt = \\ &= \frac{1}{p} \int_0^{\infty} e^{-pt} x_{ex}(t) dt = \frac{X_{ex}(p)}{p}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

де враховано, що $x_{ex}(0) = 0$.

Отже, можна стверджувати, що:

$$\left[\int_0^t x_{ex}(t) dt = \frac{X_{ex}(p)}{p} \right. \quad (5.8)$$

У загальному випадкові для n -кратного диференціювання й інтегрування маємо, повторюючи п.п. 1 і 2 n раз:

$$\left[\begin{aligned} \frac{d^n x_{ex}}{dt^n} &= p^n X_{ex}(p); \\ \int_0^t dt * \int_0^t dt \dots \int_0^t x_{ex}(t) dt &= \frac{X_{ex}(p)}{p^n}. \end{aligned} \right. \quad (5.9)$$

Що стосується звичайних функцій від часу, в яких немає інтегралів та диференціалів, то перетворення Лапласа для них зводиться тільки до заміни змінної часу t на комплексну змінну p . На постійні коефіцієнти перетворення Лапласа не впливає [11, 20, 33, 39].

5.2.2. Передавальні функції та частотні характеристики ланок

Застосовуючи перетворення Лапласа до рівняння (5.2) та враховуючи попередні залежності, можна отримати вирази для визначення передавальних і частотних характеристик ланки вимірювального каналу ІВК:

$$\left[\begin{aligned} \frac{d^n x_{ex}}{dt^n} &= p^n X_{ex}(p); \\ \int_0^t dt * \int_0^t dt \dots \int_0^t x_{ex}(t) dt &= \frac{X_{ex}(p)}{p^n}. \end{aligned} \right.$$

одержимо алгебраїчне рівняння відносно p :

$$Z(p) X_{вих}(p) = Y(p) X_{ex}(p). \quad (5.10)$$

Із рівняння (5.10) можна ввести відношення зображення Лапласа вихідного сигналу до зображення Лапласа вхідного сигналу при нульових початкових умовах:

$$W(p) = \frac{X_{вих}(p)}{X_{ex}(p)} = \frac{Y(p)}{Z(p)}. \quad (5.11)$$

яке називається передавальною функцією ланки.

Тоді структурна схема елементарної ланки вимірювального каналу ІВК (рис. 5.6) буде мати вигляд:

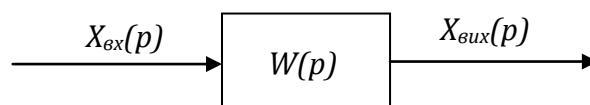


Рис. 5.6. Зображення ланки автоматизованого ІВК за допомогою передавальної функції

Перевага дій у комплексній площині полягає в тому, що коли відома передавальна функція ланки $W(p)$, то тоді, згідно з (5.11), зображення вихідного сигналу $X_{вих}(p)$ дорівнює добутку передавальної функції $W(p)$ на зображення вхідного сигналу $X_{вх}(p)$:

$$WX_{вих}(p) = W(p) \cdot X_{вх}(p). \quad (5.12)$$

Залежність дійсного вихідного сигналу від часу $x_{вих}(t)$ отримують із (5.12) за допомогою зворотного перетворення. Оскільки передавальна функція $W(p)$ являє собою відношення двох поліномів з комплексною змінною p , то і сама передавальна функція $W(p)$ є число комплексне і може бути записане в такій формі:

$$W(p) = P(p) + jQ(p). \quad (5.13)$$

або, замінюючи $p = j\omega$, де ω частота сигналу, отримаємо:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (5.14)$$

де $P(\omega)$ – дійсна (реальна) частина комплексного числа W ;

$Q(\omega)$ уявна частина W .

На комплексній площині число $W(\omega)$ зображується точкою, координатами якої можуть бути проекції на осі P та Q , а радіусом – вектор $A(\omega)$, проведений із початку координат до крапки, та кут між радіусом-вектором $A(\omega)$ й дійсною віссю $P(\omega)$, $\varphi(\omega)$ (рис. 5.7). Такий запис комплексного числа називається показниковим.

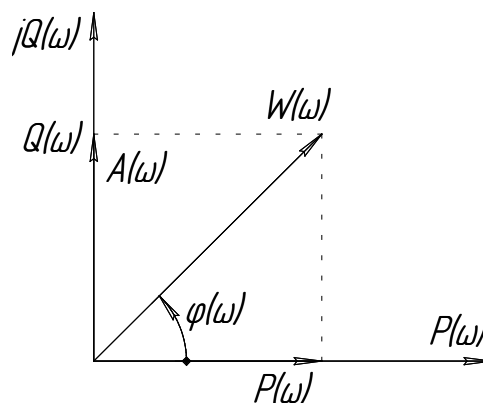


Рис. 5.7. Графічне зображення комплексного числа $W(\omega)$ на комплексній площині

У показниковій формі комплексне число $W(\omega)$ може бути записано:

$$W(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (5.15)$$

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \quad (5.16)$$

де $A(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика ланки (АЧХ);

$$\phi(\omega) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} \operatorname{sgn} Q(\omega), \text{ при } P(\omega) = 0; \\ \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}, \text{ при } P(\omega) > 0; Q(\omega) \neq 0; \\ \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} - \pi, \text{ при } P(\omega) < 0; Q(\omega) < 0; \\ \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} + \pi, \text{ при } P(\omega) > 0; Q(\omega) > 0; \end{cases} \quad (5.17)$$

$\varphi(\omega)$ – фазо-частотна характеристика ланки (ФЧХ).

На практиці часто при великому діапазоні частот використовують логарифмічні амплітудно-частотні характеристики ланок (ЛАЧХ):

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) \quad (5.18)$$

Розглянемо фізичний зміст АЧХ і ФЧХ.

Запишемо комплексні вектори вхідного і вихідного сигналів ланки в показниковій формі:

$$\begin{aligned} X_{\text{вх}}(p) = X_{\text{вх}}(\omega) &= |X_{\text{вх}}(\omega)| e^{j\alpha(\omega)}; \\ X_{\text{вих}}(p) = X_{\text{вих}}(\omega) &= |X_{\text{вих}}(\omega)| e^{j\beta(\omega)}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Далі знак модуля опускаємо. Нехай передавальна функція ланки також записана в показниковій формі:

$$W(\omega) = A(\omega) e^{j\phi(\omega)}. \quad (5.20)$$

Тоді ланка матиме такий вигляд (рис. 5.8):

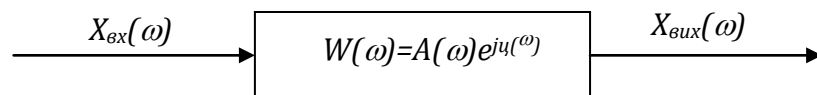


Рис. 5.8. Ланка із показниковою передавальною функцією

Підставляючи (5.19) і (5.20) в (5.11), отримуємо (5.21)

Два комплексні числа рівні, якщо рівні їх реальні та уявні частини (або модулі й фази рівні):

$$\begin{aligned} X_{\text{вих}}(\omega) &= A(\omega) X_{\text{вх}}(\omega) \rightarrow A(\omega) = \frac{X_{\text{вих}}(\omega)}{X_{\text{вх}}(\omega)}; \\ \beta(\omega) &= \alpha(\omega) + \phi(\omega) \rightarrow \phi(\omega) = \beta(\omega) - \alpha(\omega). \end{aligned} \quad (5.21)$$

З (5.21) випливає, що АЧХ ланки показує, як змінюється амплітуда вихідного сигналу при проходженні його через ланку залежно від частоти, тобто як змінюється спектр вхідного сигналу. ФЧХ показує, як змінюється фаза сигналу при проходженні його через вибрану ланку [7, 22, 39].

5.3. Перетворення багатоконтурних структурних схем автоматизованих ІВС. Основні припущення при структурному аналізі. Види з'єднань ланок та їх математичний опис

Кожна автоматизована система складається із ряду елементів або функціональних блоків, які з'єднані між собою. Динамічну взаємодію цих складових частин автоматизованої системи вивчають шляхом складання структурних схем.

Структурною схемою автоматизованої системи називають графічне зображення ланок, з'єднаних між собою певним чином.

Складні багатоконтурні структурні схеми що містять зворотні й перехресні зв'язки необхідно вміти перетворювати до однієї еквівалентної ланки з еквівалентною передавальною функцією $W(p)$, оскільки для ланки з відомою передавальною функцією можна визначити амплітудно-частотні, фазочастотні та перехідні характеристики, а також визначити стійкість і показники запасу стійкості автоматичної системи. Розділ теорії автоматичного керування (ТАК), який присвячений знаходженню еквівалентних передавальних функцій складних вимірювальних систем та систем керування, називається структурним аналізом.

5.3.1. Основні припущення при структурному аналізі

При перетворенні багатоконтурних структурних схем складних автоматизованих вимірювальних систем приймають такі припущення: вважається, що у вузлах розгалуження структурних схем величина сигналу не змінюється незалежно від числа розгалужень (рис. 5.9):

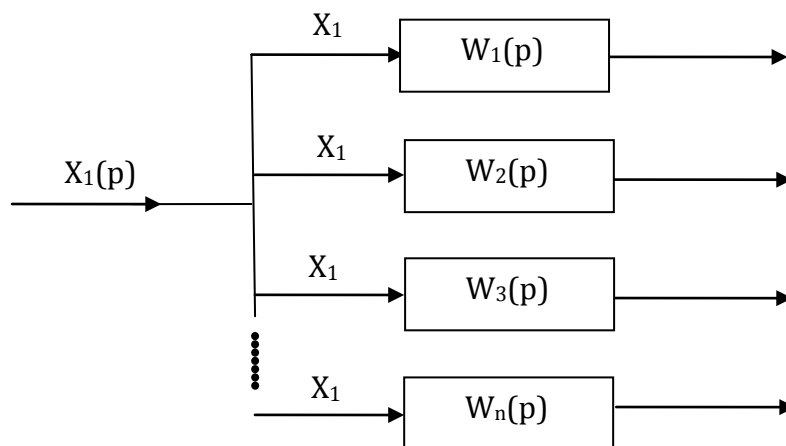


Рис. 5.9. Розгалуження структурної схеми

- *напрямок дії сигналу в будь-якій точці схеми позначається стрілкою, при цьому сигнал у зворотному напрямкові проходити не може;*
- *при переході через ланку з передавальною функцією $W(p)$ вихідний сигнал дорівнює добутковій функції W на вхідний сигнал, тобто:*

$$X_{\text{вих}}(p) = W(p) \cdot X_{\text{вх}}(p); \quad (5.22)$$

- *критерієм правильності перетворення структурної схеми є незмінність вхідного й вихідного сигналів у початковій і перетвореній схемі.*

Алгоритм знаходження еквівалентної передавальної функції складної вимірювальної системи такий:

- *вимірювальна система розбивається на прості ланки із відомими передавальними функціями;*
- *вводяться додаткові проміжні сигнали між ланками, якщо вони не визначені;*
- *записуються вихідні сигнали всіх ланок через відомі передавальні функції та вхідні сигнали (5.22);*
- *з отриманої системи рівнянь виключаються введені додаткові проміжні сигнали та записується значення еквівалентної передавальної функції всієї складної автоматизованої системи [20, 22, 24].*

5.3.2. Види з'єднань ланок та їх математичний опис

Послідовне з'єднання ланок. Послідовним з'єднанням називається таке з'єднання ланок, при якому вихід кожної попередньої ланки зв'язаний із входом наступної (рис. 5.10).

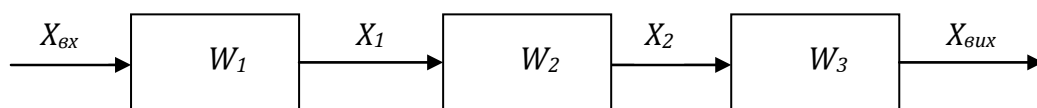


Рис. 5.10. Послідовне з'єднання ланок

Далі, для спрощення виразів, оператор Лапласа (p) опускаємо. Вводимо допоміжні проміжні сигнали X_1 та X_2 між ланками.

