

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

І.М. Бондаренко, О.В. Глухов, О.О. Кравчук

ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

Навчальний посібник
для студентів спеціальності
«Електроніка»

РЕКОМЕНДОВАНО

Вченою радою університету.

Протокол № 12 від 30.11.2018 р.

Харків 2019

УДК 621. 396.67

Бондаренко І.М., Глухов О.В., Кравчук О.О. Електронні системи:
Навч. посібник для студентів ВНЗ. – Харків: ХНУРЕ. – 2019. – 240 с.

ISBN 978-966-659-272-2

Цей навчальний посібник присвячений основам теорії електронних систем. Зокрема, розглянуто класифікацію інформаційних систем, класифікацію елементів систем автоматичного управління та контролю, інформаційні системи реального часу, архітектури обчислювальних систем, моделювання та часове означення детермінованих сигналів електронних систем.

Рекомендований як навчальний посібник для студентів усіх форм навчання спеціальності «Електроніка».

Рецензенти:

О.Ю. Панченко, д-р. фіз.-мат. наук, проф., завідувач кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів Харківського національного університету радіоелектроніки;

Ю.В. Прокопенко, д-р. фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник відділу Радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики і електроніки ім. О.Я Усикова НАН України.

Іл.: 72. Бібліогр. наймен.: 60.

ISBN 978-966-659-272-2 ©

І.М. Бондаренко,
О.В. Глухов,
О.О. Кравчук, 2019

ЗМІСТ

Перелік умовних позначок	7
ВСТУП.....	8
1 МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ.....	15
1.1 Предмет курсу «Електронні системи»	18
1.2 Узагальнена структура ІВС.....	18
1.3 Класифікація інформаційних систем.....	21
2 КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І УПРАВЛІННЯ (АКУ)	33
2.1 Об'єкти управління і види впливу на них	33
2.2 Поняття про елемент системи.....	34
2.3 Приклади автоматичних систем управління і контролю.	
Функціональні схеми систем.....	35
2.4 Класифікація елементів систем автоматичного управління і контролю	43
2.5 Узагальнена функціональна схема системи автоматичного управління	47
2.6 Уніфікація елементів систем автоматичного управління і контролю	50
3 КВАНТУВАННЯ СИГНАЛІВ У ЧАСІ.....	52
3.1 Визначення дискретизації сигналів у часі	52
3.2 Вибір кроку квантування в часі.....	52
3.3 Відтворення безперервного сигналу	56
4 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	60
4.1 Динамічні характеристики	68
4.2 Структурні схеми приладів для вимірювання неелектричних величин	71

4.3 Послідовне з'єднання перетворювачів	71
5 ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ КОРЕКЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК	86
5.1 Призначення і класифікація коригувальних елементів	86
5.2 Коригувальні елементи постійного струму.....	91
5.3 Коригувальні елементи змінного струму	108
5.4 Нелінійні коригувальні елементи	109
6 ОРГАНІЗАЦІЯ І ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ ДАНИХ І УПРАВЛІННЯ.....	112
6.1 Логічна структура мікропроцесорної системи.....	112
6.2 Логічна структура універсального програмованого контролера ...	115
6.3 Логічна структура розвиненої мікропроцесорної системи	118
6.4 Інтерфейс мікропроцесорів	119
6.5 Інформаційні магістралі	120
6.6 Магістраль адрес.....	123
6.7 Магістраль даних.....	129
6.8 Магістраль управління	124
6.9 Перетворювачі інтерфейсів.....	126
6.10 Формат послідовних інформаційних сигналів.....	127
6.11 Схеми і принцип роботи контролера послідовно-паралельного інтерфейсу	128
6.12 Прийом-передача послідовних інформаційних сигналів	131
6.13 Логічна структура мікропроцесорної системи на основі комплекту ВІС секційного мікропроцесора	135
6.14 Комплект ВІС для побудови електронної системи.....	140
6.15 Області застосування мікропроцесорних обчислювальних засобів	143
6.16 Вбудовані системи контролю та управління.....	146
6.17 Локальні системи накопичення та обробки інформації	147
6.18 Розподілені високопродуктивні системи паралельних обчислень....	148

7 ПРІНСТОНСЬКА І ГАРВАРДСЬКА АРХІТЕКТУРИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	150
8 СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ	156
8.1 Одноканальні системи.....	156
8.1.1 Пристрій вибірки – зберігання.....	157
8.2 Багатоканальні системи.....	159
8.3 Вибір АЦП і системи збору даних.....	162
8.3.1 АЦП, що випускаються серійно і системи збору даних	162
8.3.2 Вибір АЦП	163
8.3.3 Рекомендації по використанню АЦП	167
9 ПРИНЦИПИ ОБМІНУ ІНФОРМАЦІЄЮ.....	168
9.1 Послідовний інтерфейс	168
9.1.1 Квитування встановлення зв'язку	169
9.1.2 Асинхронний метод передачі.....	170
9.2 Декодування послідовних потоків двійкових розрядів і виявлення помилок	172
9.2.1 Помилки парності	173
9.2.2 Помилки через перезапис	173
9.2.3 Помилки кадрування переданих даних	174
9.3 Особливості ліній передачі	176
9.4 Лінійні формувачі і приймачі	177
9.4.1 Одноканальний (1-Wire) інтерфейс	178
9.4.2 Симетричний диференціальний інтерфейс	179
9.4.3 Несиметричний диференціальний інтерфейс	180
9.5 Збір даних при використанні послідовного інтерфейсу.....	180
9.5.1 Волоконно-оптичні лінії передачі.....	182
9.6 Інтерфейсні модулі введення-виведення даних.....	184
9.6.1 Типова структура модуля збору даних	184
9.6.2 Проходження сигналів при введенні даних	185

9.7 Введення-виведення даних в персональний комп'ютер	188
9.7.1 Налаштування параметрів плати збору даних і драйвери введення даних в комп'ютер	188
10 ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ	192
10.1 Багатопроцесорні архітектури	196
10.2 Багатопроцесорні архітектури та промислові системи	198
10.2.1 Індустріальні застосування	200
11 ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ	202
11.1 Призначення і типи	202
11.2 Системна сумісність	204
11.3 Структурна організація	205
12 СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ	207
13 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧАСОВЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ	209
13.1 Спектри дискретних сигналів	212
13.2 Спектри одиночних і періодичних імпульсних послідовностей	215
14 ВИБІР ЧАСТОТНОЇ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ	219
14.1 Поняття про ширину спектра і інтервали кореляції	221
Словник термінів	225
Список використаної (рекомендованої) літератури	228

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК

АІМ – амплітудно-імпульсна модуляція
АМ – амплітудна модуляція
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВІС – велика інтегральна схема
ВК – вимірювальний канал
ВКП – взаємкореляційний пристрій
ЕОМ – електронна обчислювальна машина
ЕРС – електрорушійна сила
ЕС – електронна система
ІКМ – імпульсно-кодова модуляція
КОЕС – комп’ютеризована оптико-електронна система
КУД – кінцеве устаткування даних
СПД – система передачі даних
ТЧ – тональна частота
ФІМ – фазово-імпульсна модуляція
ФМ – фазова модуляція
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ЧІМ – частотно-імпульсна модуляція
ЧМ – частотна модуляція
ЧРК – часовий розподіл каналів
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Слово *система* походить від грецького «складений» і пояснюється як група різних предметів, які об'єднані так, що утворюють єдине ціле і функціонують узгоджено і підпорядковані єдиній формі управління. Це визначення може бути застосовано і до електронної системи (ЕС) в її найзагальнішому вигляді: сукупність електронних компонентів, пов'язаних між собою, які діють як одне ціле завдяки спеціальним сигналам управління і виконують задану функцію.

Іншими словами: електронна система – це будь-який електронний вузол, блок, прилад або комплекс, що виконує обробку інформації. Таким чином, будь-який пристрій від однокаскадного підсилювача до складної мікропроцесорної системи може розглядатися як електронна система. Але, між мікропроцесорною системою і однокаскадним підсилювачем є істотна відмінність в плані опису деталей кожної з систем. Мікропроцесорну систему у вигляді компонент опорів, конденсаторів, транзисторів, якими описується підсилювач, описати практично неможливо. Тому, для опису такої системи необхідно виконати угруповання ряду компонент у функціональні блоки.

Такий функціональний блок має назву *чорний ящик* або *підсистема*.

Електронна підсистема – це частина системи, до складу якої входять більш ніж один елемент (проміжний елемент поділу системи) і, яка має певне функціональне призначення нижчого рівня, ніж система.

Узагальнена електронна система, призначена для обробки вхідних і видачі вихідних сигналів, наведена на рис. 1.

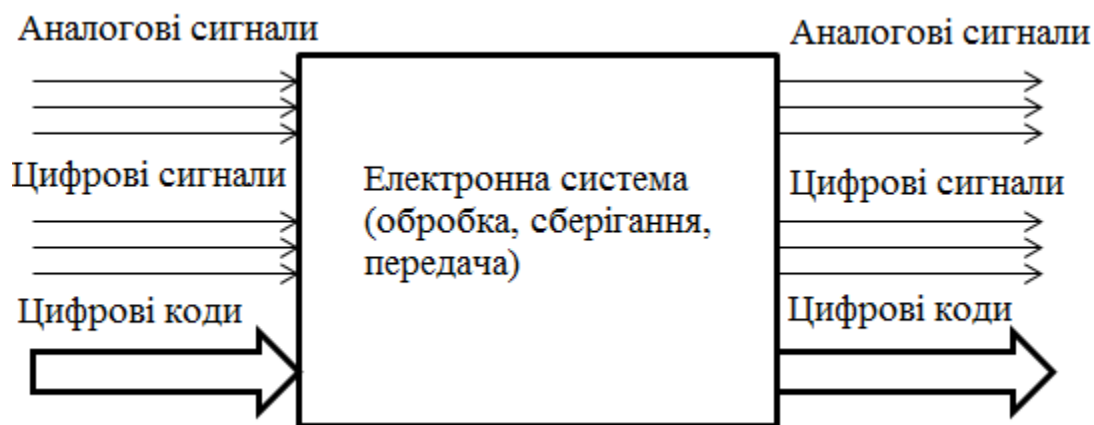


Рисунок 1 – Узагальнена схема електронної системи як чорний ящик

Елемент електронної системи – це неподільна частина системи. Часто виникає проблема одночасно мати інформацію про сотні або тисячі одно- і (або) різнорідних фізичних величин, яку потрібно отримати без участі людини, використовуючи технічні засоби, які є досить складними автоматичними системами.

Під автоматизацією розуміють використання пристрою, який за заданою програмою без участі людини виконує всі операції в отриманні, перетворенні, передачі та розподілі енергії, матеріалів й інформації.

Автоматизована електронна система – це сукупність керованого об'єкта й автоматичних пристроїв, в якій частина функцій управління виконує людина (оператор). Автоматична електронна система – це сукупність керованого об'єкта й автоматичних пристроїв, що виконують певне завдання за заданою програмою без участі людини.

За призначенням автоматичні системи підрозділяються на такі класи:

- інформаційно-вимірювальні;
- контролю;
- ідентифікації або розпізнавання образів;
- управління.

Будь-яка система характеризується розв'язуванням нею завданням, швидкодією, гнучкістю і надмірністю.

Завдання – це набір функцій, виконання яких вимагають від електронної системи. Швидкодія – це показник швидкості виконання електронною системою її функцій. Гнучкість – це здатність системи налаштовуватися під різні завдання. Надмірність – це показник ступеня відповідності можливостей системи до розв'язуваної даною системою задачі.

Завдання, які вирішуються ЕС, відображають мету її функціонування. Досягається ця мета за допомогою вирішення конкретних функціональних завдань. *Функціональні завдання* зручно розділити на чотири рівні. *Перший рівень: завдання збору та попередньої обробки інформації.* До них належать:

- квантування аналогових сигналів за часом і рівнем;
- попередня цифрова або аналогова фільтрація сигналів;
- перетворення і обчислення спектрів;
- нормалізація, посилення або ослаблення сигналів;
- зміна рівнів сигналів;
- перетворення струму в напругу.

Другий рівень:

- геометричні перетворення систем координат;
- визначення змінних параметрів вимірюваних процесів;
- спільне розв'язання лінійних і нелінійних систем рівнянь;
- розв'язання систем диференціальних рівнянь;
- інтерполяція і екстраполяція функцій;
- цифро-аналогові перетворення.

Третій рівень: вирішення завдань обробки інформації. До таких завдань належать завдання оптимізації, тобто пошуку екстремумів деякої функції або декількох змінних, на які накладено певні обмеження.

Четвертий рівень: розв'язання задач та подання інформації в зручному для сприйняття оператором вигляді.

Класифікація ЕС. Узагальнені функціональні схеми ЕС і їх блоки. Вхідними та вихідними сигналами електронної системи можуть бути: аналогові

сигнали, поодинокі цифрові сигнали, цифрові коди, послідовності цифрових кодів. Відповідно, системи можуть бути аналоговими, цифровими або комбінованими, тобто аналого-цифровими.

Якщо система аналого-цифрова, то вхідні аналогові сигнали перетворюються в послідовності кодів вибірок за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), а вихідні аналогові сигнали формуються з послідовності кодів вибірок за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Обробка і зберігання інформації виконуються в цифровому вигляді.

За своєю будовою електронні системи поділяють на системи на «жорсткій логіці» і мікропроцесорні системи. Характерною особливістю традиційної цифрової системи на відміну від мікропроцесорної є те, що алгоритми обробки і зберігання інформації в ній жорстко пов'язані зі схемотехнікою системи. Тобто, зміна цих алгоритмів можлива тільки шляхом зміни структури системи, заміни електронних вузлів, що входять в систему, і / або зв'язків між ними. Саме тому традиційна цифрова система часто називається системою на «жорсткій логіці». Будь-яка така система обов'язково є спеціалізованою системою, налаштованою виключно на одну задачу або (рідше) на кілька близьких, задалегідь відомих задач. Це має свої незаперечні переваги.

По-перше, спеціалізована система (на відміну від універсальної) ніколи не має апаратної надмірності, тобто кожен її елемент обов'язково працює на повну потужність (звичайно, якщо ця система розумно спроектована).

По-друге, саме спеціалізована система може забезпечити максимально високу швидкодію, оскільки швидкість виконання алгоритмів обробки інформації визначається в ній тільки швидкодією окремих логічних елементів в обраній схемі. Зокрема, логічні елементи завжди мають максимальну на даний момент швидкодію. Але водночас великим недоліком цифрової системи на «жорсткій логіці» є те, що для кожної нової задачі її необхідно проектувати і виготовляти заново. Цей процес тривалий, дорогий і вимагає високої кваліфікації виконавців.

Шлях подолання цього недоліку досить очевидний: необхідно побудувати таку систему, яка могла б легко адаптуватися під будь-яке завдання, перебудовуватися з одного алгоритму роботи на інший без зміни апаратури. І обирати той чи інший алгоритм шляхом введення в систему додаткової керуючої інформації, програми роботи системи (рис. 2). Тоді система стане універсальною або програмованою, не жорсткою, а гнучкою. Саме це і забезпечує мікропроцесорна система. *Мікропроцесор* – програмно-керований пристрій, призначений для обробки цифрової інформації і керування процесом цієї обробки, виконаний у вигляді однієї (або декількох) інтегральних схем з високим ступенем інтеграції електронних елементів. Зменшення вартості, споживаної потужності і габаритних розмірів, підвищення надійності та продуктивності мікропроцесорів сприяли значному розширенню сфери їхнього використання. Поряд з традиційними обчислювальними системами вони все частіше стали використовуватися в задачах управління та обробки. При цьому перед мікропроцесором постає завдання програмного управління різними периферійними об'єктами в реальному масштабі часу. Спрощена структурна схема мікропроцесорної системи управління має вигляд (рис. 2).

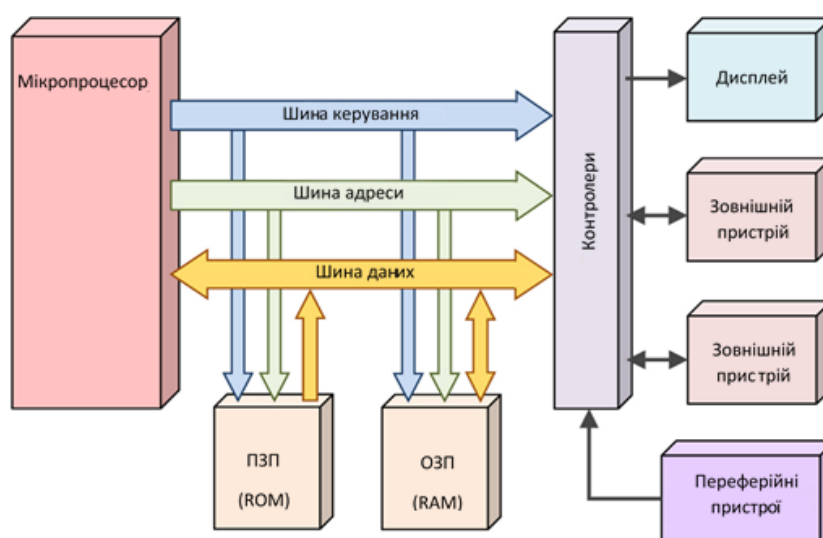


Рисунок 2 – Структурна схема мікропроцесорної системи

На процесор покладається завдання виконання всіх програмних дій, необхідних відповідно до алгоритму роботи пристрою.

У блоці пам'яті зберігаються команди програми функціонування процесора, а також значення констант і змінних величин, що беруть участь в обчисленнях.

Блок введення-виведення виконує функцію з'єднання мікропроцесорної системи з об'єктом управління. Широке використання мікропроцесорної техніки саме для завдань управління призвело до появи на ринку спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв, орієнтованих на подібного роду застосування. Особливістю цих мікросхем є те, що крім власне процесора, на цьому ж кристалі розташована і система введення-виведення, що дозволяє знизити функціональну складність і габаритні розміри мікропроцесорної системи управління. Подібні пристрої називаються мікроконтролерами.

Мікроконтролер – обчислювально-керуючий пристрій, призначений для виконання функцій логічного контролю і управління периферійним обладнанням, виконаний у вигляді однієї великої інтегральної схеми (BIC), що поєднує в собі мікропроцесорне ядро і набір вбудованих пристроїв введення-виведення. У сучасній перетворювальній техніці мікроконтролери виконують не тільки роль безпосереднього управління напівпровідниковим перетворювачем за рахунок вбудованих спеціалізованих периферійних пристроїв, а й роль цифрового регулятора, системи захисту і діагностики, а також системи зв'язку з технологічною мережею високого рівня.

Останнім часом з'явився ряд мікроконтролерів, спеціалізованих для задач управління напівпровідниковими перетворювачами. Їхнє обчислювальне ядро, побудоване, як правило, на базі так званих «процесорів цифрової обробки сигналів», адаптоване на виконання рекурентних поліноміальних алгоритмів цифрового регулювання. Вбудовані периферійні пристрої включають в себе багатоканальні генератори ШІМ-сигналів, аналого-цифрові перетворювачі,

блоки векторних перетворень координат, таймери-лічильники тощо. Прикладами таких пристроїв можуть служити мікроконтролери AVR.

Інформаційні системи, будучи основним інструментом підвищення обґрунтованості управлінських рішень, є складними програмно-апаратними і телекомунікаційними комплексами, що виступають як самостійний об'єкт досліджень. Питання архітектури таких систем і організації управління інформаційним процесом становлять один з головних напрямків даної галузі знань. На цю обставину слід звернути особливу увагу, бо вона відрізняє розуміння предмета «Електронні системи», де головний акцент робиться на управління і застосування методів прикладної інформатики в прикладній електроніці від комп'ютерних дисциплін (Computer Science), предметом яких є архітектура і управління обчислювальними системами.

Даний підручник націлений на ознайомлення студентів з основами побудови електронних систем, що базуються на основі мікроконтролерів/мікропроцесорів та принципами їх роботи.

1 МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Вся продуктивна діяльність людини так чи інакше пов'язана з обробкою інформації. Процес розвитку суспільства невіддільний від становлення все більш повних і ефективних методів обробки інформації. Кожна галузь науки і великою мірою різні галузі діяльності (освіта, економіка, екологія, транспорт, зв'язок, медична діагностика, управління і т. ін.) становлять сукупність ідей і методів, призначених для цілеспрямованої і ефективної обробки цієї інформації, за яку відповідає дана область.

Конкретизація понять "цілеспрямованої і ефективної обробки" сталася під впливом розвитку методів і технічних пристроїв, призначених для обробки інформації і здатних виконувати її швидко. Ідеї, принципи та алгоритми, які в даний час складають методологію обробки інформації, вже сьогодні дозволили зробити суттєвий прорив у технології обробки інформації (наочний приклад – Internet).

Методи обробки та принципи їхньої реалізації для кожної області мають свої специфічні особливості, які перш за все, обумовлюються конкретним видом носія інформації, методами кодування і способами представлення результатів обробки. Внаслідок цього пристрої обробки інформації для різних областей часто виявляються зовні несхожими один на одного. Але за цією зовнішньою несхожістю приховується однакова методологія і принципи побудови систем обробки, що є для нас визначальними і становлять предмет вивчення в даному курсі.

Основу методів обробки інформації складають обчислювальна математика, теорія інформації і математична статистика. Сучасні методи математичної статистики і теорії інформації використовують складний математичний апарат, але базуються на простих вихідних положеннях, що випливають із практичних завдань. Одне із завдань курсу полягає в тому, щоб за складністю математичних методів не втратити той сенс, який закладений в

сучасних принципах обробки інформації, і виділити ті рішення, які використовуються на практиці сьогодні.

Під інформацією ми розумітимемо деяку сукупність відомостей, що становлять інтерес для людини або корисних для функціонування інтелектуальних систем. Практично завжди в ході отримання інформації (людиною або системою) виникає потреба її обробки. Наведемо три типові ситуації:

- як правило, особливо в технічних системах, перед аналізом корисної інформації необхідно зафіксувати факт її надходження, оскільки якийсь потік даних на приймальний пристрій завжди надходить. У цьому випадку завдання обробки полягає у визначенні факту надходження корисної інформації (завдання виявлення);

- часто надходять дані крім корисної складової (інформаційна компонента), що містять деяку додаткову складову (в техніці кажуть заваду), яка заважає правильно виділити корисну частину (спотворює). Завдання часто ускладнюються тим, що повні відомості про завади відсутні. В даному випадку завдання обробки полягає в найбільш повному виключенні завади (завдання виділення);

- інша ситуація – це аналіз отриманої інформації з метою прийняття будь-якого рішення (тобто факт надходження інформації зафіксований, корисний сигнал виділений), причому в отриманій інформації немає всього необхідного, щоб рішення можна було прийняти з повною впевненістю. В даному випадку завдання обробки полягає в здійсненні такого аналізу інформації, щоб рішення було найбільш правильним (завдання прийняття рішення).

Умова впливу завад і відсутності повної інформації є надзвичайно важливою в проблемі розуміння необхідності застосування обробки, а, отже, і інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), одним з основних завдань яких є обробка інформації.

Термін "обробка" доцільно розглядати в широкому сенсі, розуміючи під ним реєстрацію, запам'ятовування, уявлення даних. Але правильніше ці поняття розділити і дати наступне визначення.

Інформаційно-вимірювальною системою (ІВС) називається сукупність функціонально пов'язаних пристроїв і програмного забезпечення, які реалізують необхідне інформаційне обслуговування контрольованого об'єкта, включаючи автоматизований збір, уявлення, передачу, обробку та зберігання вимірювальної інформації.

При цьому терміни "збір" і "вимірювальний" слід трактувати широко, з включенням процедур сканування, оцифровування (сигналів і зображень), векторизації тощо. Якщо передача даних здійснюється по кабельній лінії або радіолінії, то система називається телеметричною або радіотелеметричною.

Інформаційно-вимірювальні системи застосовують як автономно (збір, обробка даних про рухомі об'єкти, зовнішнє середовище, біологічні об'єкти), так і в складі різних автоматизованих комплексів, створених у результаті інтеграції обчислювальної і вимірювальної техніки, пристроїв введення-виведення і засобів зв'язку. Незалежно від призначення і конкретного застосування, загальна вимога до ІВС полягає в тому, щоб вихідна вимірювальна (найчастіше аналогова) інформація або повідомлення, що вводяться (приймаються) в систему, могли бути відновлені (або представлені) без викривлень. Для більшості сучасних ІВС обов'язковим також є вимога передачі та обробки інформації в реальному масштабі часу.

Однією з основних проблем, яка виникає під час розробки та використання ІВС, є вибір методів оцифровки і кодування інформації, шумостійких методів передачі-прийому інформації (якщо інформація передається на великі відстані). Але нас більше цікавитимуть інші проблеми, які виникають на етапі обробки інформації, що надійшла. Це попередня обробка даних (стиснення, розпакування, розпізнавання), якісні характеристики систем, застосування алгоритмів обробки і

програмного забезпечення в конкретних інформаційно-вимірювальних комплексах для кінцевого користувача.

1.1 Предмет курсу «Електронні системи»

Предметом курсу є вивчення інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) в розширеному розумінні, тобто в тому розумінні терміну "вимір", про який було сказано вище (це збір даних, введення аналогових сигналів і зображень, оцифровка інформації на твердому носії, в тому числі картографічного матеріалу). До досліджуваних належать мультимедійні системи, інформаційні системи, що використовують ресурси глобальних мереж; системи реального часу, що використовують ресурси процесорів цифрової обробки сигналів; геоінформаційні системи, а також базове програмне забезпечення, що використовується в цих системах. Систем і додатків, які потрапляють під визначення ІВС, сьогодні величезна кількість, але завдання курсу не в тому, щоб розкласти їх по полицях, а в тому, щоб зрозуміти, що їх об'єднує, визначити базову структуру і типові алгоритми обробки даних.

1.2 Узагальнена структура ІВС

Відповідно до предмета дисципліни з усього складу функціональних пристроїв ІВС, що утворюють інформаційний тракт системи, розглянемо тільки ті, які здійснюють функції збору, попередньої обробки, уявлення, передачі та обробки інформації. Розглянемо блок-схему ІВС (рис. 1.1). На вхід системи надходить в загальному випадку аналоговий сигнал $S(t)$, сформований інформаційним пристроєм (або датчиком), що є джерелом даних. Сигнал $S(t)$ розглядається як реалізація випадкового процесу. Коло перетворення даних одного пристрою (або датчика) в багатоканальній системі утворює вимірювальний канал.

У блоці підготовки сигнал піддається попередній аналоговій обробці – узгодженню, посиленню (зведення амплітуди до динамічного діапазону пристрою вибірки і зберігання – ПВЗ), полосовій фільтрації (обмеження смуги частот сигналів для коректної оцифровки).

Оскільки підсистема обробки в ІВС є цифровою системою, то кожен сигнал піддається процедурі аналого-цифрового перетворення в модулі АЦП. Послідовність відліків від різних вимірювальних каналів об'єднується в загальний потік для подальшого введення в комп'ютер або передачі по каналу зв'язку. У ряді випадків можуть застосовуватися пристрої стиснення даних (або стиснення здійснюється після введення даних у комп'ютер-програмні методи стиснення). Склад і послідовність розташування функціональних пристроїв у різних ІВС може відрізнятися від наведеної в блок-схемі, але характерним є наявність даних пристроїв як типових у системах різного призначення і технічного втілення.

Підсистема передачі включає кодер і декодер каналу зв'язку, що передає та приймає пристрій і, власне, канал зв'язку (середовище з антенними пристроями). Кодер і декодер здійснюють перешкодостійке кодування і декодування сигналів з метою додаткового захисту переданих повідомлень від завад у каналі зв'язку і можуть бути відсутніми за наявності якісного каналу.

Відновлення вихідного аналогового зв'язку по цифрових відліках з допустимою похибкою проводиться на приймальній стороні. У сучасних системах відновлення безперервного повідомлення, як правило, не виконується, оскільки реєстрація, зберігання і обробка інформації виконуються в цифровому вигляді, але принципова можливість відновлення передбачається.

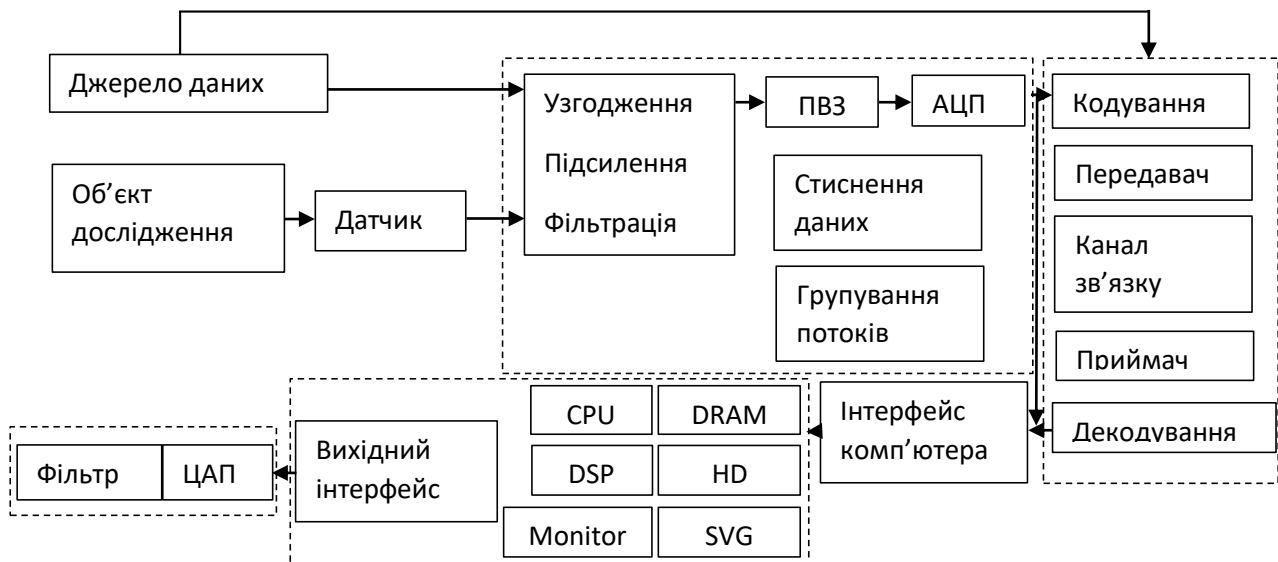


Рисунок 1.1 – Узагальнена блок-схема
інформаційно-вимірювального комплексу

Одне із завдань підсистеми цифрової обробки, яке виконується з використанням ресурсів комп'ютера і спеціалізованих процесорів цифрової обробки – сортування інформації та відбракування аномальних результатів спостережень. Відбракування є окремим випадком більш загальної задачі – фільтрації сигналів від завад або використання методів розпізнавання образів. Іншим завданням підсистеми обробки є:

- попередня обробка даних (згладжування, вилучення тренду);
- статистична обробка сигналів (застосовуються різні алгоритми залежно від призначення ІВС);
- спектральна обробка (застосовуються різні методи залежно від призначення ІВС);
- формування моделей процесів і явищ;
- подання результатів попередньої обробки або аналізу;
- збереження даних.

Перераховані завдання вирішуються в ІВС такого призначення:

- вимірювальні системи в "чистому вигляді" – моніторинг, діагностика, контроль, наукові дослідження, системи реального часу;

- мультимедійні комплекси – інформаційні послуги, презентації, навчання, ігри;
- комерційні системи введення-виведення відео-довідкові системи, реклама, перегляд і зберігання відеофрагментів;
- геоінформаційні системи.

1.3 Класифікація інформаційних систем

Інформаційна система (ІС) – сукупність технічних засобів і програмного забезпечення, призначена для інформаційного обслуговування користувачів і технічних об'єктів.

До складу технічних засобів належать обладнання для введення, зберігання, перетворення і виведення даних, у тому числі обчислювальні машини (ОМ) або комп'ютери, пристрої сполучення ОМ з об'єктами, апаратура передачі даних (комунікаційне обладнання) і лінії зв'язку.

Програмне забезпечення (програмні засоби) – сукупність програм, що реалізують покладені на систему функції (розрізняють системне і прикладне).

Функції ІС полягають у виконанні необхідної обробки даних: введення, зберігання, перетворення і представлення.

Прикладами ІС є обчислювальні системи для вирішення наукових, інженерно-технічних, планово-економічних та обліково-статистичних завдань; автоматизовані системи, що застосовуються в управлінні підприємствами і галузями народного господарства; системи автоматизованого і автоматичного управління технологічним обладнанням і технічними об'єктами; системами реального часу (транспорт, моніторинг); інформаційно-вимірювальні системи та ін.

Основа ІС – це технічні засоби, оскільки їх продуктивністю і надійністю в найбільшій мірі визначається ефективність ІС.

Одномашинні однопроцесорні ІС. Історично першими і до цих пір широко поширеними є одномашинні ІС, побудовані на базі єдиної ОМ з традиційною

однопроцесорною структурою. До теперішнього часу накопичено значний досвід проектування і експлуатації таких ІС, і тому створення їх, включаючи розробку програмного забезпечення, не викликає принципових труднощів. Однак продуктивність виявляється задовільною не для всіх додатків. Підвищення продуктивності і надійності ОМ забезпечується в основному за рахунок вдосконалення елементно-технологічної бази. При будь-якому рівні технології можна забезпечити абсолютну надійність елементної бази, і тому не можна для одномашинних ІС виключити можливість втрати працездатності. Таким чином, одномашинні ІС не повною мірою забезпечують надійну автоматизацію обробки даних.

Обчислювальні комплекси. Починаючи з 60-х років для підвищення надійності та продуктивності ІС кілька ОМ зв'язувалися між собою, утворюючи багатомашинний обчислювальний комплекс (рис.1.2).

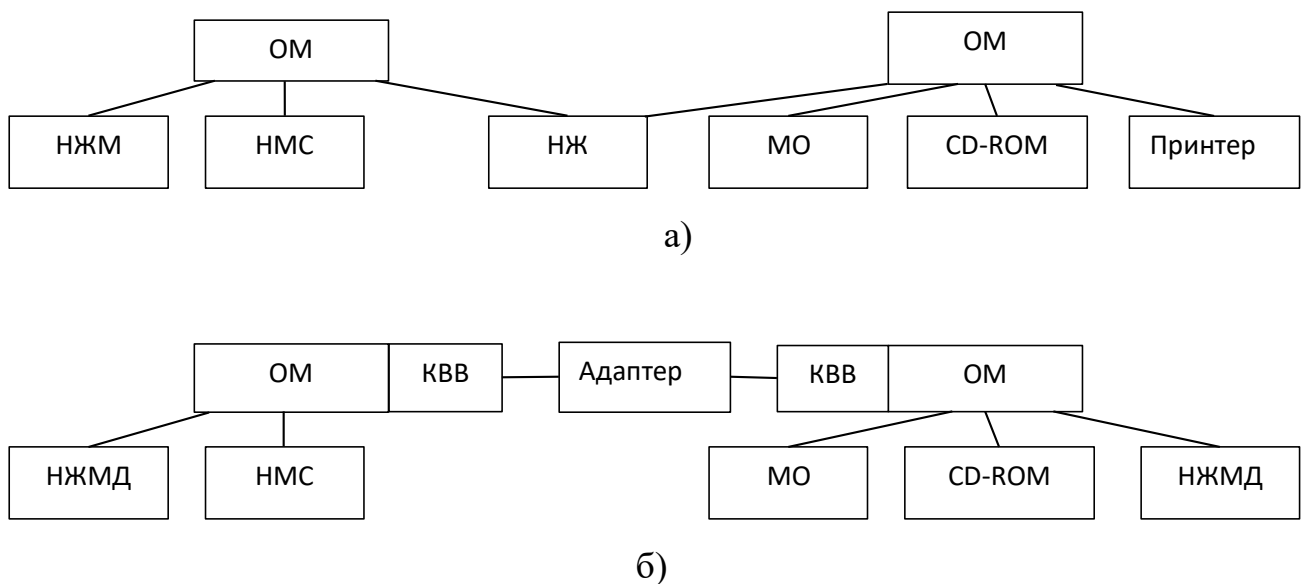


Рисунок 1.2 – Багатомашинний обчислювальний комплекс з
непрямим (а) і прямим (б) зв'язками між ОМ

У ранніх багатомашинних комплексах зв'язок між ОМ забезпечувався через загальні зовнішні пристрої, що запам'ятовують – накопичувачі на твердих магнітних дисках (НЖМД) або магнітних стрічках (НМС) (рис. 1.2, а), тобто за рахунок доступу до загальних наборів даних. Такий зв'язок називається

непрямим і виявляється ефективним тільки в тому випадку, коли ОМ взаємодіють досить рідко, наприклад, при відмові однієї з ОМ або в моменти початку і закінчення обробки даних. Більш оперативна взаємодія ОМ досягається за рахунок прямого зв'язку через адаптер, що забезпечує обмін даними між каналами введення – виведення (КВВ) двох ОМ (рис. 1.2, б) і передачу сигналів переривання. За рахунок цього створюються гарні умови для координації процесів обробки даних і підвищується оперативність обміну даними, що дозволяє вести паралельно процеси обробки й істотно збільшувати продуктивність ІС. Сьогодні багатомашинні обчислювальні комплекси широко використовуються для підвищення надійності ІС і спільного використання периферійного обладнання.

У багатомашинних обчислювальних комплексах взаємодія процесів обробки даних забезпечується тільки за рахунок обміну сигналами переривання і передачі даних через адаптери канал – канал або загальні зовнішні пристрої, що запам'ятовують. Кращі умови для взаємодії процесів – коли всі процесори мають доступ до всього обсягу даних, що зберігаються в оперативних запам'ятовуючих пристроях (ОЗП), і можуть взаємодіяти з усіма периферійними пристроями комплексу.

Обчислювальний комплекс, що містить кілька процесорів, оперативну пам'ять (загальну або розділену між процесорами) і загальні периферійні пристрої, називається багатопроцесорним обчислювальним комплексом. Принцип побудови таких комплексів наведено на рис. 1.3. Процесори, оперативна пам'ять (ОЗП) і канали введення-виведення, до яких підключені периферійні пристрої (ПП), об'єднуються в єдиний комплекс за допомогою інтерфейсних засобів, що забезпечують доступ кожного процесора до оперативної пам'яті і каналів вводу-виводу, а також можливість передачі даних між останніми. У багатопроцесорному комплексі відмови окремих пристроїв впливають на працездатність ІС меншою мірою, ніж в багатомашинному, тобто багатопроцесорні комплекси мають більшу стійкість до відмов і більшу

продуктивність. Кожен процесор має безпосередній доступ до всіх даних, що зберігаються в загальній оперативній пам'яті, і до периферійних пристроїв, що дозволяє паралельно обробляти не тільки незалежні завдання, але і блоки одного завдання (нитки).