За визначенням передавальних функцій ланок можна записати наступну операторну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} X_1 &= W_1 X_{\text{вх}}; \\ X_2 &= W_2 X_1; \\ X_{\text{вих}} &= W_3 X_2. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Виключаємо послідовно із системи рівнянь допоміжні сигнали X_1, X_2 :

$$X_{\text{вих}} = W_3 X_2 = W_3 W_2 X_1 = W_3 W_2 W_1 X_{\text{вх}}.$$

Звідки, еквівалентна передавальна функція системи буде мати вигляд:

$$W = \frac{X_{\text{вих}}}{X_{\text{вх}}} = W_1 W_2 W_3. \quad (5.24)$$

Правило 1. Передавальна функція системи послідовно з'єднаних ланок дорівнює добуткові передавальних функцій усіх ланок, що входять у з'єднання. У загальному випадкові для n ланок можна записати:

$$W = \frac{X_{\text{вих}}}{X_{\text{вх}}} = \prod_{i=1}^n W_i. \quad (5.25)$$

Паралельне з'єднання ланок. Паралельним з'єднанням називається таке з'єднання ланок, при якому вхідні дії всіх ланок однакові, а їхні реакції алгебраїчно підсумовуються (рис. 5.11).

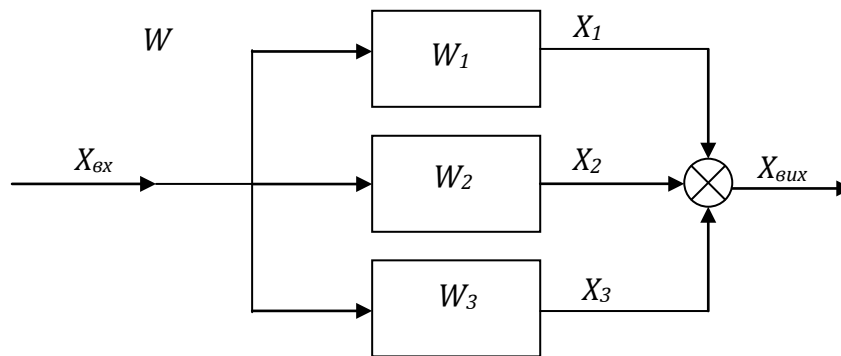


Рис. 5.11. Паралельне з'єднання ланок

Вводимо вихідні сигнали ланок x_1, x_2, x_3 , і за визначенням передавальної функції кожної ланки запишемо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} X_1 &= W_1 X_{\text{вх}}; \\ X_2 &= W_2 X_{\text{вх}}; \\ X_3 &= W_3 X_{\text{вх}}; \\ X_1 + X_2 + X_3 &= X_{\text{вих}}. \end{aligned}$$

Четверте рівняння являє собою операторне рівняння для суматора сигналів. Якщо скласти почленно перші 3 рівняння і, врахувавши четверте рівняння, одержимо:

$$X_1 + X_2 + X_3 = [W_1 + W_2 + W_3] X_{\text{вх}}. \quad (5.26)$$

Тоді еквівалентну передавальну функцію системи можна зобразити:

$$W = \frac{X_{\text{вих}}}{X_{\text{вх}}} = W_1 + W_2 + W_3. \quad (5.27)$$

У загальному випадкові, для n паралельних ланок можна записати:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i. \quad (5.28)$$

Правило 2. Передавальна функція паралельно з'єднаних ланок дорівнює сумі передавальних функцій усіх ланок, що входять у з'єднання.

Ланка зі зворотним зв'язком. Зворотним зв'язком називається ланцюг передачі впливів із виходу ланки на її вхід (рис. 5.12).

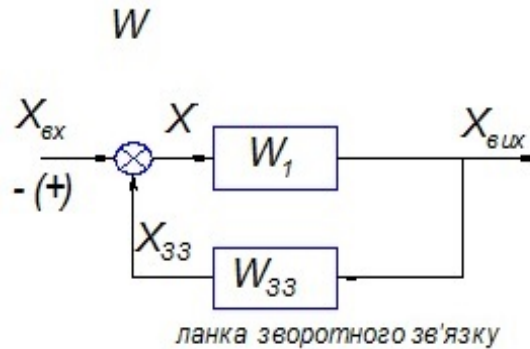


Рис. 5.12. Ланка із зворотним зв'язком

Вводимо допоміжні проміжні сигнали ΔX та X_{33} . На вході прямої ланки W_1 подається сигнал ΔX , рівний алгебраїчній сумі вхідного сигналу $X_{вх}$ і сигналу зворотного зв'язку X_{33} , тобто:

$$\Delta X = X_{вх} \mp X_{33}, \quad (5.29)$$

де знак « - » відповідає від'ємному зворотному зв'язкові, а знак « + » – додатному. Це рівняння називається «рівнянням замикання» досліджуваної системи (контуру).

За визначенням передавальних функцій прямої ланки W_1 та ланки із зворотним зв'язком W_{33} можна записати рівняння:

$$\begin{aligned} X_{вих} &= W_1 \Delta X; \\ X_{33} &= W_{33} \Delta X_{вих}. \end{aligned} \quad (5.30)$$

Зв'язуючи спільно систему рівнянь (5.29), (5.30), отримаємо:

$$X_{вх} = \Delta X + X_{33} = \frac{X_{вих}}{W_1} \pm W_{33} X_{вих} = \left[\frac{1}{W_1} \pm W_{33} \right] \cdot X_{вих} = \frac{1 + W_1 \cdot W_{33}}{W_1} \cdot X_{вих};$$

Тут потрібно зауважити, що від'ємний зворотний зв'язок відповідає знакові « - », а додатний – знаку « + ».

Тоді, передавальну функцію ланки із зворотним зв'язком можна записати у вигляді:

$$W = \frac{X_{вих}}{X_{вх}} = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_{33}}, \quad (5.31)$$

де знак « - » відповідає від'ємному зворотному зв'язкові, знак « + » – додатному.

Правило 3. Передавальна функція ланки (системи), охопленої зворотним зв'язком, дорівнює частці, у чисельнику якої стоїть передавальна функція прямої (охоплюваної) ланки, а в знаменнику – сума (різниця) одиниці й добутку передавальної функції прямої ланки на передавальну функцію ланки зворотного зв'язку [9, 20, 22, 39].

Використання вищенаведених правил дозволяє правильно скласти загальну структурну схему досліджуваної автоматизованої вимірювальної системи, дослідити динамічну взаємодію її складових частин, визначити амплітудно-частотні (АЧХ), фазочастотні (ФЧХ) та перехідні характеристики та її стійкість.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ДО РОЗДІЛУ 5

1. В залежності від чого класифікуються види моделювання? Пояснити наведену класифікацію.
2. В чому полягає фізичний зміст перетворення Лапласа? Проаналізувати співвідношення дійсної змінної часу t : $x_{ex}(t)$, $x_{вих}(t)$ від комплексної змінної $X_{ex}(p)$, $X_{вих}(p)$
3. Дайте визначення структурної схеми. Яке її призначення та що вона зображує?
4. Дайте визначення, що таке об'єкт і модель. Призначення моделювання і його роль в наукових дослідженнях.
5. Охарактеризуйте основні види моделювання. Визначте різницю між кожним видом.
6. Пояснити класифікацію математичних моделей. Охарактеризуйте кожен клас.
7. Що лежить в основі моделювання? Чи може бути при моделюванні абсолютна подібність?
8. Приведіть етапи побудови математичних моделей. Пояснити схему, за якою здійснюється побудова математичних моделей.
9. У якому випадку похибка моделювання найменша? Приведіть складові похибок рішень на ЕОМ при моделюванні.

10. Який алгоритм знаходження еквівалентної передавальної функції складної вимірювальної системи? Привести етапи знаходження еквівалентної передавальної функції
11. Що називається передавальною функцією ланки? Проаналізуйте схему ланки з передавальною функцією та її математичний вираз.
12. Що таке математична модель об'єкта? За яким принципом класифікуються математичні моделі ?
13. Що таке зворотний зв'язок у схемах автоматизованих вимірювальних систем? Привести схему з'єднання ланок із зворотним зв'язком та її математичний опис.
14. Як перетворюються складні багатоконтурні структурні схеми зі зворотними й перехресними зв'язками? Що таке структурний аналіз і коли він застосовується?
15. Який зміст перетворення Лапласа? Що у перетворенні називається оригіналом, а що зображенням? Приведіть перетворення Лапласа в науковій літературі.
16. Яким чином здійснюється складання математичної моделі складної автоматизованої вимірювальної системи? Як математично описується наведена ланка математичної моделі?
17. Які існують види з'єднань ланок автоматизованої вимірювальної системи? Дайте визначення паралельного з'єднання ланок. Проаналізувати схему паралельного з'єднання ланок та її математичний опис.
18. Дайте визначення послідовного з'єднання ланок. Проаналізувати схему послідовного з'єднання ланок та її математичний опис.
19. Які припущення приймають при перетворенні складних багатоконтурних структурних схем автоматичних систем вимірювань? Приведіть схему та математичні вирази.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРИКЛАД ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

Математична модель (ММ) вимірювального каналу (ВК) ІВС повинна точно і достовірно відображати його ключові властивості та містити достатню кількість параметрів, що характеризують його роботу в заданих робочих умовах експлуатації.

Для аналізу впливу вимірюваної величини (ВВ) можна вибрати типову структуру ВК ІВС, який містить аналогові компоненти включені послідовно. У цьому випадку, для ММ що розробляється, можна виключити часові зміни вимірюваної величини.

Роботу лінійного вимірювального каналу, що містить аналогові компоненти, можна описати інтегральним співвідношенням:

$$y(t) = \int_{-\infty}^t g(t, \tau) \cdot (\tau) d\tau \quad (\text{A.1})$$

Даний вираз показує як вихідний сигнал $y(t)$ вимірювального каналу взаємодіє з головними параметрами ВК при внесенні в нього вхідного сигналу $x(t)$ та наявності збурень.

На основі даної залежності можна побудувати математичну модель (ММ) ВК що буде відображати залежність вихідного сигналу $Y(t)$ від значень вхідного сигналу $X(t)$ (рис. А.1.). При цьому враховуються власні параметри вимірювального каналу та наявні збурення ВВ ($\eta i(t)$).

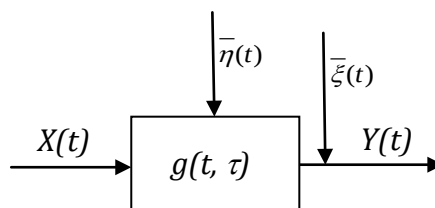


Рис.А.1. Структура лінійного ВК ІВС із аналоговими компонентами [20]

Такий вимірювальний канал, при дії на нього впливової величини, можна описати випадковою імпульсною перехідною функцією. При розгляді структури ВК ІВС можна побачити, що присутні незалежні ефекти перетворення, що відображають стохастичні та інерційні властивості.

При подальшому наближенні, даний лінійний вимірювальний канал можна розбити на 2 послідовних компоненти. Присутній компонент ВК що

характеризує його динамічні властивості, та безінерційний перетворювальний компонент що має невизначений коефіцієнт перетворення (характеризує рівень стохастичності). Таким чином, структурну модель вимірювального каналу ІВС можна зобразити у вигляді двох лінійно зв'язаних компонентів (рис.А.2.) [10, 11, 26].

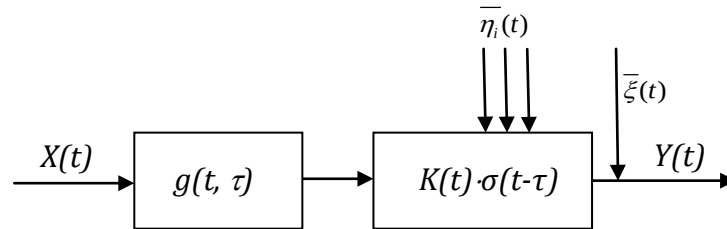


Рис. А.2. Наближена структурна модель ВК ІВС [26]

Головна імпульсна перехідна функція лінійного вимірювального каналу буде виражатися елементарними імпульсними перехідними функціями $g_1(t, \tau)$ та $g_2(t, \tau)$:

$$\begin{aligned} g_1(t, \tau) &= g_0(t - \tau), \\ g_2(t, \tau) &= k_0(t) \delta(t - \tau). \end{aligned} \quad (A.2)$$

Звідки можна виразити інтегральне рівняння:

$$g(t, \tau) = \int_{\tau}^t g_2(t, \tau) g_1(t, \tau) d\tau = k_0(t) g_0(t, \tau), \quad (A.3)$$

де $\delta(t - \tau)$ – значення δ -функції ВК;

$g_0(t - \tau)$ – імпульсна перехідна функція вимірювального каналу за стандартних умов;

$k_0(t)$ – коефіцієнт перетворення що характеризує стохастичність впливів ВВ на ВК, та являє собою сукупність визначеної та невизначеної складових перетворення.