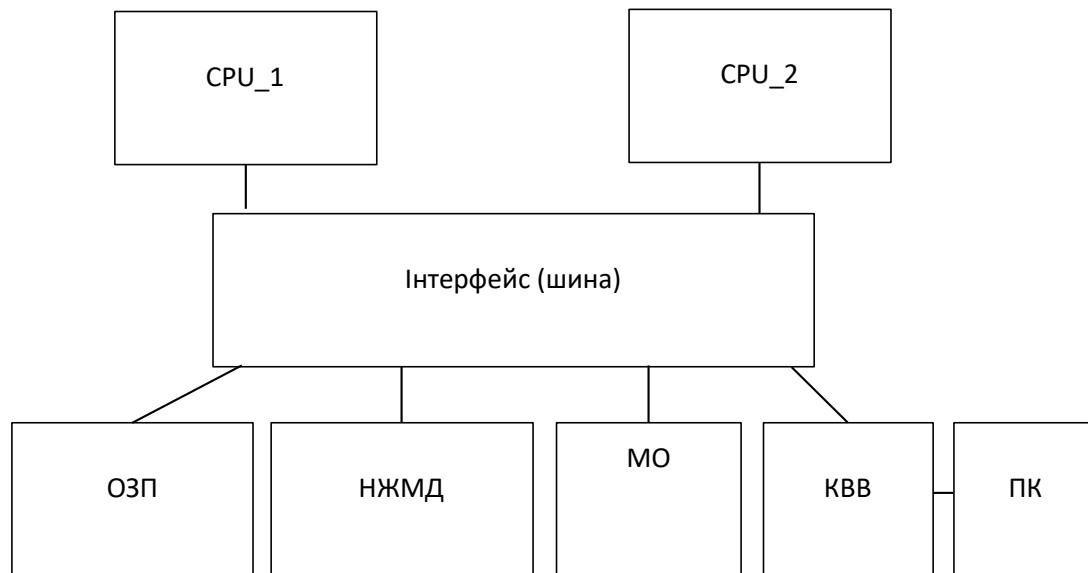


Рисунок 1.3 – Багатопроцесорний обчислювальний комплекс

Багатомашинні і багатопроцесорні обчислювальні комплекси розглядаються як базові засоби для створення ІС різного призначення. Тому, до складу обчислювального комплексу прийнято включати тільки технічні засоби і загальносистемне (базове), але не прикладне програмне забезпечення, пов'язане з конкретною областю застосування комплексу. Таким чином, обчислювальний комплекс – сукупність технічних засобів, що включають в себе кілька ОМ або процесорів, і загальносистемного (базового) програмного забезпечення.

Обчислювальні системи. ІС, налаштована на вирішення завдань конкретної області застосування, називається обчислювальною системою (ОС). Обчислювальна система включає в себе технічні засоби та програмне забезпечення, орієнтовані на вирішення певної сукупності завдань. Існує два

способи орієнтації ВС. По-перше, обчислювальна система може будуватися на основі ОМ або обчислювального комплексу загального застосування, і орієнтація системи забезпечується за рахунок програмних засобів – прикладних програм і, можливо, операційної системи. По-друге, орієнтація на заданий клас завдань може досягатися за рахунок використання спеціалізованих ОМ і обчислювальних комплексів. У цьому випадку вдається при помірних витратах обладнання досягти високої продуктивності.

Обчислювальні системи, побудовані на основі спеціалізованих комплексів, почали інтенсивно розроблятися на початку 70-х років. У таких системах використовувалися процесори зі спеціалізованими системами команд і конфігурація комплексів жорстко орієнтувалася на конкретний клас завдань. В останнє десятиліття почалися дослідження і розробка адаптивних ОС, що гнучко пристосовувалися до задач, що вирішувались. Адаптація обчислювальної системи з метою пристосування її до структури реалізованого алгоритму досягається за рахунок зміни конфігурації системи. При цьому з'єднання між процесорами, а також модулями пам'яті і периферійними пристроями встановлюються динамічно відповідно до потреб завдань, оброблюваних системою в поточний момент часу. У зв'язку з цим адаптивні обчислювальні системи інакше називаються *системами з динамічною структурою*. За рахунок адаптації досягається висока продуктивність в широкому класі задач і забезпечується стійкість системи до відмов. Тому адаптивні системи розглядаються як один з перспективних напрямків розвитку систем обробки даних.

Системи телеобробки. Навіть поверхове застосування ІС для управління виробництвом, транспортом і матеріально-технічним постачанням показало, що ефективність систем можна значно підвищити, якщо забезпечити введення даних у систему безпосередньо з місць їхньої появи і видачу результатів обробки до місць їхнього використання. Для цього необхідно пов'язати ІС і робочі місця користувачів за допомогою каналів зв'язку. Системи, призначені

для обробки даних, що передаються по каналах зв'язку, називаються системами телеобробки даних. Розглянемо склад технічних засобів системи телеобробки даних (рис. 1.4).

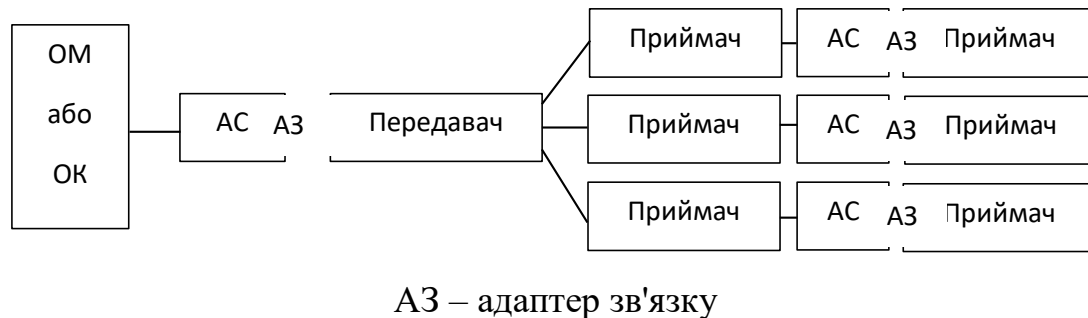


Рисунок 1.4 – Система телеобробки даних

Користувачі (абоненти) взаємодіють з системою за допомогою терміналів (абонентських пунктів) або ПК, що підключаються через канали зв'язку до засобів обробки даних – ОМ або обчислювального комплексу. Дані передаються по каналах зв'язку у формі повідомлень – блоків даних, що несуть в собі крім власне даних службову інформацію, необхідну для управління процесами передачі і захисту даних від викривлень. Програмне забезпечення систем телеобробки містить спеціальні засоби, необхідні для управління технічними засобами, встановлення зв'язку між ОМ і абонентами, передачі даних між ними і організації взаємодії користувачів з програмами обробки даних. *Телеобробка даних* значно підвищує оперативність інформаційного обслуговування користувачів і поряд з цим дозволяє створювати великомасштабні системи, що забезпечують доступ широкого кола користувачів до даних і процедур їхньої обробки.

Обчислювальні мережі. Із зростанням масштабів застосування електронної обчислювальної техніки в наукових дослідженнях, проектно-конструкторських роботах, управлінні виробництвом і транспортом стала очевидна необхідність об'єднання ІС, які обслуговують окремі підприємства і

колективи. Об'єднання розрізнених ІС забезпечує доступ до даних і процедур їхньої обробки для всіх користувачів, пов'язаних спільною сферою діяльності. Так, експериментальні дані, отримані групою дослідників, можуть використовуватися під час проектно-конструкторських роботах, результати проектування – під час технологічної підготовки виробництва, результати випробувань і експлуатації виробів – для вдосконалення конструкцій і технології виробництва і т.д. Щоб об'єднати територіально розрізнені ІС в єдиний комплекс, необхідно, по-перше, забезпечити можливість обміну даними між ІС, за допомогою з'єднання відповідних обчислювальних машин ОМ та обчислювальних комплексів каналами передачі даних і, по-друге, оснастити системи програмними засобами, що дозволяють користувачам однієї системи звертатися до інформаційних, програмних і технічних ресурсів інших систем.

Наприкінці 70-х років був запропонований спосіб побудови *обчислювальних мереж*, які об'єднують ОМ за допомогою базової мережі передачі даних. Структура обчислювальної мережі в загальних рисах наведена на рис. 1.5. Ядром мережі є базова мережа передачі даних (МПД), яка складається з каналів і вузлів зв'язку (ВЗ). Вузли зв'язку приймають дані і передають їх у напрямі, який забезпечує доставку даних абоненту. ОМ підключаються до вузлів базової мережі передачі даних, чим забезпечується можливість обміну даними між будь-якими парами ОМ. Сукупність ОМ, об'єднаних мережею передачі даних, утворює мережу ОМ. У такій конфігурації ОМ є ПК або комунікаційним сервером, або міні-ЕОМ, до якої за допомогою каналів зв'язку підключаються інші мережні вузли, через які користувачі взаємодіють з мережею. Сукупність терміналів і засобів зв'язку, використовуваних для підключення терміналів до ОМ, утворює термінальну мережу. Сукупність ПК і мережних адаптерів утворює локальну обчислювальну мережу (ЛОМ). Таким чином, обчислювальна мережа є композицією базової мережі передачі даних, ЛОМ або термінальної мережі. Така обчислювальна мережа називається глобальною або розподіленою

обчислювальною мережею (надалі – "обчислювальна мережа", на відміну від локальної). Обчислювальні мережі використовуються для об'єднання ОМ, що знаходяться на значній відстані один від одного в межах регіону, країни або континенту (рис.1.5). В обчислювальній мережі всі ОМ оснащуються спеціальними програмними засобами для мережної обробки даних. На мережне програмне забезпечення покладається широкий комплекс функцій: управління апаратурою сполучення і каналами зв'язку; встановлення з'єднань між взаємодіючими процесами і ОМ; управління процесами передачі даних; введення і виконання завдань від віддалених користувачів; доступ програм до наборів даних, розміщених у віддалених ОМ. До мережного програмного забезпечення ставиться вимога збереження працездатності мережі при зміні її структури внаслідок виходу з ладу окремих ОМ, каналів і вузлів зв'язку, а також можливість взаємодії різнотипних ОМ. Функції, покладені на мережне програмне забезпечення, відрізняються високим рівнем складності і реалізуються з використанням спеціально розроблених методів управління процесами передачі та обробки даних.

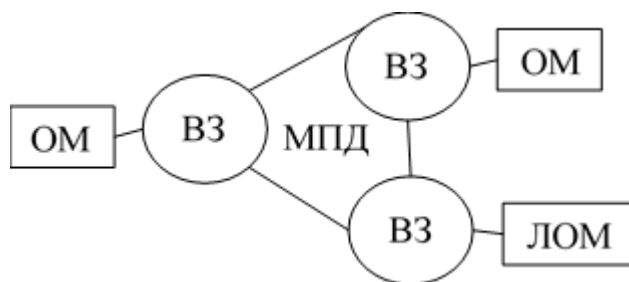


Рисунок 1.5 – Глобальна обчислювальна мережа

Обчислювальні мережі – найбільш ефективний спосіб побудови великомасштабних інформаційних систем (ІС). Використання обчислювальних мереж дозволяє автоматизувати управління галузями виробництва, транспортом і матеріально-технічним постачанням у масштабі великих регіонів і країни в цілому. Концентрація в мережі великих обсягів даних і колективний доступ до даних дозволяють поліпшити інформаційне обслуговування наукових досліджень, підвищити продуктивність праці інженерно-технічних

працівників і якість адміністративно-управлінської діяльності. Крім того, об'єднання ОМ в обчислювальні мережі дозволяє істотно підвищити ефективність їхнього використання.

Локальні обчислювальні мережі. На початку 80-х років у сфері обробки даних почали застосовуватися персональні комп'ютери (ПК). Колективний характер праці вимагав оперативного обміну даними між користувачами, тобто об'єднання ОМ в єдиний комплекс. Був розроблений ефективний спосіб об'єднання ОМ, розташованих на незначній відстані один від одного – в межах однієї будівлі або групи сусідніх будівель, за допомогою *моноканалу* (послідовного інтерфейсу). Такі обчислювальні мережі стали називати локальними обчислювальними мережами (ЛОМ).

Локальна обчислювальна мережа (ЛОМ) – сукупність близько розташованих ОМ, які пов'язані послідовними інтерфейсами і оснащені програмними засобами, що забезпечують інформаційну взаємодію між процесами в різних вузлах мережі. Типова структура ЛОМ зображена на рис. 1.6. Сполучаються ОМ за допомогою моноканалу – єдиного для всіх ОМ мережі каналу передачі даних. У моноканалі найбільш широко використовується скручена пара дротів, коаксіальний кабель або волоконно-оптична лінія.

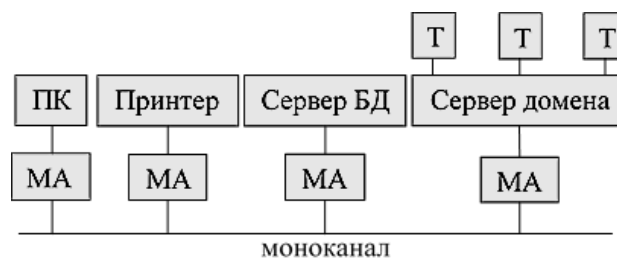


Рисунок 1.6 – Локальна обчислювальна мережа
(СА – мережний адаптер (МА), Т – термінал)

Довжина моноканалу не перевищує зазвичай декількох сотень метрів. При цьому пропускна здатність моноканалу становить 10–100 Мбіт/с, що достатньо для забезпечення інформаційного зв'язку між десятками ОМ. ОМ сполучаються з

моноканалом за допомогою мережних адаптерів (МА), або контролерів, що реалізують операції введення-виведення даних через моноканал. Наявність в мережі єдиного каналу для обміну даними між ОМ істотно спрощує процедури встановлення з'єднань і обміну даними між ОМ. Тому мережне програмне забезпечення ОМ виявляється більш простим, ніж в обчислювальних мережах, що містять мережу передачі даних. Внаслідок цього локальні обчислювальні мережі виявляються ефективним засобом побудови складних ІС на основі ПК та спеціалізованих мережних вузлів (сервери, повторювачі, маршрутизатори тощо).

Локальні обчислювальні мережі отримують широке застосування в ході організації ІС підприємств і організацій, в системах автоматизації проектування і технологічної підготовки виробництва, системах управління виробництвом, транспортом, постачанням і збутом (відомчих системах), а також в системах автоматичного управління технологічним обладнанням.

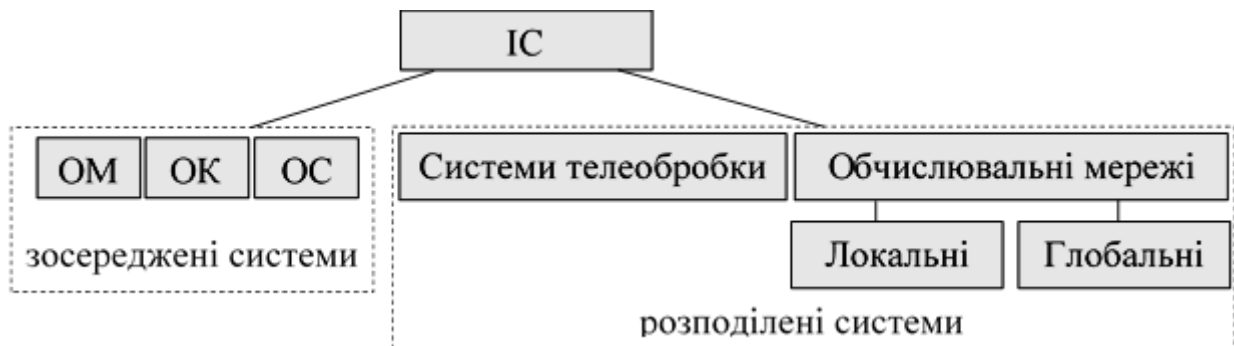


Рисунок 1.7 – Класифікація інформаційних систем (ІС)

Класифікація ІС. Класифікуються ІС залежно від способу побудови (рис. 1.7).

ІС, побудовані на основі окремих ОМ, обчислювальних комплексів і систем, утворюють клас *зосереджених (централізованих) систем*, у яких вся обробка реалізується ОМ, обчислювальним комплексом або спеціалізованою системою.

Системи телеобробки і обчислювальні мережі належать до класу *розподілених систем*, у яких процеси обробки даних розосереджені за багатьма компонентами. При цьому системи телеобробки вважаються розподіленими деякою мірою умовно, оскільки функції обробки даних тут можуть бути

реалізовані централізовано (в одній ОМ або обчислювальному комплексі) або розподілені між ОМ у межах мережі (розподілені БД).

Істотний вплив на організацію ІС надають технічні можливості засобів, що використовуються для сполучення (комплексування) ОМ. Основним елементом сполучення є *інтерфейс*, який визначає число ліній для передачі сигналів і даних та спосіб (алгоритм) передачі інформації по лініях. Всі інтерфейси, що використовуються в обчислювальній техніці і зв'язку, поділяються на три класи: *паралельні, послідовні і зв'язні*.

Паралельний інтерфейс складається з великої кількості ліній, дані по яких передаються в паралельному коді – зазвичай у вигляді слів з розрядністю 8–128 біт. Паралельні інтерфейси мають велику пропускну здатність, як правило, 20–1000 Мбіт/с. Настільки великі швидкості передачі даних забезпечуються за рахунок обмеженої довжини інтерфейсу, яка зазвичай становить від кількох до десятків метрів.

Послідовний інтерфейс складається, як правило, з однієї лінії, дані по якій передаються в послідовному коді. Пропускна здатність послідовних інтерфейсів зазвичай становить 1–10 Мбіт/с при довжині лінії від десятків метрів до кілометра.

Зв'язні інтерфейси містять канали зв'язку, робота яких забезпечується апаратурою передачі даних, що підвищує (в основному за допомогою фізичних методів) достовірність передачі. Зв'язні інтерфейси забезпечують передачу даних на будь-які відстані, проте з невеликою швидкістю – в межах від 10 до 100 Кбіт/с. Застосування зв'язних інтерфейсів економічно виправдовується на відстанях, не менших за кілометри. У *зосереджених системах* застосовуються, в основному, паралельні інтерфейси, що використовуються для сполучення пристроїв і побудови багатомашинних і багатопроцесорних комплексів, і тільки в окремих випадках, частіше для підключення периферійних пристроїв, застосовуються послідовні інтерфейси. *Паралельні інтерфейси* забезпечують передачу сигналів переривання, окремих слів і блоків даних між сполученими

ОМ та пристроями. У *розподілених системах* через те, що відстань має значення, між компонентами застосовуються *послідовні і зв'язні інтерфейси*, які виключають можливість передачі сигналів переривання між сполученими пристроями і вимагають подання даних у вигляді повідомлень, переданих за допомогою операцій введення-виведення. Різниця способів подання даних і пропускну здатності в паралельних, послідовних та зв'язних інтерфейсах значно впливає на організацію обробки даних і програмного забезпечення ІС.

Питання для самоконтролю

1. Інформація та методи обробки інформації.
2. Інформаційно-вимірювальна система та її завдання.
3. Класифікація інформаційних систем.
4. Обчислювальні комплекси, системи та мережі.

2 КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ (АКУ)

2.1 Об'єкти управління і види впливу на них

*Об'єкти, в яких протікає керований процес, називаються об'єктами управління. Це різноманітні технічні пристрої і комплекси, технологічні або виробничі процеси. Стан об'єкта можна характеризувати однією або декількома фізичними величинами, що називаються *керованими* або *регульованими змінними*. Для технічного пристрою, наприклад, електричного генератора, регульованою змінною може бути напруга на його вихідних клеммах; для виробничої ділянки або цеху – обсяг промислової продукції, що випускається ділянкою або цехом.*

Як правило, до об'єкта управління докладено два види впливів: керуючий – $r(t)$ та збурюючий $f(t)$; стан об'єкта характеризується змінною $x(t)$ (рис. 2.1). Зміна регульованої величини $x(t)$ обумовлюється як керуючим впливом $r(t)$, так і збурюючим, або завадою $f(t)$. Дано визначення цих впливів.



Рисунок 2.1 – Види впливів на об'єкт

Збурюючим називається такий вплив, який порушує необхідний функціональний зв'язок між регулюючими або керованими змінними і керуючим впливом. Якщо збурення характеризує дію зовнішнього середовища на об'єкт, то таке збурення називається зовнішнім. Якщо цей вплив виникає всередині об'єкта за рахунок протікання небажаних, але неминучих процесів при його нормальному функціонуванні, то такі збурення називаються внутрішніми.

Вплив, що докладено до об'єкта управління з метою зміни керованої величини відповідно до необхідного закону, а також для компенсації впливу збурень на характер зміни керованої величини, називаються керуючим.

Основна мета автоматичного управління будь-яким об'єктом або процесом полягає в тому, щоб безперервно підтримувати з заданою точністю необхідну функціональну залежність між керованими змінними, що характеризують стан об'єкта і керуючими впливами в умовах взаємодії об'єкта з зовнішнім середовищем, тобто за наявності як внутрішніх, так і зовнішніх впливів, що збурюють. Математичний вираз цієї функціональної залежності називається алгоритмом управління.

2.2 Поняття про елемент системи

Будь-який об'єкт управління пов'язаний з одним або декількома регуляторами, що формують керуючий вплив, подаються на регулюючий орган. *Об'єкт управління спільно з керуючим пристроєм, або регулятором, утворюють систему управління або регулювання.* При цьому, якщо людина не бере участь в процесі управління, то така система називається системою автоматичного управління.

Регулятор системи є комплексом пристроїв, з'єднаних між собою в певній послідовності, що здійснюють реалізацію найпростіших операцій над сигналами. У зв'язку з цим є можливим проведення декомпозиції (розчленування) регулятора на окремі функціональні елементи – конструктивно цілісні осередки, які виконують одну визначену операцію з сигналом. До таких операцій належать:

- 1) *перетворення контрольованої величини в сигнал;*
- 2) *перетворення:*
 - а) *сигналу одного роду енергії в сигнал іншого роду енергії,*
 - б) *безперервного сигналу в дискретний і у зворотну сторону,*

- в) сигналу за величиною енергії,
- г) виду функціонального зв'язку між вхідними та вихідними сигналами;
- 3) зберігання сигналів;
- 4) формування програмних сигналів;
- 5) порівняння контрольованих і програмних (необхідних) сигналів і формування сигналу неузгодженості (помилки);
- 6) виконання логічних і арифметичних операцій;
- 7) перетворення частотних властивостей сигналу (стиснення, модуляція);
- 8) розподіл сигналів по різних каналах управління;
- 9) застосування сигналів для впливу на об'єкт управління за допомогою регулюючих органів.

Перераховані операції з сигналами, що виконуються елементами систем автоматичного управління, використовуються в подальшому як основа систематизації всього різноманіття елементів автоматики, застосованого в різних за характером, призначенням і принципом дії у системах автоматичного управління і контролю.

2.3 Приклади автоматичних систем управління і контролю. Функціональні схеми систем

Розрізняють декілька видів автоматизації відносно різноманітних технічних завдань:

– часткову автоматизацію управління, коли створюється частково автоматизована система управління технологічним процесом, де обслуговуючий персонал має інформацію (відомості) про завдання управління, приймає участь у процесі управління, але впливає тільки на керуючий елемент, а останній – через виконуючий елемент діє на об'єкт (рис. 2.2, а);



Рисунок 2.2 – Види автоматизації щодо різноманітних технічних завдань

– *повну автоматизацію контролю*, що здійснюється системою автоматичного контролю, перед якою стоїть тільки завдання збору інформації про стан об'єкта (рис. 2.2, б);

– *повну автоматизацію управління*, що становить найбільш досконалий вид автоматизації. Він поєднує в собі використання інформації про завдання управління і відомості про його результати (рис. 2.2, в). У цьому випадку управління об'єктом відбувається повністю автоматично, тобто без участі оператора.

Автоматичні системи можуть будуватися за розімкненим і замкнутим принципом. Більш широке застосування отримали замкнуті системи, на аналізі яких і буде зосереджено увагу в ході розгляду прикладів систем і класифікації елементів. Системи такого виду завжди містять замкнуте коло дій впливів керуючого пристрою, або регулятора, на об'єкт і об'єкта на керуючий пристрій, і називаються замкнутими автоматичними системами управління або регулювання.

За характером зміни задаючого впливу $g(t)$, що подається на вхід системи, або необхідного значення вихідної величини замкнуті автоматичні системи регулювання поділяються на три класи: *системи стабілізації; системи спостереження; системи програмного управління.*

Системами стабілізації називаються автоматичні системи регулювання, що підтримують регульовану величину на деякому постійному рівні, відповідному певному постійному значенню задаючого впливу.

Системи спостереження – це автоматичні системи регулювання, у яких керована величина відповідає будь-яким заздалегідь невідомим змінам керуючого впливу $r(t)$, що виробляється керуючим пристроєм з непередбаченим характером зміни задаючого впливу $g(t)$.

Системами програмного управління є такі автоматичні системи управління, у яких керуюча величина відповідає керуючому впливу $r(t)$ та формується на основі задаючого впливу $g(t)$, що становить функцію часу та виробляється деякими програмним пристроєм.

Для закріплення розглянутого матеріалу як приклад розглянемо автоматичну систему регулювання температури печі.

Автоматична система регулювання температури печі. Щоб підтримувати температуру печі ОР (рис. 2.3) в необхідних межах, необхідно, перш за все, мати відомості про значення температури в кожен момент часу. Цю інформацію можна отримати за допомогою простої системи контролю (рис. 2.3), що складається з термоопору ВК, поміщеного в печі і включеного в одне з плечей моста, і гальванометра Г, шкала якого проградуєвана в градусах Цельсія. Напруга U діагоналі моста пропорційна температурі печі θ . Оператор О, що обслуговує піч, спостерігаючи за становищем стрілки гальванометра, отримує інформацію про температуру θ та, залежно від її значення, проводить переміщення засувки З, що регулює надходження робочого тіла, в напрямку, що відповідає необхідній зміні температури.

Тут процес регулювання температури протікає за участю оператора. Для його автоматизації необхідно виключити оператора, а систему замкнути так, щоб сигнал, що виробляється вимірювальним елементом, приводив в дію регулюючий орган-засувку. З цією метою можна було б живити привід М напругою, що знімається з діагоналі моста, проте системи такого типу часто

виявляються непрацездатними, оскільки потужність сигналу, що подається на виконавчий елемент М, у більшості випадків недостатня для приведення в дію регулюючого органу. Для усунення зазначеного недоліку вводиться додатковий елемент – підсилювач (У), що має стороннє джерело енергії, за рахунок якого проводиться посилення сигналу.

Функціональна схема автоматичної системи регулювання температури печі наведена на рис. 2.4, де блок 1 – підсилювач; 2 – виконавчий елемент; 3 – регулюючий орган; 4 – об'єкт регулювання; 5, 6 – відповідно – вимірювальний елемент і задатчик.

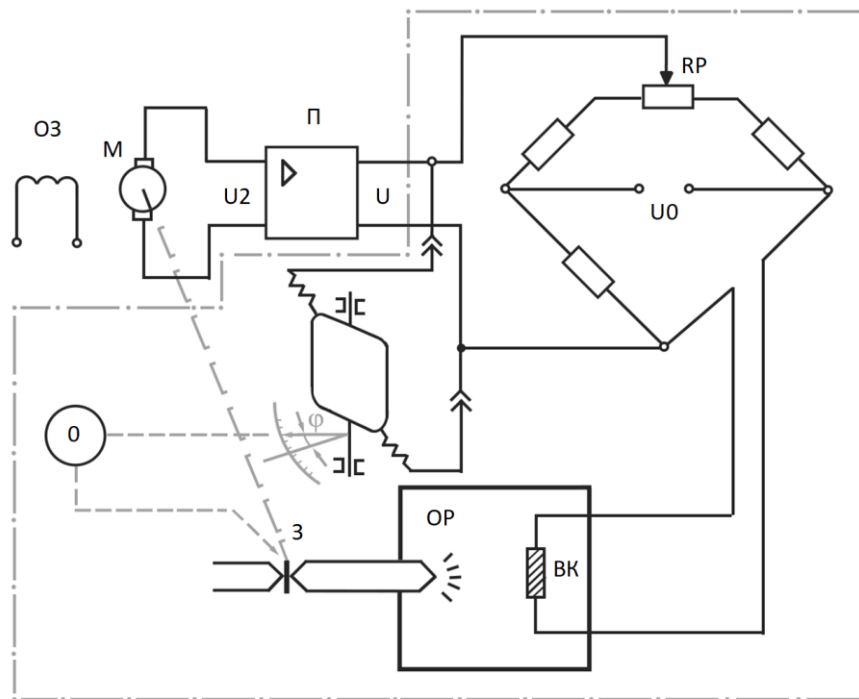


Рисунок 2.3 – Система автоматичного регулювання температури печі

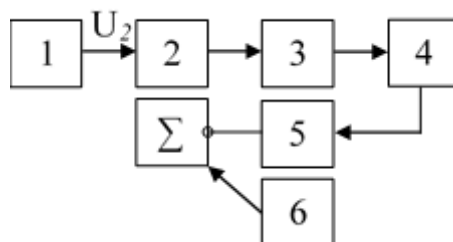


Рисунок 2.4 – Функціональна схема автоматичної системи регулювання температури печі

Завдання системі певного режиму роботи проводиться задатчиком (потенціометр RP на рис. 2.3). Під час роботи системи в режимі стабілізації температури значення сигналу підтримується постійним, тобто движок потенціометра RP займає незмінне положення. Якщо положення движка змінювати відповідно до деякої програми, то регулювання температури проводитиметься відповідно до тієї ж програми, а система буде працювати в режимі програмної системи управління.

Розглянута система автоматичного регулювання температури печі (рис. 2.3) характеризується тим, що між вхідними та вихідними величинами всіх елементів системи існує безперервний функціональний зв'язок. Системи такого виду називаються безперервними системами автоматичного регулювання.

Поряд з безперервними останнім часом набули поширення так звані дискретні системи (системи регулювання з перериванням). Застосування дискретних систем особливо доцільно при управлінні об'єктами з великою інерційністю, де процеси протікають повільно, наприклад, системи стабілізації температури, тиску, витрат. При цьому дискретна система управління виходить простіше за своєю конструкцією, а часто точніше, ніж безперервна [18; 33]. У дискретних системах вихідна величина якого-небудь з її елементів має дискретний характер. Перетворення безперервних сигналів і дискретних здійснюється в дискретній системі за допомогою дискретного елемента.

Роль такого елемента може виконати вміщений між схемою мосту і підсилювачем (див. рис. 2.3) електронний ключ з двома входами, на керований вхід якого подається вихідний сигнал мостової схеми, що є інформаційним сигналом термічного стану печі, а на керуючий – періодична послідовність імпульсів, що створюють умови для проходження інформаційного сигналу на вихід ключа в інтервалах існування керуючого імпульсу. В результаті на виході електронного ключа формується послідовність імпульсів, що використовується після посилення для управління реверсивним виконавчим двигуном, а значить, і регулюючим органом. Причому, управління відбувається дискретно – тільки в

інтервалі існування керуючих імпульсів, а амплітуда імпульсів, що надходять на якір двигуна, визначається рівнем інформаційного сигналу в ці інтервали часу.

Перевага імпульсних систем полягає в можливості застосування однієї дискретної системи керування технологічними процесами в декількох об'єктах шляхом почергового підключення цих об'єктів за допомогою комутатора до регулятора. Звідси випливає, що для створення імпульсної системи в загальному випадку необхідно розташовувати поряд з функціональними елементами, використовуваними в безперервних системах, ще й такі, як імпульсний елемент і комутатор.

Система управління (СУ) становищем антени радіолокаційної станції (РЛС). Така система належить до класу систем, що стежать, оскільки вплив $g(t)$, який задає оператор, змінюється в часі за заздалегідь невідомим законом. Розглянемо роботу системи на основі принципової схеми (рис. 2.5).

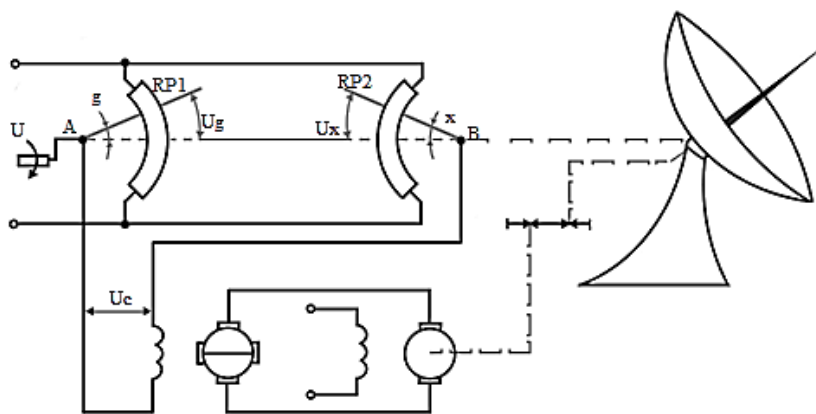


Рисунок 2.5 – Принципова схема системи управління положенням антени радіолокаційної станції

Аналіз роботи системи, що стежить, дозволяє виділити функціонально необхідні елементи і подати дану систему у вигляді функціональної схеми (рис. 2.6). Потенціометри RP1 і RP2 при зустрічному включенні створюють пристрій, що вимірює кут неузгодженості між валами і виробляє сигнал, пропорційний неузгодженості ε .

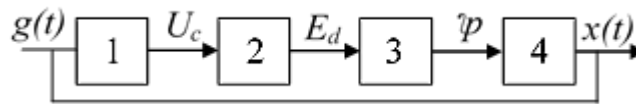


Рисунок 2.6 – Функціональна схема системи управління
становищем антени радіолокаційної станції

Таким чином, система стеження складається з пристрою вимірювання і пристрою порівняння 1 (потенціометри RP1 та RP2), пристрою підсилення 2 (ЕМУ), виконавчого пристрою 3 (двигуна з редуктором) і об'єкта управління 4 (антени).

Функціональна схема системи автоматичного контролю. У кожному з розглянутих прикладів систем автоматичного регулювання і управління можна як підсистема автоматичного контролю деякий комплекс елементів (вимірювально-перетворювальний, також комплекс, що задає та що порівнює, підсилювально-перетворювальний), об'єднаних єдиним призначенням – здійснювати автоматичний контроль за станом об'єкта управління. У цьому випадку сигнали, сформовані підсистемою автоконтролю, використовуються надалі для реалізації цілей управління. Однак досить часто система автоматичного контролю може існувати як самостійна система, коли на неї покладається тільки задача збору інформації про якийсь спостережуваний об'єкт (див. рис. 2.2, б), а кінцевий результат контролю може виражатися або у формі реєстрації стану параметра, або у вигляді сигналізації при досягненні певних станів. Прикладами такого роду систем можуть служити: системи автоматичної реєстрації телеметричної інформації при випробуваннях різних об'єктів; системи автоматичної сигналізації аварійних ситуацій на електростанції та ін.

У загальному випадку, коли здійснюється контроль більшої кількості параметрів, крім того, деякі з цих параметрів не можуть бути виміряні безпосередньо (непрямі вимірювання), в системах автоматичного контролю застосовуються спеціалізовані обчислювачі або мікро-ЕОМ. Сполучення цих пристроїв з функціональними елементами системи безперервного типу передбачає

наявність аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів (АЦП і ЦАП) та комутаторів. Деякі функції, що виконувалися раніше окремими елементами (задає, порівнює, реєструє), покладаються на мікро-ЕОМ.

Таким чином, функціональна схема системи автоматичного контролю містить (рис. 2.7): вимірювально-перетворювальні елементи; комутатор, який здійснює підключення до вимірювальних елементів; аналого-цифровий перетворювач; компаратор або елемент, що порівнює; елемент, що задає; підсилювально-перетворювальні елементи; цифро-аналоговий перетворювач і пристрої для реєстрації, що становлять собою аналогові або цифрові вимірювальні прилади з можливістю запису сигналів.

Приклади різних систем автоматичного управління і контролю дозволяють *залежно від характеру внутрішніх динамічних процесів* виділити такі *класи систем*: 1) безперервні системи, у яких вхідні і вихідні сигнали кожного з елементів змінюються безперервно, 2) дискретні системи, що містять хоча б один момент з дискретним характером зміни сигналу і підрозділяються на імпульсні, релейні та цифрові.

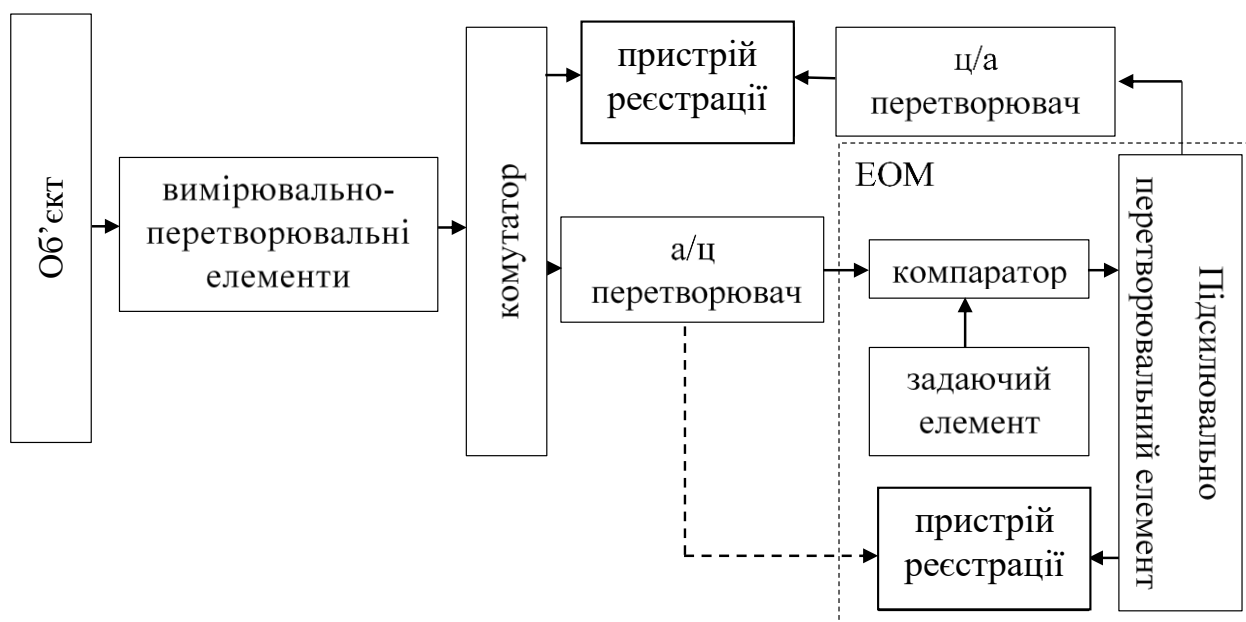


Рисунок 2.7 – Функціональна схема системи автоматичного контролю
(у загальному випадку)

2.4 Класифікація елементів систем автоматичного управління і контролю

Аналіз наведених класів систем автоматичного управління та контролю показує, що будь-яка система складається з окремих елементів, пов'язаних між собою. При цьому різноманіття автоматичних систем, призначених для контролю і управління різними за своєю фізичною природою об'єктами, тягне за собою різноманіття елементів як щодо їхнього конструктивного виконання, фізичних принципів, покладених в основу побудови, роду енергії, що використовується під час роботи, так і в плані виконуваних ними функцій. Це призводить до необхідності здійснити класифікацію елементів, об'єднавши їх в окремі групи з однаковими класифікаційними ознаками, що дозволить проводити вивчення не кожного окремого елемента, а цілого класу.

Класифікаційні ознаки можуть бути основними і другорядними. Тому при їх виборі потрібно розглянути *роль окремого елемента в системі*, його характерні риси, потім встановити на цій основі можливі загальні ознаки і згрупувати за ним класи елементів, виходячи із загальної мети – розробки системи управління, виділити головні і допоміжні ознаки і намагатися розташувати їх у порядку важливості.

Завдання кожного елемента в загальному випадку полягає в якісному і кількісному перетворенні інформації, отриманої від попереднього елемента, і передачі її у формі, зручній для використання, подальшого елемента. Таким чином, будь-який елемент автоматики можна розглядати, в першу чергу, як перетворювач енергії, на вхід якого надходить деяка величина g , а з виходу знімається величина x . В одних елементах енергія вихідного сигналу x береться повністю з енергії вхідного сигналу g , такі елементи називаються пасивними. В інших є додаткове джерело енергії потужністю N . Тут вхідна величина g тільки керує розповсюдженням (передачею) енергії додаткового джерела на вихід елемента. Ці елементи називаються активними. Отже, за наявності додаткового

джерела енергії всі елементи систем автоматичного управління і контролю можна розділити на два класи: пасивні та активні.

Аналізуючи наведені приклади систем (див. рис. 1.3, 1.5), можна помітити, що застосовуються елементи, які використовують різний рід енергії додаткового джерела, різний фізичний принцип дії, крім того, характер зміни вихідних сигналів елементів може бути різним – *безперервним, імпульсним, релейно-імпульсним.* У силу цього можна зробити класифікацію за зазначеними ознаками. Так, за родом енергії допоміжного джерела елементи можуть бути поділені на *електричні, пневматичні, механічні та комбіновані.*

За фізичним принципом дії розрізняють елементи: *електричні, теплові, магнітні, механічні, оптичні, акустичні, рідинні, газові та ін.*

За характером зміни вихідної величини можна виділити такі класи елементів: *безперервний, імпульсний, цифровий, релейний.*

Важливою властивістю елемента є його здатність розрізняти зміну знака (плюс/мінус) або фази вхідного сигналу. За цією властивістю елементи поділяють на *реверсивні (двотактні), у яких знак (фаза) вихідного сигналу змінюється при зміні знаку вхідного сигналу, і нереверсивні (однотактовий), знак (фаза) вихідного сигналу яких не залежить від полярності вхідного.*

Наведена класифікація є досить корисною з точки зору впорядкування елементів за різними ознаками, однак зачіпає вузькі питання, пов'язані з вирішенням завдання вибору або розробки певного елемента, або завдання побудови конкретної системи автоматичного управління.

Загальні питання реалізації принципів побудови систем та їх дослідження не можуть бути вивчені повною мірою в рамках представлених видів класифікації. Більш зручною для цієї мети є класифікація елементів за їхнім функціональним призначенням і за видом рівнянь, що описують процеси в елементі, що впливає безпосередньо з самого процесу проектування системи, яке *поділяється на два етапи.* На першому етапі (*функціональний рівень проектування*) на основі відомої задачі і прийнятого принципу управління

вибираються основні конструктивні елементи, що виконують ту чи іншу функціональну дію. Тут використовується класифікація елементів за функціональним призначенням і намічається загальна попередня функціональна схема системи управління. Другий етап (*структурний рівень проектування*) є дослідженням динамічних властивостей системи, на основі якого уточнюється обрана схема системи, тому в цьому випадку важливо розташовувати не конструктивними елементами, а їх еквівалентними математичними моделями, тобто рівняннями, що описують процеси, які відбуваються в елементах. На цьому етапі зручно скористатися класифікацією елементів за видом їхніх рівнянь.

Приклади систем автоматичного управління та контролю дозволяють помітити, що, незважаючи на різноманіття технічних завдань, які розв'язуються системами, різну фізичну природу регульованої величини, всі системи включають в себе елементи, *однакові за своїм функціональним призначенням*. У зв'язку з цим із безлічі елементів можна виділити такі групи: *вимірювальні-перетворювальні* (сприймають), елементи, що задають, елементи, які порівнюють, *підсилювальні-перетворювальні*, виконавчі, *коригувальні* (змінюють динамічні властивості системи), *допоміжні*. Об'єднуючою ознакою кожної з груп служить певна функція, яка виконується елементом у регуляторі. Нарешті, за *видом рівнянь*, що описують процеси, які протікають в елементах систем, виділяють такі елементи: *безперервні і дискретні*, що підрозділяються у свою чергу на *лінійні, лінеаризовані, нелінійні*.

Маючи в своєму розпорядженні різні види класифікації елементів, можна побудувати зведену класифікаційну схему (рис. 2.8). Слід зазначити, що подібна збільшена класифікація за багатьма з розглянутих ознак не є вичерпною і в ході вивчення окремих елементів уточнюватиметься.



Рисунок 2.8 – Зведена класифікаційна схема різних видів класифікації елементів

2.5 Узагальнена функціональна схема системи автоматичного управління

Будь-яку систему автоматичного управління, що використовує принцип управління за відхиленням, тобто коли відхилення керованої величини від необхідного значення є вихідною інформацією для прийняття рішення (управління), можна уявити в рамках розглянутої класифікації елементів за функціональним призначенням у вигляді узагальненої функціональної схеми (рис. 2.9). Зазначимо призначення кожного функціонально-необхідного елемента системи, зазначимо їхні деякі особливості виконання, а також умови наявності і відсутності того чи іншого елемента залежно від характеру системи.

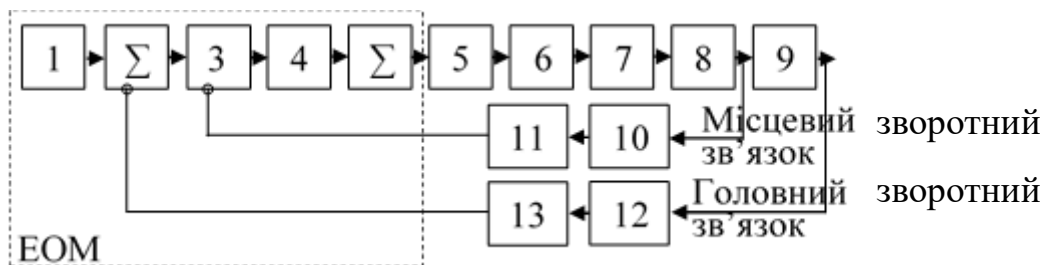


Рисунок 2.9 – Узагальнена функціональна схема системи автоматичного управління

Об'єкт управління 9 може становити різні парові і гідравлічні турбіни, теплові агрегати, електричні двигуни, де потрібно регулювання швидкості обертання; електричні генератори і спеціальні пристрої, де доводиться керувати напругою, частотою, електронними потоками; морські судна, літаки, керовані ракети, які мають автоматично утримуватися на заданій траєкторії, різні технологічні процеси, де керованим параметром може бути температура, тиск, витрати, концентрація, рівень тощо.

Вимірювально-перетворювальний елемент (датчик) 12 призначений для отримання інформації про поточний стан об'єкта управління і перетворення її у форму, придатну для роботи елемента порівняння.

Елемент, що задає 1 здійснює вироблення необхідного сигналу і може бути реалізований на елементах пам'яті або у вигляді програмного механізму.

Елемент, що порівнює 2, служить для отримання неузгодженості між необхідним значенням керованої координати, що задається сигналом задатчика $g(t)$, і оцінкою її дійсного стану, яка визначається вихідним сигналом вимірювача-перетворювача.

Слід зазначити, що досить часто вимірювально-перетворювальні елементи, а також елементи, що задають і порівнюють конструктивно, виконуються у вигляді єдиного пристрою. Це розглянуто в прикладах систем автоматичного управління (див. рис. 2.3, 2.5).

Підсилювально-перетворювальні елементи 3, 7 призначені для посилення і перетворення сигналу за рахунок допоміжного джерела енергії до величини, достатньої і зручної для роботи наступного елемента. У системах управління непрямої дії підсилювально-перетворювальних елементів може бути кілька. Тоді один (7) з них виконує роль підсилювача потужності і здійснює перетворення і посилення сигналу по потужності до величини, достатньої для приведення в дію, відповідно з сигналом управління, виконавчого елемента, а решта (3) використовуються як попередні підсилювачі для посилення малопотужних сигналів. У системах прямої дії підсилювально-перетворювальні елементи відсутні.

Виконавчий елемент 8 забезпечує зміну керуючої координати за рахунок керуючого впливу, що прикладається до об'єкта. Іноді виконавчий елемент суміщений з підсилювально-перетворювальним в єдиний блок, що називається сервомеханізмом.

Коригувальний елемент 4 застосовується для поліпшення динамічних властивостей систем, або для реалізації прийнятого закону управління. Розрізняють *послідовні і паралельні коригувальні елементи*. *Послідовний* коригувальний елемент 4 включається послідовно з іншими елементами в основне коло проходження сигналу. *Паралельний* коригувальний елемент 10 вводиться в

систему за допомогою додаткового зворотного зв'язку, що називається, на відміну від головного зворотного зв'язку, (ГЗЗ) *місцевим зворотним зв'язком* (МЗЗ).

Допоміжні елементи 5, 6, 11, 13 використовуються при переході від безперервних систем до імпульсних або цифрових систем. До цього класу елементів належать: імпульсний елемент 6, ЦАП 5, і АЦП 11, 13, комутатори.

Слід зазначити, що у *функціональній схемі безперервної системи допоміжні елементи 5, 6, 11, 13 відсутні*. При переході від безперервного способу управління до переривчатого в схему системи вводиться імпульсний елемент 6 як функціональний необхідний елемент, призначений для перетворення безперервного сигналу, що надходить на його вхід, у послідовність імпульсів, модульованих за одним з параметрів (амплітудою, частотою, тривалістю) цим сигналом.

Введення в структуру системи управління цифрового обчислювального пристрою (ЦОП), мікро-ЕОМ або мікроконтролера, призводить до появи нового класу систем, що називаються *цифровими системами автоматичного управління*. При переході від безперервної системи до цифрової на мікро-ЕОМ можуть бути покладені функції елемента, що задає (зберігання програми управління або значення уставки), елемента, що порівнює (віднімання цифрових кодів необхідного значення керуючої координати та її оцінки), коригувального елемента (формування більш складного закону управління) і елемента підсилення (множення на постійний коефіцієнт), тобто мікро-ЕОМ може розглядатися як елемент системи.

Крім того, мікро-ЕОМ може виконувати різні обчислювальні операції за непрямым визначенням параметрів, що не піддаються безпосередньому вимірюванню, проводити усереднення (згладжування) результатів вимірювань та інші арифметичні й логічні операції. Таким чином, функціональна схема цифрової системи управління набуває такого вигляду: елементи 1, 2, 3, 4 замінюються мікро-ЕОМ, вводяться допоміжні елементи 5, 11, 13 (елемент 6 відсутній). Аналого-цифрові перетворювачі 11, 13 призначені для перетворення

неперервних величин у цифровий код, придатний для використання його в мікро-ЕОМ. Зворотне перетворення цифрового коду, отриманого на виході мікро-ЕОМ, у безперервний сигнал, зручний для подальшого його відпрацювання виконавчим пристроєм (після посилення за потужністю), здійснюється ЦАП 5.

Отже, аналіз узагальненої функціональної схеми системи автоматичного управління показує, що наведений відповідно до класифікації елементів за функціональною ознакою перелік функціонально необхідних елементів систем є досить загальним і допускає побудову будь-якої системи автоматичного управління.

2.6 Уніфікація елементів систем автоматичного управління і контролю

Можливість декомпозиції регулятора на окремі елементи, що виконують більш дрібні функції, створює передумови для розроблення уніфікованої системи елементів автоматики. Уніфікація елементів полягає в розробці універсальних типів елементів, пригідних до застосування в автоматичних системах управління об'єктами найрізноманітнішої фізичної природи. Уніфіковані елементи повинні легко з'єднуватися між собою, забезпечуючи оперативну і економічну побудову регуляторів з використанням *агрегатно-модульного підходу*, який полягає в тому, що в його основу покладено не фізичну природу впливу на вході регулятора або всередині каналу управління, а передана цими впливами інформація. Такий підхід дозволяє збирати регулятори, або пристрої керування різних систем автоматичного управління і регулювання з стандартних спеціалізованих елементів або блоків.

Одним з основних системотехнічних принципів, покладених в основу побудови набору уніфікованих елементів, є принцип сумісності окремих елементів: інформаційної, енергетичної, метрологічної, конструктивної та експлуатаційної.

Крім того, передача інформації в системі управління між сполученими елементами здійснюється уніфікованими сигналами електричної або пневматичної гілки. Сигнали електричної гілки в свою чергу поділяються на такі класи: 1) *безперервні сигнали струму і напруги*; 2) *безперервні частотні сигнали*; 3) *кодовані сигнали*.

Питання для самоконтролю

1. Об'єкти управління і види впливу на них.
2. Елемент системи та його роль у системі. Класифікація елементів системи.
3. Автоматичні системи та їх види. Приклади автоматичних систем.
4. Уніфікація елементів. Принципи уніфікації елементів.

3 КВАНТУВАННЯ СИГНАЛІВ У ЧАСІ

3.1 Визначення дискретизації сигналів за часом

У ході квантування за часом безперервна за аргументом функція $x(t)$ перетворюється у функцію $x_d(t)$ дискретного аргументу. Таке перетворення може бути виконане шляхом взяття відліків функції $x(t)$ у певні дискретні моменти часу $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$. У результаті функція $x(t)$ замінюється сукупністю миттєвих значень $x(t_i)$ [$i = 0, 1, 2, \dots, n$]. Часовий інтервал $T_k = t_i - t_{i-1}$ між двома сусідніми фіксованими моментами часу, в яких задається дискретна функція, називається *інтервалом часового квантування*. Величина, зворотна інтервалу часового квантування, $f_k = \frac{1}{T_k}$ називається *частотою квантування*.

Частота квантування має вибиратися так, щоб за відліковими значеннями $x(t_i)$ можна було б із заданою точністю отримати вихідну функцію.

3.2 Вибір кроку квантування за часом

Відомо кілька критеріїв вибору частоти квантування за часом. До таких критеріїв належить, зокрема, частотний критерій В.А. Котельникова – К. Шеннона – Г. Найквіста. Цей критерій, який отримав назву теореми Котельникова – Шеннона – Котельникова, ґрунтується на наступній моделі сигналів:

- сигнал є стаціонарним випадковим процесом;
- спектр сигналу суцільний і обмежений певною частотою, за межами якої він тотожно дорівнює нулю.

Теорема В.А. Котельникова: якщо безперервна функція $x(t)$ задовольняє умови Діріхле (обмежена, кусково-неперервна і має кінцеве число екстремумів)

та її спектр обмежений деякою частотою f_c , то вона повністю визначається відліками, що знаходяться на відстані один від одного – $T_k = \frac{1}{2f_c}$.

Для доведення теореми розглянемо вирази прямого і зворотного перетворення Фур'є неперервної функції $x(t)$.

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (3.1)$$

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.2)$$

У даному окремому випадку функції з обмеженим спектром можна записати:

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.3)$$

Доповнимо функцію до періодичної з періодом, рівним $1/2f_c$ (рис. 3.1) і розкладемо її в ряд Фур'є (3.3) та (3.4).

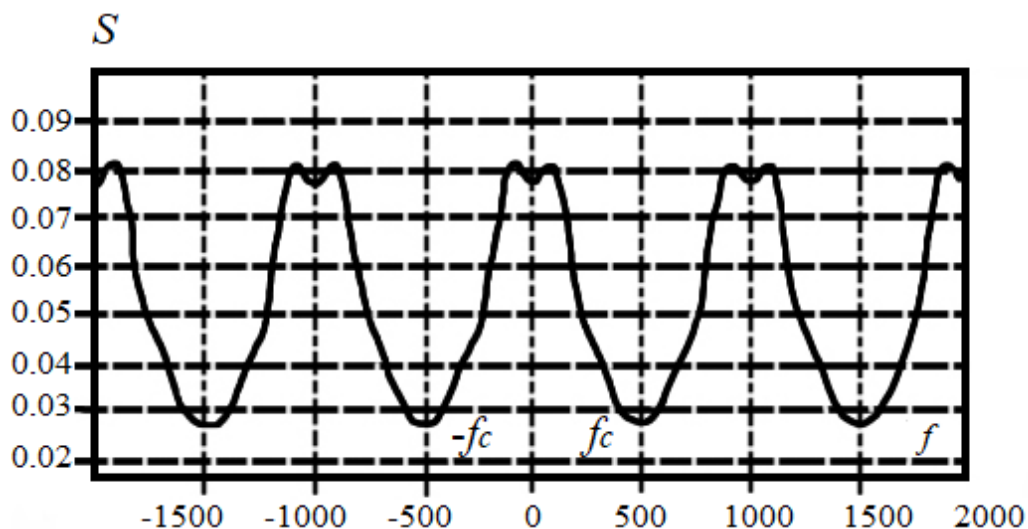


Рисунок 3.1 – Функція з періодом, рівним $\frac{1}{2f_c}$

$$S(j\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} \underline{C}_k \exp\{j\pi k \frac{\omega}{\omega_c}\} \quad (3.4)$$

$$\underline{C}_k = \frac{1}{2\omega_c} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} S(j\omega) \exp\{-j\pi k \frac{\omega}{\omega_c}\} d\omega \quad (3.5)$$

Порівнюючи вирази (3.3) та (3.5) бачимо, що вони *співпадають* з точністю до постійного множника $\Delta t = \frac{\pi}{\omega_c}$, якщо прийняти $t = -k \cdot \Delta t$.

Тобто,

$$\underline{C}_k = \frac{\pi}{\omega_c} x(-k \cdot \Delta t). \quad (3.6)$$

Підставимо отриманий вираз для $\underline{C}_k$ в (3.4):

$$S(j\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_c} x(-k\Delta t) \exp\{j\pi k \frac{\omega}{\omega_c}\} \quad (3.7)$$

Після підстановки (3.6) в (3.3), заміни знака при k (тому що підсумовування проводиться за всіма позитивними і негативними значеннями k) і перестановки операцій підсумовування і інтегрування, отримаємо:

$$X(t) = \frac{1}{\omega_c} \sum_{-\infty}^{\infty} x(-k\Delta t) \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \exp\{j\omega(t - k\Delta t)\} d\omega. \quad (3.8)$$

Порахуємо інтеграл:

$$\begin{aligned} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \exp\{j\omega(t - k\Delta t)\} d\omega &= \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \cos \omega(t - k\Delta t) d\omega - j \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \sin \omega(t - k\Delta t) d\omega = \\ &= \frac{2 \sin \omega_c(t - k\Delta t)}{t - k\Delta t}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

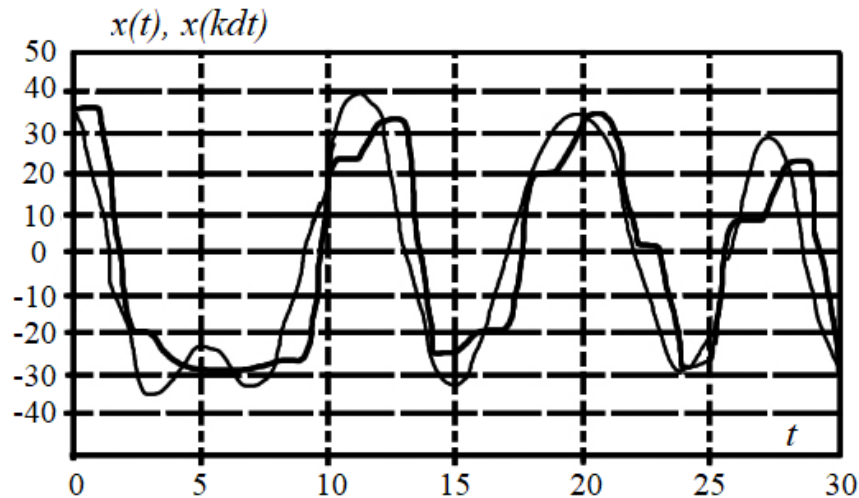
оскільки $\int_{-\omega_c}^{\omega_c} \sin \omega(t - k\Delta t) d\omega = 0$.

Після підстановки (14.9) в (14.8) остаточно отримаємо:

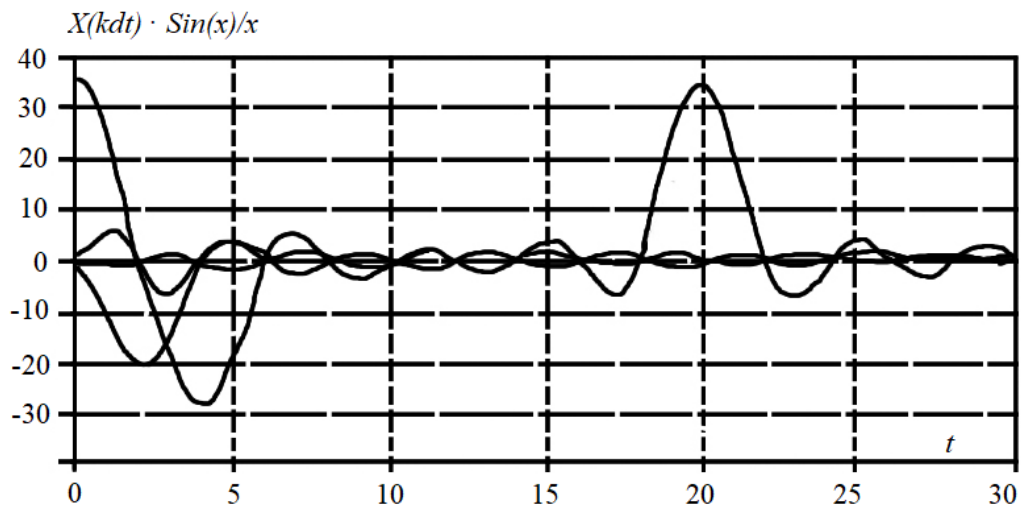
$$X(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(-k\Delta t) \frac{\sin[\omega_c(t - k\Delta t)]}{\omega_c[t - k\Delta t]}. \quad (3.10)$$

Вираз (3.10) є аналітичним відображенням теореми Котельникова.

З (3.10) видно, що безперервна функція $X(t)$ (рис. 3.2, а), яка володіє обмеженим спектром, може бути подана розкладанням у ряд, кожен член якого виражається однаковою функцією виду $\sin(x)/x$ (функція відліку), але з різними коефіцієнтами (рис. 3.2, б).



а)



б)

Рисунок 3.2 а) – Функція відліку; б) – Функція відліку, але з різними коефіцієнтами $x(k\Delta t)$

Ряд (3.10) є розкладанням випадкового процесу з координатними функціями (детермінованими функціями часу) і ваговими коефіцієнтами

$x(k\Delta t)$, які є випадковими величинами, рівними миттєвим значенням сигналу в точках $k\Delta t$.

Функція відліків у момент часу $t = k\Delta t$ досягає максимуму і дорівнює одиниці. У моменти часу $t = (k \pm i)\Delta t$, де $i = 1, 2, 3 \dots$ функція відліків спадає, звертаючись в нуль при $t = \infty$.

Сума (3.10) у кожен k -й момент часу визначається тільки однією k -ю складовою, тому що всі інші складові в цей момент часу звертаються в нуль. У середині проміжку Δt відновлювана функція визначається всіма складовими.

3.3 Відтворення безперервного сигналу

Відомо, що функція виду $\frac{\sin y}{y}$ є реакцією *ідеального фільтра нижніх частот* з граничною частотою ω_c на дельта-функцію. Отже, якщо в приймальному пристрої помістити такий фільтр і пропустити через нього *квантований сигнал*, що становить послідовність з частотою $f_k = 2f_c = \frac{\omega_c}{\pi}$ дуже короткочасних імпульсів, *амплітуди яких пропорційні відлікам вихідної неперервної функції*, то, підсумовуючи вихідні сигнали фільтра, можна відтворити з досить високим ступенем точності вихідний безперервний сигнал.

Однак нас цікавить випадок, коли *сигнал $X(T)$ обмежений в часі (T_c)*. У цьому випадку сума (3.10) буде кінцевою

$$X'(t) = \sum_{k=1}^n x(k\Delta t) \frac{\sin[\omega_c(t - k\Delta t)]}{\omega_c[t - k\Delta t]}, \quad (3.11)$$

$$\text{де } n = \frac{T_c}{\Delta t} = 2f_c \cdot T_c.$$

Усічення нескінченної суми, тобто обмеження її тими значеннями Xk , які виявляються в межах T_c , зменшує точність подання сигналу $x(t)$.

Це перший чинник, що визначає точність подання.

Крім того, сигнал кінцевої тривалості має нескінченний спектр гармонійних складових. Тому обмеження спектра сигналу деякою частотою ω_c є другим чинником, що знижує точність подання безперервного сигналу $x(t)$ дискретними відліками.

Середній квадрат відносної похибки в цьому випадку визначається виразом $\alpha = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%$, де E – повна енергія необмеженого спектра сигналу; ΔE – енергія «хвоста» спектра, тобто тієї його частини, яка розташована за межами f_c .

Щоб похибка формули (3.11) була мала, має виконуватися умова:

$$n = 2 f_c \cdot T_c \cdot 1. \quad (3.12)$$

Додаткова похибка вноситься при відновленні сигналу $x(t)$ за рахунок неідеальності фільтра нижніх частот, тому що ідеальний фільтр НЧ фізично не можна реалізувати (передбачає наявність відгуку на δ -функцію при $t < 0$, тобто до початку подачі на вхід).

Однак на практиці ніколи не потрібно ідеально точне відтворення сигналу, що передається, тому обмежують спектр сигналу діапазоном з верхньої частотою ω_c , в якому зосереджена основна енергія сигналу.

Дисперсія зведеної похибки, що виникає в результаті усічення, буде:

$$D_{\omega_c} = \frac{\frac{1}{\pi T_c} \int_{\omega_c}^{\infty} |S(j\omega)|^2 d\omega}{(X_{\max} - X_{\min})^2}, \quad (3.13)$$

де $\frac{1}{\pi T_c} \int_{\omega_c}^{\infty} |S(j\omega)|^2 d\omega$ – середня потужність частини спектра, що

відсікається;

T_c – тривалість сигналу;

$X_{\max}$, $X_{\min}$ – ідеальні значення $X(T)$.

Можливе і таке подання:

$$D_{\omega_c} = \frac{Q_{\omega_c} \cdot P_{\tau}}{(X_{\max} - X_{\min})^2}, \quad (3.14)$$

де $P_{\tau} = \frac{1}{\pi T_c} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} |S(j\omega)|^2 d\omega$ – середня потужність сигналу;

$$Q_{\omega_c} = \frac{\int_{-\omega_c}^{\omega_c} |S(j\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{\omega_c} |S(j\omega)|^2 d\omega} - \text{відносна площа ділянки енергетичного спектра}$$

$X(T)$, що відсікається.

За заданою величиною D_{ω_c} та відомих P_{τ} , $X_{\max}$, $X_{\min}$, $S(j\omega)$ можна дізнатися ω_c за допомогою:

а) використання таких критеріїв оцінювання:

$$\varepsilon(t) = [S(t) - S_{\text{оц}}(t)];$$

б) максимальна абсолютна та відносна похибки:

$$\varepsilon_{\max} = \max |S(t) - S_{y0}(t)|, \quad \Delta_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} = \frac{D\tau}{D_S};$$

в) ефективна відносна похибка

$$\Delta_{y0} = \frac{\sqrt{P_{\tau}}}{D_S} = \frac{\sqrt{[\varepsilon^2(t)]}}{D_S};$$

г) середня відносна похибка

$$\Delta_{cp} = \frac{\overline{[\varepsilon^2(t)]}}{D_s}.$$

Питання для самоконтролю

1. Поняття дискретизації сигналу. Дискретизація сигналів за часом.
2. Безперервний сигнал та його відтворення.

4 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Вхідною величиною вимірювального приладу є його вимірювана величина.

Найбільше і найменше значення вимірюваної величини, для яких нормовані похибки називаються межами вимірювання. Область значень, укладена між верхньою і нижньою межами вимірювання, називається діапазоном вимірювань. Від діапазону вимірювань слід відрізнити діапазон показань, який охоплює область значень шкали, обмежену кінцевим і початковим значеннями шкали. Таким чином, діапазон вимірювань, що охоплює частину шкали, в межах якої вимірювання можуть бути проведені з нормованою похибкою, більш вузький, ніж діапазон показань, що охоплює всю шкалу.

Вихідною величиною вимірювального приладу є зміна стану відлікового пристрою, наприклад, положення стрілки приладу.

Функція (рівняння) перетворення – функціональна залежність між вихідною величиною y і вхідною величиною x . Як і будь-яка функція, функція перетворення може задаватися аналітично (рівнянням), таблично або графічно. В аналітичну функцію перетворення зазвичай входять конструктивні параметри приладу або перетворювача і тому вона використовується під час розрахунку та проектування. Функція перетворення реального перетворювача визначається експериментально. Під час експерименту визначається залежність вихідної величини від вхідної. Для спрощення аналізу отриманої функції за допомогою табличних даних будується графік.

Зазвичай бажано, щоб функція перетворення була лінійною. Чутливість – це відношення зміни вихідної величини вимірювального приладу або вимірювального перетворювача до зміни, що викликала зміну вхідної величини. Чутливість визначається виразом (4.1) і може бути визначена за будь-якого способу завдання функції перетворення.

У важливому окремому випадку, коли вихідна величина змінюється пропорційно вхідній, $S = y/x$, де y – значення вихідної величини, відповідне вхідній величині x . При нелінійній функції перетворення чутливість залежить від значення вхідної величини.

Для приладу або перетворювача може визначатися абсолютна, відносна і приведена похибки. Абсолютна похибка приладу в даній точці діапазону вимірювання дорівнює:

$$\Delta = x_n - x, \quad (4.2)$$

де x_n – показання приладу;

x – істинне значення вимірюваної величини.

Однак у зв'язку з тим, що справжнє значення невідомо, на практиці замість нього використовується дійсне значення x_n . Як x_n приймають свідчення більш точного, зразкового приладу.

Абсолютна похибка приладу виражається в тих же одиницях, що і вимірювана величина.

Відносна похибка приладу дорівнює відношенню абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини і зазвичай виражається у відсотках:

$$\delta = (\Delta / x) \cdot 100 = [(x_n - x) / x] \cdot 100. \quad (4.3)$$

Зведена похибка приладу також виражається у відсотках і дорівнює відношенню абсолютної похибки до нормуючих значень x_N , яке приймається рівним верхній межі вимірювань (якщо нульова відмітка знаходиться на краю або поза шкалою) або діапазону вимірювання (якщо нульова відмітка знаходиться всередині діапазону вимірювань), %. Зведену похибку можна розрахувати за формулою (4.4).

$$\gamma = (\Delta / x_N) \cdot 100 = [(x_n - x) / x_N] \cdot 100 \quad (4.4)$$

Значення абсолютної, відносної та зведеної похибки використовуються для нормування похибки приладів.

Абсолютну похибку вимірювального перетворювача неможливо визначити за виразом (4.2), оскільки вхідний і вихідний величини можуть мати різну фізичну природу, а також внаслідок того, що часто відсутній зразковий вимірювальний перетворювач, за яким можна було б перевірити робочий перетворювач. Розрізняють *номінальну функцію перетворення* вимірювального перетворювача $y_{ном} = F_{ном}(x)$, яку він повинен мати згідно з державними стандартами, технічними умовами або іншим нормативним документам, і реальну $y = f(x)$, яку, він має в дійсності. Різниця значень дійсної і номінальної функцій перетворення при одному і тому ж значенні вхідної величини визначає *абсолютну похибку перетворювача* за виходом:

$$\Delta y = y - y_{ном} \quad (4.5)$$

Похибка створюється перетворювачем. Однак часто буває корисно знати значення вхідного сигналу, відповідного похибки перетворювача. Абсолютним значенням похибки перетворювача за входом називається різниця:

$$\Delta x = X_{ном} - x, \quad (4.6)$$

де x – справжнє значення вхідної величини;

$X_{ном}$ – значення вхідної величини, що визначається за номінальною функцією перетворення $y_{ном} = F_{ном}(x)$ при значенні вихідної величини $y_{ном}$, відповідної до істинного значення x .

Відносні похибки за виходом і входом визначаються відповідно рівняннями:

$$\Delta y = \Delta y / y \quad (4.7)$$

$$\delta x = \Delta x / x \quad (4.8)$$

Наведені похибки за виходом та входом:

$$\gamma_y = \Delta y / (y_{\max} - y_{\min}) \quad (4.9)$$

$$\text{та } \gamma_x = \Delta x / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (4.10)$$

де $x_{\max}$ та $y_{\max}$ – максимальні значення вхідної і вихідної величин, а $x_{\min}$ і $y_{\min}$ – їхні мінімальні значення.

Очевидно, при пропорційній функції перетворення $y = Sx$ значення відносних похибок так само як і наведених похибок за входом та виходом збігаються. У техніці часто використовуються перетворювачі з лінійною функцією перетворення:

$$y = Sx + y_0, \quad (4.11)$$

де S – чутливість перетворювача;

y_0 – значення вихідної величини при нульовому значенні вхідної.

Відхилення такої функції перетворення від номінальної може бути викликано відхиленням y_0 і відхиленням чутливості S . Похибка, обумовлена неномінальним значенням вихідної величини при нульовому значенні вхідної y_0 , називається адитивною. Похибка, обумовлена не номінальним значенням чутливості S , називається мультиплікативною.

Адитивна похибка не залежить від вхідної величини. При зміні y_0 внаслідок будь-яких причин графік функції перетворення переміщається паралельно самому собі (рис. 4.1).

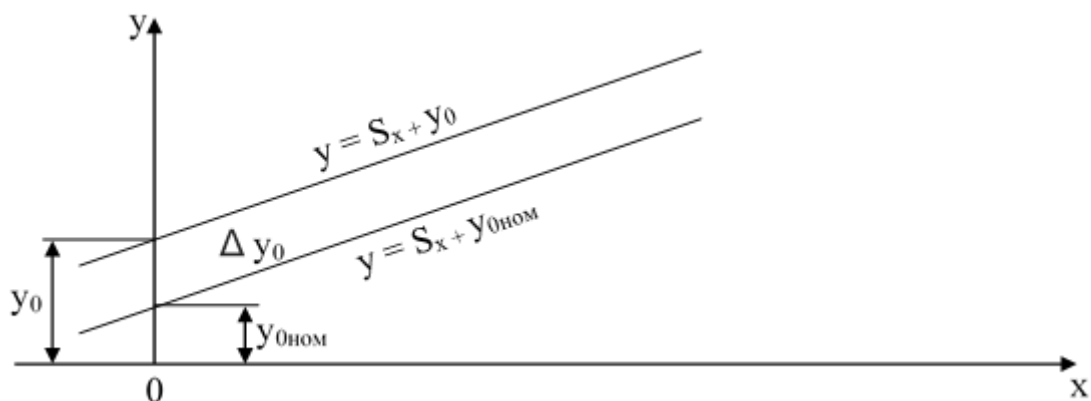


Рисунок 4.1 – Графік адитивної похибки

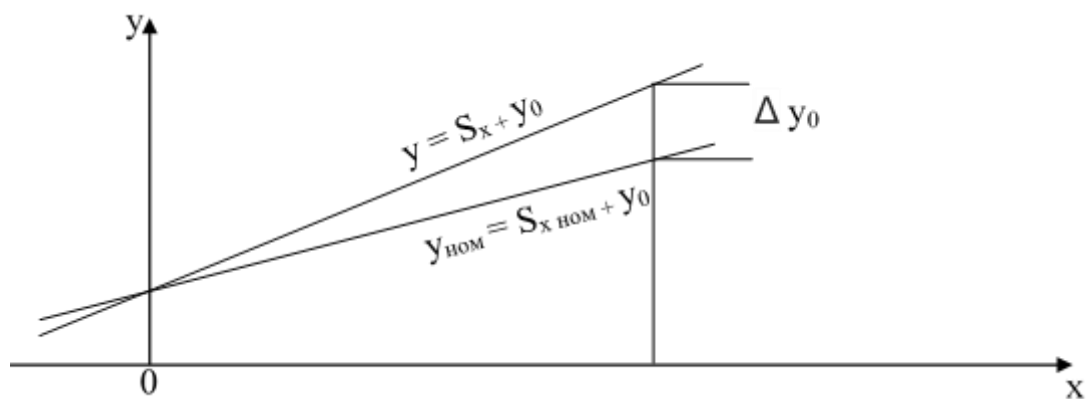


Рисунок. 4.2 – Графік мультиплікативної похибки

Значення цієї похибки:

$$\Delta y = \Delta y_0 = y_0 - y_{0ном}, \quad (4.12)$$

де $y_{0ном}$ – номінальне значення y_0 .

При мультиплікативній похибці нахил прямої графічно відображає функцію перетворення, що відрізняється від нахилу при номінальній функції перетворення (рис. 4.2). При цьому абсолютна похибка $\Delta y = y - y_{ном}$ залежить від вхідної величини x . Дійсно, нехай чутливість змінилася на ΔS і стала рівною $S = S_{ном} + \Delta S$, де $S_{ном}$ – номінальне її значення. У цьому випадку абсолютна похибка перетворювача рахується за формулою:

$$\Delta y = [(S_{ном} + \Delta S)x + y_0] - [S_{ном} \cdot x + y_0] = \Delta S x, \quad (4.13)$$

тобто абсолютна мультиплікативна похибка пропорційна вхідній величині x .

Розглянемо відносну мультиплікативну похибку при пропорційній функції перетворення $y = S_{ном} \cdot x$:

$$\Delta y = \Delta y / y = \Delta S \cdot x / S_{ном} \cdot x = \Delta S / S_{ном}. \quad (4.14)$$

Відносна мультиплікативна похибка дорівнює відносній зміні чутливості. Похибка вимірювальних засобів залежить від умов проведення вимірювань. При цьому розрізняють основну і додаткові похибки. Основною похибкою називається похибка, яка існує за так званих нормальних умов, які вказані в нормативних документах, що регламентують правила випробування і експлуатації даного засобу вимірювання. Наприклад, під нормальними умовами можуть розуміти: температуру навколишнього середовища $(+20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$; положення приладу горизонтальне з відхиленням від горизонтального, що не перевищує $\pm 2^{\circ}$; відносну вологість $(65 \pm 15)\%$; практичну відсутність магнітних і електричних полів; частоту живильної мережі (50 ± 1) Гц і т.ін.

Додаткова похибка виникає в ході відхилення умов випробування та експлуатації засобів вимірювання від нормальних. Вона нормується значенням похибки, викликаного відхиленням однією з величин, що має вплив на похибку від її нормального значення або виходом її за межі нормальної області значень. Наприклад, наведена похибка приладу за нормальних умов, тобто в діапазоні температур $(+20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, не перевищує 1%. Якщо температура лежить поза зазначеним діапазоном, то похибка може бути більше зазначеної. Наприклад, наведена додаткова похибка при зміні температури на 10°C не має перевищувати 1%.