Коефіцієнт $k_0(t)$ можна виразити, врахувавши випадкову складову коефіцієнту перетворення при дії впливової величини $\varepsilon(t)$, додавши її до коефіцієнту перетворення k_c за стандартних умов:

$$k_0(t) = k_c + \varepsilon(t). \quad (A.4)$$

Таким чином, повну модель лінійного вимірювального каналу можна виразити рівнянням:

$$y(t) = \left[k_c + \sum_{i=1}^n a_i \eta_i(t) \right] \int_{-\infty}^{+\infty} g_0(t - \tau) \cdot \tau d\tau + \sum_{i=1}^n b_i \eta_i(t), \quad (A.5)$$

Дана модель містить комплекс ВВ $\sum_{i=1}^n \eta_i(t)$ виражений за допомогою складових функції впливу $\sum_{i=1}^n a_i \eta_i(t), \sum_{i=1}^n b_i \eta_i(t)$, що розкладені у ряд за впливовими величинами.

Розглянута модель дозволяє оцінити імпульсну перехідну функцію лінійного ВК та невизначеність показань, що виникає внаслідок дії систематичних ефектів. До таких ефектів можна віднести невизначеність викликану дією ВВ на лінійний ВК, яка кількісно може бути виражена за допомогою коефіцієнтів чутливості a_i і b_i , що входять в додаткову невизначеність показань.

У випадку роботи ВК у *динамічному режимі* при нормальних умовах експлуатації його модель можна виразити співвідношенням:

$$y(t) = k_c + \int_{-\infty}^{+\infty} g_0(1-\tau) \cdot \tau d\tau. \quad (A.6)$$

При роботі у статичному режимі та робочих умовах можна прийняти:

$$\int g_0(1-\tau) d\tau = 1, \quad (A.7)$$

звідки модель буде мати вигляд:

$$y(t) = k_c + \sum_{i=1}^n a_i \eta_i(t) \cdot \tau + \sum_{i=1}^n b_i \eta_i(t). \quad (A.8)$$

Математичну модель (ММ) за нормальних умов, при роботі у статичному режимі, можна записати у вигляді лінійної залежності:

$$y = k_0 x \quad (A.9)$$

Наведена вище модель дозволяє оцінити невизначеність показів лінійного вимірювального каналу за нормальних умов експлуатації [9, 18, 26].

При роботі з моделями що відображають властивості процесів чи об'єктів важливою умовою є їх перевірка на адекватність. У випадку розгляду моделі вимірювального каналу покази на виході вимірювального каналу зрівнюються зі значеннями розрахованими теоретично, за допомогою математичної моделі. При цьому, вхідні дані для розрахунку повинні бути ідентичні реальним вхідним величинам що присутні на вході вимірювального каналу.

Іноді виникає необхідність коригування адекватності моделі. Це має місце під час планування і проведення експериментальних досліджень. В основі методів планування експерименту лежить необхідність розробки

стохастичної моделі що дозволяє оцінити параметри ММ та вхідний набір впливових величин, що краще всього дозволяють перевірити адекватність математичної моделі.

Визначення характеристик додаткової похибки ВК із застосуванням методик планування експерименту (ПЕ). Відповідно до методик ПЕ можна визначити та оцінити додаткові похибки, що виникають у ВК внаслідок відхилення впливових величин від значень що вважаються нормальними. Такі похибки формують додаткову складову невизначеності показів на виході ВК та можуть бути описані за допомогою функції впливу для вибраних умов роботи ВК.

Розглянемо модель функції впливу що є лінійною, та включає 3 впливових величини, що діють незалежно:

$$\begin{aligned}\psi_c(\xi) &= \sum_{i=1}^{k=3} \psi_c \Delta_s \cdot (\xi_i), \\ \psi_{\Delta_s}(\xi_i) &= A_i \Delta \xi_i A_i = \text{const} (i = 1 \dots k).\end{aligned}\tag{A.10}$$

У такому випадку, математичну модель функції впливу можна представити у вигляді рівняння:

$$\psi_c(\xi) = \sum_{i=1}^{k=3} A_i \xi_i \tag{A.11}$$

Для представленої ММ функції впливу необхідно вибрати область факторного простору (ФП). Вибравши область ФП в подальшому проводиться планування та проведення факторного експерименту, що дозволяє чисельно оцінити коефіцієнти рівняння А.11. План експерименту та область визначення впливових величин вибирається після аналізу характеристик вимірювального каналу.

Після вибору області визначення задають точку відліку $\xi_i(0)$ у факторному просторі, що відповідає показам ВВ за умов що визначені у нормативній документації на ВК, та межі варіації для вибраних впливових величин (інтервали варіації $\pm \Delta \xi_i$).

На початку факторного експерименту задають значення факторів варіації, які визначають верхню $\xi_i(B)$ і нижню $\xi_i(H)$ межі відносно $\xi_i(0)$. При цьому розглянуті фактори відповідають значенням:

$$\begin{aligned}\xi_i(B) &= \xi_i(0) + \Delta \xi_i, \\ \xi_i(H) &= \xi_i(0) - \Delta \xi_i, \\ \Delta \xi_i &= \frac{\xi_i(B) - \xi_i(H)}{2}.\end{aligned}$$

Отримані значення можна записати у вигляді безрозмірних змінних η_i відповідно до рівняння:

$$\eta_i = \frac{\xi_i(B) + \xi_i(H)}{\xi_i(B) - \xi_i(H)} \quad (A.12)$$

При проведенні повного факторного експерименту для факторів записують їх відповідність певним рівням: верхньому $\eta_i = +1$, нульовому $\eta_i = 0$, або нижньому $\eta_i = -1$. Визначають кількість дослідів, що необхідно для проведення експерименту. При 3-х впливових величинах кількість дослідів буде становити $N = 2^k = 8$. Безрозмірний коефіцієнт k відповідає числу впливових величин. Матрицю 3-х факторного експерименту показано у таблиці А.1.

Таблиця А.1

Повний факторний експеримент для трьох факторів

№ дослідів	План експерименту			Результати експерименту
	1	2	3	
1	-1	-1	-1	$\tilde{\psi}_{c1}(\xi)$
2	+1	-1	-1	$\tilde{\psi}_{c2}(\xi)$
3	+1	-1	+1	$\tilde{\psi}_{c3}(\xi)$
4	-1	-1	+1	$\tilde{\psi}_{c4}(\xi)$
5	-1	+1	-1	$\tilde{\psi}_{c5}(\xi)$
6	+1	+1	-1	$\tilde{\psi}_{c6}(\xi)$
7	+1	+1	+1	$\tilde{\psi}_{c7}(\xi)$
8	-1	+1	+1	$\tilde{\psi}_{c8}(\xi)$

Рівняння моделі із використанням безрозмірних змінних η_i буде мати вигляд:

$$\tilde{\psi}_c(\xi) = A_1\eta_1 + A_2\eta_2 + A_3\eta_3, \quad (A.13)$$

де $\tilde{\psi}_c(\xi)$ - функція впливу отримана під час розрахунку.

Далі проводиться визначення коефіцієнтів розглянутої моделі. Для цього використовуються наведені у таблиці А.1 значення, що обробляються за методом найменших квадратів:

$$A_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{1j} \psi_{cj}}{N}; \quad A_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{2j} \psi_{cj}}{N}; \quad A_3 = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{3j} \psi_{cj}}{N}. \quad (A.14)$$

Використовуючи критерій Стюдента можна оцінити значимість знайдених коефіцієнтів:

$$t_i = \frac{A}{\sqrt{S^2\{A\}}}. \quad (\text{A.15})$$

Де $S^2\{A\}$ – дисперсія коефіцієнтів досліджуваної моделі.

$$S^2\{A\} = \frac{S_{\text{кінц.}}^2}{N - (K + 1)}. \quad (\text{A.16})$$

Кінцеву дисперсію $S_{\text{кінц.}}^2$ можна визначити із виразу:

$$S_{\text{кінц.}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\psi_{ci} - \psi_c)^2}{N - (K + 1)}, \quad (\text{A.17})$$

де $(N - k)$ – кількість ступенів свободи.

Далі проводиться перевірка значущості коефіцієнтів. Для цього використовуються табличні дані критичних значень коефіцієнту $t_{кр}$ для вибраних умов факторного експерименту, що порівнюються із розрахунковими значеннями t_i . Якщо справджується нерівність $t_i \leq t_{кр}$ даний коефіцієнт вважається значущим.

Адекватність моделі перевіряється по критерію Фішера, що дозволяє оцінити додаткову невизначеність показань:

$$\tilde{F}_{\text{розрах.}} = \frac{S_{\text{кінц.}}^2}{S_{\Delta c}^2}. \quad (\text{A.18})$$

Звідки можна знайти дисперсію відтворюваності експерименту відповідно до виразу:

$$S_{\Delta c}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\psi_{ci} - \psi_c)^2}{N - 1}, \quad (\text{A.19})$$

$$\text{приймавши } \tilde{\Psi}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{\Psi}_{ci}.$$

Після проведення розрахунків, проводиться порівняння знайденого значення із $F_{кр}$. Умова адекватності моделі визначається нерівністю:

$$\tilde{F}_{\text{розрах.}} < F_{кр}. \quad (\text{A.20})$$

У випадку, коли модель функції впливу виявляється неадекватною проводять новий експеримент, під час якого можна виконати наступні дії:

- 1) розглянути модель вищого порядку;
- 2) зменшити інтервали варіації [10, 26, 30].

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

Розрахунок статичних метрологічних характеристик (МХ) вимірювального каналу полягає у визначенні та оцінці номінальної функції перетворення (НФП) ВК для вибраного зразку ІВС.

Для розрахунку НФП вимірювального каналу необхідно визначити кількість перетворювальних елементів (N) у ВК та їх номінальні функції перетворення $f_{sai}(x)$. Функція перетворення ВК задається параметром (i), що характеризує загальну лінійну функцію вимірювального сигналу на виході ВК, причому ($i = 1, 2, 3 \dots N$).

Функція перетворення, із врахуванням адитивної та мультиплікативної складових похибки перетворення буде мати вигляд:

$$f_{sa_i}(x) = A_i x + a_i, \quad (\text{Б.1})$$

Параметр A_i визначає мультиплікативну складову НФП, a_i – показує зміщення функції перетворення f_{sa_i} внаслідок присутності адитивної складової похибки перетворення. Для знаходження мультиплікативної складової НФП при значенні $i=1, 2, 3 \dots N$ можна застосувати вираз:

$$A^{(i)} = \prod_{j=1+i}^N A_j, \quad (\text{Б.2})$$

Зміщення НФП внаслідок наявності адитивної складової похибки перетворення, можна знайти за виразом:

$$a = \sum_{i=1}^N a_j \prod_{j=1+i}^N A_j, \quad (\text{Б.3})$$

Загальна лінійна функція перетворення ВК буде мати вигляд:

$$f_{sa_i}(x) = Ax^{(0)} + a, \quad (\text{Б.4})$$

де $A^{(0)} = A^{(i)}_{i=0}$ [17, 18, 26].

Розглянемо вимірювальний канал (ВК) ІВС що містить структурні елементи k_1, k_2, k_3 які з'єднані послідовно. Відповідно, дані елементи мають власні функції перетворення що містять адитивні та мультиплікативні складові. Для розрахунку НФП вимірювального каналу що складається із 3-х елементів прийmemo, що кожен елемент ВК має адитивну (A_i) та мультиплікативну (a_i) складові функції перетворення: $k_1 (A_1, a_1)$, $k_2 (A_2, a_2)$, $k_3 (A_3, a_3)$.

Далі, опишемо функціональну залежність сигналів на вході та виході кожного елементу ВК. Для елементу k_1 вихідний сигнал буде мати вигляд:

$$x_1 = A_1 x + a_1 \quad (\text{Б.5})$$

Даний сигнал поступає на вхід елементу k_2 . В результаті на виході елементу k_2 сформується сигнал:

$$x_2 = A_2 x_1 + a_2 = A_2 (A_1 x + a_1) + a_2 = A_1 A_2 x + A_2 a_1 + a_2 \quad (\text{Б.6})$$

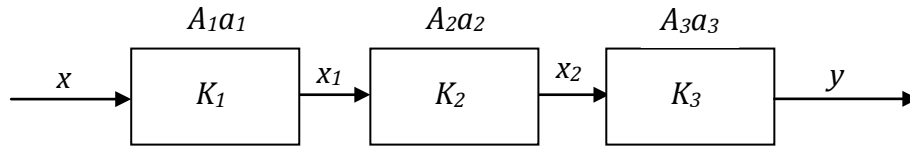


Рис. Б.1. Проста лінійна модель вимірювального каналу ІВС.