Нормування похибки засобів вимірювання проводиться за максимально допустимим значенням основної та додаткової похибок. Похибка засобів вимірювань не повинна перевищувати одного з перерахованих нижче меж.

а) Якщо похибка має адитивний характер, то межа допустимої абсолютної похибки не має перевищувати:

$$\Delta_{\max} = a. \quad (4.15)$$

б) Якщо похибка має як адитивну, так і мультиплікативну складову, то межа допустимої абсолютної похибки не повинна перевищувати:

$$\Delta_{\max} = (a + bx). \quad (4.16)$$

в) Якщо похибка має мультиплікативний характер, то межа відносної похибки не має перевищувати:

$$\delta_{\max} = \Delta_{\max} / x = c. \quad (4.17)$$

г) Якщо похибка має як адитивну, так і мультиплікативну складові, то межа відносної похибки (у відсотках) не має перевищувати:

$$\delta_{\max} = \Delta_{\max} / x = \pm [c + d (x_k / x - 1)], \quad (4.18)$$

де a, b, c і d – постійні; x_k – кінцеве значення діапазону вимірювання. З (4.31) випливає, що при $x = 0$ межа абсолютної похибки:

$$\Delta_{\max} (0) = \pm dx_k, \quad (4.19)$$

а при $x = x_k$:

$$\Delta_{\max} (x_k) = \pm cx_k. \quad (4.20)$$

д) Наведена похибка не має перевищувати значення:

$$(\Delta_{np})_{\max} = \pm c. \quad (4.21)$$

В ході нормування похибки засобу вимірювання постійні a, b, c, d вибираються з такого ряду чисел: $1 \cdot 10n; 1,5 \cdot 10n; 2 \cdot 10n; 2,5 \cdot 10n; 4 \cdot 10n; 5 \cdot 10n; 6 \cdot 10n$, де $n = 1; 0; -1; -2$ і т.ін.

Засобам вимірювання присвоюється клас точності. Це узагальнена метрологічна характеристика, яка визначається межами допуску основної та додаткових похибок, значення яких встановлюються в межах стандартів на окремі види засобів вимірювання. Клас точності позначається числом, відповідним нормованій основній похибці засобу вимірювання. Для випадку (г) клас точності позначається у вигляді дробу c/d , наприклад: $0,1/0,05$.

Клас точності стрілкових приладів, як правило, позначається одним числом, рівним максимально допустимому значенню основної зведеної похибки s , тоді як клас точності цифрових приладів, мостів і компенсаторів вказується у вигляді дроби c/d .

Конкретні ряди класів точності встановлюються в стандартах на окремі види засобів вимірювання.

Окремими характеристиками похибки є варіації показань приладу і поріг чутливості. Варіація показань приладу – це найбільша різниця його показань при одному і тому ж значенні вимірюваної величини. Основною її причиною є тертя в опорах рухомої частини приладу. Варіацію визначають, порівнюючи показання приладу, лічені один раз після установки необхідного значення вимірюваної величини підходом знизу (з боку менших значень), а іншим разом – підходом зверху (з боку великих значень).

Поріг чутливості – це зміна вимірюваної величини, що викликає найменшу зміну показань, помітне при нормальному для даного приладу, способі відліку.

Власне споживання потужності приладом з кола, в якій проводиться вимірювання, є важливою характеристикою приладу. Воно призводить до зміни електричних параметрів цього кола і негативно впливає на точність вимірювання. Особливо сильно це проявляється при вимірах у малопотужних колах. Залежно від конструкції і призначення приладу споживана їм потужність може коливатися від 10 – 12 Вт до декількох ват.

4.1 Динамічні характеристики

Описані вище характеристики є статичними, тобто незалежними від часу. Вони, правду кажучи, мають сенс тільки в тому випадку, коли параметри вимірювального приладу (або іншого засобу вимірювання) і значення вимірюваної величини залишаються постійними, а час вимірювання не обмежено. На практиці, однак, ці умови часто не дотримуються: вимірювана величина змінюється за часом, вимір зазвичай потрібно проводити за максимально короткий час, параметри вимірювального приладу тільки наближено можна вважати незмінними. Одночасний облік усіх цих особливостей процесу вимірювання скрутний. Є, однак, багато випадків, коли про закон зміни вхідної величини від часу вимірювання можуть бути висловлені досить обґрунтовані припущення і коли засіб вимірювання є лінійною системою, тобто може бути описаний лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами:

$$a_0 \cdot d^n \cdot y / dt^n + a_1 \cdot d^{n-1} \cdot y / dt^{n-1} + \dots + a_n \cdot y = x(t), \quad (4.22)$$

де $a_0, a_1, \dots, a_n$ – постійні коефіцієнти.

Нерідко можна вважати, що до моменту часу $t=0$ вхідна величина була постійною і почала змінюватися лише при $t=0$. Якщо при цьому відраховувати значення вхідної величини від значення, яке вона мала до $t=0$, то отримаємо нульові початкові умови. Такий принцип спрощує визначення реакції ланки $y(t)$ на зміну вхідної величини. За нульових початкових умов рівняння (4.35) в операторній формі має вигляд:

$$(a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_n) \cdot y(p) = x(p), \quad (4.23)$$

де $p = d/dt$ – оператор.

Передатною функцією перетворювача називається відношення зображень за Лапласом вихідної величини до вхідної:

$$K(p) = y(p)/x(p). \quad (4.24)$$

Знаючи передатну функцію перетворювача, можна визначити його реакцію $y(t)$ на задану зміну вимірюваної величини $x(t)$ і визначити динамічну похибку:

$$\Delta y(T) = Y(t) - y_{cm}, \quad (4.25)$$

де $y(t)$ – значення вихідної величини вимірювального засобу в момент часу t ;

y_{cm} – значення вихідної величини, що задано його статичною функцією перетворення.

В ході аналізу динамічних характеристик використовуються наступні типові вхідні впливу.

1. Одинична функція. При такому впливі вхідні величина дорівнює 0 при $t < 0$ і одиниці при $t \geq 0$. З одиничною функцією перехідний процес перетворювача визначається співвідношенням:

$$h(t) = L^{-1} \cdot [K(p) / p], \quad (4.26)$$

де L^{-1} – символ зворотного перетворення Лапласа.

2. Гармонійна функція. При гармонійній зміні вхідної величини $x(t) = \text{Im}(X_m e^{j\omega t})$, де X_m – амплітуда її змiни; ω – її кругова частота. Вихідна величина змінюється також $y(t) = \text{Im}(Y_m e^{-j\omega t - \varphi(\omega)})$ гармонійно,

де Y_m – амплітуда вихідної величини. Відношення реакції перетворювача до вхідного впливу визначає частотну передатну функцію (комплексну чутливість):

$$K(j\omega) = Y(j\omega) / X(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (4.27)$$

де $A(\omega)$ – модуль частотної передатної функції;

$\varphi(\omega)$ – зсув фаз між вхідною і вихідною величинами.

Зв'язок між частотною передатною функцією і функцією передачі виражається співвідношенням $K(j\omega) = K(p)$ при $p = j\omega$.

Залежність модуля частотної передатної функції від частоти $A(\omega)$ визначає амплітудно-частотну характеристику перетворювача; залежність її аргументу від частоти $\varphi(\omega)$ визначає фазочастотну характеристику.

До важливих динамічних характеристик приладів належить час встановлення показань – проміжок часу, що пройшов з моменту підключення або зміни вимірюваної величини до моменту, коли відхилення показчика від сталого значення не перевищує 1,5% довжини шкали. Для багатьох приладів цей час не перевищує 4с. Часом встановлення показань характеризуються прилади, що мають показчик і шкалу. Для цифрових приладів вказується час вимірювання, що відраховується від початку вимірювання або зміни вимірюваної величини, до отримання результату на відліковому пристрої з нормованою похибкою.

Зазвичай прагнуть мати прилади, що забезпечують малий час встановлення показань (в разі цифрових приладів – малий час вимірювання).

Надійність приладу – здатність зберігати задані характеристики за певних умов протягом заданого часу. Вихід значення параметрів і характеристик приладу за межі норми вважається відмовою. Відмова вимірювального приладу може наступити, якщо його дійсна похибка досягне більшого значення, ніж її нормуюче значення, що визначається класом точності.

Кількісним показником надійності є напрацювання на відмову – середній час безвідмовної роботи приладу. Напрацювання на відмову є статистичною величиною. Вона встановлюється для даної серії приладів на підставі вибірових випробувань невеликої їх партії, що входять в цю серію.

4.2 Структурні схеми приладів для вимірювання неелектричних величин

Прилади для вимірювання неелектричних величин або окремі їхні перетворювачі в робочих умовах піддаються впливу різних несприятливих умов, що погіршують їх точність. Одним з методів зменшення похибки є *структурний метод*. За цим методом прилад будується з перетворювачів, на які мають вплив величини, але його структурна схема обирається такою, щоб приватні похибки окремих перетворювачів взаємно компенсувалися. Структурний метод дозволяє побудувати "гарний" прилад, використовуючи "погані" перетворювачі. Структурна схема приладу багато в чому визначає його властивості. Прилади, побудовані за простими схемами, зазвичай дешевше і надійніше приладів, побудованих за складними схемами. Однак ускладнення схеми призводить до приладу з кращими метрологічними характеристиками: меншою похибкою, меншою інерційністю тощо.

4.3 Послідовне з'єднання перетворювачів

Послідовною схемою з'єднання перетворювачів називається така, за якою вхідною величиною кожного наступного перетворювача служить вихідна величина попереднього. Вхідною величиною першого перетворювача є вимірювана величина. Окремі перетворювачі можуть мати більш складну структуру. Прикладом схеми з послідовним з'єднанням перетворювачів є структурна схема термоанемометра (приладу для вимірювання швидкості газів). Датчик (рис. 4.3, *а*) є платиновим дротом 1 з опором R , припаяним до манганінових стержнів 2, які змонтовані на ручці 3. Платиновий дріт за допомогою інших дротів 4 включений в електричне коло, як показано на рис.

4.3, б), і нагрівається струмом I , що йде від джерела E . При протіканні струму I по рамці вимірювального механізму його стрілка відхиляється. Символом R_c позначено сумарний опір дротів, вимірювального механізму і джерела живлення.

У розглянутому термоанемометрі можна виділити такі елементарні перетворювачі, що включені послідовно (рис. 4.3, в): 1 – нагрітий платиновий дріт, що перетворює швидкість v повітря в зміну температури t ; 2 – той самий платиновий дріт, що виконує функцію термометра опору і перетворює зміну температури в зміну опору R ; 3 – електричне коло, що перетворює зміну опору R в зміну струму I ; 4 – вимірювальний механізм, що перетворює зміну струму I в зміну відхилення стрілки або відліку приладу y .

Визначимо функцію перетворення приладу з послідовним з'єднанням перетворювачів. При цьому вважатимемо заданими функції перетворення окремих перетворювачів. Функція перетворення першого перетворювача є залежністю температури дроту термоанемометра t від швидкості повітря v і виражається складною аналітичною залежністю, яку позначимо:

$$t = f(v). \quad (4.28)$$

Функція перетворення другого перетворювача є залежністю опору платинового дроту R від температури t і виражається рівнянням:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (4.29)$$

де R_0 – опір при 0°C ;

α – температурний коефіцієнт опору.

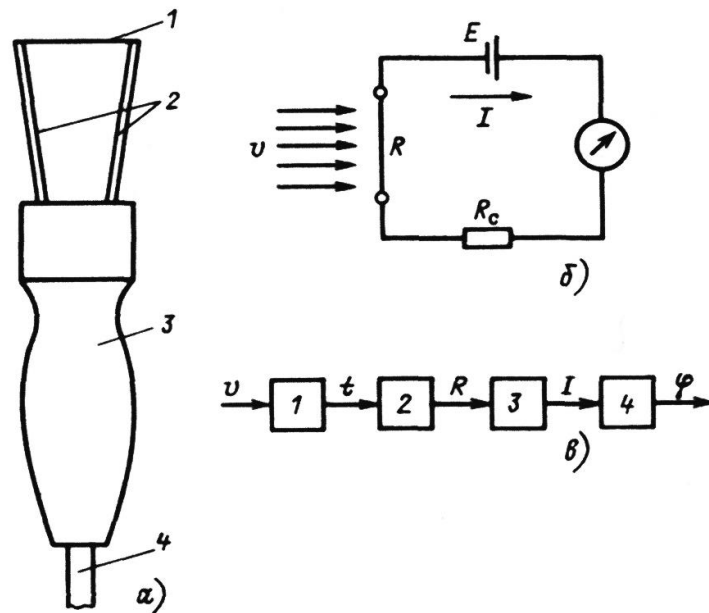


Рисунок 4.3 – Структурна схема термоанемометра

Функція перетворення третього перетворювача – залежність струму I в колі від значення опору R :

$$I = E / (R + R_c). \quad (4.30)$$

Функція перетворення четвертого перетворювача – залежність відхилення стрілки магнітоелектричного механізму φ від струму I , що проходить через нього, причому:

$$\varphi = S_M I, \quad (4.31)$$

де S_M – чутливість механізму.

Функція перетворення приладу виходить шляхом послідовної підстановки функцій перетворення елементарних перетворювачів (4.28), (4.29), (4.3) і (4.31):

$$\begin{aligned} \varphi &= S_M I = S_M E / (R + R_c) = S_M E / [R_c + R_0(1 + \alpha t)] = \\ &= S_M E / (R_c + R_0[1 + \alpha f(v)]). \end{aligned} \quad (4.32)$$

Вираз (4.32) визначає залежність відхилення стрілки приладу від вимірюваної швидкості повітряного потоку. Він показує також вплив конструктивних параметрів (S_M , E , R_c , R_0 , α) на функцію перетворення і може бути використаний при проектуванні.

Визначимо залежність чутливості приладу від чутливості окремих перетворювачів S_1 , S_2 , S_3 і S_4 . Згідно з визначенням чутливості:

$$S_1 = dt/dv, \quad S_2 = dR/dt, \quad S_3 = dI/dR, \quad S_4 = d\phi/dI. \quad (4.33)$$

Якщо перемножити значення чутливості, отримаємо:

$$S_1 S_2 S_3 S_4 = d\phi/dv. \quad (4.34)$$

Права частина рівності є чутливість приладу:

$$S = d\phi/dv. \quad (4.35)$$

Таким чином, при послідовному з'єднанні перетворювачів, чутливість приладу дорівнює добутку чутливості входять до нього перетворювачів:

$$S = S_1 S_2 S_3 S_4. \quad (4.36)$$

Розглянемо залежність похибки приладу з послідовним з'єднанням перетворювачів від похибок елементарних перетворювачів. Для простоти припустимо, що прилад складається з трьох перетворювачів (рис. 4.4). Вважаємо, що кожен окремо взятий перетворювач має похибку. Його вихідна величина може бути подана у вигляді суми:

$$y = y_n + \Delta y, \quad (4.37)$$

де y_n – частина вихідного сигналу, що визначається вхідною величиною і номінальною функцією перетворення;

Δy – абсолютна похибка, зведена до виходу перетворювача.

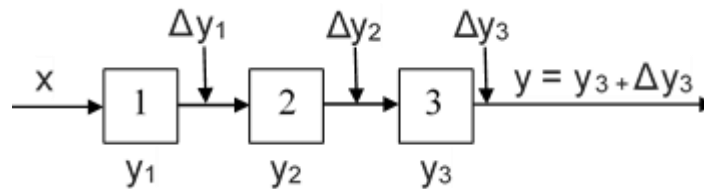


Рисунок 4.4 – Схематичне зображення приладу, що складається з трьох перетворювачів послідовним з'єднанням

Якщо перетворювачі з'єднані в послідовну схему (рис. 4.4), то сигнал похибки Δy впливає на вхід наступного перетворювача точно так, як і сигнал y_n . Оскільки похибка Δy зазвичай мала, можна вважати, що на виході подальшого перетворювача вона утворює сигнал $S\Delta y$, де S – чутливість наступного перетворювача. Якщо функція перетворення цього перетворювача нелінійна, то чутливість S залежить від сигналу y_n . Вихідна величина перетворювача 1 впливає на вхід перетворювача 2 (4.38):

$$y_1 = y_{1n} + \Delta y_1. \quad (4.38)$$

Вихідна величина перетворювача 2 при цьому дорівнюватиме:

$$y_2 = y_{2n} + S_2 \Delta y_1 + \Delta y_2, \quad (4.39)$$

де S_2 – чутливість перетворювача 2;

Δy_2 – похибка перетворювача 2.

Вихідна величина перетворювача 2 впливає на вхід перетворювача 3.

Вихідна величина перетворювача 3 при цьому дорівнюватиме:

$$y_3 = y_{3n} + (S_2 \Delta y_1 + \Delta y_2) S_3 + \Delta y_3 = y_{3n} + S_2 S_3 \Delta y_1 + S_3 \Delta y_2 + \Delta y_3. \quad (4.40)$$

де S_3 – чутливість перетворювача 3;

Δy_3 – похибка перетворювача 3.

За відсутності похибок вихідна величина приладу дорівнювала би y_{3n} , отже, похибка схеми:

$$\Delta y = y - y_n = S_1 S_2 \Delta y_1 + S_3 \Delta y_2 + \Delta y_3. \quad (4.41)$$

З (4.41) випливає, що при послідовному з'єднанні перетворювачів похибка приладу дорівнює сумі перерахованих до виходу похибок усіх вхідних у нього перетворювачів.

Аналогічно можна показати, що похибка по входу визначається виразом:

$$\Delta x = \Delta x_1 + (1/S_1) \Delta x_2 + (1/S_1 S_2) \Delta x_3, \quad (4.42)$$

де $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ – похибки перетворювачів 1–3 по входу.

Розглянемо наведену похибку приладу, що складається з перетворювачів з пропорційною функцією перетворення. Діапазон зміни вихідної величини такого приладу:

$$\begin{aligned} y_{\max} - y_{\min} &= S(x_{\max} - x_{\min}) = S_2 S_3 (y_{1\max} - y_{1\min}) = \\ &= S_3 (y_{2\max} - y_{2\min}) = y_{3\max} - y_{3\min}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Підставивши вирази (4.41) і (4.43) у формулу наведеної похибки (4.4), отримаємо:

$$\gamma_y = \gamma_{y1} + \gamma_{y2} + \gamma_{y3}. \quad (4.44)$$

Таким чином, при послідовному з'єднанні перетворювачів, що мають пропорційні функції перетворення, наведена похибка приладу дорівнює сумі наведених похибок перетворювачів, його складових.

За отриманими виразами можна визначити похибку приладу, якщо відомі похибки перетворювачів, його складових, наприклад, якщо похибки систематичні. Якщо ж похибки випадкові, то їхні значення, зазвичай, невідомі, але часто відомі імовірнісні параметри точності: середньоквадратична похибка, граничні похибки тощо.

Для схеми (рис. 4.4) абсолютне значення середньоквадратичної похибки при незалежності приватних похибок:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_2^2 S_3^2 + \sigma_1^2 S_2^2 S_3^2}, \quad (4.45)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – абсолютне значення середньоквадратичної похибки відповідних перетворювачів.

Наведена середньоквадратична похибка при пропорційній функції перетворення визначається виразом:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_{np1}^2 + \sigma_{np2}^2 + \sigma_{np3}^2}, \quad (4.46)$$

де $\sigma_{np1,2,3}$ – наведені середньоквадратичні похибки відповідних перетворювачів.

В (4.45) і (4.46) середньоквадратичні абсолютні або середньоквадратичні наведені похибки елементарних перетворювачів геометрично додаються.

За нормальних законів розподілу похибок елементарних перетворювачів за аналогічними формулами можуть визначатися і граничні похибки приладу за заданими довірчими ймовірностями.

Перевагою приладу з послідовним з'єднанням перетворювачів є його простота. Недоліком – досить велика похибка.

Диференціальні схеми з'єднання перетворювачів. Диференціальною схемою називається схема, яка містить два канали з послідовним з'єднанням перетворювачів, причому вихідні величини кожного з каналів подаються на два входи перетворювача, що віднімає. *Перетворювач, що віднімає (віднімаючий перетворювач)* – це перетворювач з двома входами, вихідна величина якого становить непарну функцію різниці двох вхідних:

$$y = F(y_1 - y_2). \quad (4.47)$$

Зокрема вихідна величина може дорівнюватиме:

$$y = y_1 - y_2. \quad (4.48)$$

На рис. 4.5 показано структурну схему диференціального перетворювача. Згідно з прийнятими позначеннями величина, що подається на сектор, позначеним знаком «-», віднімається з величини, що підходить до іншого сектору. Обидва канали диференціальної схеми робляться однаковими і знаходяться в однакових робочих умовах.

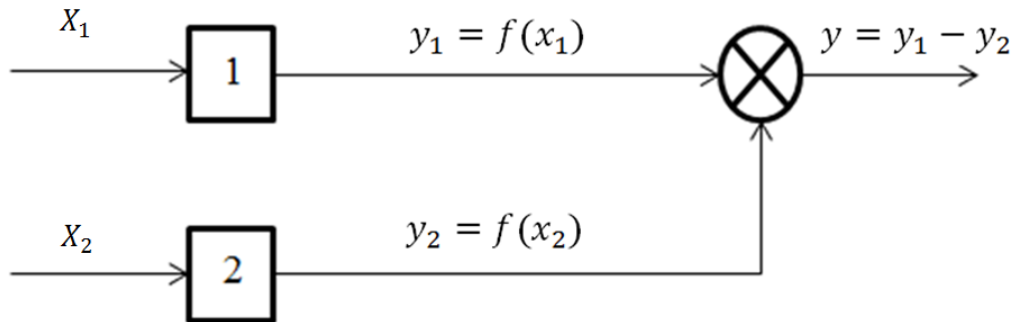


Рисунок 4.5 – Структурна схема диференціального перетворювача

Диференціальні схеми бувають *двох типів*. У схемі *першого типу* вимірювана величина впливає на вхід одного каналу, на вхід іншого – фізична величина тієї ж природи, але вона має постійне значення, зокрема, рівне нулю. *Другий канал* слугує для компенсації похибок, викликаних зміною умов роботи приладу. У схемі *другого типу* вимірювана величина після деякого перетворення впливає на обидва канали, причому так, що, коли на вході одного каналу вхідна величина зростає, на вході іншого – зменшується.

Розглянемо приклад. Нехай перетворювачі 1 і 2 мають лінійну функцію перетворення:

$$y_1 = Sx_1 + y_0, \quad y_2 = Sx_2 + y_0. \quad (4.49)$$

При цьому вихідна величина диференціального перетворювача:

$$y = y_1 - y_2 = S(x_1 - x_2). \quad (4.50)$$

Таким чином, якщо функція перетворення каналів диференціального перетворювача описується повним лінійним рівнянням (4.49), то функцією перетворення диференціального перетворювача є залежність (4.50).

Для диференціальної схеми першого типу $x_1=x$, $x_2=const$. При цьому чутливість схеми дорівнює чутливості одного каналу:

$$S_D = dy/dx = S. \quad (4.51)$$

Для диференціальної схеми другого типу зазвичай, причому $x_0 = const$:

$$x_1 = x_0 + x, \quad x_2 = x_0 - x, \quad (4.52)$$

Ці співвідношення виконуються з тим більшою точністю, чим менше x . З (4.50) і (4.52) випливає, що функція перетворення диференціального перетворювача має вигляд:

$$y = 2Sx, \quad (4.53)$$

а його чутливість вдвічі більше чутливості одного каналу:

$$S_D = 2S. \quad (4.54)$$

Розглянемо похибку перетворювача, складеного за диференціальною схемою рис. 4.5. Нехай перетворювачі 1 і 2 мають адитивні похибки, тобто такі, що не залежать від вхідної величини. У цьому випадку:

$$y_1 = f(x_1) + \Delta y, \dots y_2 = f(x_2) + \Delta y. \quad (4.55)$$

Похибки Δy обох каналів можна вважати рівними, оскільки канали однакові і знаходяться в одних і тих самих умовах. При цьому вихідна величина диференціального перетворювача:

$$y = y_1 - y_2 = f(x_1) - f(x_2). \quad (4.56)$$

Таким чином, у диференціальних перетворювачах адитивні похибки каналів 1 і 2 компенсуються.

Лінійність функції перетворення диференціальної схеми другого типу при малих x краще, ніж лінійність вихідних перетворювачів. Нехай канали 1 і 2 мають нелінійні функції перетворення:

$$y_1 = f(x_0 + x), \quad y_2 = f(x_0 - x). \quad (4.57)$$

Розкладаючи y_1 і y_2 в степеневий ряд в околі x_0 , отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= f(x_0) + f'(x_0)x + [f''(x_0)/2!]x^2 + \dots; \\ y_2 &= f(x_0) - f'(x_0)x + [f''(x_0)/2!]x^2 - \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.58)$$

Бажано, щоб перетворювачі мали максимально лінійну функцію перетворення. При не дуже великих x можна обмежити ряди квадратичними членами, а членами, що містять x у більш високих ступенях, знехтувати. При цьому:

$$y = y_1 - y_2 = 2f'(x_0)x. \quad (4.59)$$

Тобто функція перетворення диференціальної схеми лінійна. За великих x нелінійність може бути більше, ніж у перетворювачів 1 і 2.

Логометричні схеми з'єднання перетворювачів. Логометрична схема включення перетворювачів (рис. 4.6) містить два канали з послідовним з'єднанням перетворювачів, вихідні величини яких подаються на логометричний перетворювач. Логометричний перетворювач – це перетворювач з двома входами, вихідна величина якого є функцією частки від розподілу вхідних величин:

$$y = F(y_1/y_2). \quad (4.60)$$

Обидва канали логометричної схеми, як і в диференціальній схемі, виконуються однаковими і знаходяться в одних і тих самих умовах.

Логометрична схема дозволяє компенсувати мультиплікативну похибку.

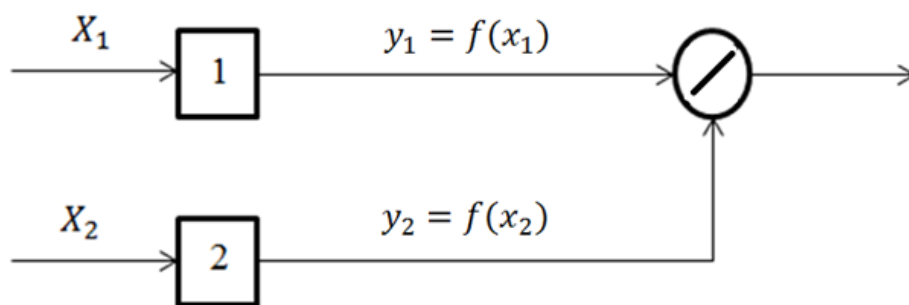


Рисунок 4.6 – Логометрична схема включення перетворювачів

У загальному випадку для схеми, наведеної на рис. 4.6, при пропорційній функції перетворення каналів 1 і 2:

$$y_1 = Sx_1, \quad y_2 = Sx_2. \quad (4.61)$$

Вихідна величина приладу з логометричною схемою включення не залежить від зміни чутливості каналів послідовного перетворення:

$$y = F(y_1/y_2) = F(x_1/x_2). \quad (4.62)$$

У ряді випадків чутливість перетворювача сильно залежить від його напруги живлення і часто можна вважати, що вона пропорційна цій напрузі. Така залежність викликає *мультиплікативну похибку*. Застосування логометричної схеми дозволяє її зменшити.

Компенсаційні схеми включення перетворювачів. Прилади, побудовані на основі компенсаційної схеми (схеми зі зворотним зв'язком), мають малу як адитивну, так і мультиплікативну похибки. Застосування зворотного зв'язку дозволяє створити прилади, що володіють малою статичною та динамічною похибкою. Ці прилади мають велику вихідну потужність, і їхні показання мало залежать від навантаження.

Структурна схема компенсаційного перетворювача приведена на рис. 4.7. Вхідна величина x подається на один з входів перетворювача, який

віднімає, на інший його вхід подається сигнал x_{33} тієї ж фізичної природи, що і вхідна величина x , причому розмір величини x_{33} визначається розміром вихідної величини y . Різниця $\Delta x = x - x_{33}$ надходить в перетворювач 1. Якщо перетворювачі 1, 2 мають лінійні функції перетворення:

$$y = S_1 \Delta x, \quad x_{33} = S_2 y, \quad (4.63)$$

де S_1 і S_2 – чутливості відповідних перетворювачів, то залежність між вхідною величиною x і сигналом x_{33} визначається співвідношенням:

$$x_{33} = S_1 S_2 \Delta x = S_1 S_2 (x - x_{33}). \quad (4.64)$$

З (4.64) випливає, що:

$$(S_1 S_2 + 1) x_{33} = S_1 S_2 x. \quad (4.65)$$

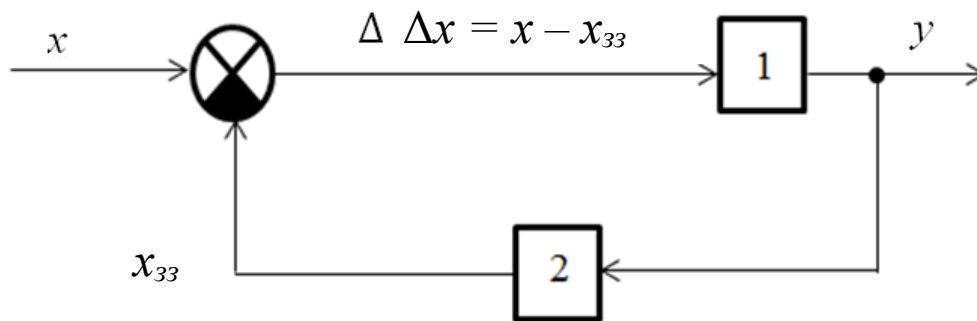


Рисунок 4.7 – Структурна схема компенсаційного перетворювача

Добуток $S_1 \cdot S_2$ часто досить великий, і можна вважати, що $x \approx x_{33}$. Рівність $x \approx x_{33}$ часто має місце і при нелінійних функціях перетворення перетворювачів. З іншого боку, x_{33} є функцією вихідної величини:

$$x_{33} = f(y). \quad (4.66)$$

З цього співвідношення можна визначити:

$$y = f^{-1}(x_{33}) \approx f^{-1}(x), \quad (4.67)$$

де f^{-1} позначення функції, оберненої (4.66).

Отже, якщо $x_{33} \approx x$, то у визначається перетворювачем 2 (рис. 4.7) і мало залежить від перетворювача 1. У приладах зі зворотним зв'язком роль перетворювача зворотного зв'язку виконують прості прилади, що володіють високою точністю. При цьому високу точність має і прилад у цілому.

Розглянемо функцію перетворення і чутливість перетворювача зі зворотним зв'язком. Для простоти припустимо, що перетворювачі 1 і 2 на схемі (рис. 4.7) мають пропорційні функції перетворення (4.63).

Маючи на увазі рівності (4.63) і $\Delta x = x - x_{33}$, отримуємо:

$$y = [S_1 / (1 + S_1 S_2)] x. \quad (4.68)$$

Звідси чутливість схеми зі зворотним зв'язком:

$$S = S_1 / (1 + S_1 S_2). \quad (4.69)$$

Визначимо похибку пристрою, обумовлену мультиплікативними похибками вхідних у нього перетворювачів 1 і 2, тобто похибку, викликану мінливістю чутливості цих перетворювачів.

Згідно з (4.70) чутливість схеми є функцією двох змінних:

$$S = F(S_1, S_2). \quad (4.70)$$

Зміна S можна визначити як повний диференціал виразу (4.71):

$$\Delta S = (dF/dS_1) \Delta S_1 + (dF/dS_2) \Delta S_2. \quad (4.71)$$

Вхідні в (4.71) приватні похідні виходять шляхом диференціювання (4.72):

$$dF/dS_1 = 1/(1 + S_1 S_2)^2; \quad (4.72)$$

$$dF/dS_2 = -S_1^2/(1 + S_1 S_2). \quad (4.73)$$

Підставляючи (4.73) і (4.72) в (4.70), отримаємо:

$$\Delta S = \Delta S_1/(1 + S_1 S_2)^2 - S_1^2 \Delta S_2/(1 + S_1 S_2)^2. \quad (4.74)$$

Відносна мультиплікативна похибка $\delta y = \Delta y/y$ дорівнює відносній зміні чутливості $\Delta S/S$. З огляду на це, отримаємо:

$$\delta y = \delta y_1/(1 + S_1 S_2) - \delta y_2/(1 + 1/S_1 S_2), \quad (4.75)$$

де $\delta y_1 = \Delta S_1/S_1$, $\delta y_2 = \Delta S_2/S_2$ – відповідно відносні мультиплікативні похибки перетворювачів 1 і 2 (рис. 4.7).

Можна показати, що відносна адитивна похибка компенсаційної схеми визначається таким самим виразом (4.75) з тією різницею, що δy_1 і δy_2 є відносними адитивними похибками.

За виразом (4.75) обчислюється похибка схеми, якщо відомі похибки перетворювачів 1 і 2. Якщо ж ці похибки є випадковими і відомі їх середньоквадратичні похибки σ_1 і σ_2 , то середньоквадратична похибка компенсаційного перетворювача:

$$\sigma = [1/(1 + S_1 S_2)] \sqrt{\sigma_1^2 + S_1^2 S_2^2 \sigma_2^2}. \quad (4.76)$$

З отриманих співвідношень випливає, що вплив похибки перетворювача 1 на похибку приладу з компенсаційною схемою сильно зменшується.

Зменшення залежності похибки приладу зі зворотним зв'язком від похибки перетворювача 1 можна показати наступним прикладом.

Припустимо, що в схемі складного перетворювача зі зворотним зв'язком (рис. 4.7) перетворювач 1 не стабілізований і його чутливість S_1 може залежати, зокрема, від опору, на який навантажений цей складний перетворювач. При зменшенні чутливості S_1 зменшуються вихідна величина y і сигнал зворотного зв'язку $x_{зз}$. Це викликає збільшення Δx і збільшує значення y . Таким чином, завдяки зворотному зв'язку зменшується похибка, викликана зміною S_1 .

Питання для самоконтролю

1. Вхідна величина вимірювального приладу (визначення).
2. Визначення абсолютної, відносної та приведеної похибок. У чому відмінність? Де і навіщо вони використовуються?
3. Визначення адитивної та мультиплікативної похибки. Графік функції.
4. Які межі визначаються для похибки засобів вимірювань?
5. Класи точності та динамічні характеристики.
6. Послідовне з'єднання перетворювачів: особливості, позитивні та негативні риси такого з'єднання.
7. Диференціальні схеми з'єднання перетворювачів: особливості, позитивні та негативні риси такого з'єднання.
8. Логометричні схеми з'єднання перетворювачів: особливості, позитивні та негативні риси такого з'єднання.
9. Компенсаційні схеми включення перетворювачів: особливості, позитивні та негативні риси такого з'єднання.

5 ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ КОРЕКЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК

5.1 Призначення і класифікація коригувальних елементів

Коригувальні елементи, що включаються в структуру систем автоматичного управління, призначені для зміни динамічних властивостей системи з метою досягнення необхідних показників її якості. Поліпшення показників якості системи досягається за допомогою коригувальних пристроїв шляхом введення в закон управління системи складових, пропорційних похідним або інтегралам від зміни керуючого сигналу або сила помилки в часі.

У даному розділі будуть наведені як приклади аналогові еквівалентні схеми коригувальних елементів на основі RLC-кіл. Завдяки такому представленню читач матиме змогу краще зрозуміти принцип роботи таких приладів.

Складність технічної реалізації коригувального пристрою ускладнює включення в сигнали системи управління похідних вищого порядку або інтегралів великої кратності від цих сигналів. Введення першої і другої похідних, й інтегралів першої та другої кратності до закону управління вимагає створення пристрою, що реалізує передатну функцію виду:

$$W(p) = \frac{k_{-2}}{p^2} + \frac{k_{-1}}{p} + k_0 + k_1 p + k_2 p^2. \quad (5.1)$$

Така передатна функція відповідає ідеальному коригувальному пристрою. У разі, коли достатньо введення однієї похідної або одного інтеграла, коригувальні контури спрощуються і їх передатні функції мають вигляд:

$$W(p) = k_1 p, \quad (5.2)$$

$$W(p) = \frac{k_{-1}}{p}. \quad (5.3)$$

Необхідність наявності у вихідному сигналі коригувального елемента крім похідних й інтегратор від сигналу управління або помилки, пропорційної цьому сигналу, призводить до застосування коригувальних елементів з передатними функціями:

$$W(p) = k_0 + k_1 p; \quad (5.4)$$

$$W(p) = \frac{k_{-1}}{p} + k_0. \quad (5.5)$$

Коригувальні ланки з передатними функціями (5.2), (5.4) називають диференціюючих, а ланки з функціями (5.3), (5.5) – інтегруючими.

Часто використовують елементи, що об'єднують одночасно властивості інтегруючих і диференціюють ланок. Вони мають передатну функцію вигляду:

$$W(p) = \frac{k_{-1}}{p} + k_0 + k_1 p \quad (5.6)$$

і називаються *інтегро-диференціюючими коригувальними елементами*. Такий коригувальний елемент використовується в тому випадку, коли його вихідний сигнал повинен мати *три складові*, пропорційні вхідному сигналу, його першій похідній і інтеграла від нього.

Для отримання на виході коригувального елемента другої похідної або подвійного інтеграла від сигналу управління застосовують послідовне включення двох коригувальних ланок з передатними функціями (5.2) або (5.3) відповідно.

Передатні функції реальних коригувальних пристроїв відрізняються від передатних функцій наведених ідеальних коригувальних ланок (5.1) – (5.6) і виконують, за певних умов, диференціювання і інтегрування сигналів, близьке до ідеального.

Коригувальні елементи систем можуть бути класифіковані за різними ознаками.

За видом диференціального рівняння, що описує процеси в коригувальних елементах, останні бувають двох типів: лінійні і нелінійні (рис.5. 1).