Функцію перетворення для останнього елементу ВК (k_3) можна записати у вигляді:

$$y = A_3 x_2 + a_3 = A_3 (A_1 A_2 x + A_2 a_1 + a_2) + a_3 = A_1 A_2 A_3 x + A_2 A_3 a_1 + A_3 a_2 + a_3 \quad (\text{Б.7})$$

Для того щоб визначити динамічні властивості вимірювального каналу необхідно розглянути амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики складових елементів ВК.

Можна прийняти, що $A_{ai}(\omega)$ – номінальне значення амплітудно-частотної характеристики i -го компонента ВК, а $\Delta A_{ai}(\omega)$ – максимальне відхилення значень АЧХ. Тоді, відповідно, $\varphi_{ai}(\omega)$ буде відповідати номінальним значенням фазочастотної характеристики (ФЧХ) i -го компонента ВК, а $\Delta \varphi_{ai}(\omega)$ її найбільшому відхиленню.

Для визначення амплітудно-частотної характеристики вимірювального каналу можна скористатися виразом:

$$\Delta a_i(\omega) = \sum_{i=1}^N \Delta a_i(\omega) \cdot \sum_{i=1}^{i-1} \Delta a_i(\omega) \cdot \sum_{i+1}^N \Delta a_i(\omega), \quad (\text{Б.8})$$

Значення номінальної фазочастотної характеристики можна отримати із виразу (Б.9). В подальшому, розраховують допустимі відхилення ФЧХ від номінальних значень:

$$\varphi_a(\omega) = \sum_{i=1}^N \varphi_{ai}(\omega), \rightarrow \varphi_a(\omega) = \sum_{i=1}^N \Delta \varphi_i(\omega). \quad (\text{Б.9})$$

Для застосування виразів (Б.8) та (Б.9) розглянутий вимірювальний канал ІВС повинен відповідати необхідним умовам.

По-перше, вимірювальний канал, характеристики якого розраховуються, повинен містити лише лінійні аналогові елементи ($k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$). Якщо в

каналі присутні дискретні елементи, їх нелінійні інерційні параметри не повинні впливати на номінальні значення функцій ВК. Якщо вимірювальний канал включає АЦП (є дискретним перетворювальним елементом), що забезпечує квантування аналогового вимірювального сигналу $y(t)$ відповідно до значень його амплітуди, приймають припущення що АЦП є ідеальним елементом квантування.

По-друге, вимірювальний канал необхідно розглядати в стаціонарному динамічному робочому режимі. В такому випадку, для вимірювального сигналу дисперсію та математичне сподівання потрібно розглядати як незалежні у часі величини [6, 23, 26, 34].

При обробці елементами ВК вимірювальних сигналів, що мають широкую смугу або швидко змінюються у часі, можна розглянути динамічну модель ВК в якій структурно розділені лінійна аналогова та нелінійна цифрова частини (рис.Б.2)

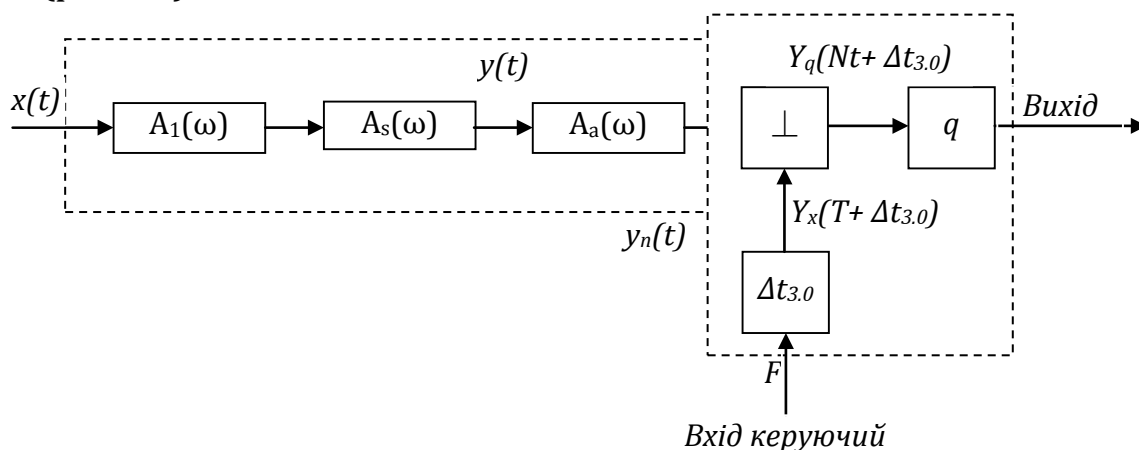


Рис. Б.2. Структурна модель вимірювального каналу що містить інерційні дискретні елементи (АЦП)

У наведеній на рис. Б.2. моделі вимірювального каналу для аналогової частини визначають АЧХ та ФЧХ відповідно до виразів (Б. 8-9) та їх відхилення від номінальних значень. Для дискретної частини ВК визначають динамічні параметри АЦП (апертурний час та затримку/ випередження відліку дискретного перетворювача).

При розгляді динамічних властивостей АЦП визначають постійну ($t_{3.c}$) та систематичну складову ($\Delta t_{3.0}$) затримки/випередження відліку:

$$t_{3.0} = t_{3.c} + \Delta t_{3.0}. \quad (\text{Б.10})$$

Для визначення динамічної похибки ВК необхідно визначити показники розподілу затримки/випередження відліку $P(\Delta t_{3.0})$, що дозволяє

оцінити час апертури t_a АЦП. Необхідно враховувати, що $t_{3.0}$ відповідає рівню сигналу що приходить на вхід АЦП та його часових характеристикам.

Для визначення сигналу $y_k(t)$, що формується на виході аналогової частини ВК, можна скористатися виразом що пов'язує спектр $S_x(\omega)$ сигналу $x(t)$ із амплітудно-частотними характеристиками аналогових елементів вимірювального каналу (вираз Б.11):

$$y_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) \prod_{i=1}^S Aa_i(\omega) Aa_y(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{Б.11})$$

У виразі Б.11 параметр $Aa_i(\omega)$ характеризує амплітудно-частотні характеристики аналогової частини ВК, $Aa_y(\omega)$ – описує АЧХ дискретних компонентів вимірювального каналу. У такому випадку, результуючий сигнал що формується дискретною частиною ВК можна записати у вигляді виразу Б.12:

$$y_k(nT + \Delta t_{3.0}) = \int_{nT-a}^{nT+a} y_k t \sum_{-\infty}^{+\infty} \sigma[t - (nt + \Delta t_{3.0})] dt \quad (\text{Б.12})$$

У виразі Б.12 інтервал інтегрування (α) визначається відліками зліва та справа відносно точки що відповідає n -му відліку.

Вихідний сигнал вимірювального каналу можна задати лінійною функцією $\varepsilon(y_k)$ що має пилкоподібну форму:

$$y_g(nT + \Delta t_{3.0}) = y_k(nT + \Delta t_{3.0}) - \varepsilon_g(y_k). \quad (\text{Б.13})$$

Із виразу Б.13 можна виразити динамічну похибку вимірювального каналу:

$$\Delta y_k = \frac{y_g}{nT} \Delta t_{3.0}. \quad (\text{Б.14})$$

Провівши експериментальні виміри та задавши значення тимчасового ряду можна вирахувати та оцінити похибки ВК у задані моменти часу.

Визначивши систематичну складову ($\Delta t_{3.0}$) затримки/випередження відліку та значення статичної характеристики $y_k(t)$ можна вирахувати та оцінити загальну невизначеність показів що формуються вимірювальним каналом та відхилення показів ВК від значень що є стандартними для конкретного ВК [17, 26, 36].

СПОСОБИ ЗАПИСУ ЛІНІЙНИХ ТА КУТОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ОДНОРІДНИХ КООРДИНАТАХ

Основні операції над векторами, заданими в однорідних координатах, при розрахунку переміщень маніпулятора ПР у складі ІВК, виконуються у відповідності із наступними правилами:

1. Додавання:

$$A \pm B = C, \quad (B.1)$$

де вектор C має координати $c_i = (a_i / a_4 \pm b_i / b_4) c_4$, причому c_4 – будь-яке число, не рівне нулю; $i = 1, 2, 3, \dots$

2. Множення на скаляр:

$$\lambda A = \lambda \frac{a_1}{a_4} i + \lambda \frac{a_2}{a_4} j + \lambda \frac{a_3}{a_4} k = \left[\frac{a_1, a_2, a_3, a_4}{\lambda} \right]^T. \quad (B.2)$$

3. Модуль (довжина) вектора:

$$|A| = \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}}{|a_4|}. \quad (B.3)$$

4. Скалярний добуток:

$$A \cdot B = |A||B| \cos \gamma = \frac{a_1 i + a_2 j + a_3 k}{a_4} \cdot \frac{b_1 i + b_2 j + b_3 k}{b_4} = \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{a_4 b_4}. \quad (B.4)$$

де γ – кут між векторами A і B .

5. Векторний добуток:

$$A \times B = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{a_1}{a_4} & \frac{a_2}{a_4} & \frac{a_3}{a_4} \\ \frac{b_1}{b_4} & \frac{b_2}{b_4} & \frac{b_3}{b_4} \end{vmatrix} = \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{a_4 b_4} i + \frac{a_3 b_1 - a_1 b_3}{a_4 b_4} j + \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_4 b_4} k. \quad (B.5)$$

Звідси слідує, що однорідні координати вектору рівні:

$$c_1 = a_2 b_3 - a_3 b_2; \quad c_2 = a_3 b_1 - a_1 b_3; \quad c_3 = a_1 b_2 - a_2 b_1; \quad c_4 = a_4 b_4. \quad (B.6)$$

За допомогою однорідних координат можна задати будь-яку точку в просторі або лінію. Наприклад:

початок координат: $(0, 0, 0, 1)$;

вектор i (вісь Ox): $(1, 0, 0, 0)$;

вектор j (вісь Oy): $(0, 1, 0, 0)$;

вектор k (вісь Oz): $(0, 0, 1, 0)$;

точка a (система $Oxyz$): $(3,4,5,1)$;

точка a (система $O/x/y/z/$): $(6,8,10,2)$.

У однорідних координатах існує неоднозначність запису координати однієї і тієї ж точки у просторі, наприклад, точка a , як записано вище, може бути визначена по-різному, що пов'язано зі зміщенням початку однорідних координат по всім осям на відстань, рівну величині $a_i \cdot (a_4 = 1)$.

Розглянемо координатні перетворення в загальному вигляді. Уявимо, що координати деякої точки a у однорідних координатах системи $Oxyz$ описуються радіус-вектором $A = [a_1, a_2, a_3, a_4]^T$, тоді радіус-вектор $A' = [a'_1, a'_2, a'_3, a'_4]^T$ тієї ж точки у системі $O'x'y'z'$ буде зв'язаний з першим співвідношенням:

$$\begin{aligned} a'_1 &= t_{11}a_1 + t_{12}a_2 + t_{13}a_3 + t_{14}a_4; \\ a'_2 &= t_{21}a_1 + t_{22}a_2 + t_{23}a_3 + t_{24}a_4; \\ a'_3 &= t_{31}a_1 + t_{32}a_2 + t_{33}a_3 + t_{34}a_4; \\ a'_4 &= a_4. \end{aligned} \quad (B.7)$$

Або у матричному вигляді:

$$A' = TA = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \\ a'_3 \\ a'_4 \end{bmatrix}. \quad (B.8)$$

де T – матриця лінійного перетворення координат від системи $Oxyz$ до системи $O'x'y'z'$.

Будь-яке перетворення координат може бути розбите на послідовні операції переносу вздовж і повороту навколо осей Ox , Oy , Oz .

Матриця T_1 для лінійного переносу, наприклад, вздовж осі Oy на відстань ℓ_2 буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} T_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \ell_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ T_2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (B.9)$$

ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗКУ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ КІНЕМАТИКИ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТУ

Застосування прямої задачі кінематики (ПЗК) є необхідним при визначення поточного положення рухомих ланок маніпулятора ПР. Для цього використовуються узагальнені (лагранжеві) координати окремих ланок що вимірюються внутрішніми датчиками положення. Розв'язок ПЗК виконується в декілька послідовних етапів.

Спочатку визначаються та задаються рівняння, що описують зв'язок рухомих ланок маніпулятора із відповідними значенням узагальнених координат. Далі, складаються функціональні залежності, що містять узагальнені координати та їх швидкості, та визначають швидкості руху виконавчого органу маніпулятора. Наостанок, визначається прискорення виконавчого органу, що відповідає функції узагальнених координат, їх відповідних швидкостей та прискорень [3, 41].

Розглянемо розв'язок ПЗК для ПР, маніпулятор якого працює в циліндричній системі робочих координат та який розташований на нерухомій основі (рис. Г.1).

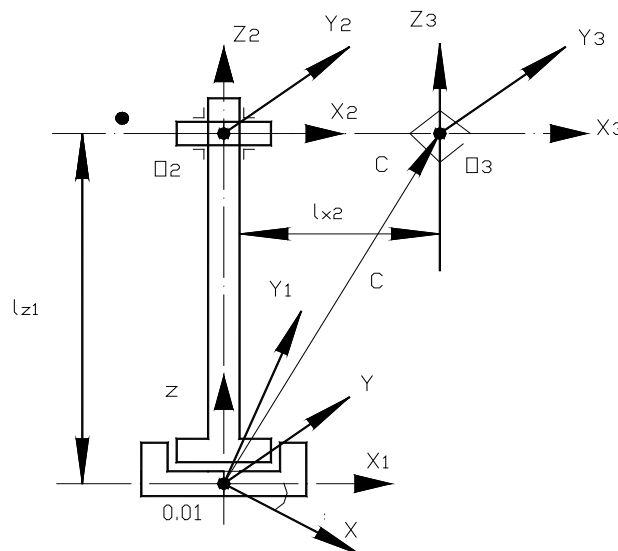


Рис.Г.1. Схематичне зображення координатних осей ПР, що працює в циліндричній системі координат.

Задамо зв'язок основи ПР із координатною системою (КС) $O_0x_0y_0z_0$, що співпадає із абсолютною системою координат. В такому випадку, із першою

ланкою можна зв'язати КС O_{xyz} , положення якої визначається координатою першого ступня свободи. Координатна система $O_1x_1y_1z_1$ зв'язується із другою ланкою маніпулятору. Її положення відносно КС O_{xyz} , буде визначатися 2-м ступенем свободи, і т.д. Таким чином, проводиться прив'язка рухомих ланок маніпулятору ПР до відповідних КС [25, 35, 41] .

Задамо зв'язок між довільною точкою C у КС та $(i+1)$ -ою ланкою маніпулятору радіус-вектором C_{i+1} . Між C_{i+1} та радіус-вектором C_i , що відповідає даній точці в КС, зв'язаний із i -тою ланкою, буде зв'язок виду:

$$C_i = T_{(i+1)i} \cdot C_{i+1}, \quad (\Gamma.1)$$

де $T_{(i+1)i}$ – матриця перетворень координат із системи $O_{i+1}x_{i+1}y_{i+1}z_{i+1}$ до системи $O_ix_iy_iz_i$.

Результуючі матриці перетворення для рухів кінематичних пар V класу будуть мати вигляд:

- для обертання навколо осі Ox : $T_{\theta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x & 0 \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$
- для обертання навколо осі Oy : $T_{\theta_y} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$
- для обертання навколо осі Oz : $T_{\theta_z} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$
- для лінійного переміщення вздовж осі Ox : $T_{\ell_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \ell_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$
- для лінійного переміщення вздовж осі Oy : $T_{\ell_y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \ell_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$
- для лінійного переміщення вздовж осі Oz : $T_{\ell_z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ell_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$

Після визначення положення виконавчого елементу C_n у системі координат $0_n x_n y_n z_n$ визначається його положення в абсолютній (декартовій) КС що зв'язана із основою ПР:

$$C_0 = T_{10} T_{21} \dots T_{n(n-1)} C_n \quad (\Gamma.2)$$

Положення вибраної точки, що задана в i -й системі координат радіус-вектором R_i можна знайти із виразу $\Gamma.3$:

$$R_0 = \Gamma_i R_i, \quad (\Gamma.3)$$

де $\Gamma_i = T_{10} T_{21} \dots T_{i(i-1)}$ – відповідно, матриця перетворення i -тої ланки, що описує її положення у системі координат $0_0 x_0 y_0 z_0$.

На наступному етапі задаються сепаратні системи координат $0_i x_i y_i z_i$, (відповідно до рис. $\Gamma.1$). Центр хвату виконуючого пристрою у системі координат $0_3 x_3 y_3 z_3$ описується радіус-вектором $C_3 = [0, 0, 0, 1]^T$. Координати центру ваги хвату у КС $0_2 x_2 y_2 z_2$, що зв'язана з $0_3 x_3 y_3 z_3$ лінійним переміщенням руки ℓ_{x2} , визначаються відношенням $C_2 = T_{32} C_3$.

Так як перетворення виконується вздовж осі $0_2 x_2$, можна записати:

$$R_0 = \Gamma_i R_i, C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \ell_{x2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{x2} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (\Gamma.4)$$

Система координат $0_2 x_2 y_2 z_2$ зв'язана з системою $0_1 x_1 y_1 z_1$ лінійним перетворенням по координаті ℓ_{z1} . Положення хвату виконуючого пристрою C_1 у КС $0_1 x_1 y_1 z_1$ можна записати за допомогою лінійного перетворення $C_1 = T_{21} C_2$. Результуюча матриця буде мати вигляд:

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ell_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_{x2} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{x2} \\ 0 \\ \ell_{z1} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (\Gamma.5)$$

При переході до абсолютної КС, положення хвату буде визначатися, відношенням $C = T_{10} C_1$, що відповідає матричному вигляду:

$$C = \begin{bmatrix} \cos \theta z & -\sin \theta z & 0 & 0 \\ \sin \theta z & \cos \theta z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_{x2} \\ 0 \\ \ell_{z1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{x2} \cos \theta z \\ \ell_{x2} \sin \theta z \\ \ell_{z1} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (\Gamma.6)$$

Наведений вище алгоритм придатний для визначення положення виконавчого пристрою ПР що працює у сферичній КС.

Для визначення швидкості та прискорення виконавчого органу ПР складаються функціональні залежності виду:

$$\begin{aligned} V_c &= \dot{C}_1; \\ W_c &= \dot{V}_c = \ddot{C} \end{aligned} \quad (\Gamma.7)$$

Провівши диференціювання по часу виразів $\Gamma.7$ за проекціями радіус-вектору C_1 , отримаємо результуючі значення:

$$V_c = V_x i + V_y j + V_z k, \quad (\Gamma.8)$$

де $V_x = dC_x/dt$, $V_y = dC_y/dt$, $V_z = dC_z/dt$,

$$W_c = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k, \quad (\Gamma.9)$$

де $\omega_x i = dV_x/dt$, $\omega_y j = dV_y/dt$, $\omega_z k = dV_z/dt$.

Далі, знаходимо модуль швидкості і прискорення для заданої точки C :

$$\begin{aligned} |V_c| &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \\ |W_c| &= \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}. \end{aligned} \quad (\Gamma.10)$$

Прийнявши $C_j = f_j(q_1, \dots, q_i, \dots, q_n)$, $j = x, y, z$, де q_i – узагальнена координата, причому $q_i = f_i(t)$, можна стверджувати, що C_x, C_y, C_z є складними функціями змінної t . Результуючі значення можна отримати провівши диференціювання по часу складної змінної функції:

$$\begin{aligned} \dot{f}_j &= \frac{\partial f_j}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial q_i} \dot{q}_i + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial q_n} \dot{q}_n; \\ \ddot{f}_j &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f_j}{\partial q_1} \right) \dot{q}_1 + \frac{\partial f_j}{\partial q_1} \ddot{q}_1 + \dots + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f_j}{\partial q_i} \right) \dot{q}_i + \frac{\partial f_j}{\partial q_i} \ddot{q}_i + \dots + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f_j}{\partial q_n} \right) \dot{q}_n + \frac{\partial f_j}{\partial q_n} \ddot{q}_n. \end{aligned} \quad (\Gamma.11)$$

та врахувавши повну похідну за часом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f_j}{\partial q_i} \right) = \frac{\partial^2 f_j}{\partial q_i \cdot \partial q_1} \dot{q}_1 + \dots + \frac{\partial^2 f_j}{\partial q_i^2} \dot{q}_i + \dots + \frac{\partial^2 f_j}{\partial q_i \cdot \partial q_n} \dot{q}_n. \quad (\Gamma.12)$$

Останній етап вирішення ПЗК для ПР, маніпулятор якого працює в циліндричній системі робочих координат (рис. $\Gamma.1$) полягає у *знаходженні швидкості та прискорення* центру хвату виконавчого органу ПР.

Використаємо вираз для знаходження положення виконавчого органу ПР у абсолютній системі координат $C_x = \ell_{x2} \cos \theta_z$, $C_y = \ell_{x2} \sin \theta_z$, $C_z = \ell_{21}$. Для проекції на вісь Ox знаходимо похідні по часу від C_{xi} :

$$\dot{C}_x = \frac{\partial C_x}{\partial \theta_z} \dot{\theta}_z + \frac{\partial C_x}{\partial \ell_{x2}} \dot{\ell}_{x2} = -\dot{\theta}_z \ell_{x2} \sin \theta_z + \dot{\ell}_{x2} \cos \theta_z, \quad (\Gamma.13)$$

$$\begin{aligned} \ddot{C}_x &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial C_x}{\partial \theta_z} \right) \dot{\theta}_z + \frac{\partial C_x}{\partial \theta_z} \ddot{\theta}_z + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial C_x}{\partial \ell_{x2}} \right) \dot{\ell}_{x2} + \frac{\partial C_x}{\partial \ell_{x2}} \ddot{\ell}_{x2} = \frac{\partial^2 C_x}{\partial \theta_z \ell_{x2}} \dot{\ell}_{x2} \dot{\theta}_z + \frac{\partial^2 C_x}{\partial \theta_z^2} \dot{\theta}_z^2 + \frac{\partial C_x}{\partial \theta_z} \ddot{\theta}_z^2 + \\ &+ \frac{\partial C_x}{\partial \theta_z} \theta_z \ell_{x2} + \frac{\partial^2 C_x}{\partial \ell_{x2} \partial \theta_z} \dot{\ell}_{x2} \dot{\theta}_z + \frac{\partial C_x}{\partial \ell_{x2}} \dot{\ell}_{x2}^2 + \frac{\partial C_x}{\partial \ell_{x2}} \ddot{\ell}_{x2}^2 = -\dot{\ell}_{x2} \dot{\theta}_z \sin \theta_z - \dot{\theta}_z^2 \ell_{x2} \cos \theta_z - \\ &- \dot{\ell}_{x2} \ddot{\theta}_z \sin \theta_z - \dot{\theta}_z \ddot{\ell}_{x2} \sin \theta_z + \ddot{\ell}_{x2} \cos \theta_z. \end{aligned}$$

Подібні результати можна отримати для координатних осей C_y і C_z . В результаті знаходимо вектор швидкості і прискорення, що буде мати вигляд в однорідній системі координат:

$$V_c = \begin{bmatrix} \ell_{x2} \cos \theta_z - \dot{\theta}_z \ell_{x2} \sin \theta_z \\ \ell_{x2} \sin \theta_z - \dot{\theta}_z \ell_{x2} \cos \theta_z \\ \ell_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (Г.14)$$

$$W_c = \begin{bmatrix} \ddot{\ell}_{x2} \cos \theta_z - 2\dot{\theta}_z \dot{\ell}_{x2} \sin \theta_z - \ddot{\theta}_z \ell_{x2} \sin \theta_z - \dot{\theta}_z^2 \ell_{x2} \cos \theta_z \\ \ddot{\ell}_{x2} \sin \theta_z + 2\dot{\theta}_z \dot{\ell}_{x2} \cos \theta_z + \ddot{\theta}_z \ell_{x2} \cos \theta_z - \dot{\theta}_z^2 \ell_{x2} \sin \theta_z \\ \ddot{\ell}_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (Г.15)$$

Наостанок, визначають модулі швидкості і прискорення. Рівняння для знаходження швидкості та прискорення довільної точки виконуючого органу ПР в КС $0_0x_0y_0z_0$ у матричній формі будуть мати вигляд:

$$V_0 = \sum_{j=1}^i \frac{\partial \prod_{j=1}^i T_{j(j-1)}}{\partial q_j} R_i q_j = \sum_{j=1}^i \bigcup_i^j R_i q_i, \quad (Г.16)$$

$$\text{де } \bigcup_i^j V_0 = \sum_{j=1}^i \frac{\partial \prod_{j=1}^i T_{j(j-1)}}{\partial q_j}.$$

$$W_0 = \sum_{j=1}^i (\bigcup_i^j R_i) \ddot{q}_j + \sum_{k_1 j=1}^i (\bigcup_i^{j k_1} R_i) \dot{q}_j \dot{q}_{k_1}, \quad (Г.17)$$

$$\text{де } \bigcup_i^{j k} = \frac{\partial^2 \prod_{j=1}^i T_{j(j-1)}}{\partial q_j \partial q_k}, \text{ причому: } 1 \leq j \leq i; 1 \leq k \leq j; i = 1, 2, \dots, n.$$

Розглянутий алгоритм розв'язку прямої задачі кінематики забезпечує визначення переміщень робочих ланок маніпулятора ПР як функції узагальнених координат та, відповідно, їх швидкостей і прискорень. Це забезпечує комплексний аналіз функціональних властивостей ПР вибраної кінематичної схеми [35, 41].