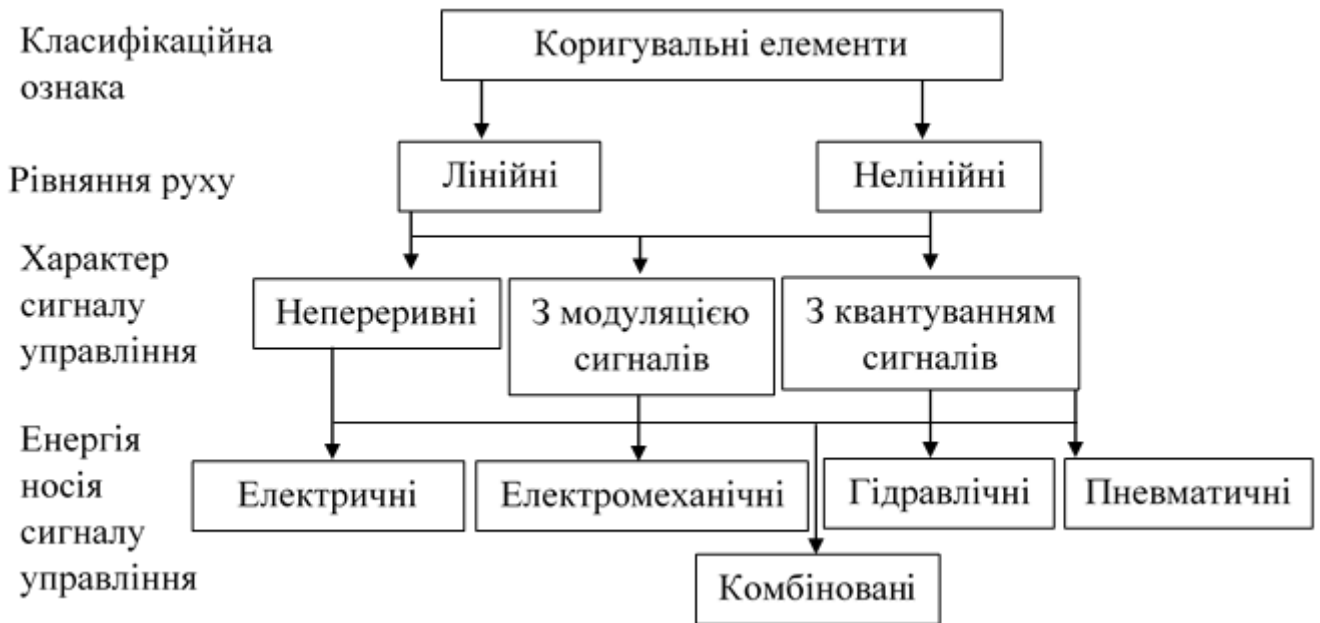


Рисунок 5.1 – Класифікація коригувальних елементів систем по виду диференціального рівняння

На відміну від лінійних коригувальних елементів коефіцієнт передачі і фазовий зсув між вхідним і вихідним сигналами нелінійних елементів можуть залежати не тільки від частоти, а й від амплітуди вхідного сигналу. Крім того, у нелінійних коригувальних елементів немає жорсткого зв'язку між еквівалентними амплітудними і фазовими частотними характеристиками, завдяки чому часто можна забезпечити в заданому діапазоні частот необхідний вид амплітудної і фазової частотних характеристик і кращі показники якості системи в цілому, тобто можливості нелінійних коригувальних елементів значно ширше порівняно з лінійними.

Залежно від характеру сигналів, які передаються коригувальними елементами, вони поділяються на три підкласи:

- 1) безперервні, що працюють з сигналами постійного струму;
- 2) з модуляцією, що передають сигнали перемінного струму;
- 3) коригувальні елементи з перетворенням сигналу управління.

За видом енергії сигналу, що є носієм інформації в контурі системи управління, розрізняють електричні, електромеханічні, гідравлічні, пневматичні коригувальні елементи.

Коригувальні електричні елементи, що містять у своїй схемі додаткові джерела енергії, належать до *активних*, а елементи, що не мають в своєму складі джерел енергії, – до *пасивних* (рис. 5.2).

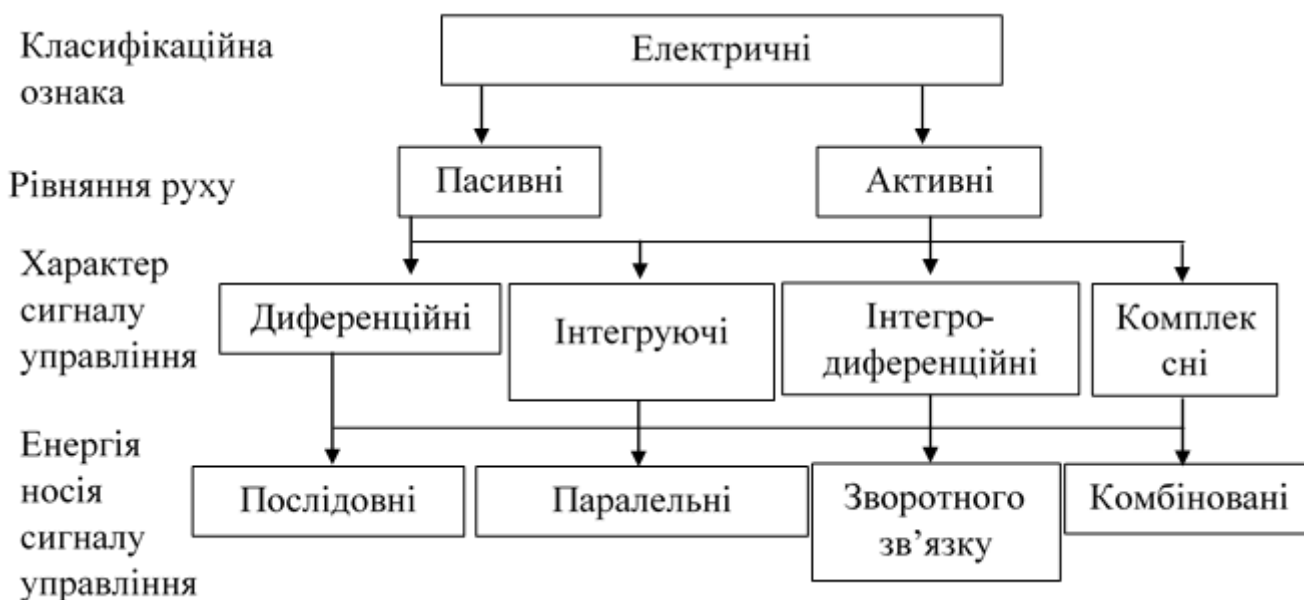


Рисунок 5.2 – Класифікація коригувальних елементів систем за наявністю додаткового джерела

За видом операції, виробленої з сигналом, коригувальні елементи діляться на ті, що диференціюють, що інтегрують, інтегро-диференційні та комплексні, що реалізують більш складні оператори перетворення.

За способом включення щодо основних елементів системи коригувальні елементи поділяються на послідовні, паралельні, коригувальні та зворотного зв'язку.

На рис. 5.3 показано структурні схеми нескоригованої системи і системи, скоригованої послідовним коригувальним елементом. Останній включає послідовно з основними ланками системи.

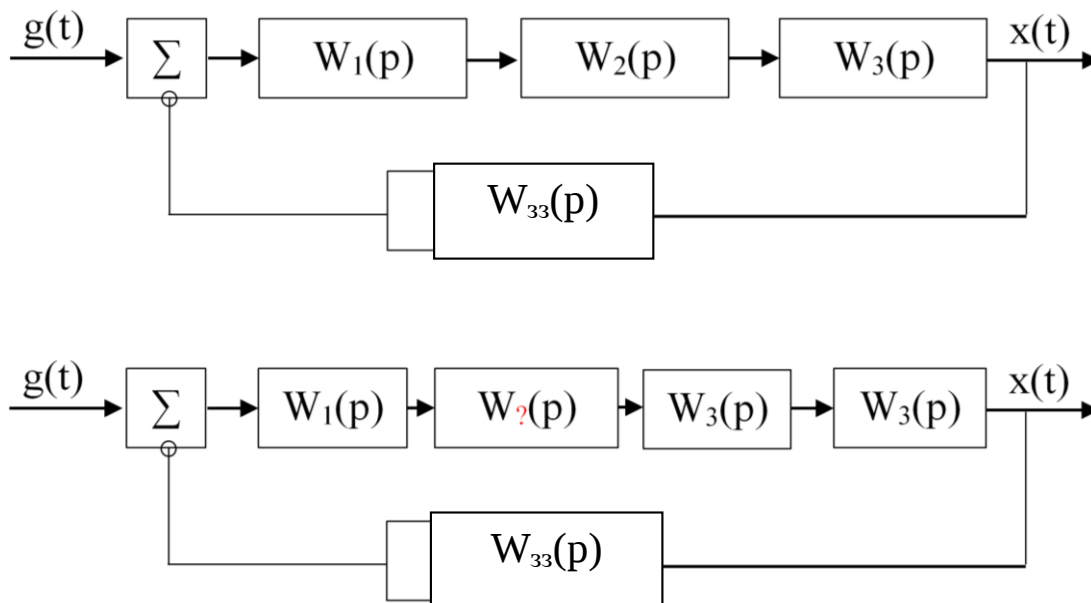


Рисунок 5.3 – Структурні схеми нескоригованої системи і системи, скоригованої послідовним коригувальним елементом

Структурні схеми систем, скоригованих прямим паралельним коригувальним елементом і коригувальним елементом у зворотному зв'язку, наведені на рис. 5.4.

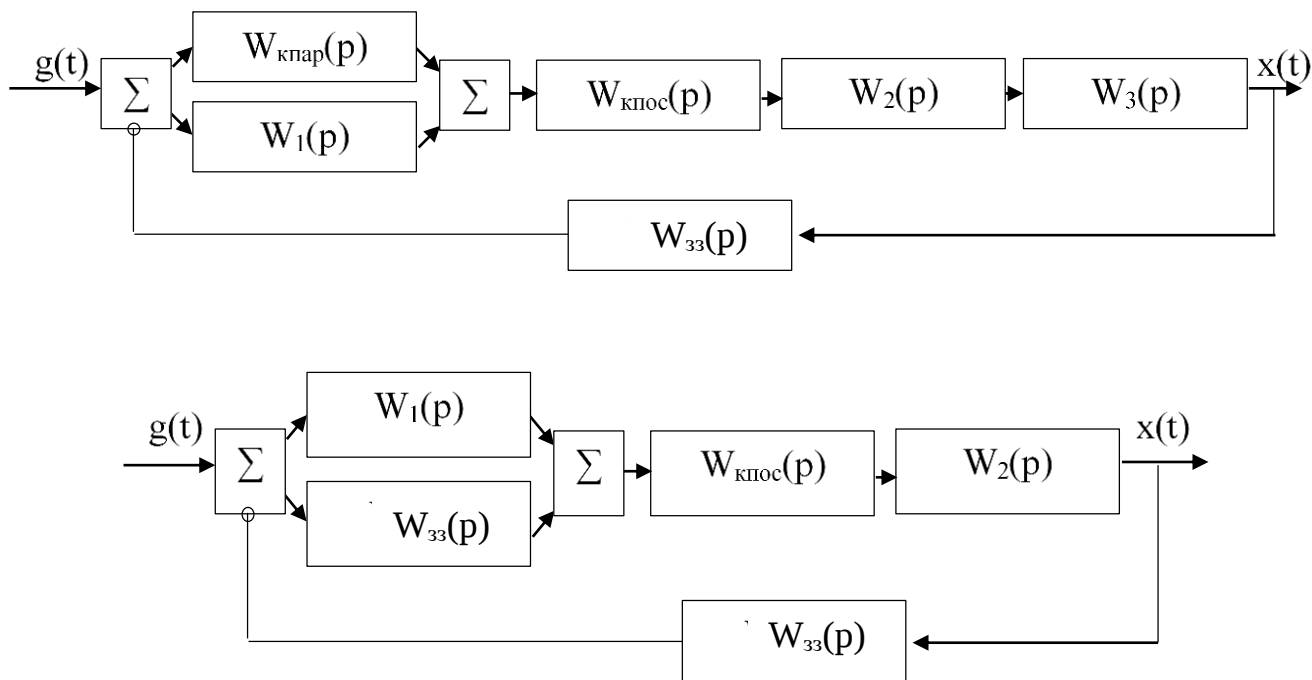


Рисунок 5.4 – Структурні схеми систем, скоригованих прямим паралельним коригувальним елементом (а) і коригувальним елементом у зворотному зв'язку(б)

Крім того, часто можуть застосовуватися складні коригувальні пристрої, що включаються в різні точки контуру проходження сигналу.

Далі розглядатимуться електричні лінійні коригувальні елементи постійного і змінного струмів, а також нелінійні коригувальні елементи.

Слід зазначити, що функції корекції системи можуть іноді виконуватися за допомогою деяких електромеханічних елементів автоматики, що належать, зазвичай, до основного обладнання систем, наприклад, тахогенераторів, двигунів, тощо.

5.2 Коригувальні елементи постійного струму

Диференціюючий коригувальний елемент. Більшість елементів систем управління володіють *інерційністю*, що призводить до відставання по фазі вихідного сигналу щодо вхідного.

Це тягне за собою погіршення показників якості замкнених систем управління, а іноді призводить до втрати стійкості системи. Для компенсації відставання по фазі вихідного сигналу необхідно в систему вводити елементи, що створюють випереджаючий зсув фази. До таких елементів належать послідовні диференціюючі коригувальні кола, найпростіший з яких наведено на рис. 5.5, а.

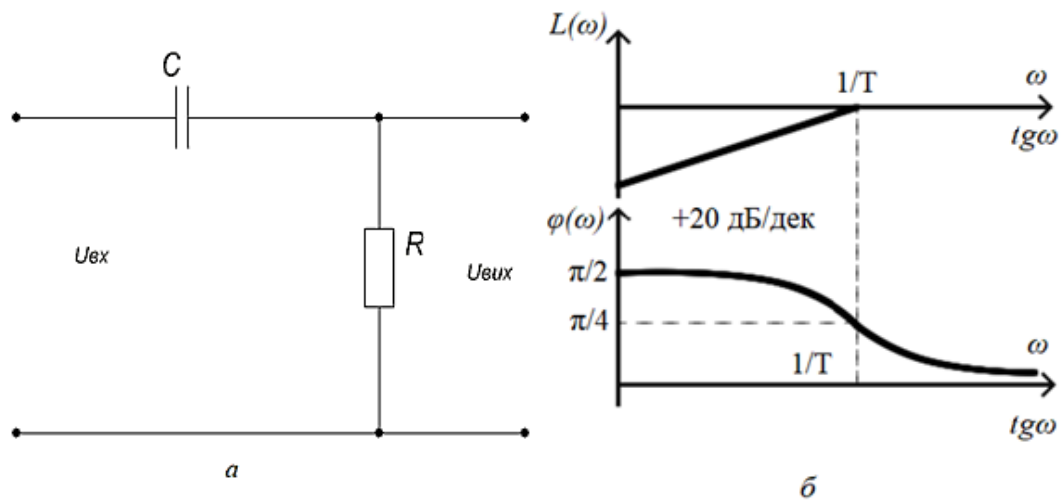


Рисунок 5.5 – Диференціюючий коригувальний елемент:

(а) – послідовне диференціююче коригувальне коло; (б) – логарифмічні амплітудно і фазо-частотні характеристики розглянутого коригувального кола

Диференціальне рівняння, що зв'язує вхідну і вихідну напруги – $T \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} + U_{\text{вих}} = T \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$, де $T = RC$ – стала часу кола.

Відповідно до цього рівняння *передатна функція* і *комплексна частотна характеристика (КЧХ)* кола визначаються виразами:

$$W(p) = \frac{Tp}{Tp + 1}; \quad (5.7)$$

$$W(j\omega) = \frac{j\omega T}{j\omega T + 1}. \quad (5.8)$$

З диференціального рівняння і вирази (5.7–5.8) видно, що умовою диференціювання, близькою до ідеального, є $T \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} = 0$ або $\omega T \ll 1$. В ході

виконання цієї умови передатна функція і КЧХ кола відповідатимуть передатній функції і КЧХ ідеальної диференціюючої ланки (5.2).

Логарифмічні амплітудно і фазо-частотні характеристики розглянутого коригувального кола показані на рис. 5.5, б.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) має позитивний нахил $+20$ дБ / дек (дек – декада, оскільки, ми працюємо з логарифмічною шкалою і вона, для легкості розуміння, розбита на відрізки – декади) до частоти $\omega = 1/T$ і, отже, пасивне RC-коло може розглядатися як ідеальне диференціальне для вхідної напруги, смуга частот якого не перевищує величини $\omega = 1/T$. Тому, щоб диференціювання вхідного сигналу таким колом було ідеальним у більшому діапазоні частот, необхідно зажадати малості постійної часу $T = RC$. Однак зменшення активного опору резистора призводить до одночасного зменшення величини вихідної напруги коригувального елемента. З ЛАЧХ видно, що на низьких частотах у найпростішому диференціюючому колі відбувається послаблення амплітуди вхідного сигналу, причому ослаблення тим інтенсивніше, чим менше частота сигналу.

Якщо на виході коригувального елемента крім похідної від вхідного сигналу, необхідно мати складову, пропорційну самому вхідному сигналу, застосовують елемент, показаний на рис. 5.6, а. Передатна функція такого кола:

$$W(p) = k \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (5.9)$$

де $T_1 = R_2 C$ – стала часу кола за похідною; $k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ – коефіцієнт

посилення кола; $T_2 = k T_1$ – стала часу запізнення. Так як $k < 1$, то $T_2 < T_1$.

Логарифмічні частотні характеристики диференціального коригувального кола наведені на рис. 5.6, б. З характеру ЛАЧХ видно, що диференціювання сигналу відбувається в діапазоні частот $\frac{1}{T_1} \leq \omega \leq \frac{1}{T_2} = \frac{1}{k T_1}$.

У смузі частот $\omega \geq \frac{1}{T_2}$ розглянутий контур втрачає свої диференційні

властивості, на цих частотах конденсатор C має малу ємність і можна вважати, що вхідний сигнал повністю додається до опору резистора R_1 .

Для збільшення діапазону частот, в якому відбувається диференціювання сигналу, близьке до ідеального, що необхідно зменшити значення коефіцієнта k . Однак, чим менше значення коефіцієнта посилення кола, тим більшою мірою послаблюється сигнал на низьких частотах (див. рис. 5.6, б).

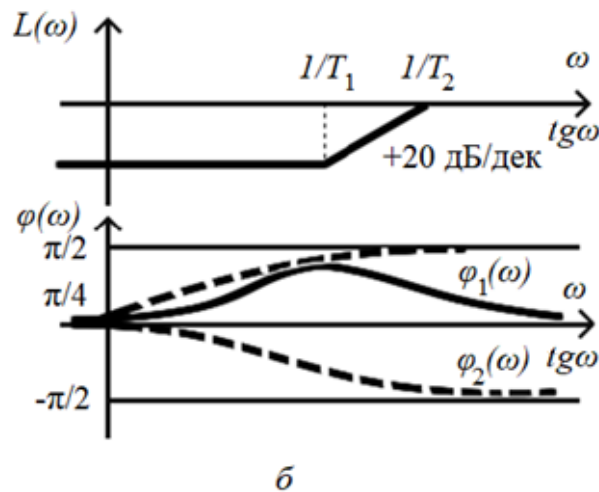
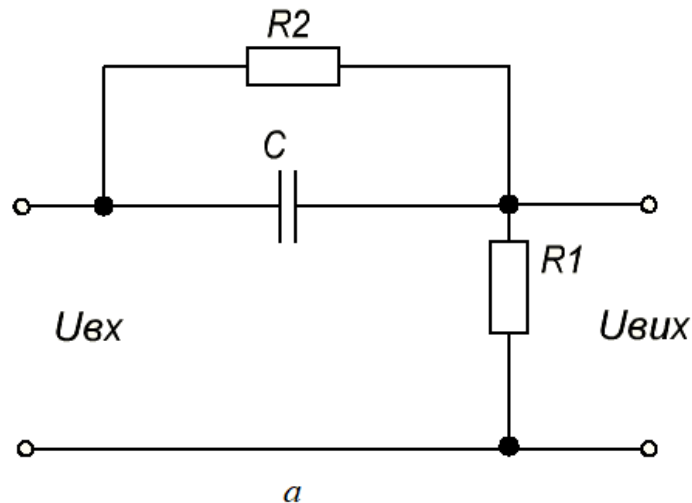


Рисунок 5.6 – Диференціюючий коригувальний елемент: (а) – доповнення послідовного диференціюючого коригувального кола резистором (опором); (б) – логарифмічні амплітудно і фазо-частотні характеристики такого кола

З іншого боку, щоб отримати великі значення максимального фазового випередження кола, необхідно вибирати сталі T_1 і T_2 , які як можна більше відрізнятимуться один від одного:

$$\varphi_{\max}(\omega) = \arctg T_1 \omega - \arctg T_2 \omega = \varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega). \quad (5.10)$$

Відмінність між цими сталими збільшується зі зменшенням коефіцієнта k . Таким чином, параметри коригувального кола мають обиратися компромісно, виходячи з суперечливих вимог. Тому, якщо *загальний коефіцієнт передачі* системи має задане значення, то ослаблення сигналу управління, внесене пасивним коригуючим елементом через малість його коефіцієнта посилення k має бути скомпенсоване збільшенням коефіцієнта підсилення будь-якого іншого елемента системи, або застосуванням активних коригувальних елементів.

Інтегруючий коригувальний елемент. Під час проходження корисного сигналу з накладеною на нього високочастотною завадою по контуру системи управління, що містить диференціююче коло, відношення сигнал-завада, що визначає точність відпрацювання системою керуючого сигналу, падає і при деякому його значенні може виявитися, що виділення сигналу на тлі завади стане неможливим, тобто система буде непрацездатною. Зниження рівня високочастотної завади можна домогтися введенням у структуру системи інтегруючого коригувального елемента. Крім того, інтегруючий елемент, володіючи властивістю запам'ятовування, здатний протягом часу накопичувати помилку неузгодженості, в результаті чого формування керуючого впливу відбувається вже за значенням інтеграла від цієї помилки, а не через саму помилку, завдяки чому зростає точність роботи системи.

Найпростішим інтегруючим елементом є коло, передатна функція якого має вигляд (рис. 5.7, а):

$$W(p) = \frac{1}{Tp + 1}, \quad (5.11)$$

де $T = RC$ – стала часу кола.

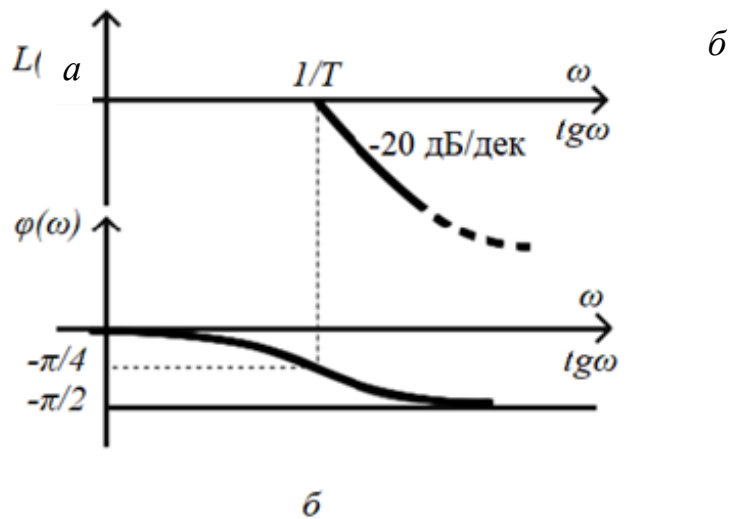
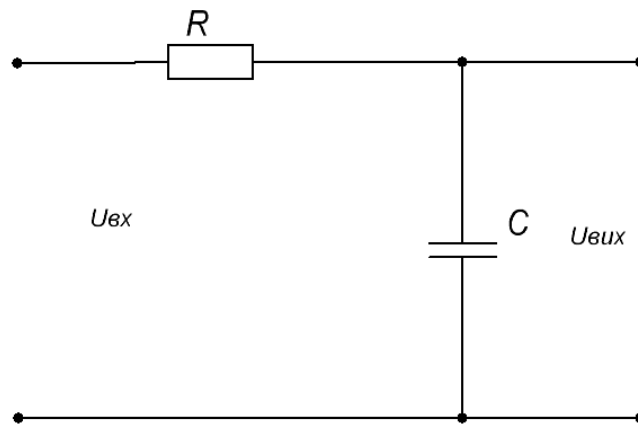


Рисунок 5.7 – Диференціюючий коригувальний елемент: (а) – найпростіший інтегруючий елемент – коло; (б) – логарифмічні амплітудно і фазо-частотні характеристики такого кола

З (5.11) видно, що умовою інтегрування управляючого сигналу, близьким до ідеального, є $\omega T \gg 1$. Логарифмічні частотні характеристики цього коригувального кола мають вигляд, зображений на рис. 5.7, б.

Аналіз цих характеристик показує, що із зростанням частоти керуючого сигналу його амплітуда падає. ЛАЧХ має негативний нахил – 20 дБ/дек, починаючи з частоти $\omega = 1/T$. Отже, цей елемент може розглядатися як інтегруючий для вхідного сигналу, смуга частот якого перевершує значення ω . Для зміщення області інтегрування в сторону низьких частот необхідно

збільшувати постійну часу T , що призводить до втрати швидкодії кола. Цю властивість потрібно враховувати при проектуванні швидкодіючих систем. У області інтегрування фаза вихідного сигналу відстає від фази вхідного, причому це відставання зі зростанням частоти прагне до $-\pi/2$. В ході використання даного коригуючого кола слід враховувати, що з збільшенням частоти інтегруючі властивості контуру губитимуться, оскільки в цій області частот опір ємності і коефіцієнт передачі кола прагнуть до нуля.

Для отримання на виході коригувального кола сигналу, що буде пропорційним вхідному сигналу і інтегралу від нього, застосовують схему, наведену на рис. 4.8, а. Передатна функція такого кола має вигляд:

$$W(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (5.12)$$

де $T_1 = R_1 C$, $T_2 = (R_1 + R_2) \cdot C$ – постійні часу кола, причому $T_2 > T_1$.

Визначимо співвідношення між цими постійними, що має вигляд – $\frac{T_1}{T_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = k$. Логарифмічні амплітудно і фазо-частотні характеристики показані на рис. 5.8, б.

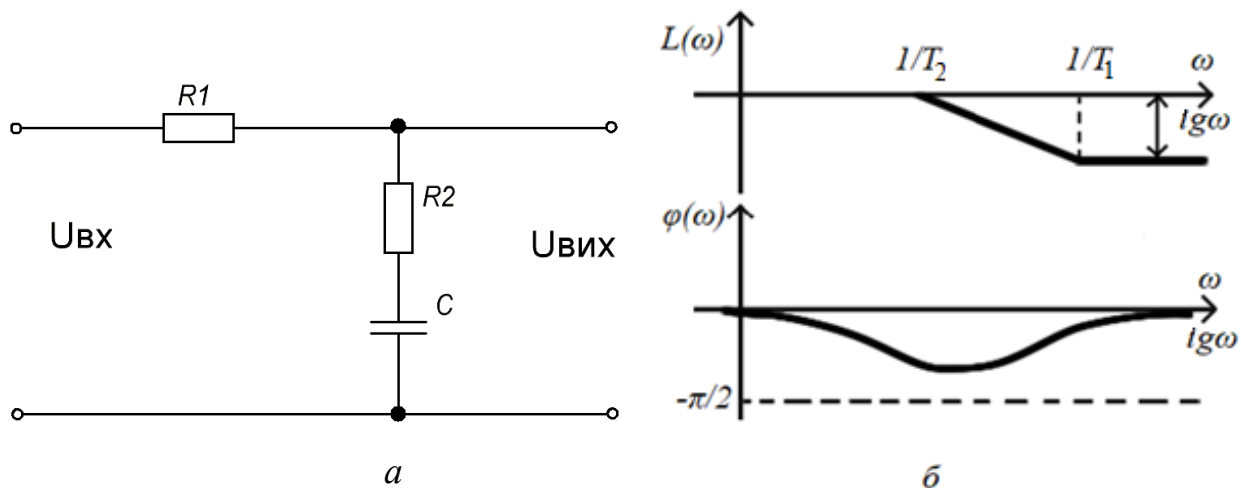


Рисунок 5.8 – Диференціюючий коригувальний елемент: (а) – схема для отримання на виході коригувального кола сигналу, що буде пропорційним вхідному сигналу і інтегралу від нього; (б) – логарифмічні-амплітудно і фазо-частотні характеристики такого кола

З аналізу логарифмічних характеристик видно, що коригувальне коло пропускає низькочастотний сигнал без ослаблення, виконує інтегрування сигналу в області частот $\frac{1}{T_2} \leq \omega \leq \frac{1}{T_1}$ і послаблює високочастотну складову сигналу на величину $20 \lg k = 20 \lg \frac{T_1}{T_2}$. Чим більше значення T_2 , тим у більш широкому діапазоні частот можна знехтувати в знаменнику (5.12) одиницею порівняно з $T_2 p$, тобто тим вище точність інтегрування сигналу. Однак, зменшення $k = T_1 / T_2$ призводить до збільшення відставання по фазі на ділянці інтегрування вихідного сигналу по відношенню до вхідного. Відставання сигналу за фазою в колі є її недоліком, який може призвести до погіршення показників якості системи в цілому.

Інтегро-диференціюючий елемент. У тих випадках, коли необхідно реалізувати закон управління у формі (5.6), за якого в процесі управління мають враховуватися разом із сигналом управління похідна і інтеграл від неї, застосовують *послідовне інтегро-диференціююче коригувальне коло* (рис. 5.9, а). Передатна функція наведеного реального коригувального кола відрізняється від ідеальної (5.6) і має вигляд:

$$W(p) = \frac{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (5.13)$$

де $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_2 = R_2 C_2$, а сталі часу T_1 і T_2 знаходяться із системи рівнянь:

$$\begin{cases} \tau_1 \tau_2 = T_1 T_2 \\ \tau_1 + \tau_2 + R_1 C_2 = T_1 + T_2. \end{cases} \quad (5.14)$$

Поділивши обидві частини першого рівняння на величину $\tau_2 T_1$, отримаємо відношення $\frac{\tau_1}{T_1} = \frac{T_2}{\tau_2} = \alpha$, Причому $\alpha < 1$.

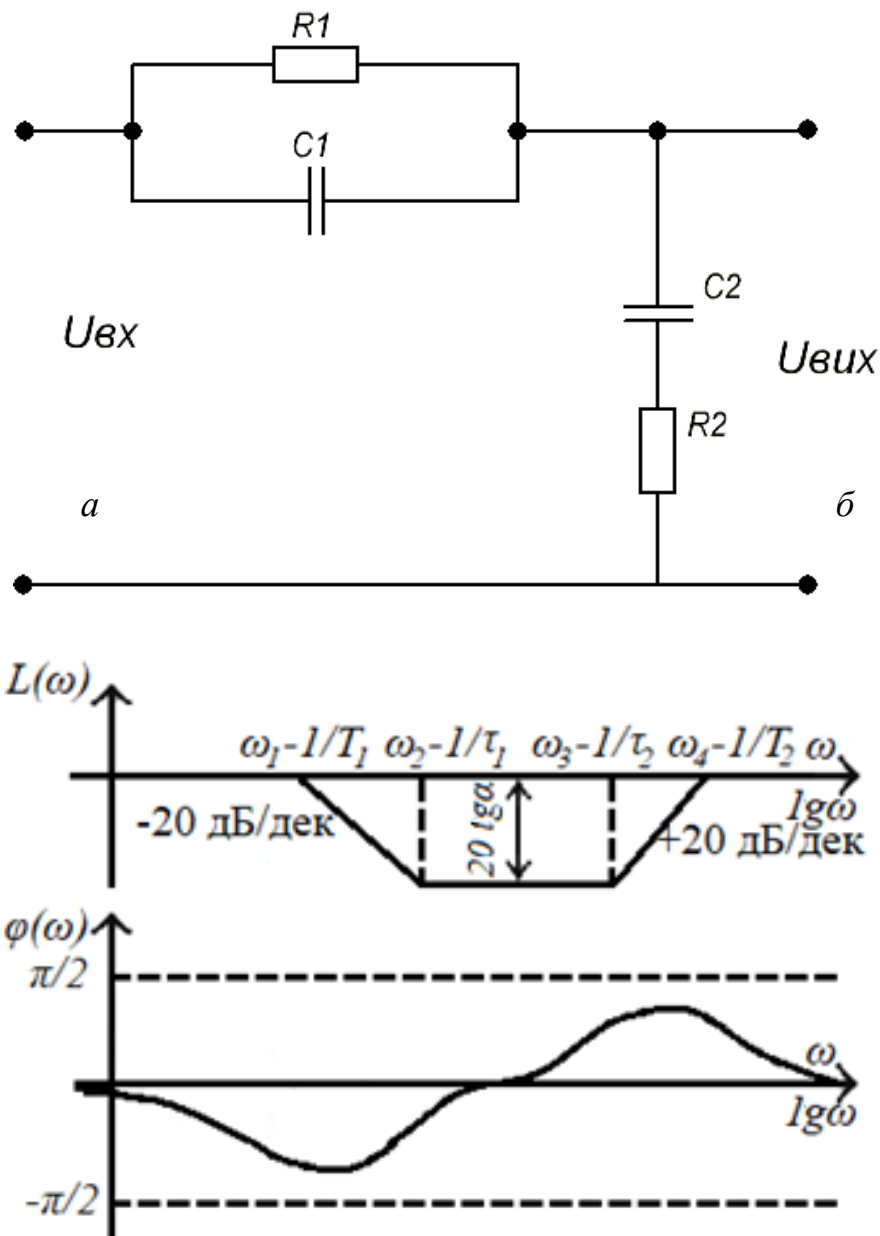


Рисунок 5.9 – Інтегро-диференціюючий елемент:

- (а) – послідовний інтегро-диференціююче коригувальне коло;
- (б) – логарифмічні частотні характеристики коригувального елемента

Аналіз логарифмічних частотних характеристик коригувального елемента (рис. 5.9, б) показує, що інтегро-диференціюючий елемент в області низьких частот поводить себе як інтегруючий, а в області високих частот – як диференціюючий елемент. В області середніх частот відбувається рівномірне ослаблення керуючого сигналу на величину $20 \lg \alpha$. Завдяки застосуванню такого

контур у вдається зберегти коефіцієнт посилення системи управління в області частот, менших ω_1 , що призводить до підвищення точності системи і поліпшення якості перехідного процесу за рахунок створення фазового випередження в області високих частот.

На закінчення слід зазначити, що існують послідовні коригувальні елементи зі складними передатними функціями, які не можна віднести до диференціюючих, інтегруючих або інтегро- диференціюючих, оскільки ЛАЧХ таких елементів має складну конфігурацію з наявністю двох і більше однакових або різних нахилів. Такі коригувальні елементи називатимемо комплексовані і класифікувати за видом на такі класи:

- а) коригувальні елементи з максимальним нахилом ЛАЧХ +20 дБ / дек;
- б) коригувальні елементи з максимальним нахилом ЛАЧХ +40 дБ / дек;
- в) коригувальні елементи з максимальним нахилом ЛАЧХ -20 дБ / дек;
- г) коригувальні елементи з максимальним нахилом ЛАЧХ -40 дБ / дек;
- д) коригувальні елементи з різними позитивними і негативними нахилами ЛАЧХ.

Паралельні коригувальні елементи. Як вже зазначалося, розрізняють прямі і зворотні паралельні коригувальні елементи. Прямі паралельні коригувальні пристрої включаються в структуру системи управління, як показано на рис. 5.4, а. Вони призначені для введення в закон управління поряд з основним сигналом його похідних або інтегралів. Прямі паралельні коригувальні пристрої мають менші можливості, ніж послідовні і зворотні паралельні. Однак іноді такий пристрій при меншій складності допускає задовільне в сенсі забезпечення необхідних показників якості перетворення сигналу, що управляє. На рис. 5.10 наведені еквівалентні структурні схеми із зустрічно-паралельним і послідовним коригувальними елементами.

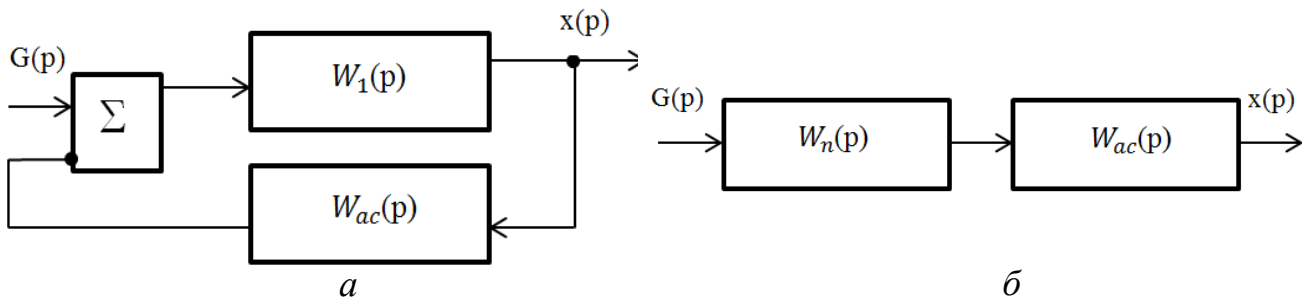


Рисунок 5.10 – Еквівалентні структурні схеми із зустрічно-паралельним (а) і послідовним (б) коригувальними елементами

Передатна функція з'єднання зі зворотним зв'язком дорівнює:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_{33}(p)}. \quad (5.15)$$

Вираз (5.15) можна подати у такому вигляді:

$$W(p) = W_1(p) \frac{1}{1 \pm W_1(p)W_{33}(p)} = W_1(p)W_n(p), \text{ де } W_n(p) = \frac{1}{1 \pm W_1(p)W_{33}(p)} - \text{передатна функція}$$

послідовного коригувального елемента, еквівалентного паралельного коригувального пристрою з функцією передачі $W_{33}(p)$. Таким чином, введення паралельного коригувального пристрою з функцією передачі $W_{33}(p)$ рівносильно включенню послідовного пристрою з функцією передачі $W_n(p)$.

Застосування зворотних коригувальних елементів можна проілюструвати на прикладі аперіодичної ланки, охопленої жорстким і гнучким зворотними зв'язками.

Аперіодичну ланку, охоплену жорстким негативним зворотним зв'язком (рис. 5.11, а), можна замінити еквівалентною ланкою з передатною функцією

$$W(p) = \frac{\frac{k_1}{T_1 p + 1}}{1 + \frac{k_1 k_{33}}{T_1 p + 1}} = \frac{k_1}{T_1 p + 1 + k_1 k_{33}} = \frac{\frac{k_1}{1 + k_1 k_{33}}}{\frac{T_1}{1 + k_1 k_{33}} p + 1} = \frac{k}{T p + 1}, \text{ де } k = \frac{k_1}{1 + k_1 k_{33}}; T = \frac{T_1}{1 + k_1 k_{33}}.$$

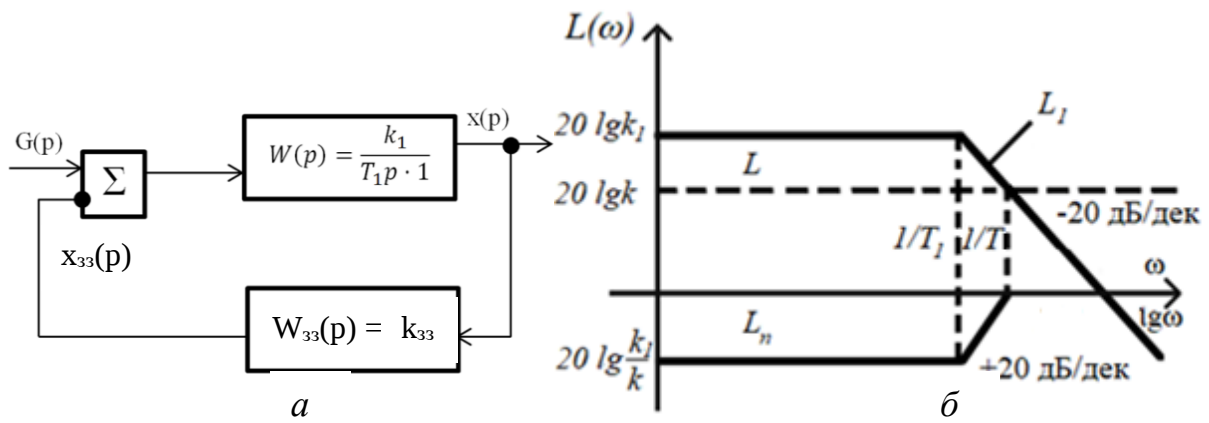


Рисунок. 5.11 – Паралельні коригувальні елементи: (а) – аперіодична ланка, охоплена жорстким негативним зворотним зв'язком; (б) – амплітудні логарифмічні характеристики аперіодичної ланки без зворотного зв'язку L_1 із жорстким негативним зворотним зв'язком L

З отриманих співвідношень видно, що жорсткий зворотний зв'язок не змінює вигляду ланки. Однак з введенням жорсткого зворотного зв'язку змінюються параметри передатної функції. Коефіцієнт посилення і стала часу зменшуються в $(1 + k_1 k_{33})$ раз. Зменшення постійної часу покращує показники якості системи, так як зменшується інерційність, яка вноситься цією ланкою. Зменшення коефіцієнта посилення ланки є небажаним явищем у ході корекції за допомогою жорсткого негативного зворотного зв'язку. На рис. 5.11, б зображені амплітудні логарифмічні характеристики аперіодичної ланки без зворотного зв'язку L_1 із жорстким негативним зворотним зв'язком L .

ЛАЧХ L_n є різницею між L_1 і L . Ця характеристика відповідає ЛАЧХ диференціюючого коригувального елемента. Тому можна зробити висновок, що охоплення аперіодичної ланки жорстким негативним зворотним зв'язком еквівалентно включенню послідовно аперіодичної ланки диференціюючого кола з передатною функцією

$$W_n(p) = \frac{k_n (T_1 p + 1)}{T_1 p + 1}, \text{ де } k_n = \frac{k}{k_1} = \frac{1}{1 + k_1 k_{33}}.$$

Легко показати, що введення жорсткого позитивного зворотного зв'язку призводить до збільшення постійної часу і коефіцієнта посилення ланки. Розглянемо, як зміняться параметри аперіодичної ланки при її охопленні гнучким зворотним зв'язком (рис. 5.12, а) з функцією передачі:

$$W_{33}(p) = \frac{T_{33}p}{T_{33}p + 1}. \quad (5.16)$$

У сталому режимі, коли вихідна величина аперіодичної ланки має постійне значення, зворотний зв'язок не впливає на процеси основної ланки.

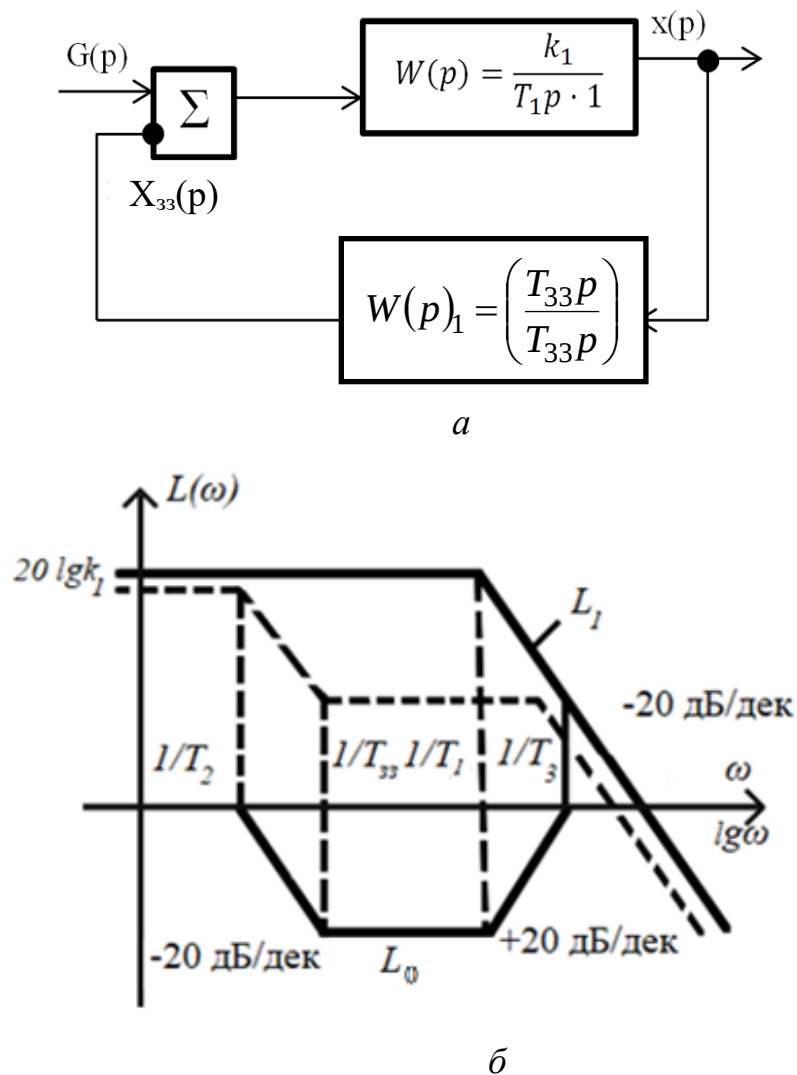


Рисунок 5.12 – Аперіодична ланка: (а) – аперіодична ланка з гнучким зворотним зв'язком; (б) – логарифмічні частотні характеристики аперіодичної ланки L_1 і з'єднання з гнучким зворотним зв'язком L для випадку $T_{33} > T_1$

В області низьких частот на вхід аперіодичної ланки подається величина, пропорційна похідній від її вихідної величини.

Передатна функція аперіодичної ланки, охопленої гнучким зворотним зв'язком, що містить елемент з передатною функцією (5.16):

$$W(p) = \frac{\frac{k_1}{Tp+1}}{1 \pm \frac{k_1 T_{33} p}{(T_{33} p+1)(T_1 p+1)}} = \frac{k(T_{33} p+1)}{T_1 T_{33} p^2 + (T_1 + T_{33} \pm k T_{33} p+1)} \quad (5.17)$$

При розкладанні знаменника передатної функції на множники її можна подати у вигляді:

$$W(p) = \frac{k(T_{33} p+1)}{(T_2 p+1)(T_3 p+1)}, \quad (5.18)$$

де T_2 і T_3 знаходяться з системи рівнянь:
$$\begin{cases} T_1 T_{33} = T_2 T_3; \\ T_1 + T_{33} \pm k T_{33} = T_1 + T_2. \end{cases}$$

Передатна функція отримана шляхом прирівнювання коефіцієнтів при p з однаковими ступенями в поліноми знаменників виразів (5.17) і (5.18). Розв'язання системи в разі негативного зворотного зв'язку дає такі значення постійних часу:

$$T_2 = \frac{1}{2} [T_1 + T_{33} + k T_{33} + \sqrt{(T_1 + T_{33} + k T_{33})^2 - 4 T_1 T_{33}}], \quad (5.19)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} [T_1 + T_{33} + k T_{33} - \sqrt{(T_1 + T_{33} + k T_{33})^2 - 4 T_1 T_{33}}]. \quad (5.20)$$

Таким чином, аперіодична ланка, охоплена гнучким зворотним зв'язком, еквівалентна послідовному з'єднанню двох аперіодичних ланок і однієї форсованої ланки 1-го порядку.

Коефіцієнт посилення залишається без зміни, а постійні часу (5.19) і (5.20) залежать від виду зворотного зв'язку і постійної часу ланки зворотного зв'язку. Завдяки цьому є можливість зміни характеристик з'єднання в потрібному напрямку.

На рис. 5.12, б) зображені логарифмічні частотні характеристики аперіодичної ланки L_1 і з'єднання з гнучким зворотним зв'язком L для випадку $T_{33} > T_1$. Різниця між L_1 і L дає ЛАЧХ послідовного коригувального елемента, з якої випливає, що охоплення аперіодичної ланки гнучким негативним зворотним зв'язком для зазначеного співвідношення постійних часу відповідає включенню послідовно аперіодичної ланки інтегро-диференціюючого контуру з функцією передачі $W_n(p) = \frac{(T_{33}p+1)(T_1p+1)}{(T_2p+1)(T_3p+1)}$.

Послідовна корекція застосовується, як правило, в малопотужних системах управління, а корекцію більш потужних систем здійснюють, зазвичай, за допомогою зворотних зв'язків.

Активні коригувальні елементи. Як вже зазначалося раніше, пасивні коригувальні елементи іноді виробляють небажане ослаблення сигналу управління в області робочих частот. Для компенсації цього ослаблення застосовують активні коригувальні елементи. До них належать коригувальні пристрої на операційних підсилювачах, а також елементи основного обладнання систем, здатні виконувати роль коригувальних і належать за своїм принципом дії до класу активних: тахогенератори, електродвигуни та ін.

Залежно від характеру опору, що визначається видом електричних елементів, що включаються в коло зворотного зв'язку і вхідне коло операційного підсилювача, останній виконуватиме різні операції із сигналом управління: підсумовування, диференціювання, інтегрування та ін.

Для отримання активного диференціюючого коригувального елемента необхідно у вхідне коло операційного підсилювача включити конденсатор C , а в коло зворотного зв'язку – резистор R (рис. 5.13, а). В інтегруючому операційному

підсилювачі резистор включається у вхідне коло, а ємність – у коло зворотного зв'язку (рис. 5.13, б).

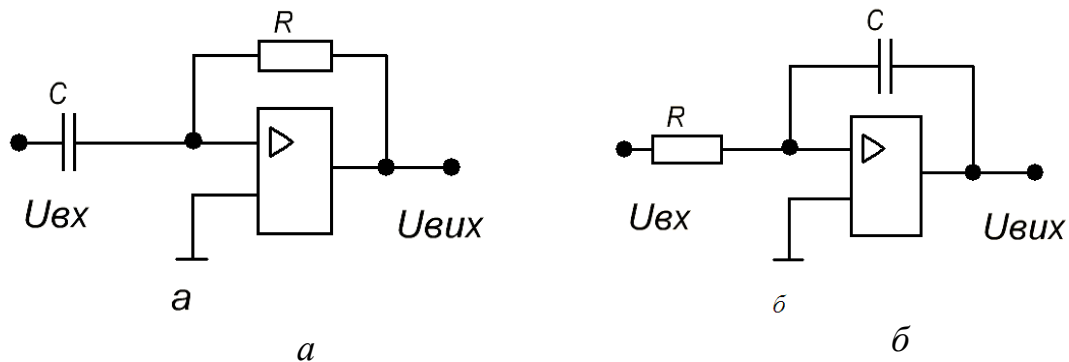


Рисунок 5.13 – Схема активного диференціюючого коригувального елемента:

а – включення конденсатора та резистора у коло операційного підсилювача;

б – включення конденсатора та резистора у коло з інтегруючим операційним підсилювачем

Такі схеми активних коригувальних елементів мають найпростіші передатні функції (5.7), (5.11).

Простотою конструкції, малими габаритами відрізняються активні коригувальні елементи з напівпровідниковими підсилювачами. У схемі активного диференціюючого коригувального елемента (рис. 5.14, а) транзистор VT_1 охоплений негативним зворотним зв'язком за напругою через резистор R_1 . Диференціювання сигналу здійснюється за допомогою RC-кола, складеної на конденсаторі C_1 і резисторі R_1 . Резистори R_2 , R_3 забезпечують необхідний режим роботи транзистора за постійним струмом. З великими значеннями коефіцієнта посилення транзистора по струму схема здійснює диференціювання, близьке до ідеального в широкому діапазоні частот. Стала часу коригувального елемента визначається значеннями ємності C_1 і опору R_1 .

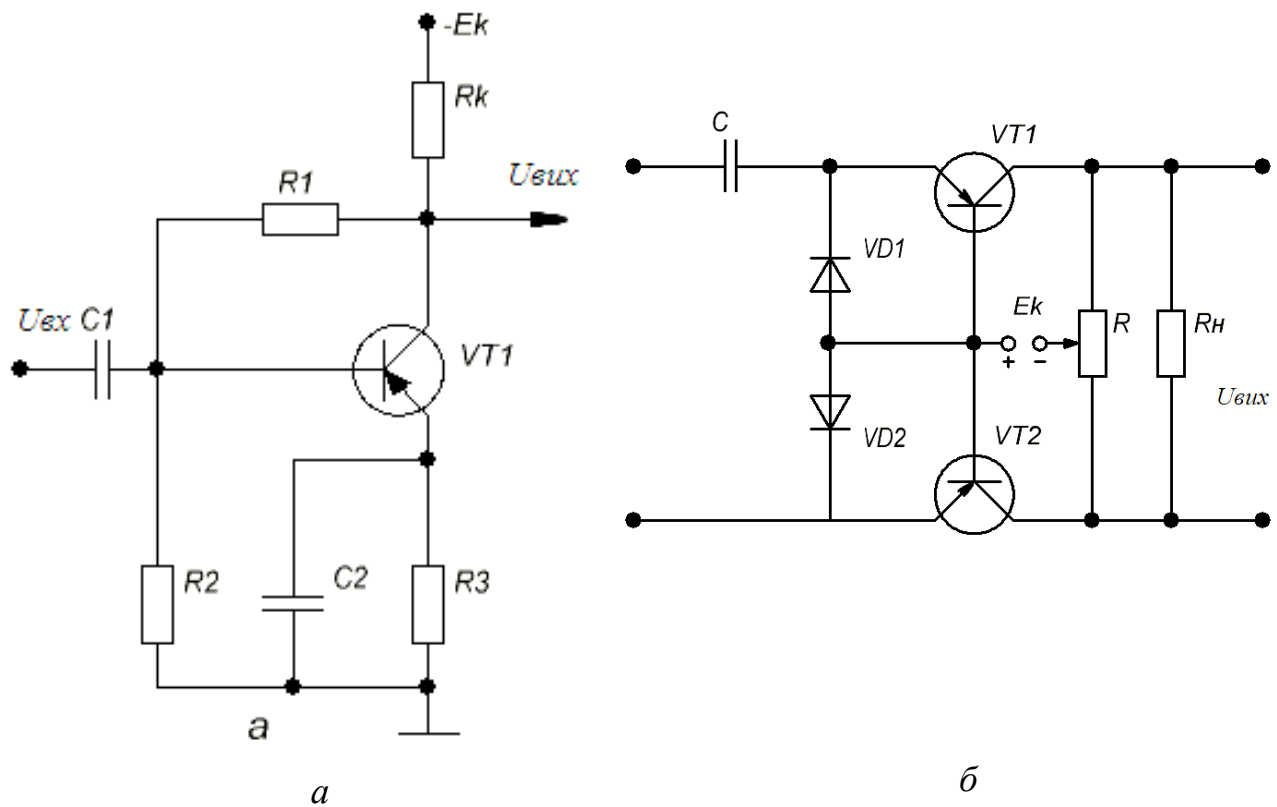


Рисунок 5.14 – Схема активного диференціюючого коригувального елемента:
(а) – включення транзистора VT_1 через резистор R_1 ; (б) – диференціюючий коригувальний елемент для різнополярного керуючого сигналу

Для різнополярного керуючого сигналу застосуємо диференціюючий коригувальний елемент, показаний на рис. 5.14, б. Передатна функція схеми із загальною базою має вигляд (5.2), де $k = \alpha R_E C$, α – коефіцієнт посилення транзистора по струму, R_E – величина опору емітерного переходу транзистора.

У схемі інтегруючого коригувального елемента (рис. 5.15) транзистор VT_1 охоплений негативним зворотним зв'язком через конденсатор C_1 . Резистор R_1 разом з конденсатором C_1 утворює інтегруючий ланцюжок, а резистори R_2 , R_3 і R_4 служать для забезпечення необхідного режиму роботи транзистора. При досить великому значенні коефіцієнта посилення транзистора по струму інтегрування вхідного сигналу проводиться досить близько до ідеального.

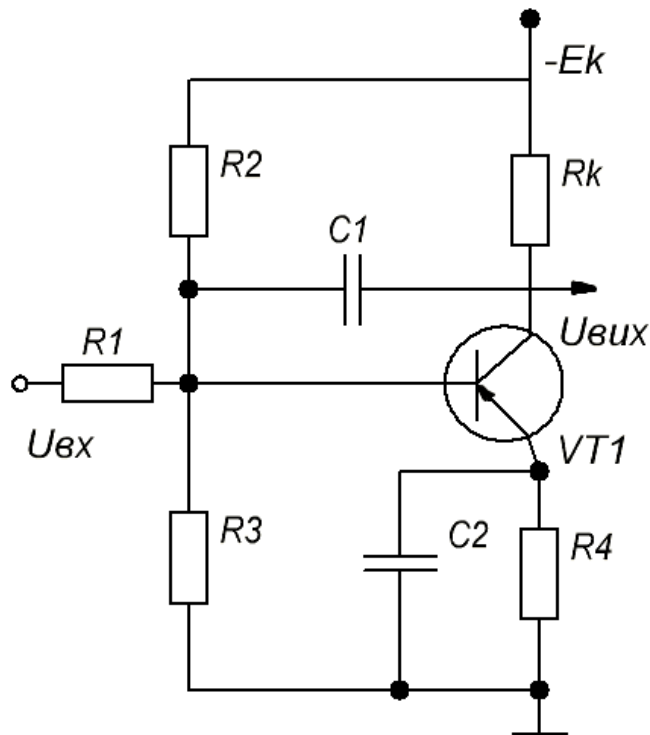


Рисунок 5.15 – Схема інтегруючого коригувального елемента

Особливістю розглянутих коригувальних елементів є те, що енергія вихідного сигналу виходить від додаткового джерела живлення E_k . Таким чином, активний коригувальний елемент, побудований на базі підсилювача постійного струму (ППС), забезпечує перетворення сигналу відповідно до необхідного алгоритму і одночасне його посилення за амплітудою і потужністю за рахунок додаткового джерела енергії.

В електричних коригувальних елементах (тахогенератор, двигуни) джерелом енергії вихідного сигналу є мережа, від якої підводиться напруга до обмотки збудження.

5.3 Коригувальні елементи змінного струму

У системах автоматичного управління передача сигналів часто здійснюється не постійним, а змінним струмом. На відміну від сигналу постійного струму, який можна уявити звичайною функцією часу $U_1(t)$, сигнал змінного струму на частоті ω_0 має вигляд $U_2(t) = U_1(t) \cos \omega_0 t$, тобто сигнал

змінного струму є напругою частоти ω_0 , модульований за амплітудою функцією $U_1(t)$, що є корисним сигналом.

Використання в системах змінного струму відповідних підсилювачів і двофазних асинхронних виконавчих електродвигунів дає можливість створювати малогабаритні, прості за конструкцією, та надійні системи управління.

Поліпшення показників якості систем управління змінного струму здійснюються за допомогою їх корекції, як і систем постійного струму.

Системи автоматичного управління на несучій (основній) частоті мають більш складні коригувальні пристрої та поліпшення показників якості введенням коригувальних елементів реалізуються з великими труднощами.

Можна виділити три типи коригувальних елементів змінного струму:

- *коригувальні пристрої з попередньою демодуляцією сигналу змінного струму;*
- *коригувальні елементи несучої частоти;*
- *спеціальні коригувальні пристрої.*

5.4 Нелінійні коригувальні елементи

Класифікація нелінійних коригувальних елементів. Підвищення вимог до якості процесів управління, ступеня захисту систем від завад, призвело до більш наочного прояву обмежених можливостей лінійних коригувальних елементів. Основна причина зазначеного факту полягає в наявності жорсткого зв'язку між амплітудно- і фазо-частотною характеристиками, існуючої для лінійних коригувальних пристроїв. Так, наприклад, введення лінійного коригувального елемента з метою внесення в коригований сигнал додаткового випередження його по фазі призводить до одночасної зміни амплітудно-частотної характеристики в бік збільшення смуги пропускання, а отже, до зниження завадозахищеності системи. Нелінійні коригувальні елементи не мають яскраво вираженого функціонального зв'язку між еквівалентними амплітудно-частотними і фазо-

частотними характеристиками, часто навіть виявляється, що при зміні однієї з цих характеристик друга змінюється незначно або не змінюється зовсім. Ця властивість створює передумови для широкого використання нелінійних коригувальних елементів під час розробки систем автоматичного управління та контролю, що володіють високою якістю процесів управління і рівнем завадозахищеності.

Нелінійна корекція може здійснюватися трьома способами:

- 1) формуванням нелінійних законів управління;*
- 2) перебудовою параметрів елементів керуючого пристрою або програми цифрового контролера або мікро-ЕОМ;*
- 3) включенням у структуру системи нелінійних чотириполіусників.*

Перші два способи корекції найзручніше розглядати у невід'ємному зв'язку з конкретною системою управління, тобто аналізувати динаміку системи в цілому, що є предметом теорії управління. Третій спосіб полягає в послідовному або паралельному включенні в коло управління простих технічних пристроїв – чотириполіусників, що володіють певними динамічними властивостями.

Коригувальні чотириполіусники можна розділити на три групи елементів:

- 1) псевдолінійні коригувальні елементи;*
- 2) коригувальні елементи нелінійного типу;*
- 3) комбіновані коригувальні елементи.*

У свою чергу першу групу елементів можна поділити на двоканальні та багатоканальні, а другу – на компенсуючі нелінійні елементи і нелінійні елементи, вбудовані в лінійні фільтри. Комбіновані коригувальні елементи є з'єднаними певному порядку псевдолінійними і нелінійними коригувальними елементами.

Питання для самоконтролю

1. Призначення і класифікація коригувальних елементів.
2. Класифікація коригувальних елементів систем.
3. Коригувальні елементи постійного струму.
4. Коригувальні елементи змінного струму.
5. Нелінійні коригувальні елементи.

6 ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ ДАНИХ І УПРАВЛІННЯ

6.1 Логічна структура мікропроцесорної системи

В ході проектування систем контролю, управління або обчислень на основі мікропроцесора необхідно з'ясувати й описати функції, що підлягають виконанню в системі, а потім узгодити їх з можливостями тих мікропроцесорів, які можуть бути використані в проектованій системі.

Реальна електронна система на основі мікропроцесора містить дуже багато функціональних пристроїв, одним з яких є мікропроцесор. Всі пристрої системи мають стандартний інтерфейс і підключаються до єдиної інформаційної магістралі, як це показано на рис.6.1.

Мікропроцесор, залежно від вимог, що висуваються до системи, може бути пристроєм однокристальним або одноплатним, створеним на основі багатокристального комплекту мікропроцесорних великих інтегральних схем (ВІС). У високопродуктивних системах мікропроцесор будується на основі біполярних мікропроцесорних секцій ВІС.

Мікропроцесор виконує в системі функції центрального пристрою управління і пристрою арифметично-логічного перетворення даних. Як пристрій управління він генерує послідовності синхронізуючих і логічних сигналів, які визначають послідовності спрацювання всіх логічних пристроїв системи. Мікропроцесор задає і послідовно здійснює мікрооперації вилучення команд програми з пам'яті системи, їх розшифрування і виконання. Тип операцій мікропроцесора визначається кодом операції в команді. Відповідно до цих кодів мікропроцесор виконує арифметичні, логічні чи інші операції над числами, поданими в двійковому або кодованому двійково-десятьковому коді.

Числа, що піддаються операційним перетворенням в арифметично-логічному блоці мікропроцесора, називають операндами. Операнд може бути

одним з вихідних чисел, результатом, константою або деяким параметром. Операція в мікропроцесорі проводиться над одним або двома операндами.

Пам'ять мікропроцесорної системи фізично реалізується на основі різних запам'ятовуючих пристроїв (ЗП). Техніко-економічна доцільність веде до побудови ієрархічної пам'яті на основі напівпровідникових постійних і оперативних запам'ятовуючих пристроїв і магнітних зовнішніх запам'ятовуючих пристроїв.

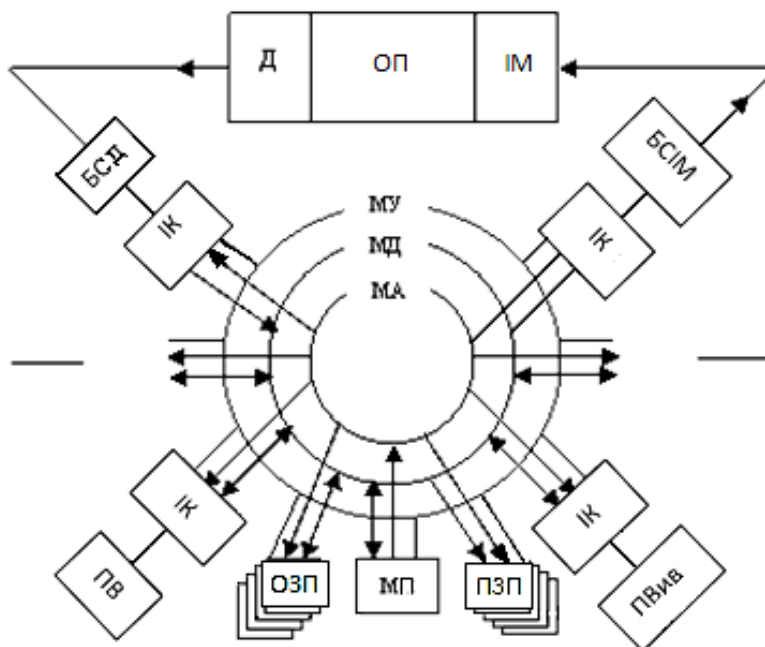


Рисунок 6.1 – Логічна структура мікропроцесорної системи

Напівпровідникові постійні запам'ятовуючі пристрої (ПЗП) дозволяють в процесі роботи системи здійснювати тільки читання заздалегідь записаних даних, мають високу швидкість роботи і енергонезалежність, тобто зберігають інформацію при відключенні джерела живлення (мережі).

Напівпровідникові оперативні запам'ятовуючі пристрої (ОЗП) працюють в режимах оперативного (що збігається з темпом роботи мікропроцесора) запису і читання (зчитування) даних. Недолік ОЗП – їх енергозалежність, тобто втрата записаної інформації при виключенні живлення.

Пам'ять системи адресується, тобто кожне слово записується в комірку пам'яті зі своїм унікальним адресом. Слово – сукупність двійкових

одиниць (біт) – двійкових розрядів, що інтерпретуються як окреме число або кілька смислових груп двійкових розрядів. Для отримання числа з пам'яті або запису числа в пам'ять необхідно точно задати його адресу в пам'яті і здійснити операцію зчитування даних з пам'яті.

Пристрої введення даних (ПВД) – будь-які засоби, призначені для передачі даних ззовні в реєстри мікропроцесора або в пам'ять (клавіатура, зовнішні пристрої, що запам'ятовують, дисплеї тощо).

Пристрої виведення даних (ПВ_{вив}) – будь-які засоби, здатні сприймати дані, що передаються з реєстрів мікропроцесора або елементів пам'яті (дисплеї, зовнішні пристрої, що запам'ятовують і тощо).

Для підключення різноманітних пристроїв введення або виведення даних (а також комбінованих пристроїв введення-виведення) необхідно привести їх всі зв'язки і сигнали до стандартного виду, тобто провести узгодження інтерфейсів. Для цього використовується спеціальний апаратурний блок – *інформаційний контролер* (ІК), що має стандартний інтерфейс з боку підключення до інформаційної магістралі і нестандартний інтерфейс з боку пристроїв введення-виведення, тобто є перетворювачем інтерфейсних сполучень.

Мікропроцесор МП, ОЗП і ПЗП разом з ПВ_{вив}, призначеними для операцій з людиною або інший електронною системою, називається мікро-ЕОМ. Мікро-ЕОМ – це ЕОМ, центральна частина якої в складі процесора, ОЗП, ПЗП, інформаційного контролера побудована на основі ВІС. Застосування ВІС як основних елементних компонентів забезпечують мікро-ЕОМ такі переваги перед іншими типами ЕОМ, як компактність, надійність, мала матеріаломісткість, низькі потужність споживання і вартість. Але магістральна структура мікро-ЕОМ і швидкісні обмеження мікропроцесора визначають помірні характеристики продуктивності мікро-ЕОМ. Це належить до мікро-ЕОМ на основі мікропроцесорів на одному або декількох кристалах.

Мікро-ЕОМ стає центральною частиною електронної системи контролю, управління і обчислень, коли вона вводиться в контур управління

деякого об'єкта (процесу). Для сполучення з мікро-ЕОМ об'єкт (процес) має бути оснащений датчиками стану та виконавчими механізмами. Датчики виступають як джерела введеної для мікро-ЕОМ інформації, а виконавчі механізми – як приймачі виведеної інформації. Для узгодження інтерфейсів підключення датчиків і виконавчих механізмів у системі здійснюється через блоки поєднання датчиків і виконавчих механізмів.

Залежно від особливостей об'єкта (процесу) і можливостей мікропроцесора складність кожного пристрою або блоку встановлюється на етапі проектування. Частини системи можуть розвиватися або вироджуватися, але має бути забезпечений загальний принцип побудови і роботи всіх електронних систем управління. Внаслідок прямої залежності між функціями програмних і апаратних засобів можна в ході побудови електронної системи розвивати або апаратуру, або ускладнювати програмне забезпечення. Саме ці обставини і визначають масові можливості застосування мікропроцесорних систем управління практично в усіх сферах.

6.2 Логічна структура універсального програмованого контролера

Контролер (блок місцевого управління) необхідний для управління *апаратами введення-виведення* інформації (АВВ). Він забезпечує електромеханічне і логічне сполучення інформаційного каналу ЕОМ і частин АВВ, що є джерелами або приймачами керуючої інформації і даних, задає порядок проходження, кількість, електричні параметри, положення в часі і напрямок проходження інформації між інформаційними каналами і АВВ. Основне завдання контролера полягає в забезпеченні умов відмикання і замикання одиночних клапанів або їх груп, а також у запуску різного роду електричних двигунів, електромеханічних перемикачів, порушення соленоїдів, прийомі посиленних і сформованих різноманітних сигналів датчиків інформації АВВ.

За будь-яких варіантів функціонального розбиття системи на частини апаратні засоби блоку сполучення з АВВ або інтегрується із засобами ВІС мікропроцесора, або виконуються окремо у вигляді інтерфейсної (інтерфейсних) ВІС.

Контролер можна виконати жорстким з'єднанням між групами вентилів, тригерів і тощо, як цифровий автомат на основі апаратної логіки.

Мінімізація кількості електронних елементів для корпусів інтегральних схем, як правило, призводить до неупорядкованої електронної структури, спеціалізованої на конкретне використання тільки в цьому пристрої. Зміна в часовій діаграмі або введення нових сигналів в апаратному контролері тягнуть за собою необхідність перепроєктування і переконструювання всього контролера або його частини.

Універсальні програмовані контролери реалізуються у вигляді однокристальних великих інтегральних схем ВІС або на основі секцій мікропроцесорних комплектів ВІС. У таких контролерах різноманітні часові діаграми сигналів і їх послідовності породжуються не розподілом регулярних сигналів тактових генераторів шляхом дровових з'єднань, а перетворенням послідовностей команд (мікрокоманд). Через гнучкості програмних і мікропрограмних засобів адаптації програмованого контролера до конкретної області застосування здійснюється за рахунок перепрограмування, що не зачіпає апаратну реалізацію контролера або викликає тільки перезапис вмісту керуючих запам'ятовуючих пристроїв.

Техніко-економічні параметри інтегральних схем з високим ступенем інтеграції елементів дозволяють здійснювати управління АВВ інформації ЕОМ за допомогою електронних структур, подібних структурам керуючих ЕОМ. При цьому забезпечуються: 1) функціональна гнучкість за рахунок використання розвинених систем команд і побудови різноманітних складних послідовностей сигналів на їх основі з можливістю обліку реакції системи, на які видаються сигнали; 2) використання розподілених методів управління в ієрархічних

керуючих системах, коли оптимізація процесу перетворення інформації ведеться на верхньому рівні управління, а безпосереднє локальне управління здійснюється вбудованим контролером, що сприймає і інтерпретує як стан АВВ, так і керуючі сигнали засобів більш високого рівня управління.

Алгоритм управління певним типом АВВ задається однозначно і у вигляді програми може бути записаний в ПЗП. Таким чином, програмований контролер у процесі роботи багато разів може виконувати одну і ту ж програму, отримуючи з більш високого рівня управління вихідні дані і завдання, і функціонуючи автономно, незалежно і паралельно з роботою засобів більш високого рівня.

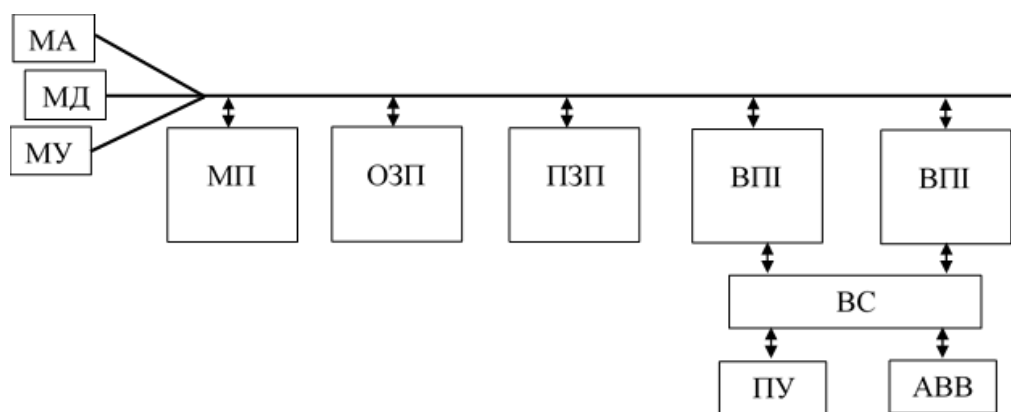


Рисунок 6.2 – Логічна структура універсального програмного контролера

Логічна структура універсального програмованого контролера наведена на рис.6.2. Контролер має магістральну структуру. Управління АВВ забезпечують мікропроцесор МП, мікроконтролер і мікро-ЕОМ, виконані на одному кристалі. Якщо апаратних можливостей мікропроцесора МП недостатньо, то до магістралей підключаються ОЗП і ПЗП, що розширюють; поле пам'яті цих пристроїв може управляти додатковим контролером. Однак на відміну від мікро-ЕОМ у контролері системні функції розширюють ОЗП і ПЗП розвинені дуже слабко і тому для управління ними достатньо найпростіших апаратних засобів, зазвичай закладаються в кристали ВІС ОЗП і ПЗП. Вузли програмованого інтерфейсу ВПІ і вузли сполучення ВС з пультом управління

ПУ і АВВ мають модульну структуру, що дозволяє нарощувати їх при ускладненні АВВ і збільшення їх числа. Контролер працює за жорстко заданою, заздалегідь відпрацьованою і введеною в нього програмою.

Вузли програмованого інтерфейсу ВПІ дають можливість врахувати специфіку АВВ і здійснити перехід від внутрішньосистемного інтерфейсу інформаційної магістралі до інтерфейсу різноманітних АВВ. Спеціалізація шин управління АВВ забезпечується подачею сигналів у ході виконання певної послідовності команд МП; їх число залежить від числа вузлів програмованого інтерфейсу ВПІ.

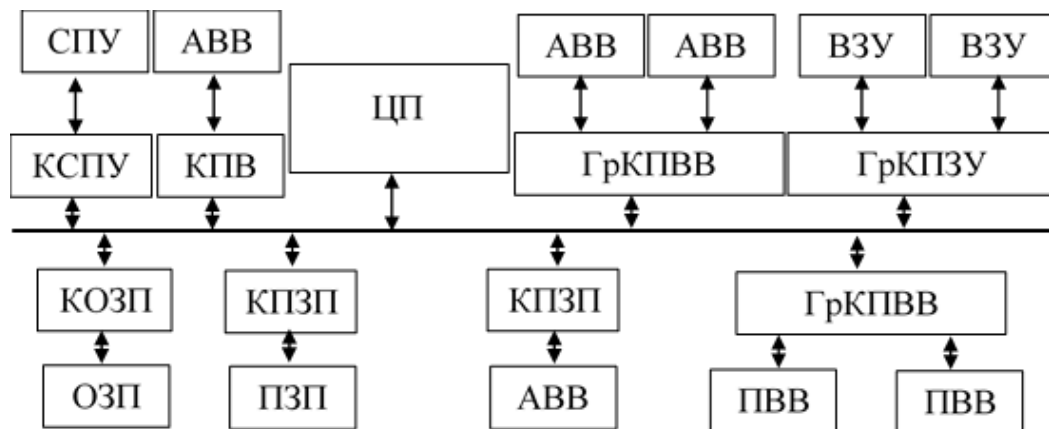


Рисунок 6.3 – Узагальнена логічна структура мікро-ЕОМ з мікропроцесорними контролерами

6.3 Логічна структура розвиненої мікропроцесорної системи

На рис. 6.3 наведена узагальнена логічна структура мікро-ЕОМ, в якій як всі керуючі блоки пристроїв ЕОМ використовуються програмовані контролери, наприклад, контролер системного пульта управління КСПУ. Він застосовується для роботи з системним пультом управління СПУ. Всі апарати введення-виведення управляються контролерами пристроїв введення-виведення КПВВ або груповими контролерами пристроїв введення-виведення ГрКПВВ. Оперативний ОЗП і постійні запам'ятовуючі пристрої ПЗП управляються за

допомогою відповідних контролерів КОЗП, КПЗП. При такій організації ЕОМ центральний процесор ЦП забезпечує програмовані контролери тільки керуючої інформацією високого рівня, що деталізується контролером. Тому кількість керуючої інформацією на інформаційній магістралі системи різко зменшується, що дозволяє збільшити швидкість передачі даних. По суті, в цій схемі наведена багатопроцесорна обчислювальна система, в якій контролер має ті ж можливості, що і центральний процесор. Низька вартість і висока надійність ВІС дозволяють для досягнення бажаних параметрів ввести розподілену обробку у всіх підсистемах обчислювальної системи, що визначає нові способи організації обчислювальних процесів у системах з децентралізованим управлінням і обробкою інформації.

6.4 Інтерфейс мікропроцесорів

Для включення мікропроцесора в будь-яку мікропроцесорну систему необхідно встановити єдині принципи і засоби його сполучення з іншими пристроями системи, тобто уніфікований інтерфейс.

Уніфікований інтерфейс – сукупність правил, що встановлюють єдині принципи взаємодії пристроїв мікропроцесорної системи. До складу інтерфейсу входять апаратні засоби з'єднання пристроїв (роз'єм і зв'язки), номенклатура і характер зв'язків, програмні засоби, що описують характер сигналів інтерфейсу і їх часову діаграму, а також опис електрофізичних параметрів сигналів.