РОЗВ'ЯЗОК ЗВОРотної ЗАДАчі КІНЕМАТИКИ МАНІПУЛЯТОРА ТОЧНИМ І НАБЛИЖЕНИМ МЕТОДАМИ

В основі зворотної задачі кінематики (ЗЗК) лежить визначення узагальнених координат рухомих ланок маніпулятора для планування руху виконуючого пристрою у декартовій системі координат, зв'язаній із основою робота.

Розв'язок ЗЗК для вибраної ланки полягає у розв'язку рівняння $C_z = T_{32}C_3$ відносно вектора узагальнених координат $Q=[q_1, q_2, \dots, q_n]^T$. Положення і орієнтацію виконуючого пристрою у абсолютній (декартовій) КС задається матрицею перетворення:

$$\Gamma_n = T_{10}T_{21}\dots T_{n(n-1)} = \prod_{i=1}^n T_i(i-1) \quad (Д.1)$$

$$\Gamma_n = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} & \Gamma_{24} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} & \Gamma_{34} \\ \Gamma_{41} & \Gamma_{42} & \Gamma_{43} & \Gamma_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A \times B)_x & Ax & Bx & Cx \\ (A \times B)_y & Ay & By & Cy \\ (A \times B)_z & Az & Bz & Cz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (Д.1)$$

де C – вектор початку відліку системи координат $0_n x_n y_n z_n$, що зв'язана із центром хвату;

A – вектор орієнтації;

B – вектор підходу схвату;

$A \times B$ – векторний добуток.

Графічне розміщення векторів наведено на рис. Д.1.

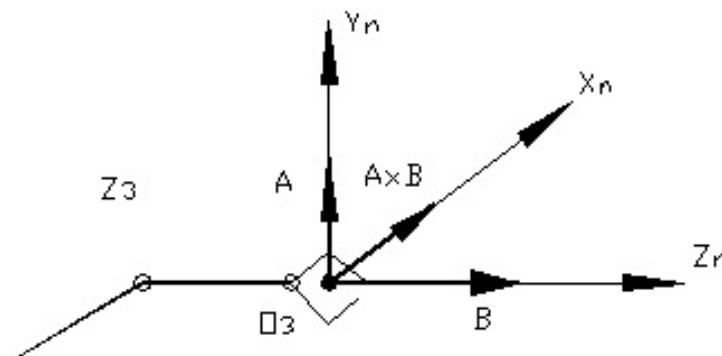


Рис. Д.1. Розташування векторів підходу і орієнтування хвату маніпулятора

Елементи матриці Γ_i формують дванадцятимірний вектор-стовпець що задає вектор положення i -тої ланки маніпулятора:

$$X_i = [\Gamma_{11}, \Gamma_{12}, \Gamma_{13}, \Gamma_{14}, \Gamma_{21}, \Gamma_{22}, \Gamma_{23}, \Gamma_{24}, \\ \Gamma_{31}, \Gamma_{32}, \Gamma_{33}, \Gamma_{34}, \Gamma_{41}, \Gamma_{42}, \Gamma_{43}, \Gamma_{44}], \quad (Д.1)$$

В основі *точного методу розв'язку ЗЗК* лежить вирішення системи нелінійних рівнянь, що характеризують зв'язок заданого вектору X_{i3d} у абсолютній КС із вектором положення $X_i(q)$ в узагальнених координатах:

$$X_{i3d} = X_i(q), \quad (Д.2)$$

Нелінійні рівняння визначають у процесі прирівнювання аргументів вектора положення:

$$\Gamma_{jk,3d} = \Gamma_{jk}(q); j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4. \quad (Д.3)$$

Гранично можна задати дванадцять рівнянь зв'язку [3, 35, 41].

Метод *точного розв'язку ЗЗК* дозволяє визначити однозначні аналітичні залежності узагальнених координат від геометричних параметрів маніпулятора і проєкцій векторів А, В, С на осі системи 0хуз для вибраних КС та кінематичних схем ПР.

У випадку, коли ПР працює в сферичній робочій КС, матрицю перетворення для визначення центру виконавчого органу маніпулятора, можна записати у вигляді:

$$\Gamma_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_z \cos\theta_{y1} & -\sin\theta_z & -\cos\theta_z \sin\theta_{y1} & \ell_{x2} \cos\theta_z \cos\theta_{y1} \\ \sin\theta_z \cos\theta_{y1} & \cos\theta_z & -\sin\theta_z \sin\theta_{y1} & \ell_{x2} \sin\theta_z \cos\theta_{y1} \\ \sin\theta_{y1} & 0 & \cos\theta_{y1} & \ell_{x2} \sin\theta_{y1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (Д.4)$$

Відповідно до схеми, зображеної на рис. Д.1, для *точного розв'язку ЗЗК* для маніпулятора що має 3 ступені свободи, потрібно вирішити систему із 3-х нелінійних рівнянь, що задають зв'язок відносно центру виконуючого органу маніпулятора у просторі, по координатам радіус-вектору С ($\Gamma_{j3d} = \Gamma_{j4}(q)$, $j = 1, 2, 3$):

$$\left. \begin{aligned} C_{x3d} &= \ell_{x2} \cos\theta_z \cos\theta_{y1} \\ C_{y3d} &= \ell_{x2} \sin\theta_z \cos\theta_{y1} \\ C_{z3d} &= \ell_{x2} \sin\theta_{y1} \end{aligned} \right\}. \quad (Д.5)$$

В результаті, отримаємо значення:

$$q_1 = \theta_z = \arctg\left(\frac{C_{y3d}}{C_{z3d}}\right); \quad q_2 = \theta_{y1} = \arctg\left(\frac{C_{x3d} \sin\theta_z}{C_{y3d}}\right); \quad q_3 = \ell_{x2} = \frac{C_{x3d}}{\sin\theta_{y1}}.$$

Приклад розв'язку зворотної задачі кінематики маніпулятора:

Нехай: $-180^\circ \leq \theta_z \leq 180^\circ$; $-60^\circ \leq \theta_{y1} \leq 240^\circ$;

$C_{x3d} = 1\text{м}$; $C_{y3d} = 1\text{м}$; $C_{z3d} = 0,817\text{м}$.

Тоді: $\theta_z \leq 45^\circ$ або -135° ; $\theta_{y1} = 30^\circ$ або 210° ;
 $(\theta_z = 45^\circ), 150^\circ$ або $-30^\circ (\theta_z = -135^\circ)$;
 $\ell_{x2} = \pm 0,817/0,5 = \pm 1,634\text{м}$.

Спочатку будується граф можливих розв'язків ЗЗК (рис. Д.2). Розв'язок $\ell_{x2} < 0$ відкидається, так як його реалізація є абсурдною. Із доступних варіантів розв'язків залишаються 2 можливих варіанти, один з яких характеризується оптимальним кутом повороту першої координати ($\theta_z = 45^\circ$).

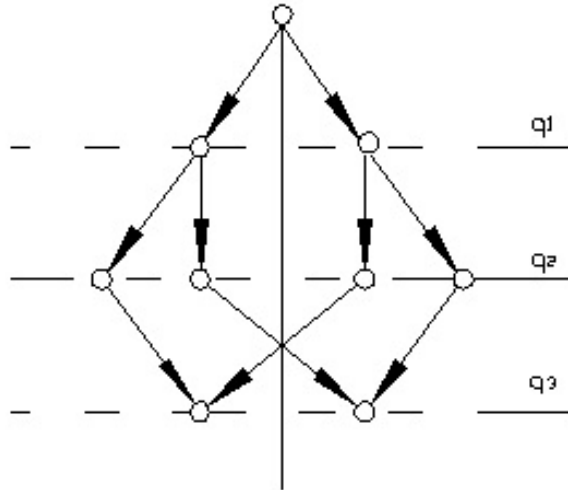


Рис.Д.2. Граф вибору можливих розв'язків ЗЗК маніпулятора

Якщо маніпулятор ПР має кількість ступенів свободи, що є більшою ніж у розглянутому варіанті (4 ступені), відповідно збільшується кількість можливих розв'язків. В такому випадку застосовують залежність виду:

$$\Gamma_{j430} = \Gamma_{j4}(q). \quad (\text{Д.6})$$

В основі розв'язку ЗЗК маніпулятора ПР наближеними методами лежить численний розв'язок відповідних рівнянь зв'язку:

$$X_{i30} = X_i(q). \quad (\text{Д.7})$$

Розв'язок ЗЗК маніпулятора можна виконати мінімізувавши функціонал розугодження:

$$I^2(Q) = |X_{30} - X(Q)|^2, \quad (\text{Д.8})$$

де X_{30} – вектор положення у КС $0_0x_0y_0z_0$;

$X(Q)$ – вектор положення в узагальнених (лагранжевих) координатах, що функціонально залежить від значення вектору узагальнених координат $Q = [q_1, q_2, \dots, q_i]^T, i = 1, 2, 3, \dots, n$ [35, 41].

На наступному етапі проводиться мінімізація виразу Д.7 градієнтним методом, із забезпеченням заданого кроку. Для векторного простору, що включає усі допустимі значення Q узагальнених координат вибираються

можливі напрямки і крок зміни вектору Q . При цьому зберігається умова $Q \in Q$. Далі будується послідовність $Q^{[0]}, Q^{[1]}, \dots, Q^{[k]}, \dots, Q^{[m]}$, що є мінімізуючою для функціоналу $I^2(Q)$:

$$I^2(Q^{[0]}) > I^2(Q^{[1]}) > \dots > I^2(Q^{[k]}) > I^2(Q^{[m]}), \quad (Д.9)$$

Отримані залежності задаються із визначення координат вектору градієнту $\partial I^2(Q^{[0]})/\partial q_i$ $i = 1, 2, \dots, n$.

Перший крок ітерації $q_i^{[0]}$, $i = 1, 2, \dots, n$ потребує вибору напрямків $\Delta q_i^{[1]}$, що забезпечують отримання переважно від'ємних значень вектору градієнту.

На 2-му та наступних кроках ітерації визначають величину $I^2(Q^{[k]})$, шляхом приросту $\Delta q_i^{[k]}$, та перевіряють виконання послідовності. Величину кроку $\Delta q_i^{[k]}$ змінюють із зменшенням модулю градієнту.

Якщо виникають умови, при яких визначення градієнту функціоналу є неможливим або складним завданням, необхідно здійснити перехід до кінцевих різниць $\Delta I^2(Q)/\Delta q_i$. В цьому випадку кожна координата змінюється по чергово, тоді кожна ітерація виконується за n кроків.

При розв'язку ЗЗК наближеними методами часто застосовується *метод Ньютона*. В його основі лежить представлення нелінійних рівнянь зв'язків у лінійному вигляді. Для цього необхідно задавати початкове значення координат $q_i^{[j]}$, на кожному j -тому кроці ітерації у процесі розв'язку лінійних рівнянь. Це дозволяє знайти наступне значення координат $q_i^{[j+1]}$, що застосовується як початкове для $(j+1)$ -го кроку ітерації.