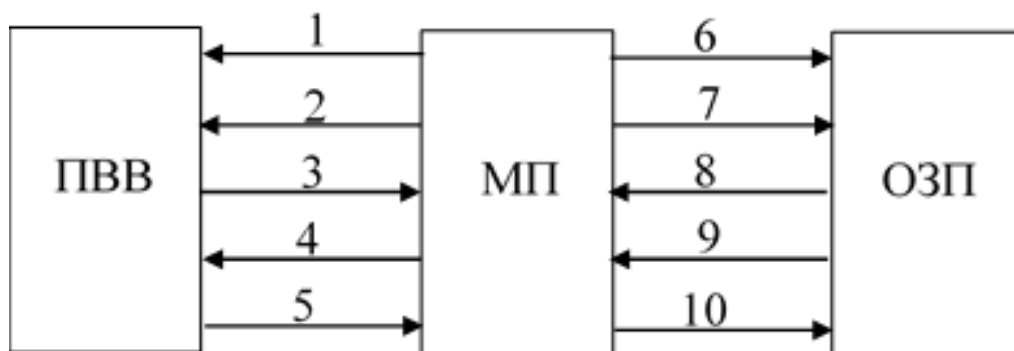


Рисунок 6.4 – Схема інтерфейсних зв'язків мікропроцесора

На рис.6.4. наведена загальна схема взаємодії мікропроцесора МП з пристроями введення-виведення ПБВ і ОЗП в мікропроцесорній системі. Зв'язок МП з ПБВ вимагає п'яти груп зв'язку, які забезпечуються через виходи корпусу. По групі шин 1 передається код вибору (адреси) пристрою, по шині 2 – сигнал управління зчитуванням – записом, по шині 3 – сигнал запиту на переривання, шини 4 і 5 використовуються для передачі даних від процесора до ПБВ і від ПБВ до МП. Зв'язок МП з ОЗП також містить п'ять груп зв'язків, які необхідно забезпечити через виходи корпусу МП. По групі шин 6 передається адреса в ОЗП, шина 7 потрібна для керування читанням/записом, по сигналах на шині 8 приймаються команди в процесор, а шини 9 і 10 забезпечують передачу даних з ОЗП в МП і у зворотному напрямку.

6.5 Інформаційні магістралі

В ході проектування ВІС і пристроїв на їх основі необхідно брати до уваги складність виконання розгалужених зв'язків між різними вузлами (блоками) та пристроями. Тому практично реалізовані і набули широкого поширення магістральні структури зв'язків, до яких підключені входи і виходи електронних вузлів (блоків). Інформаційна магістраль (МІ) є сукупністю провідників (шин) або кабелів, фізичні властивості яких забезпечують передачу високочастотних інформаційних сигналів. Електронні вузли (блоки), які підключаються до інформаційної магістралі, повинні мати певні властивості, інакше можливе утворення короткозамкнених зв'язків та низькоомних навантажень.

Розглянемо приклад передачі даних у системі трьох чотирирозрядних синхронізуючих регістрів з інформаційними магістральними зв'язками, що дозволяє визначити загальні закономірності побудови подібних структур (рис.6.5).

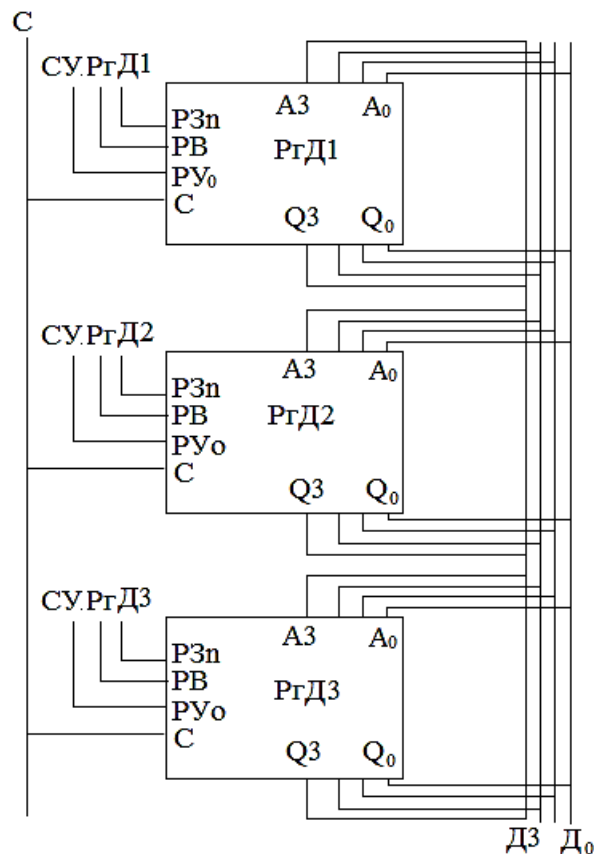


Рисунок 6.5 – Схема магістральних зв'язків трьох регістрів даних

Вхідні сигнали запису даних A_0 - A_3 передаються в регістр і викликають спрацювання тригерів тільки на передньому фронті сигналу синхронізації за наявності керуючого сигналу "Дозвіл запису" D_{3n} . Якщо сигнал $D_{3n} = 0$, то сигнали вхідних даних не проходять на входи тригерів і тому не можуть змінити стан регістра. Вхідний опір для інформаційних входів A_i при цьому стають досить великими, їхнє паралельне підключення до шин магістралі даних не веде до яких-небудь проблем.

Вихідні інформаційні сигнали Q_0 - Q_3 у розглянутих схемах формуються за допомогою керуючих трирівневих каскадів, що виробляють вихідні сигнали логічних станів "0", "1" і "Виключено". Управління вихідними каскадами тригерів регістра здійснюється сигналом "Дозвіл видачі" D_B . При забороні видачі вихідних станів ($D_B = 0$) вихідні каскади переводяться в режим з високим вихідним опором. Тому паралельне підключення вихідних виходів регістрів до шин інформаційної магістралі також не породжує проблем.

Скидання (обернення в 0) тригерів регістрів відбувається імпульсом синхронізації при подачі сигналу "Дозвіл установки 0" (ДУ "0").

У розглянутій схемі дозволена тільки послідовна передача інформаційних сигналів. Тому, незважаючи на те, що всі входи регістрів підключені до шин магістралі, і сигнали, які проходять по магістралі, надходять на вхідні каскади всіх регістрів, запис здійснюється тільки в один регістр керуючим сигналом $D3n = 1$ (принципових обмежень на одночасний запис однієї і тієї ж інформації в кілька регістрів немає). Однозначність інформаційних сигналів на магістралі при видачі інформації з регістрів забезпечується подачею тільки одного керуючого сигналу $DВ = 1$.

Керуючі сигнали $DВ = 0$ інших регістрів забезпечують ефективну електричну ізоляцію їхніх вихідних каскадів від шин інформаційних магістралей.

Операція передачі даних "регістр-регістр" здійснюється наступним чином. Розглянемо таблицю істинності (табл. 6.1) регістрів з тривірневими вихідними станами.

Таблиця 6.1 – Таблиця істинності

ДЗп	ДВ	ДУ "0"	Вихідний стан
Ø	1	1	$Q0 = Q1 = Q2 = 0$
1	1	0	$Q_i = A_i$ (на задньому фронті С)
0	1	0	Режим зберігання (сигнали С не діють)
ø	0	Ø	"Відключено"

Примітка: Знаком ø позначені сигнали, які можуть набувати значень або "0", або "1" і не впливають на виконання регістром тих функцій, які визначені іншими керуючими сигналами.

Використовуючи таблицю істинності, визначимо умови передачі стану регістра даних РгД1 в регістр даних РгД3 (в умовному запису $[РгД1 \rightarrow РгД3]$):

$$\left. \begin{array}{l} D3n_1=0, DB_1=0 \\ D3n_2=0, DB_2=0 \\ D3n_3=1, DB_3=0 \end{array} \right\} [P_2D_1] \rightarrow [P_2D_3] \quad (6.1)$$

Після установки рівнів керуючих сигналів передача інформаційного стану відбувається за імпульсною синхронізацією.

Зі збільшенням кількості регістрів (чи інших електронних блоків), підключених до магістралі, правильність роботи схеми не порушується, якщо дотримані правила проектування регістрів і схем управління ними.

Єдина інформаційна магістраль мікропроцесорної системи пов'язує між собою всі пристрої і функціонально складається з інформаційних магістралей, адрес, даних і сигналів керування.

6.6 Магістраль адрес

У простій мікропроцесорній системі тільки мікропроцесор може виробляти адреси переданої в системі інформації. Тому магістраль адрес (МА) – односпрямована: мікропроцесор генерує сигнали коду адреси, а інші пристрої, підключені до МА, тільки можуть сприймати їх, виконуючи безперервно мікрооперацію впізнання коду адреси.

Кількість шин магістралі адрес збігається з розрядністю переданого коду адреси. Якщо використовується 16-розрядний код, то в системі дозволяється вироблення $2^{16} = 65536$ адрес. Вони всі можуть мати відношення до адрес комірок пам'яті або до адрес комірок пам'яті і адреси регістрів даних пристроїв введення-виведення.

6.7 Магістраль даних

Мікропроцесор, а також ОЗП, ВЗП, дисплеї можуть сприймати або передавати дані. Інші пристрої можуть або тільки приймати дані, наприклад, пристрій друку, або тільки видавати їх, наприклад, ПЗП.

Щоб забезпечити всі можливості системи, магістраль даних має працювати у двох напрямках. Її розрядність визначається розрядністю мікропроцесора і дорівнює 2, 4, 8, 16 і 32 біт. Якщо в мікропроцесорі обробляються дані за програмами подвійної розрядності, то подвійне слово пересилається за два цикли, тобто має місце часове мультиплексування (воно також застосовувалося в декількох перших мікропроцесорах, коли використовувалася загальна магістраль адрес і даних).

6.8 Магістраль управління

Мікропроцесор і деякі шини пристроїв введення-виведення генерують сигнали, призначені для синхронізації і визначення операцій пристроїв. Ці сигнали передаються за сукупністю односпрямованих шин, у цілому утворюють магістраль сигналів управління (МУ). Всі сигнали управління в електронній системі узгоджені з системними сигналами синхронізації. Ці сигнали задають початок і послідовність спрацьовування, як різних пристроїв системи, так і різних блоків і вузлів всередині всіх кристалів ВІС. Для завдання головної послідовності синхронізуючих імпульсів, як правило, застосовується зовнішній кварц або генератор на його основі. Видані мікропроцесором сигнали синхронізації бувають однофазними, рідше двофазними.

Кожен мікропроцесор має унікальну систему сигналів управління. Тому конкретний опис всіх шин МУ, так само як і цюколі виходів корпусу, дається в технічній документації на конкретний мікропроцесор. Проте, практично всі мікропроцесори мають загальні сигнали. Серед них – сигнал "Скидання" – вхідний сигнал, що виробляється на пульті управління системи. Він призводить до скидання всіх внутрішніх регістрів мікропроцесора і завантаження лічильника команд – вузла, що визначає послідовність виконання команд програми, початковим значенням адреси, де записана перша команда програми.

Найважливіша керуюча функція мікропроцесора – визначення потоків даних у системі. Мікропроцесор викликає слова команд з пам'яті в процесі їхнього читання, звертається в пам'ять за операндами або до зовнішніх пристроїв за новими даними, може записати результат операції в пам'ять або, сформувавши масив даних, визначити необхідність їх виведення на зовнішні пристрої. Коли мікропроцесор посилає дані якомусь пристрою, відбувається операція запису даних, а коли отримує дані від якогось пристрою, то зчитує дані з його інформаційного регістра і виконує операцію зчитування даних. Щоб задати напрямок передачі даних по магістралі даних МД, мікропроцесор генерує сигнали "Читання/Запис", що передаються по одній з шин магістралі управління МУ.

Специфіка пристроїв введення-виведення даних така, що інформація може бути втрачена, якщо мікропроцесор МП своєчасно не здійснить операцію з пристроєм. Тому ці пристрої генерують сигнали "Запит переривання процесора". Вони звертають увагу мікропроцесора на стан готовності (або несправності). Мікропроцесор має вхід для прийому, принаймні, одного сигналу "Запит переривання процесора". Якщо ж запит приймається, то МП інформує систему, виробляючи відповідний сигнал "Запит переривання задоволений".

Різна швидкість роботи пристрою введення-виведення і мікропроцесора породжує необхідність зупинки процесора на час підготовки даних у зовнішньому пристрої. Тому режим роботи очікування мікропроцесора визначається зовнішнім сигналом "Дані підготовлені (дані не підготовлені)". Всього в магістралі управління МУ передається до десятка (і більше) різноманітних сигналів управління.

6.9 Перетворювачі інтерфейсів

Коли необхідно перейти від одного виду інтерфейсу до іншого, застосовують спеціальні апаратурні засоби у вигляді перетворювача інтерфейсів і інтерфейсного контролера. В ході побудови мікропроцесорних систем найчастіше здійснюються перетворення, пов'язані з різними форматами електронних сигналів.

Всі мікропроцесори МП обробляють цифрові дані, подані у паралельній формі. У цьому випадку розряди слів даних передаються одночасно з інформаційної магістралі і обробляються паралельно у всіх розрядах арифметико-логічного блоку АЛБ мікропроцесора, тому всередині електронної системи всі передачі даних також виробляються в паралельному форматі. Але в периферійній частині електронних систем можуть бути різноманітні формати інформаційних сигналів, серед яких найбільш важливими є аналогові і цифрові послідовні.

Аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі у вигляді ВІС вирішують завдання перетворення аналогових сигналів у паралельні коди і навпаки. Розвиток керуючих засобів цих перетворювачів дозволяє не тільки істотно спростити їхній інтерфейс з МП, але практично забезпечити пряме з'єднання без додаткових апаратурних засобів. Дані в послідовному цифровому форматі передаються по одній інформаційній шині, що істотно знижує кількість зв'язків у периферійній частині систем, у випадках, коли не потрібно здійснювати сполучення з периферійними швидкодіючими пристроями. Ці дані можуть прямо вводитися (або виводитися) в МП, для чого необхідно розробити програмні модулі прийому і перетворення форматів даних з відповідною синхронізацією МП і зовнішніх пристроїв.

Асинхронна передача даних означає, що приймач (наприклад, МП) і передавач здійснюють зв'язок в умовах, коли кожен має свою власну систему синхронізації, тому передавач посилає свої дані в будь-який момент, не

погодившись з часовим станом приймача. У приймачі мають бути передбачені засоби аналізу та входження у "часове зачеплення", тобто засоби синхронізації своєї роботи з роботою передавача.

6.10 Формат послідовних інформаційних сигналів

Послідовні інформаційні сигнали формуються у вигляді "1" або "0" рівнів струму (напруги), значення яких зберігаються незмінними протягом періоду проходження інформаційних сигналів T_n . Рівень сигналу може змінювати свою величину лише на початку періоду проходження інформаційних сигналів.

До початку подачі цифрової інформації в лінію зв'язку постійно надходить сигнал рівня "1". Якщо необхідно почати передачу даних, то їм завжди передують так званий стартовий біт "0". Потім слідує посилка бітів слова даних, наприклад 7-розрядного.

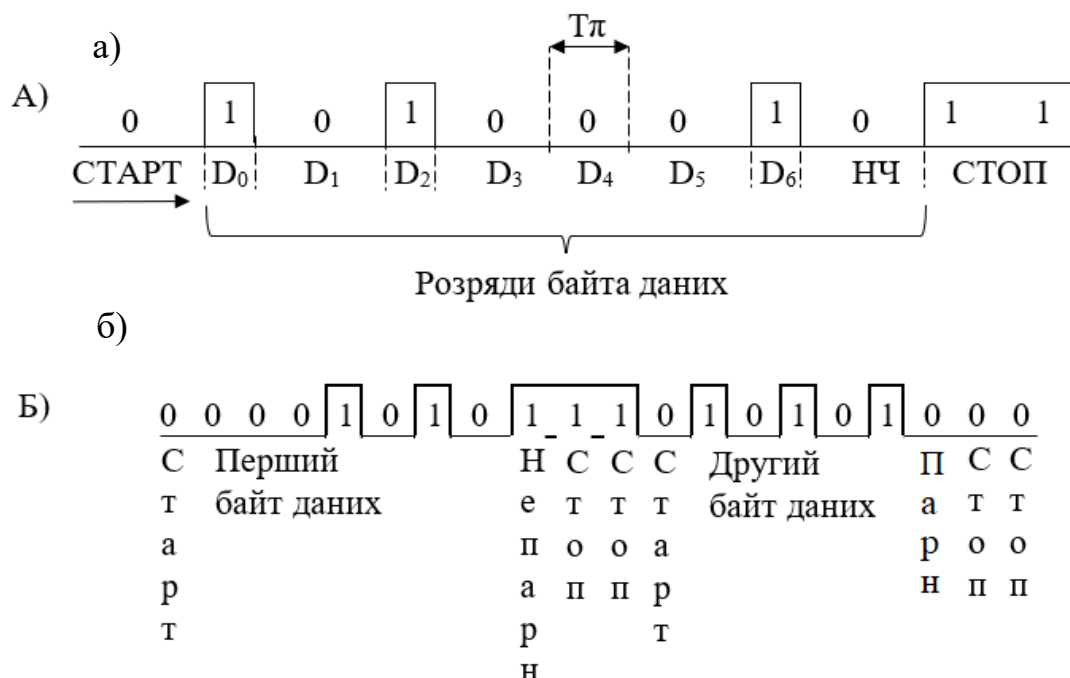


Рисунок 6.6 – Формат сигналів послідовних даних (а),
послідовний байт даних з контролем за непарністю (б)

На рис. 6.6, а наведено формат послідовних даних, а на рис.6.6, б – приклад послідовної передачі двох слів даних з контролем на непарність переданих "1" даних.

Слово даних може супроводжуватися контрольним бітом, відповідним парності / непарності "1" в переданому коді. Завершується посилка двома стоповими бітами, які завжди мають значення "1". Всередині слова даних молодший значущий розряд передається першим, старший – останнім. Після видачі сигналів «СТОП» передавач може або одразу ж передавати наступне слово даних, або зберігає рівень "1", відповідний справності лінії зв'язку і передавача за відсутності даних, що передаються. Приймач стежить за рівнями сигналу в лінії зв'язку, фіксуючи перехід від "1" до "0" як початок передачі, сприймає дані наступних семи або восьми інтервалів, аналізує наявність «СТОП-бітів» і приймає рішення про припинення або продовження прийому. Отже, введення «СТАРТ» і «СТОП» у кодову посилку дозволяє здійснити синхронізацію приймача і передавача, і правильно інтерпретувати сигнали даних.

6.11 Схеми і принцип роботи контролера послідовно-паралельного інтерфейсу

Щоб полегшити побудову схем сполучення зовнішніх пристроїв з послідовним форматом вихідних сигналів у ході створення мікропроцесорних систем, до складу комплектів мікропроцесорних ВІС включається ВІС контролера послідовно-паралельного інтерфейсу. Такі контролери інтерфейсу мають різну складність, свої специфічні особливості, але функції, виконувані ними, практично однакові і відповідають сенсу назві ВІС універсальних асинхронних приймачів-передавачів (УАПП) або асинхронних інтерфейсних адаптерів зв'язку (АСІА).

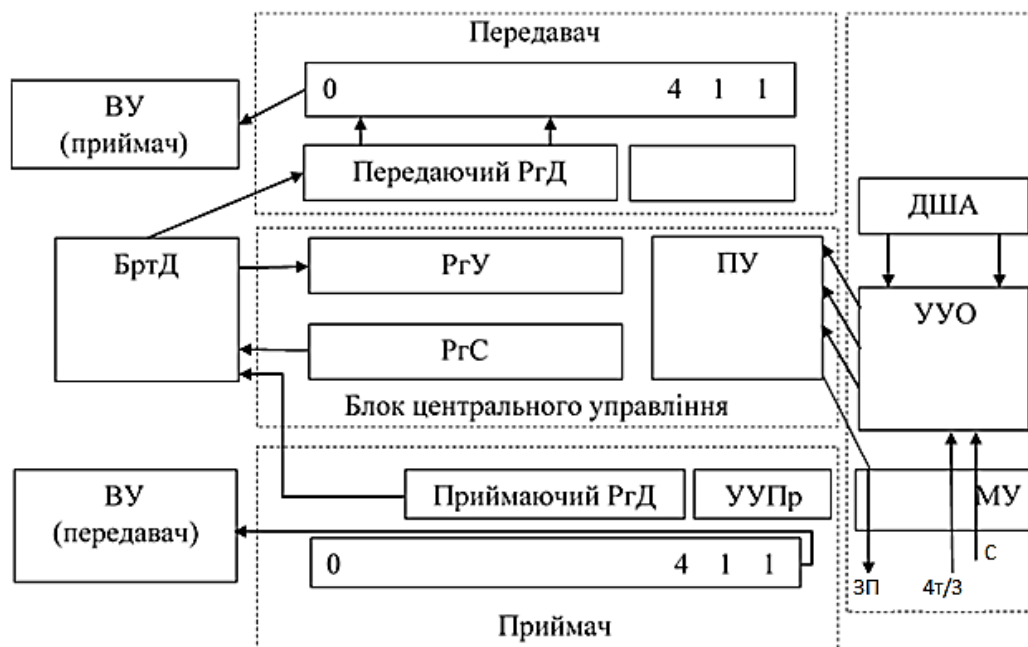


Рисунок 6.7 – Функціональна структура асинхронного прийомо-передавача

Розглянемо особливості функціональної побудови і режим роботи типового ВІС УАПП (рис.6.7). У структурі ВІС УАПП містяться такі основні електронні блоки: приймач послідовних сигналів, що виконує перетворення даних послідовного формату в паралельний код; передавач сигналів, який здійснює перетворення паралельного коду в послідовний формат; блок центрального управління, блок буферного зберігання даних і блок зв'язку з інформаційною магістраллю мікропроцесора, а також блок системного управління.

Як і будь-який інший компонент електронної інформаційно-керуючої системи, ВІС УАПП має адресне програмне керування. УАПП за командами МП може виконувати чотири операції, для завдання яких достатньо видавати коди двох адрес і керуючий сигнал на магістралі управління "Читання / запис" (Чт / Зп).

Розглянемо виконання команд УАПП.

1. *Записати слово в передатний регістр даних.* За цією командою слово даних з акумулятора МП передається в передатний регістр даних (РГД)

передавача через буферний регістр даних (БРГД). Потім це слово даних передається у зсувний регістр даних передавача і видається в послідовному форматі в інтерфейс відповідного зовнішнього пристрою.

2. *Зчитати слово з приймального регістра даних.* Під час виконання цієї команди в акумулятор МП передається слово даних, утворене в результаті паралельної передачі з зсувного регістра приймача після закінчення прийому одного слова даних у послідовному форматі.

3. *Записати код керуючого слова в регістр сигналів управління.* Блок центрального управління перетворює сигнали тригерів регістра управління (РГУ) (зазвичай восьмирозрядного) в сигнали управління різними блоками. Мікропроцесор передає в блок центрального управління БЦУ інформацію про зовнішнє джерело синхронізації, форматі послідовного коду і напрямку передачі. У коді управління форматом задається число розрядів даних (зазвичай до восьми), число «СТОП» бітів і ознаки парності. Цієї інформації достатньо для програмування роботи УАПП з передачі даних.

4. *Зчитати інформацію стану.* При здійсненні операції введення даних МП може здійснювати зчитування, введення і аналіз статусної інформації УАПП, яка зберігається в регістрі стану (РГС) (зазвичай восьмирозрядний).

Розглянемо режим взаємодії МП і УАПП під час введення послідовних даних від зовнішнього пристрою (ЗП). У програмі роботи МП має бути передбачений процес ініціалізації УАПП, який здійснюється засиланням керуючої інформації в регістр управління РГУ по команді 3. У складі цієї керуючої інформації є сигнали "Дозвіл переривання" (ДПР) і "Готовність слова даних" (ГСД). Отримавши інформацію, що управляє, УАПП починає аналіз слова даних на вході і їх введення за наявності сигналу «СТАРТ» у коді слова даних. Коли в приймальний регістр даних РГД передається повне слово даних, то в тригері готовності слова даних встановлюється рівень "1". Установка цього тригера є підставою для генерації сигналу запиту переривання МП, якщо раніше від МП у складі керуючого слова надійшов сигнал рівня "1".

У програмі переривання, перш за все, здійснюються збереження інформаційного змісту внутрішніх регістрів МП і блокування інших сигналів переривання на вході блоку переривання МП. Потім виконується команда 4 і йде аналіз тих бітів інформації стану, які пов'язані з контролем правильності виконання операції прийому даних, тобто перевіряється порушення парності, переповнення або визначаються помилки форматування. Якщо сталася помилка, то відбувається перехід до підпрограми аналізу причин помилок. Якщо помилок немає, то виконується команда 2, і прийняті дані передаються в акумулятор або будь-який регістр МП. Потім МП знімає блокування сигналів блоку переривання, відновлює стан перерваної програми і продовжує її виконання до отримання наступного сигналу запиту переривання.

6.12 Прийом-передача послідовних інформаційних сигналів

Для введення даних МП через буферний регістр даних передається слово в передатний регістр даних РГД. Вузол управління передачею (ВУПд) здійснює паралельну передачу слова з передатного регістру в зсувний передатний регістр (ЗПР). Тут слова даних доповнюються стартовим бітом, бітом парності і необхідним числом «СТОП-бітів». Наявність 8-розрядів даних в апаратурних ресурсах УАПП дозволяє застосовувати різні методи кодування даних п'яти, сьоми і восьмирозрядними кодами. Потім слово даних, сформований в ЗПР, під дією імпульсів синхронізації зсувається, і електричні сигнали у вигляді струмових посилок надходять в лінію зв'язку. Таким чином, формується послідовний інформаційний формат даних, що пересилаються.

При прийомі даних послідовні кодові сигнали приймаються в зсувний приймальний регістр (ЗПрР). Потім інформаційні розряди даних паралельно передаються в приймальний регістр даних УАПП.

Як вже зазначалося, МП при взаємодії з УАПП виконує чотири основні операції, які аналогічні читанню і запису даних, здійснюваних у певних

регістрах УАПП. Одна й та ж адреса використовується для операцій з регістрами стану і управління, оскільки сигнал на шині Чт/Зп (читання/запис) магістралі управління точно доповнює адресу коду команди. Аналогічно, виявляється достатньо тільки одного коду адреси для операцій з прийомним і передатним регістрами даних РГД.

Якщо формат послідовних сигналів даних може бути реалізований розглянутими засобами приймача і передавача, то УАПП використовують для роботи з будь-якими зовнішніми пристроями послідовної дії без необхідності застосування нових команд або будь-яких додаткових апаратурних засобів.

Для настройки апаратурних інтерфейсів засобів УАПП на певні функції прийому-передачі даних необхідно виконати його програмну ініціалізацію. Розглянемо функції, які визначаються кожним бітом типового керуючого слова.

Біт "Дозвіл переривання при прийомі" управляє разом з бітом "Готовність слова даних" регістра стану УАПП виробленням сигналу запиту переривання роботи МП при прийомі даних.

Біт "Дозвіл переривання при передачі даних" управляє разом з бітом "Закінчення передачі слова даних" регістра статусу виробленням сигналу запиту переривання роботи МП при передачі даних.

Кілька бітів регістра використовуються для кодування розрядності слів (7 або 8 біт), парності / непарності або відсутності контролю, кількості «СТОП-бітів» (1 або 2).

Два біта коду керуючого слова достатньо для завдання сигналів скидання керуючих кіл УАПП і визначення коефіцієнта ділення частоти синхроімпульсів при прийомі даних. Зазначимо, що ініціалізації УАПП передують скидання керуючих кіл посилкою коду керуючого слова, в якому задані умови зведення до нуля (установкою відповідних керуючих бітів в рівень "1").

Коефіцієнт розподілу частоти синхроімпульсів відображає прийняту схему виділення прийнятих інформаційних сигналів. Як вже було показано,

початкова синхронізація викликається «СТАРТ-бітом», повідомляє приймачу, що далі йдуть, біти даних, парності, «СТОП».

Щоб полегшити синхронізацію роботи зовнішніх пристроїв, в УАПП використовується в 16 або 64 рази вища частота, ніж швидкість передачі даних, яка визначається співвідношенням $1/T_n$. Отже, один період проходження синхроімпульсів, що передаються в УАПП, має дорівнювати $1/16 T_n$ або $1/64 T_n$. Тому, після виявлення переходу "1" або "0", що викликається «СТАРТ-бітом», за допомогою засобів УАПП можна підтвердити цей перехід через 8 (або 32) періодів (тобто приблизно в середині періоду T_n) і встановити, що саме старт біт має місце, а не випадкова завада. Аналогічним чином здійснюється стробуванням всіх інших інформаційних переходів всередині періоду проходження послідовних сигналів, що збільшує ймовірність правильного виділення інформаційних сигналів на рівні перешкод.

Вузли управління прийомом і передачею даних (ВУПр і ВУПд) ведуть аналіз сигналів, що надходять і передаються до цих вузлів. У разі відхилення від заданого режиму ці блоки управління формують рівень "1" відповідних бітів в регістрі стану.

Регістр стану фіксує наступні важливі сигнали стану. Біт "Запит переривання" завжди знаходиться в стані, відповідному сигналу "Запит переривання роботи МП" УАПП. Цей біт скидається в стан "0", коли МП виконує команди читання або запису даних у прийомних-передатних регістрах УАПП. Установка біта "Запит переривання" в регістрі стану УАПП дозволяє МП виділити тільки один УАПП, що виставив запит переривання, з декількох УАПП, що працюють паралельно в системі. Мікропроцесор за своїми внутрішніми програмами може здійснити послідовне зчитування і аналіз даного біта в кодах станів усіх підключених УАПП і виділити активний інтерфейсний контролер, тобто сформувався сигнал запиту переривання.

Біт "Контроль парності" відповідає стану парності бітів даних, якщо парність включена у формат і задана в керуючому слові. При порушенні

парності даний біт регістра стану встановлюється в значення "1", що дозволяє звернути увагу МП на порушення встановленого режиму роботи.

Як тільки завершується прийом послідовного слова з приймального регістра, що зрушує, ВУПр виконує аналіз кількості «СТОП-бітів». При виявленні будь-яких відхилень генерується сигнал "Помилка форматування" шляхом встановлення відповідного біта регістра в стан "1".

При прийомі даних УАПП сформовані слова передаються з регістру зрушення в приймальний РГД, а з нього в МП. Якщо після прийому одного слова не надійшов запит на його передачу в МП, то інше послідовне слово, сформоване в зрушуючому регістрі, не може бути передано в приймальний РГД. Оскільки приймальний РГД заповнений, передача в нього другого слова знищить перше. При цьому втрачається слово даних і порушується правильна робота системи. Тому виявлення факту прийому наступного слова до передачі в МП попереднього веде до встановлення регістру стану РГС в "1" біта "Помилка переповнення". Цей сигнал повідомляє МП про те, що сталася втрата слова в процесі передачі послідовного масиву даних.

Біт "Приймальний регістр даних заповнений" свідчить про готовність слова даних до передачі в МП.

Біт "Передатний регістр даних звільнений" встановлюється в стан "1" після передачі вмісту передатного регістру даних у зсувний регістр даних передавача. Цей сигнал регістра стану вказує процесору ті моменти, в які може бути здійснена передача чергового слова даних з МП і УАПП.

У складі регістра стану УАПП можуть бути також тригери, що встановлюються сигналами стану модемів. *Модеми* – електронні блоки зв'язку МП з дистанційно віддаленими зовнішніми пристроями по телефонній лінії зв'язку. Вони перетворюють цифрову інформацію в аналогову, призначену для поширення по телефонних лініях зв'язку. Модеми ставляться на обох кінцях лінії зв'язку для здійснення процесів модуляції і демодуляції цифрової інформації.

Великий показник автономності роботи УАПП дозволяє забезпечити високу ефективність використання МП у системі, оскільки вимагає від нього тільки даних по ініціалізації свого стану і дозволяє МП виконувати обчислювальний процес одночасно з виконанням процесу введення-виведення інформації в УАПП. Зазначимо також, що розвинені 16-розрядні МП мають всі ті можливості, які забезпечуються в мікросистемах на основі звичайних МП і ВІС УАПП.

6.13 Логічна структура мікропроцесорної системи на основі комплекту ВІС секційного мікропроцесора

Комплект ВІС секційного мікропроцесора. Внаслідок малої розрядності секцій мікропроцесора і визначеності функціонального наповнення їх реалізують, як правило, у вигляді біполярних ВІС в корпусі з 42 - 64 виходами. Велика кількість виходів корпусу однієї секції ВІС і внутрішня логічна структура секції мікропроцесора забезпечують побудову мікро-ЕОМ різної розрядності зі збільшенням кількості входів переривань, різною кількістю пристроїв, що підключають ведення-виведення ПВВ тощо.

До складу комплекту ВІС секційного мікропроцесора належать значна кількість секцій. Розглянемо найбільш важливі з них.

Секції арифметично-логічних ВІС використовуються для побудови операційних блоків обробки інформації. Вони включають в себе кілька розрядів арифметико-логічного блоку АЛБ, керуючих регістрів, систему виявлення і захисту від проникнення СЗЗП і вузлів зв'язку з інформаційними магістралями. Секції ВІС випереджаючого паралельного перенесення дозволяють об'єднати арифметично-логічні (АЛБ) секції в високошвидкісні блоки обробки інформації за рахунок створення пірамідальних схем прискореного перенесення.

Секції ВІС для завдання послідовності мікрокоманд, що застосовуються для побудови блоків мікропрограмного управління, дають можливість

виробляти вихідний код залежно від зовнішнього керуючого коду, коду стану процесора, вмісту внутрішнього стека, а також внутрішнього стану самої секції.

При мікропрограмному управлінні кожній команді відповідає *мікропрограма* – послідовність мікрокоманд, виконання яких призводить до виконання операцій, заданих командою. Мікрокоманда управляє виконанням однієї або декількох мікрооперацій.

ВІС мікропрограмного управління на основі програмованої логічної матриці (ПЛМ) наведена на рис. 6.8.

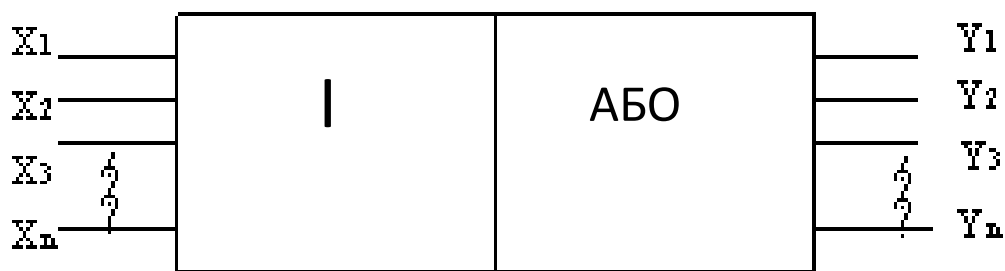


Рисунок 6.8 – Структура програмованої матриці

Наведена схема ПЛМ (рис.6.8) містить логічні матриці адрес «І» і даних «АБО», за допомогою яких здійснюється перетворення вхідного n -розрядного коду в m -розрядний вихідний код. Матриці даних постійного запам'ятовуючого пристрою ПЗП та програмованої логічної матриці ПЛМ збігаються. Різниця ПЗП і ПЛМ існує тільки між матрицями адрес або дешифраторами адрес.

У ході побудови дешифратора адрес ПЗП обов'язкова постановка комутуючих елементів між вхідними шинами і шинами перехідних функцій. Тому в дешифраторі кожної комбінації вхідних сигналів відповідає одна і тільки одна перехідна функція. *Всього перехідних функцій* – 2^n штук. У ПЛМ комутуючі елементи для ряду вхідних змінних можуть бути відсутні. Тому деякі змінні не впливають на вибір перехідної функції. *Число перехідних функцій ПЛМ* $0 < l \leq 2^n$.

На практиці набули поширення ПЛМ з багаторозрядними адресами, для яких число вхідних змінних дорівнює 16, 24 розрядів і більше. ПЗП і ПЛМ розрізняються за системою адресації інформаційного поля даних, розподілу інформаційних полів, можливості одночасного опитування декількох перехідних функцій. Оскільки в ПЛМ здійснюється надлишкова вільна адресація, а в ПЗП – жорстка не надмірна адресація, то в ПЛМ великій кількості вхідних комбінацій адрес відповідає мала кількість адресованих перехідних функцій. Різні адреси можуть визначати одну і ту ж перехідну функцію або не визначати жодної. Крім того, можливі варіанти, коли одна адреса визначає більш однієї перехідної функції.

Специфіка внутрішнього розподілу інформаційних полів у ПЛМ у тому, що за допомогою двох (або більше) різних адрес можна адресувати одну і ту ж область даних матриці, що дозволяє звертатися до мікропрограм за різними адресами. Отже, з'являється можливість мікропрограмного переходу до мікропрограм з різних поточних умов без виконання спеціальних мікрокоманд переходу. Ця особливість адресації забезпечується наявністю байдужих розрядів у коді адреси.

Одночасність вибору двох (і більше) вихідних інформаційних слів і об'єднання їх по «АБО» на виході програмованої логічної матриці ПЛМ визначаються можливістю адресації різних перехідних функцій однією адресою. При цьому зберігається вибір кожного інформаційного слова своєю специфічною адресою. Жорстка не надмірна адресація ПЗП дозволяє мати однозначну відповідність адрес і слів в інформаційному полі даних.

Схема ВІС мікропрограмного управління вертикального типу з інформаційним полем на основі ПЛМ наведена на рис.6.9.

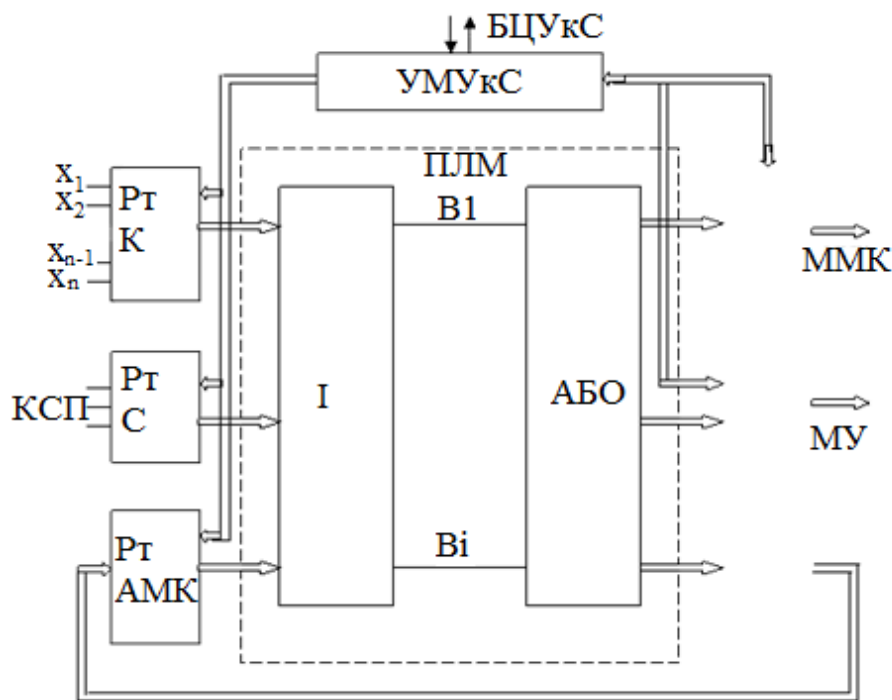


Рисунок 6.9 – Схема ВІС мікропрограмного управління на основі програмованої логічної матриці

Звичайна програмована логічна матриця ПЛМ – комбінаційна логічна схема. Щоб побудувати мікропрограмний послідовний автомат, необхідні регістри на входах і виходах ПЛМ і зворотний зв'язок для завдання закону вироблення послідовних станів. Вбудовування вхідних і вихідних регістрів у блок управління з ПЛМ забезпечує автономну функціональну закінченість ВІС. Управління прийомом і видачею інформаційних станів регістрів дозволяє використовувати таку ВІС у будь-якій асинхронній (а також синхронній) мікро-ЕОМ і знімає проблему "перегонів" ("змагань").