Лінійне наближення рівнянь зв'язку за методом Ньютона має вигляд:

$$X(q^{[j]}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial X(Q)^{[j]}}{\partial q_i} (q_i^{[j+1]} - q_i^{[j]}) = X_{zd}. \quad (Д.10)$$

Для прикладу наведеному на рис. Д.1 (ПР, що працює у циліндричній полярній системі координат), зі збереженням вказаних початкових умов і кінцевого положення виконуючого пристрою, для застосування методу Ньютона доцільною є заміна першої координати.

Таким чином, врахувавши, що $q_1 = \sin \theta_z$, тобто $q_1^{[0]} = \sin \theta_z = 0,707$ можна задати матрицю:

$$X_{zd} = \begin{bmatrix} C_{xz} \\ C_{yz} \\ C_{z1} \end{bmatrix}; \quad X(Q) = \begin{bmatrix} \ell_{x2} \cos \theta_z \\ \ell_{x2} \sin \theta_z \\ \ell_{z1} \end{bmatrix}$$

Лінійне наближення рівняння зв'язку для маніпулятора можна відобразити залежностями виду:

$$\begin{bmatrix} \ell_{x2}^{[j]} \cos \theta_z^{[j]} \\ \ell_{x2}^{[j]} \sin \theta_z^{[j]} \\ \ell_{z1}^{[j]} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ell_{x2}^{[j]} \operatorname{tg} \theta_z^{[j]} \\ \ell_{x2}^{[j]} \\ 0 \end{bmatrix} \left(\sin \theta_z^{[j+1]} - \sin \theta_z^{[j]} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left(\ell_{z1}^{[j+1]} - \ell_{z1}^{[j]} \right) + \begin{bmatrix} \cos \theta_z^{[j]} \\ \sin \theta_z^{[j]} \\ 0 \end{bmatrix} \left(\ell_{x2}^{[j+1]} - \ell_{x2}^{[j]} \right) = \begin{bmatrix} C_{x3\partial} \\ C_{y3\partial} \\ C_{z3\partial} \end{bmatrix} \quad (\text{Д.11})$$

Залежність (Д.11) можна вирішити відносно $q_i^{[j+1]}$ і $q_3^{[j+1]}$ ($q_2 = \text{const}$).

Після перетворень, рівняння системи можна записати у вигляді:

$$\sin \theta_z^{[j+1]} = \sin \theta_z^{[j]} - \frac{C_{x3\partial}}{(\ell_{x2}^{[j]} \operatorname{tg} \theta_z^{[j]})} + \frac{\cos \theta_z^{[j]} \ell_{x2}^{[j+1]}}{(\ell_{x2}^{[j]} \operatorname{tg} \theta_z^{[j]})}, \quad (\text{Д.12})$$

$$\ell_{x2}^{[j+1]} = \frac{C_{y3\partial}}{\sin \theta_z^{[j]}} + \frac{\ell_{x2}^{[j]} \sin \theta_z^{[j+1]}}{\sin \theta_z^{[j]}} + \ell_{x2}^{[j]}.$$

Далі необхідно ввести відповідні позначення:

$$A^{[j]} = C_{y3\partial} / \sin \theta_z^{[j]} + \ell_{x2}^{[j]};$$

$$B^{[j]} = \ell_{x2}^{[j]} / \sin \theta_z^{[j]};$$

$$C^{[j]} = \sin \theta_z^{[j]} - C_{x3\partial} / (\ell_{x2}^{[j]} \operatorname{tg} \theta_z^{[j]});$$

$$D^{[j]} = \cos \theta_z^{[j]} / (\ell_{x2}^{[j]} \operatorname{tg} \theta_z^{[j]}).$$

В результаті чого, рівняння системи будуть мати вигляд:

$$q_3^{[j+1]} = \ell_{x2}^{[j+1]} = \frac{(A^{[j]} - B^{[j]} C^{[j]})}{(1 + B^{[j]} D^{[j]})}, \quad (\text{Д.13})$$

$$q_1^{[j+1]} = \sin \theta_z^{[j+1]} = C^{[j]} + D^{[j]} \ell_{x2}^{[j+1]}.$$

Іншим способом наближеного розрахунку ЗЗК є застосування *методу розрахунку приростів узагальнених координат*. Приріст узагальнених координат можна знайти із виразу:

$$dR_0 = \sum_{j=1}^i U_i^j R_i dq_i = \sum_{j=1}^i \frac{\partial \prod_{j=1}^i T_{j(j+1)} R_i dq_i}{\partial q_i}; \quad (\text{Д.14})$$

де $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, i$.

Отримана система лінійних рівнянь розв'язується відносно dq_i по заданому приросту вектора dR_0 .

Під час практичних розрахунків, розв'язок ЗЗК проводиться комбінованим способом. Потрібно враховувати, що метод Ньютону може мати відсутність збіжності при значному відхиленні виконуючого пристрою маніпулятора від заданого положення. В такому випадку, більш доцільним є застосування градієнтного методу. В той же час, метод

Ньютона дає гарну збіжність при незначному відхиленні виконуючого пристрою маніпулятору від заданого положення.

Розв'язок ЗЗК методом приросту узагальнених координат доцільно застосовувати при незначних змінах положення виконуючого пристрою маніпулятору у просторі [3, 25, 41].

Дані методи придатні для ПР основа яких є нерухомо закріплена та для мобільних зразків, після прив'язки їх абсолютної системи координат.

У завданнях проектування та налагоджування роботи ПР значна увага приділяється обмеженням, що накладаються на робочі координати, при розробці законів зміни координат приводів рухомих ланок маніпулятору та їх зв'язків із декартовими координатами.

Для векторного простору Q задаються певні обмеження, що характеризуються:

- конструктивними обмеженнями по кожному ступеню свободи маніпулятору $q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max}$, $i = 1, 2, \dots, n$;
- обмеженнями, що виникають при виборі способу маніпулювання об'єктом у робочій зоні;
- обмеження, що виникають при виборі умов обходу завад у робочій зоні маніпулятору.

Для узагальнених координат необхідне збереження умови $Q \in Q$, при якій вектор узагальнених координат знаходиться у векторному просторі допустимих значень.

ДИНАМІКА МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПР. ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ. СКЛАДАННЯ РІВНЯНЬ РУХУ МАНІПУЛЯТОРА У ЗАГАЛЬНИХ КООРДИНАТАХ

Динамічні властивості механічної системи являють собою комплекс узагальнених закономірностей функціонування та взаємозв'язків її рухомих елементів. При розгляді ПР як МС, його динамічний аналіз можна провести шляхом складання рівняння руху маніпулятора. Для цього доцільно застосувати спосіб складання рівнянь руху ланок МС із використанням рівнянь Лагранжа II роду.

Рівняння Лагранжа II роду, для загальних умов, описуються виразом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = N_i \quad (E.1)$$

де $L = W_k - W_n$ – функція Лагранжа;

W_k – кінематична енергія системи;

W_n – потенційна енергія системи;

q_i – i -та узагальнена координата;

$\dot{q}_i$ – швидкість i -тої узагальненої координати;

N_i – i -та узагальнена сила.

Алгоритм складання рівнянь руху складається із наступних кроків:

1) Визначаються узагальнені сили механічної системи що містить стаціонарні геометричні зв'язки із n ступенями свободи, що знаходяться під дією сил $F_j (j=1,2,...,m)$, прикладених у m точках.

2) За допомогою методів координатних перетворень задаються рівняння зв'язку для кожної j -тої точки прикладання сили, що можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} R_{xj} &= f_{xj}(q_1, q_2, \dots, q_i); \\ R_{yj} &= f_{yj}(q_1, q_2, \dots, q_i); \\ R_{zj} &= f_{zj}(q_1, q_2, \dots, q_i). \end{aligned} \quad (E.2)$$

3) Визначаються варіації узагальнених координат. Повні диференціали рівнянь зв'язку (функції f_{xj}, f_{yj}, f_{zj}) від незалежних змінних $q_1, q_2, \dots, q_i$ відповідають можливим зміщенням точок j при максимально малих змінах (варіаціях) узагальнених координат $\delta q_1, \delta q_2, \dots, \delta q_n$. При цьому, можливим переміщенням розглянутої системи можна вважати будь-яке доступне елементарне переміщення, що є можливим у даний момент часу, під дією зв'язків що

накладені на механічну систему. Отримані закономірності можна відобразити системою рівнянь:

$$\begin{aligned}\delta R_{xj} &= \frac{\partial f_{xj}}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial f_{xj}}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\partial f_{xj}}{\partial q_n} \delta q_n; \\ \delta R_{yj} &= \frac{\partial f_{yj}}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial f_{yj}}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\partial f_{yj}}{\partial q_n} \delta q_n; \\ \delta R_{zj} &= \frac{\partial f_{zj}}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial f_{zj}}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\partial f_{zj}}{\partial q_n} \delta q_n.\end{aligned}\tag{E.3}$$

4) Визначаються проекції сили F_j у j -тій точці на осях координат F_{xj} , F_{yj} , F_{zj} . В такому випадку, елементарна робота цієї сили в узагальнених (лагранжевих) координатах буде виражатися рівнянням виду:

$$\begin{aligned}\delta A_j &= |F_j| |\delta R(t)| \cos \gamma_j = F_{xj} \delta R_{xj} + F_{yj} \delta R_{yj} + F_{zj} \delta R_{zj} = \\ &= \left(F_{xj} \frac{\partial f_{xj}}{\partial q_1} + F_{yj} \frac{\partial f_{yj}}{\partial q_1} + F_{zj} \frac{\partial f_{zj}}{\partial q_1} \right) \delta q_1 + \left(F_{xj} \frac{\partial f_{xj}}{\partial q_2} + F_{yj} \frac{\partial f_{yj}}{\partial q_2} + F_{zj} \frac{\partial f_{zj}}{\partial q_2} \right) \delta q_2 + \\ &+ \left(F_{xj} \frac{\partial f_{xj}}{\partial q_i} + F_{yj} \frac{\partial f_{yj}}{\partial q_i} + F_{zj} \frac{\partial f_{zj}}{\partial q_i} \right) \delta q_i, i = 1, 2, \dots, 3, n.\end{aligned}\tag{E.4}$$

де δR_j – вектор елементарного переміщення ланки у j -тій точці або варіація радіус-вектору $\delta R_{(j)}$ j -ї точки у вибраній системі координат;

γ_j – кут між вектором сили F_j , що прикладена до j -ї точки, і вектором $\delta R_{(j)}$.

5) Проводиться підсумовування робіт усіх елементарних сил, що присутні в механічній системі. Сума робіт виражається в узагальнених координатах, та знаходиться із виразу:

$$A = \sum_{j=1}^m \delta A_j = N_1 \delta q_1 + N_2 \delta q_2 + \dots + N_i \delta q_i + \dots + N_n \delta q_n,\tag{E.5}$$

Узагальнену (результуючу) силу за i -ю координатою можна знайти із залежності виду [3, 25, 41]:

$$N_i = \sum_{j=1}^m \left(F_{xj} \frac{\partial f_{xj}}{\partial q_i} + F_{yj} \frac{\partial f_{yj}}{\partial q_i} + F_{zj} \frac{\partial f_{zj}}{\partial q_i} \right) = \sum_{j=1}^m \left(F_j \frac{\partial R_{(j)}}{\partial q_i} \right).\tag{E.6}$$

Існує альтернативний спосіб визначення узагальнених сил, що враховує варіацію тільки однієї узагальненої координати при переміщенні. При цьому, варіація однієї із узагальнених координат не є рівною 0 ($0 \delta q_k \neq 0$), а для усіх інших – виконується умова $\delta q_i = 0 (i \neq k)$.

Для даного випадку можна задати рівняння, що визначає суму елементарних робіт усіх сил для переміщення $\sum_{j=1}^m \delta A_j$ (вираз E.7). Це дозволяє частково спростити математичні залежності.

$$N_k = \frac{\sum_{j=1}^m \delta A_j'}{\delta q_k} \quad (E.7)$$

При розрахунку динамічних властивостей МС потрібно враховувати, що розмірність узагальненої сили не співпадає із її абсолютною розмірністю. Відповідно до рівняння Лагранжа, рівновага МС в узагальнених координатах забезпечується при зрівноваженні усіх узагальнених сил. Дана умова виконується при рівності нулю сукупності усіх елементарних робіт та можливих переміщень (ідеальні зв'язки).

5) Важливою умовою складання рівнянь руху є визначення кінетичної енергії (КЕ) як функції узагальнених координат. Кінетична енергія МС дорівнює сукупності КЕ її окремих ланок:

$$W_k = \sum W_{ki}, \quad (E.8)$$

При розгляді просторових рухів ланки МС, її сукупну кінетичну енергію можна представити як суму КЕ поступально рухомого центру мас та КЕ обертального руху ланки навколо центру мас:

$$W_{ki} = \frac{m_i V_i^2}{2} + \frac{I_i \omega_i^2}{2}. \quad (E.9)$$

де m_i – маса i -тої ланки;

V_i – лінійна швидкість центру мас;

J_i – момент інерції i -тої ланки відносно осі обертання, що співпадає із центром мас;

ω_i – абсолютна кутова швидкість обертання навколо центральної осі.

Для вибраної точки i -тої ланки МС що зв'язана із початком координат абсолютної системи $Oxyz$, має масу dm_i , та описується радіус-вектором R , кінетична енергія буде визначатися співвідношенням виду:

$$dW_{ki} = \frac{1}{2} |\dot{R}|^2 dm_i, \quad (E.10)$$

$$R = \sum_{j=1}^i U_j^i R_i \dot{q}_j, i = 1, 2, \dots, i.$$

Для застосування виразу E.10 квадрат модулю вектору швидкості можна задати через скалярний добуток векторів швидкості $|\dot{R}|^2 = \dot{R} \cdot \dot{R}$:

$$\dot{R} \cdot \dot{R} = \text{tr}(\dot{R} \cdot \dot{R}^T) \quad (E.11)$$

де tr – слід матриці, що характеризує рівний суму її діагональних

членів із однаковими індексами $tr(A) = \sum_{k=1}^m (a_{kk})$

Таким чином, R^T – матриця швидкості після трансформації, може бути задана співвідношенням:

$$\dot{R}^T = \sum_{\ell=1}^i U_i^\ell R_i^T \dot{q}_\ell = \sum_{\ell=1}^i R_i^T (U_i^\ell)^T \dot{q}_\ell. \quad (\text{E.12})$$

Зробивши заміну R^T , отримаємо вираз:

$$|\dot{R}|^2 = \sum_{j=1}^i \sum_{\ell=1}^i \text{tr}(U_i^j R_i R_i^T (U_i^\ell)^T) \dot{q}_j \dot{q}_\ell. \quad (\text{E.13})$$

Рівняння для визначення кінетичної енергії i -тої ланки механічної системи буде мати вигляд:

$$W_{ki} = \frac{1}{2} \int_{mi} |\dot{R}|^2 dm_i. \quad (\text{E.14})$$

Підставивши сюди вираз для $|\dot{R}|^2$ отримаємо:

$$W_{ki} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i \sum_{\ell=1}^i \text{tr}(U_i^j H_i (U_i^\ell)^T) \dot{q}_j \dot{q}_\ell. \quad (\text{E.15})$$

де $H_i = H_i = \int_{mi} R_i R_i^T dm_i$ – матриця інерції i -тої ланки.

В результаті, можна прийти до співвідношення, що характеризує сукупну кінетичну енергію системи:

$$W_{ki} = \sum_{i=1}^i W_{ki} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^i \sum_{\ell=1}^i \text{tr}(U_i^j H_i (U_i^\ell)^T) \dot{q}_j \dot{q}_\ell. \quad (\text{E.15})$$

б) Наступним етапом є визначення потенційної енергії механічної системи W_n . Потенційна енергія яка створюється силами ваги ланок МС для i -тої ланки, що характеризується масою m_i , буде визначатися рівнянням:

$$W_{ni} = m_i g \Delta h_i, \quad (\text{E.16})$$

де g – прискорення вільного падіння;

Δh_i – висота підйому центра мас i -тої ланки.

Необхідним є врахування дії сил механізмів що урівноважують сили ваги. Наприклад, для пружних елементів, потенційна енергія сили пружності буде визначатися співвідношенням:

$$W_{n,np} = \frac{C_\phi \Delta \phi^2}{2}, \quad (\text{E.17})$$

де C_ϕ – постійна пружини;

$\Delta \phi$ – кут її закручення.

Потенційна енергія маніпулятора промислового роботу, у полі сил земного тяжіння, при умові що центральна вісь Oz напрямлена вертикально, визначається співвідношенням:

$$W_n = -\sum_{i=1}^n m_i G^T \Gamma_i R_{i\text{цм}} \quad (\text{E.18})$$

де $G^T = [0, 0, g, 0]^T$ – вектор прискорення вільного падіння;

$R_{i\text{цм}}$ – радіус-вектор центра мас i -тої ланки у зв'язаній з ним системі координат.

7) На заключному кроці проводиться підстановка значень, знайдених на попередніх етапах розрахунку, у загальне рівняння Лагранжа. Провівши диференціювання, можна отримати рівняння Лагранжа II роду для маніпулятора ПР у явному вигляді (при $k = 1, 2, \dots, n$):

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^i \sum_{\ell=1}^i \text{tr}(U_i^j H_i (U_i^\ell)^T) \ddot{q}_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{\ell=1}^i \text{tr}(U_i^{j\ell} H_i (U_i^k)^T) \dot{q}_j \dot{q}_\ell \\ - \sum_{i=1}^n m_i G^T \Gamma_i R_{i\text{цм}} = N_k \end{aligned} \quad (\text{E.19})$$

Механічна система маніпулятора ПР може вважатися рівноважною (в узагальнених координатах) при рівності нулю усіх її визначених узагальнених сил. В такому випадку, сума усіх елементарних робіт на усіх можливих переміщеннях повинна також буде дорівнювати нульовому значенню [25, 41].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизация физического эксперимента: Учебное пособие для физ. спец. вузов / Ю.Ф. Певчев, К.Г. Финогенов, М.: Энергоатомиздат, 1986. – 367 с.
2. Андрианов Ю.Д., Глейзер Л.Я. Игнатов М. Б. и др. Управляющие системы промышленных роботов, М.: Машиностроение . – 1984. – 288 с.
3. Ахrameев Ж. П., Дмитриева Н. Д. и др. Робототехника и гибкие автоматизированные производства, в 9-ти книгах, кн. 2 «Приводы робототехнических систем», кн. 3 «Системы управления промышленными роботами». М.: ВШ. – 1986. – 350 с.
4. Бабич Н.П., Жуков И.А. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования: учебное пособие. Киев: Изд.-во «МК-Пресс», 2004. – 576 с.
5. Волков О.І., Величко О.М., Хімічева Г.І. та ін. Метрологія: теорія і нормативне забезпечення: Навч. посіб. За заг. ред. А.С. Зенкіна. – К.: Вища школа, 2008. –335 с.
6. Вощинський В.С. Інформаційно-вимірювальні комплекси: Конспект лекцій. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 337 с.
7. Галай М.В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматичного керування: навчальний посібник. – Полтава.: редакційно-видавничий відділ ПолтНТУ, 2002. – 220 с.
8. Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы: В 2 т.: Учеб – СПб.: Изд.-во Крисмас+, 1998. – 732 с.
9. Грановский В.А. Системная метрология: метрологические системы и метрология систем / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – СПб.: 1999. – 360 с.
10. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник у 2 т. /М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик, за ред. Б.Стадника. – Львів: Видавництво національного університету «Львівська політехніка». 2005. – т.1. Основи метрології. – 532 с.
11. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник у 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик, за ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво

- національного університету «Львівська політехніка». 2005. – т.2. Вимірювальна техніка. – 656 с.
12. Закон України про метрологію та метрологічну діяльність. – К.: №111/98-ВР, 11.02.1998.
 13. Зенкін А.С. Основи метрологічного забезпечення / А.С. Зенкін, В.П. Куценко, Г.І. Хімічева, М.Ф. Трегубов. – Донецьк: ІПШ «Наука і освіта», 2014. – 324 с.
 14. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учебное пособие для вузов/Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скурогов. Под общ. ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
 15. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы. Справочник, М., Машиностроение, 1985. – 367 с.
 16. Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств: учеб. Пособие для студентов высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.
 17. Метрологическое обеспечение измерительных информационных систем (теория, методология, организация)/Е.Т. Удовиченко, А.А. Брагин, А.Л. Семенюк и др. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 192 с.
 18. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С.Поліщук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко. – Львів: Видав. «Львівська політехніка», 2012. – 544 с.
 19. Микропроцессорные системы управления в робототехнике /Под ред. М. Макарова. М.: Наука. – 1986. – 217 с.
 20. Моделювання та оптимізація систем: підручник / В.М. Дубовий, Р.Н. Кветний, О.І. Михальов, Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017. – 804 с.
 21. Москаленко В.В. Современные системы автоматизированного электропривода. – М.: Высшая школа. 1990. – 96 с.
 22. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.
 23. Обозовський С.С. Інформаційно-вимірювальна техніка: Методологічні питання теорії вимірювань. – К.: ІСДО, 1993. – 424 с.
 24. Основи метрології та електричні вимірювання: Навч. посіб. / М.М. Дорожовець, Р.М. Івах, В.П. Мотало та ін.; За заг.ред. Б.І. Стадника. – Львів: «Львівська політехніка», 2011. – 373 с.

25. Остриров В.Н., Сафонов Ю.М., Маслова Н.К. Механика электроприводов промышленных роботов, М., издательство МЭИ, 1988. – 67 с.
26. Паламар М.І. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів/М.І. Паламар, М.О. Стрембіцький, А.М. Паламар – Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Полюя – 2018. – 150 с.
27. Періодична повірка засобів вимірювальної техніки: Навч.посіб./ О.М. Величко, Л.В. Коломієць, Т.Б. Гордієнко. – Одеса: ОДАТР, 2016. – 217 с.
28. Поджаренко В.О. Основы микропроцессорной техники. Навчальний посібник. /В.О. Поджаренко, В.Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов – Вінниця: ВНТУ, 2006. - 226 с.
29. Руководство по выражению неопределенности измерения / Под ред. проф. Слаева В.А.; Перевод и публикация ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – СПб.: «ООО Типография ЛИТАС+», 1999. – 126 с.
30. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
31. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учебное пособие для вузов. – М.: Логос, 2001. – 408 с.
32. Точки Р.Дж. Цифровые системы. Теория и практика / Р.Дж. Точки, Н.С. Уидмер; пер. с англ. М. В. Бойко, А.В. Высоцкого, С.А. Огородника. [8-е изд.]. Москва: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 1024 с.
33. Х. Харт. Введение в измерительную технику: Пер. с нем. – М.: Мир, 1999. – 391 с.
34. Хімічева Г.І. та ін. Інформаційні та вимірювальні системи: теорія і практика. Посібник. /Г.І. Хімічева, О.М.Величко, О.В. Іванченко, М.А. Долгов, А.С. Зенкін. – К.: Основа, 2006. – 216 с.
35. Холготин Ю. А. Приводы и элементы систем управления промышленными роботами и манипуляторами, Л., ЛЭТИ, 1982, – 314 с.
36. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 357 с.
37. Цапенко М.П., Кнорринг В.Г. Очерки современных измерений/ Новосибирский гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 1994. – 205 с.
38. Чернявский Е.А. и др. Измерительно-вычислительные средства автоматизации производственных процессов: Учебное пособие для вузов / Е.А. Чернявский, Д.Д. Недосекин, В.В. Алексеев, – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1998. – 272 с.

39. Чеховський С.А. Математичне моделювання фізичних процесів. Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 174с.
40. Чумаченко І.В., Кошовий М.Д., Лопатин В.В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання: Навчальний посібник. – Харків: Нац. аеро-космічний ун-т «ХАІ», 2001. – 277 с.
41. Шульга О.В. Конспект лекцій з дисципліни «Електропривод і автоматизація робіт та маніпуляторів» для студентів спеціальності 7.092203 «Електротехнічні системи автоматизації та електропривод» усіх форм навчання. /Шульга О.В. – Полтава: ПНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2012. – 104 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Защепкіна Наталія Миколаївна
Шульга Олександр Васильович
Наконечний Олександр Анатолійович

Метрологічне забезпечення інформаційно- вимірювальних систем

Навчальний посібник

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК №5354 від 25.05.2017 р.
просп. Перемоги, 37
м. Київ, 03056

Підписано до друку 27.08.2021
Наклад 100 екземплярів

Видавництво «Ультрадрук»
вул. Братська, 6
м. Київ, 03056
Тел.: (044) 492-20-02