Схема ВІС мікропрограмного управління вертикального типу з інформаційним полем на основі ПЛМ (рис.6.9) містить ПЛМ, регістр команд РГК, регістр стану системи РГС, регістр наступної адреси мікрокоманд РГАМК, буферний регістр наступної адреси мікрокоманд БРГАМК, регістр внутрішніх станів блоку мікропрограмного управління РГСМУ, вихідний регістр мікрокоманд РГМК, а також вузол місцевого управління і синхронізації ВМУіС. Як вхідна інформація в ПЛМ подаються код команди (наприклад,

16-розрядний), код наступної адреси (наприклад, чотирирозрядний) і кілька розрядів коду стану системи, що визначають формування умов переходів у мікропрограмах та обробку сигналів переривання.

Вихідний код ПЛМ зазвичай містить 20–30 розрядів, оскільки мікрокоманди більшої розрядності вимагають застосування корпусів ВІС з великою кількістю виходів. Частина вихідних сигналів ПЛМ не виводиться з ВІС. Код наступної адреси мікрокоманд записується в регістр БРГАМК, а потім передається в регістр РГАМК. Сигнали з регістра РГСМУ діляться на дві групи, одна з яких передається всередині ВІС в ВМУіС, а друга через контакти корпусу виводиться з ВІС і використовується блоком центрального управління і синхронізації БЦУіС. У кожному машинному такті мікрокоманда видається на інформаційну магістраль мікрокоманд ІММК, а в РГАМК заноситься деякий код, що визначає разом з командами РГС і РГСМУ адреса наступної команди.

Властивість одночасності вибору декількох вихідних адресних шин ПЛМ збільшує інформаційну насиченість ПЛМ порівняно з ПЗП і дозволяє виграти в 3–10 разів у числі елементів, необхідних для побудови інформаційних полів ВІС.

Секції ВІС пріоритетного векторного переривання включають в себе регістри прийому зовнішніх сигналів запитів переривання, коду маскуванню стану, пріоритетний шифратор, вузол формування коду пріоритетного вектора, блоки місцевого мікропрограмного управління і управління інформаційними магістралями.

Секції ВІС тригерних регістрів широкого призначення використовуються для організації різноманітних буферів зберігання цифрової інформації.

Секції ВІС приймачів інформації (з контролем правильності передачі або без нього) містять буферні регістри для зберігання вхідної та вихідної інформації, підсилювачі для роботи на зовнішні інформаційні магістралі (як правило, з трьома внутрішніми станами: "Включено", "Виключено", "Відключено").

6.14 Комплект ВІС для побудови електронної системи

До складу всіх комплектів ВІС (у тому числі і секційних) входять ВІС ОЗП, ПЗП, програмованого ПЗП або ППЗП, ПЛМ, програмованої ПЛМ або ППЛМ, що мають різноманітну організацію інформаційних полів і керуючі інтерфейсною логікою. Вони дозволяють створювати нарощувані поля оперативної, постійної і мікропрограмної пам'яті, працювати з прямими й інтерфейсними інформаційними сигналами, будувати багатовхідні системи адресної вибірки, кола контролю переданої і збереженої інформації.

Логічна структура процесора на основі комплекту ВІС секційного мікропроцесора. Розвинена інфраструктура секційних комплектів ВІС мікропроцесора забезпечує можливість побудови високопродуктивних засобів ефективної емуляції розвинених мікро-ЕОМ і дозволяє створювати гнучкі ефективні системи з адаптацією до області застосування (рис.5.10.).

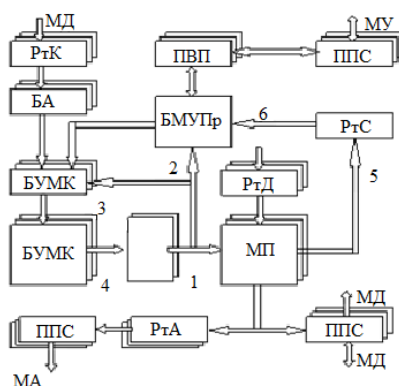


Рисунок 6.10 – Узагальнена структура процесора на основі ВІС комплекту секційного мікропроцесора

Узагальнена структура процесора на основі комплекту ВІС наведена на рис.6.10. В основу процесора покладені секції мікропроцесорів МП і секції прискореного випереджаючого перенесення. Для побудови інтерфейсних схем застосовані секції приймачів сигналів ППС, що дозволяють організувати двонаправлені магістралі даних, адрес і сигналів управління. Блок мікропрограмного управління будується на основі ПЗП або ППЗП, а також ВІС

вироблення послідовності керуючих сигналів. Останні застосовуються як блок управління мікрокомандами БУМК. Для управління пріоритетними векторними перериваннями використовуються відповідні секції ВІС ПВП для побудови регістрів – секції ВІС регістрів універсального призначення. Блок місцевого управління БМУ керує всією системою.

Оскільки секції мікропроцесора мають деякий набір робочих регістрів загального призначення, будь-які з них можуть бути виділені як лічильник команд, регістри – показчик стека або інших працюючих і керуючих регістрів.

Розглянемо *взаємодію основних блоків процесора*. Команда витягується з ОЗП і по магістралі даних МД передається регістр команд РГК. Код команди надходить через блок адресації БА і блок управління мікрокомандами БУМК, щоб перетворити його в першу адресу мікрокоманд у запам'ятовуючому пристрої мікрокоманд ЗПМК. Потім виконується кілька мікрооперацій для пошуку даних в ОЗП і передачі їх в мікропроцесор МП, виконання операцій в арифметично-логічному блоці АЛБ, контролю переповнення і запитів на переривання тощо.

Вихідний код з ЗПМК є мікрокоманда, що зазвичай містить близько 40 розрядів, наприклад, 9 розрядів для визначення операції арифметично-логічного блоку, 8 розрядів для адресації двох вихідних операндів системи виявлення і захисту від проникнення СВЗП; інші розряди – для сигналів видачі вихідних результатів, управління ОЗП, прийомопередавачами, стеком тощо.

Наявність регістра мікрокоманд РГМК дає можливість організувати конвеєрну роботу процесора. Нехай в регістрі РГМК міститься код 1 виконуваної мікрокоманди. Поле мікрокоманд, що управляє послідовністю мікрокоманд, аналізується блоком місцевого управління процесора БМУПр і направляється у вигляді керуючих сигналів 2 в БУМК для визначення адреси наступної мікрокоманд. Адреса мікрокоманд у вигляді сигналів 3 надсилається в ЗПМК і нова мікрокоманда надходить на вихід РГМК. Мікропроцесор паралельно виконує раніше отриману мікрокоманду, оскільки на реалізацію мікрокоманд 1–4 потрібно всього лише один цикл роботи процесора. За цей час мікропроцесор повинен

пройти стани до 5-го включно, тобто крім виконання дій усередині мікропроцесора має бути переданий в регістр стану РГС код стану процесорів. Якщо він не викликає розгалуження в мікрокоманді, що визначає БМУПр за сигналами 6 від регістру РГС, то починає виконуватися наступна команда, що вже підготовлена в РГМК. Таким чином, наявність РГМК дає можливість отримувати таку мікрокоманду паралельно з роботою мікропроцесора МП, що подвоює швидкість роботи процесора через виключення послідовної роботи його операційної і керуючої частин.

Типова команда в ЕОМ має таку послідовність виконання окремих тактів у процесі інтерпретації: вибірка команди; дешифрування коду операції; вибірка базової адреси; формування виконавчої адреси; вибірка операнда з ОЗП; виконання операції над операндом і вмістом робочого регістра або регістра результату; засилання результату на зберігання в регістр результату або робочий регістр. Під час виконання такої команди необхідні три звернення до ОЗП.

Високої пропускну здатності мікропроцесора дозволяє досягти метод перекриття (потоківий або конвеєрний) шляхом паралельних дій над потоком команд в часі по окремих фазах їхнього виконання. Вище наведено послідовність шести тактів команди, що при потоковому виконанні скорочує здаваний час виконання команд до трьох тактів. При цьому досягається максимальна ефективність використання ресурсів ОЗП, оскільки звернення до нього здійснюється протягом кожного такту.

Для найпростішого перекриття процесу виконання двох команд необхідний доступ до інформаційних полів команди, що вимагає окремого регістра команд. Код команди заноситься в цей регістр з буферного регістра команд ОЗП, в який він вступив в попередньому такті вибірки команди з ОЗП. На час виконання мікропроцесором операції необхідно зберігати операнд наступної команди в буферному регістрі даних. Вибрана із ОЗП базова адреса поміщається у вихідний інформаційний регістр. Під час виконання даної

команди треба забезпечити одиничне прирощення вмісту лічильника команд. Оскільки арифметично-логічний пристрій зайнятий виконанням операцій, необхідно передбачити окремий суматор або інкрементний блок для одиничного збільшення коду адреси команди.

6.15 Області застосування мікропроцесорних обчислювальних засобів

Під час проектування мікро-ЕОМ необхідно забезпечувати: просте нарощування розрядності і продуктивності; можливість широкого розпаралелювання обчислювального процесу; ефективну обробку алгоритмів вирішення різних завдань; простоту технічної і математичної експлуатації.

Сама мікро-ЕОМ, будучи оснащеною різноманітними пристроями введення-виведення інформації, може застосовуватися як закінчений виріб. Однак часто до мікро-ЕОМ необхідно крім пристроїв введення-виведення інформації підключити сигнали від безлічі датчиків і виконавчих механізмів будь-якого складного об'єкта управління або технологічного процесу. У цьому випадку вже утворюється складна керуюча система, центром якої є мікро-ЕОМ.

У керуючих системах використовуються окремі мікро-ЕОМ, розширені мікро-ЕОМ (за рахунок нарощування кількості мікропроцесорів для збільшення розрядності) і системи мікро-ЕОМ, що утворюють обчислювальні мережі з параметрами, близькими до параметрів розвинених міні-ЕОМ.

Мікропроцесори та мікро-ЕОМ знаходять широке застосування в тестових і контрольно-вимірювальних системах; системах управління технологічними процесами; програмного управління верстатами; контролю станів ліній зв'язку; підсистемах первинної обробки інформації і керуючих системах промислового призначення; системах автоматизації наукового експерименту; підсистемах управління периферійним обладнанням обчислювальних систем і комплексів; спеціалізованих обчислювальних пристроях.

Дешеві мікропроцесори застосовують в годинниках, калькуляторах, кіно- і фотокамерах, радіоприймачах і телевізорах. Мікропроцесори ставляться в замки і дзвінки, домашні прилади і пристрої (система розумний дім).

Дорожчі мікропроцесори успішно конкурують з механічними і електромеханічними блоками управління "жорсткої", або "апаратної", логіки.

Як приклад, мікропроцесори та мікроконтролери встановлюються для регулювання середовища в домашніх акваріумах і великих водоймах; вони здійснюють контроль *pH* середовища, температури, щільності, вмісту кисню; керують освітленням, підігрівом, рівнем води, дозуванням корму і біологічних добавок, виробляють фільтрацію і аерацію тощо.

Візьмемо, наприклад, звичайний і широко поширений механічний інструмент – електричну дріль. Вбудований в неї мікропроцесор дозволяє враховувати опір свердління і автоматично змінювати частоту обертання залежно від твердості оброблюваного матеріалу. В ході використання дрилі для загвинчування гвинтів і гайок мікропроцесор вимикає живлення електромотора до закінчення операції, що завершується за рахунок інерції.

Обробка тексту становить розвинені операції редагування від виправлення слів і розстановки абзаців до вставки нового тексту і формування фраз з уже написаних словосполучень. Потім запам'ятований текст може бути автоматично багаторазово і безпомилково видрукований. Це дозволяє здійснити в такій системі функції пошуку документів за ознаками, сортування документів, ведення архіву тощо.

Бурхливо розвивається виробництво електронних ігор з використанням мікропроцесорів і мікроконтролерів. Воно породжує не тільки цікаві засоби розваги, а й дає можливість перевірити і розвинути прийоми логічних висновків, спритність і швидкість реакції. Ігри забезпечують виконання складних функцій внаслідок застосування логічно більш потужних, але доступних за вартістю мікропроцесорів.

Мікропроцесор може виконувати найважливіші функції в автомобілях усіх типів. Водій може викликати з мікро-ЕОМ на індикатор числові значення швидкості, рівня палива, середній і поточний витрата палива на одиницю пройденого шляху, час прибуття в заданий пункт при певних водієм умовах, температуру двигуна і т. ін. Ведуться дослідження із застосування мікропроцесорних засобів для управління двигуном (подача палива, запалювання, регулювання частоти обертання, ефективність і контроль відходів при згорянні палива); управління ходовою частиною (управління швидкістю і гальмівною системою, облік впливу навантажень і рельєфу доріг); управління безпекою руху (зниження вимог до водія і облік обстановки на дорозі); управління комфортом в кабіні (салоні); повністю роботизованих (автоматизованих) автомобілів.

Мікропроцесори ефективно вбудовуються в дисплеї, екранні пульти і термінали, де на них покладено функції редагування даних, управління, генерації символів і збереження і відтворення зображень.

Мікропроцесори та мікро-ЕОМ беруть на себе функції попередньої обробки інформації зовнішніх пристроїв, перетворення форматів даних, контролерів електромеханічних зовнішніх пристроїв. Мікропроцесори в апаратурі зв'язку дають можливість проводити контроль помилок, кодування – декодування інформації і управляти приймально-передатними пристроями. Застосування мікропроцесорів дозволяє у декілька разів скоротити необхідну ширину телевізійного і телефонного каналів, створити нове покоління обладнання зв'язку. Використання мікропроцесорів у контрольно-вимірювальних приладах і як контрольні засоби радіоелектронних систем дає можливість проводити калібрування, випробування і перевірку приладів; корекцію і температурну компенсацію; контроль і управління вимірювальними комплексами; перетворення і обробку, індикацію і уявлення даних; діагностику і локалізацію несправностей. Мікропроцесорні засоби вирішують складну технічну проблему розробки різних систем збору і обробки інформації, де

загальні функції зводяться до передачі безлічі сигналів в один центр для оцінки та прийняття рішення. Наприклад, у медицині для цілодобового контролю стану тяжкохворих необхідно періодично заміряти кров'яний тиск, частоту биття серця і дихання, параметри електрокардіограм тощо. Централізована система на основі великої або міні-ЕОМ для цих цілей виходить громіздкою і досить дорогою. Розподілена діагностична система на основі мікропроцесора має високу живучість, проста по організації і дозволяє отримати гарні економічні показники. Узагальнюючи розглянуті приклади використання мікропроцесорів, можна виділити *чотири основних напрямки в застосуванні мікропроцесорів і мікропроцесорних систем*: 1) вбудовані системи контролю та управління; 2) локальні системи накопичення та обробки інформації; 3) розподілені системи управління складними об'єктами; 4) розподілені високопродуктивні системи паралельних обчислень.

6.16 Вбудовані системи контролю та управління

Вбудовування, тобто постановка мікропроцесора в будь-яку, навіть найпростішу схему (пульт) управління, принципово змінює якість функціонування окремих інструментів, приладів, різноманітних пристроїв, окремих агрегатів технологічної лінії тощо. Вбудовування мікропроцесора дозволяє оптимізувати режими роботи керованих об'єктів або процесів та за рахунок цього отримувати прямий й непрямий техніко-економічний ефект. Прямий техніко-економічний ефект виражається в економії споживаної енергії, підвищення терміну служби і зниженні витрат свердел, фрез, нагрівальних елементів і т. ін. Непрямий техніко-економічний ефект пов'язаний зі зниженням вимог до обслуговуючого персоналу і підвищенням продуктивності.

Досвід показує, що в переважній більшості випадків вбудовування мікропроцесора тільки економія електроенергії забезпечує окупність мікропроцесорного управління за 1–1,5 роки.

Управління обладнанням на основі вбудованих систем контролю і управління створює реальні передумови здійснення повністю автоматизованих виробництв. Вбудовування мікропроцесора підвищує якість роботи і продуктивність обладнання, істотно знижує вимоги до персоналу, що працює на обладнанні. Цифрове управління окремими одиницями обладнання дозволяє легко збирати інформацію (або викликати його) з нижніх контурів на верхні рівні ієрархічної системи управління.

Керуючі вбудовані мікропроцесори призначені для вирішення локальних завдань управління об'єктами і можуть виконувати функції контролерів пристроїв, що підключаються до ЕОМ, більш високих контурів управління або бути центром керуючих систем нижніх контурів управління.

Мікропроцесори, вбудовані в устаткування, в більшості випадків не комплектуються зовнішніми пристроями і містять тільки спрощений спеціалізований пульт управління, а також ПЗП керуючих програм. Лише для деяких застосувань, що вимагають частої заміни керуючих програм, необхідний завантажувач, виконаний на основі найпростіших технічних засобів.

6.17 Локальні системи накопичення та обробки інформації

Зовнішні пристрої локальних обчислювальних систем можуть вбудовуватися в корпус мікро-ЕОМ. Їхній комплект містить пристрої, мінімально необхідні для обчислювальних робіт і обробки даних: клавіатуру; принтер; зовнішні пристрої, що запам'ятовують.

У комплект складніших мікро-ЕОМ, орієнтованих на рішення інженерних і наукових завдань, можуть входити різноманітні зовнішні пристрої, наприклад, пристрої введення-виведення, візуального відбиття, зовнішньої пам'яті, комплексування, пульти операторів загального призначення і т.ін.

Розподілені системи управління складними об'єктами. Альтернативою поширеним системам з центральним процесором стають розподілені мікропроцесорні керуючі системи. В цьому випадку мікропроцесори і пов'язані

з ними схеми обробки даних фізично розташовуються поблизу місць виникнення інформації, що дозволяє вести обробку інформації в місці її виникнення, наприклад, поблизу двигуна, керма управління, гальмівної системи тощо. Зв'язок таких локальних систем обробки з центральною системою обробки та накопичення даних і створює просторово розподілену систему управління.

У розподілених системах досягається значна економія в кількості і розподілі ліній зв'язку, підвищується живучість, істотно розвиваються можливості оптимізації режимів управління і функціонування.

6.18 Розподілені високопродуктивні системи паралельних обчислень

Мікропроцесори відкрили нові можливості вирішення складних обчислювальних задач, алгоритми обчислення яких допускають розпаралелювання, тобто одночасні (паралельні) обчислення на багатьох мікропроцесорах.

Системи паралельних обчислень на основі десятків, сотень, тисяч однакових або спеціалізованих на певні завдання мікропроцесорів при значно менших витратах дають таку ж продуктивність, як і обчислювальні системи на основі потужних процесорів конвеєрного типу. Мікропроцесори в розподіленій обчислювальній системі можуть бути однаковими і універсальними або спеціалізованими на певні функції. Створення мікропроцесорних систем з великою кількістю спеціалізованих за функціональним призначенням процесорів дозволяє проектувати потужні обчислювальні системи нового типу порівняно з традиційними розвинутими великими обчислювальними машинами.

Питання для самоконтролю

1. Логічна структура мікропроцесорної системи.
2. Логічна структура розвиненої мікропроцесорної системи.
3. Інтерфейс мікропроцесорів та інформаційні магістралі
4. Формат послідовних інформаційних сигналів.
5. Схеми і принцип роботи контролера послідовно-паралельного інтерфейсу.
6. Прийом-передача послідовних інформаційних сигналів.
7. Області застосування мікропроцесорних обчислювальних засобів.
8. Вбудовані системи контролю та управління.

7 ПРІНСТОНСЬКА І ГАРВАРДСЬКА АРХІТЕКТУРИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

У 30-х роках минулого сторіччя військове відомство США доручило Гарвардському і Прінстонському університетам розробити електромеханічну обчислювальну систему ОС для військово-морської артилерії. Результатом зусиль цих університетів стали дві концепції побудови обчислювальних систем, які визначили розвиток світової обчислювальної техніки майже на 100 років вперед. Ми знаємо їх як гарвардська і прінстонська (більш відома як фон-нейманівська) архітектури.

Їхна основна відмінність в тому, що архітектура фон Неймана використовувала єдину пам'ять (загальну шину даних), а гарвардська передбачала наявність декількох шин (в оригіналі дві: шина даних і шина команд).

Переваги машини фон Неймана оцінили відразу, оскільки в ній містилося значно менше провідників між арифметико-логічним пристроєм (АЛП) і областю пам'яті, і на довгі роки вона стала еталоном для створення обчислювальної системи ОС. Саме фон-нейманівська архітектура з подачі Джона Кока була прабатьком процесорів RISC (Reduced Instruction Set Computer – обчислення зі скороченим набором команд).

Час минав, і в 70-х роках минулого сторіччя з'явилися напівпровідники, в яких можна було створювати сотні мікроскопічних провідників. Проблема безлічі контактів була знята, і настала ера гарвардської архітектури. Дійсно, якщо процесор має кілька шин, він може одночасно виконати декілька дій. У цьому випадку за один такт гарвардський процесор може виконати кілька операцій, істотно випередивши за продуктивністю аналогічний фон-нейманівський процесор. Щоб це зрозуміти, достатньо подивитися на схеми двох архітектур (рис.7.1).

Появу процесорів на гарвардській архітектурі світове співтовариство сприйняло прохолодно, оскільки на початку 70-х років не було програмного забезпечення, здатного реалізувати його потенціал. Їх за очі називали процесорами «для бідних», оскільки вони не могли працювати на високих частотах.

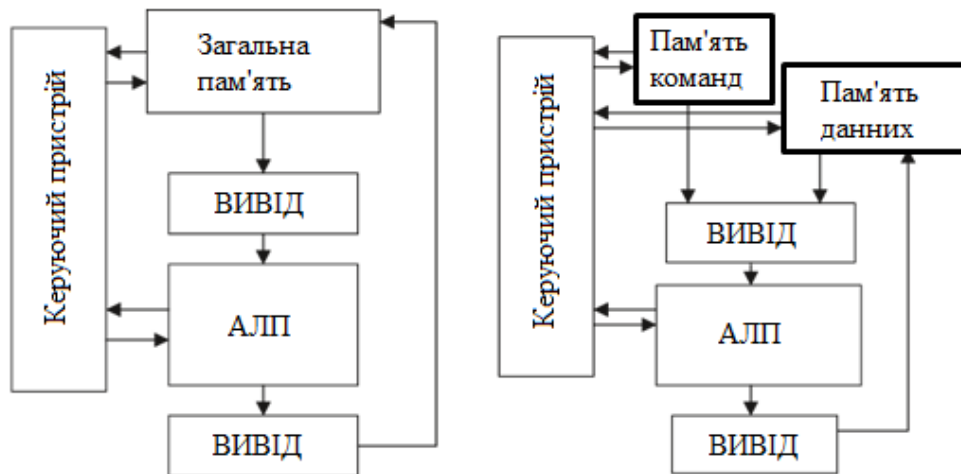


Рисунок 7.1 – Фон-нейманівська та гарвардська архітектури

Але все змінилося після появи персонального комп'ютера Apple I, в основі якого був восьмирозрядний процесор MOS 6502 на гарвардській архітектурі з операційною системою Apple DOS.

Простота ОС компенсувалася досить складним процесором, названим згодом CISC (Complex Instruction Set Computer – обчислення з комплексним набором команд), з окремою 16-розрядною адресною шиною і можливістю довільного маніпулювання регістрами. Монолітна розрахована на одного користувача ОС дозволила вичавити з нього небувало на той час продуктивність при вирішенні окремих завдань.

Через кілька років корпорація IBM кинулася наздоганяти Apple, практично повторивши її ідею. В основі створеного нею персонального комп'ютера (більш відомого нам як IBM-PC) були гарвардський процесор фірми Intel і ОС Microsoft DOS. Згодом такі комплекси отримали загальновідому аббревіатуру – Wintel.

Звичайно, що за швидкість CISC-процесора доводилося платити подвоєною/потроєною кількістю контактів, що не тільки перегрівало процесор, але і накладало обмеження на його розміри. У середньому на кожні 20% приросту продуктивності споживана потужність гарвардського процесора збільшувалася до 50%.

Виходом з цієї ситуації стала поява багатоядерних процесорів, в яких частота роботи кожного обчислювального ядра була знижена, але сумарна продуктивність перевищувала навіть показники розігнаного одноядерного. Для наочності на рис. 7.2 показаний приклад того, як змінюються продуктивність і енергоспоживання центрального процесора при зміні частот і кількості ядер.

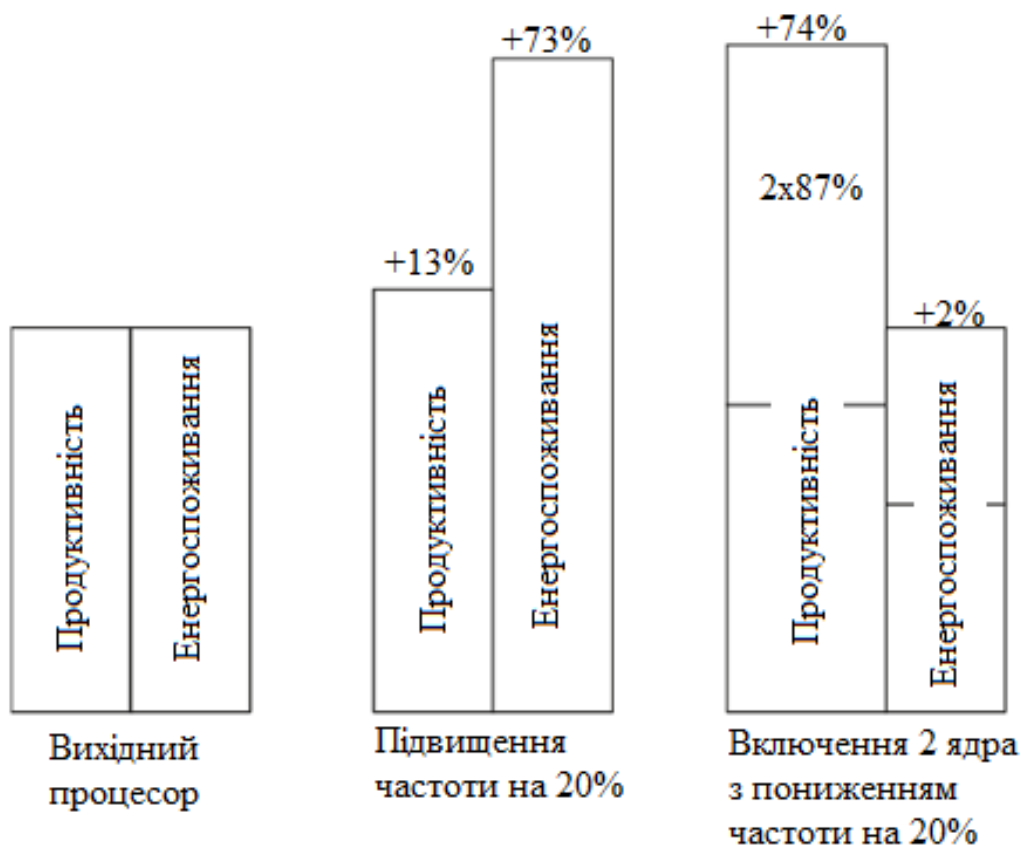


Рисунок 7.2 – Перевага багатоядерних систем

ARM. Масовий перехід на багатоядерні обчислювальні системи ознаменувався тим, що ера класичного програмування закінчилася. Багатопотокові обчислення зажадали зміни алгоритмів програмування, і

класичні, побудовані на блок-схемах, алгоритми практично перестали працювати. Утворився серйозний розрив між можливостями обчислювальної техніки і можливостями обчислювальної математики. *Закон Амдала* тільки посилив проблему, оскільки згідно з ним створити повністю розпаралелений обчислювальний алгоритм неможливо. Алгоритмів без певної частки послідовних операцій просто не існує. Практично це означає, що для кожного завдання є гранична кількість обчислювальних ядер, перевищення якого не призведе до збільшення швидкості обчислення. Наслідком закону Амдала є твердження, що за будь-якого типу обчислень одне з обчислювальних ядер процесора завжди завантажено більше за інших. Спираючись на ці висновки, можна було припустити, що будуть створені багатоядерні системи, що містять різні типи обчислювальних ядер. *Архітектура ARM* – Advanced RISC Machine (в оригіналі – Acorn RISC Machine), вдосконалена RISC-машина – була побудована на базі фон-нейманівської архітектури, але включала особливості процесорів CISC, що логічно, оскільки в його основі лежав MOS 6502. Зокрема, машина ARM передбачала надзвичайно просту реалізацію обчислювального ядра, керованого через контрольоване введення. Саме технологія, розроблена консорціумом ARM, дозволила скласти на одному кристалі декілька різних обчислювальних ядер, кожне з яких могло виконувати певні функції.

Таке складання отримало назву Soc (System on chip), оскільки до загальної шини даних підключалися не тільки обчислювальні ядра процесора, але і відеоадаптер, і контролер пам'яті.

Всілякі поєднання обчислювальних ядер в Soc дозволяли отримувати широкий спектр пристроїв, кожне з яких могло мати свої унікальні особливості. На базі Soc легко формувалися телефони, планшети, телевізори, плеєри, відеокамери тощо. Але, щоб реалізувати ці можливості, було потрібне спеціальне програмне середовище, що легко модифікується під те чи інше складання Soc.

Першим таким середовищем стала операційна система компанії Apple – iPhone OS (згодом – Apple iOS), побудована на базі ядра Darwin (урізаного ядра BSD). Невелике монолітне ядро, налаштоване під конкретну Soc, як і вразі з Apple DOS, дозволяло отримати максимальну віддачу від обладнання, а простота реалізації обчислювальних ядер забезпечувала істотну економію енергоспоживання.

А потім все заново повторилося, як 30 років тому. Корпорація Google (сучасна IBM) вирішила обіграти ідею Apple. Треба сказати, що на відміну від Apple, яка сама формувала обладнання, Google відразу замахнулася на широкий спектр можливих комбінацій Soc. І тут теж з'явилася своя «Microsoft» - Android inc, яка запропонувала операційну систему, що архітектурно повторює Apple iOS, але дозволяє працювати на декількох типах Soc (див. рис. 7.3).

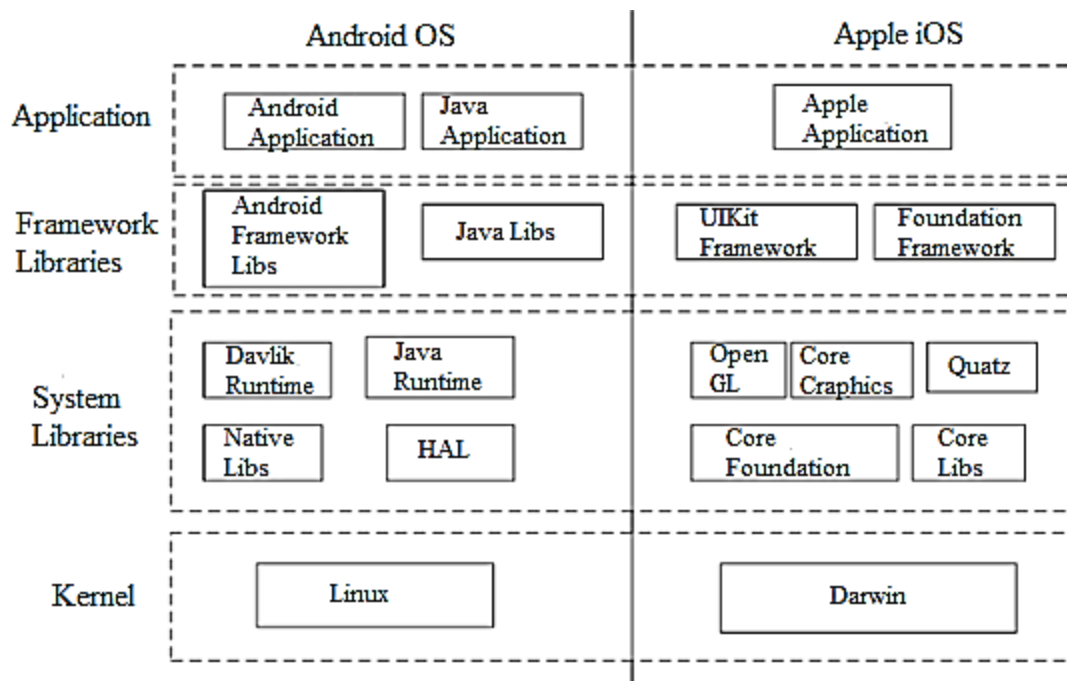


Рисунок 7.3 – Операційні системи Android і iOS

Кореневою відмінністю ОС Android OS від Apple iOS стало ядро, побудоване на базі урізаного модульного ядра Linux. Довантажувані на вимогу модулі дозволяють переносити Android OS на широкий спектр обладнання, не

перезбираючи його кожен раз під новий пристрій. Безумовно, при такій архітектурі Android має не тільки позитивні, але і негативні характеристики.

Операційна система Android OS повільніше Apple iOS при введенні-виведенні, потреба в оперативній пам'яті у неї більша, а також вона менш ефективно працює з Soc. Але, зробивши ставку на закон Мура, як свого часу це зробила корпорація IBM, Google виграла, оскільки технічні засоби фірм – ліцензіатів ARM розвиваються швидше аналогічних пристроїв Apple, а спектр можливих комбінацій Soc істотно ширше можливостей Apple.

Сьогодні мало у кого викликає сумнів, що зв'язка ARM і Android прийшла надовго, сформувавши новий напрям, умовно назване нами Armand (ARM + Android). Саме це поєднання ми зустрічали спочатку в побутових приладах, а потім у медицині.

Безумовно, ера Wintel не закінчилася і не закінчиться найближчим часом, оскільки це основний світовий обчислювальний інструмент. Вартість обчислень на базі Wintel найнижча в світі. І це не дивлячись на велику вартість програмних продуктів, що розробляються для цієї платформи.

Але також Armand має не менші перспективи. Ця платформа може стати основним інструментом в медицині. Останні збірки Soc, побудовані на поєднанні потужних і енергоекономічних обчислювальних ядер, дозволяють припускати появу пристроїв, що істотно полегшують життя хворих людей.

Питання для самоконтролю

1. Фон-нейманівська та гардвардська архітектури: відмінності та особливості.
2. Операційні системи Android і iOS: відмінності та особливості.

8 СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ

Система збору даних здійснює функцію перетворення первинних вихідних сигналів від одного або декількох вимірювальних перетворювачів в еквівалентні цифрові сигнали, придатні для подальшої обробки, відбиття інформації або використання в системах управління. Діапазон застосувань систем збору даних виключно широкий – починаючи з простого поточного контролю значень однієї аналогової змінної і закінчуючи контролем та управлінням сотнею параметрів в ядерних агрегатах. Відповідно існують як дуже дешеві системи збору даних прямого перетворення, так і складні багатоканальні системи, що забезпечують дуже високу точність і надійність.

8.1 Одноканальні системи

На рис. 8.1 показано структурну схему типової одноканальної системи збору даних. Сигнал, що надходить від вимірювального перетворювача, як правило, малий за амплітудою, до нього додано небажані шуми, і, крім того, може виникнути необхідність в узгодженні його параметрів (амплітуди) з цифровою частиною. Формування сигналу з оптимальними характеристиками для подальшої обробки здійснюється за допомогою підсилювачів, фільтрів і інших аналогових схем (все це можна назвати блоком підготовки). У дешевих системах збору даних іноді використовується пряме перетворення, коли сигнал з виходу схем формування (або погодження) безпосередньо подається на вхід аналого-цифрового перетворювача АЦП. Однак у більшості застосувань обов'язковим є наявність пристрою вибірки – зберігання, яке описується нижче.

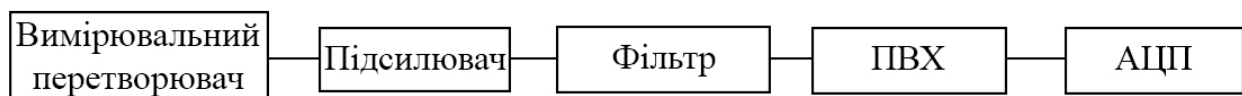


Рисунок 8.1 – Блок-схема одноканальної системи збору даних

8.1.1 Пристрій вибірки-зберігання

Вище вже зазначалося, що пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ) призначений для зменшення похибки у вихідному сигналі перетворювача, пов'язаної з невизначеністю значення вхідного сигналу протягом часу перетворення при дуже швидкій його зміні. ПВЗ потрібні також для багатоканальних систем збору даних, де вони забезпечують зберігання відліку для виконання перетворення по одному каналу, в той час як мультиплексор перемикається на інший канал. Вони іноді використовуються для фіксації імпульсних завад у вхідному сигналі або в тих випадках, коли потрібно виконати відліки значень двох або більшого числа сигналів точно в один і той самий момент часу (одночасна вибірка).

На рис. 8.2 показані спрощена принципова схема і форма сигналів для типового ПВЗ. Аналоговий ключ S_1 замикається в ході надходження команди «SAMPLE» (Вибірка). Конденсатор C починає заряджатися (або розряджатися) до рівня вхідного сигналу. Після певної часової затримки, званої "часом захоплення", напруга на конденсаторі досягає меж вузької області поблизу рівня вхідного сигналу, ширина якого визначається встановленою точністю наближення до цього рівня, і залишається всередині даної області. Команда «HOLD» (Зберігання) викликає розмикання ключа S_1 , але насправді ключ розмикається після короткого часового інтервалу, званого "апертурним часом затримки". Типове значення апертурного часу t_a – кілька десятків наносекунд. Величина t_a визначає максимально допустиму швидкість зміни вхідного сигналу, при якій ще реалізується повна точність перетворення. Однак після розмикання ключа має пройти деякий "час встановлення", перш ніж вихідний сигнал ПВЗ стабілізується, тобто прийде до сталого значення і буде готовий для перетворення. Однак і після стабілізації рівень цього сигналу насправді не залишається постійним, а повільно спадає з часом (витік заряду). Крім того, наявність паразитної ємності може призвести до появи на виході ПВЗ викидів

напруги, що становить собою ослаблений відгук схеми на будь-які великі зміни вхідного сигналу. Це явище називається *паразитним проходженням сигналу в режимі зберігання*.

Слід звернути особливу увагу на вибір типу і номіналу конденсатора, що запам'ятовує. При виборі конденсатора з малою ємністю зменшується час захоплення, але збільшується спад напруги в режимі зберігання. З іншого боку, конденсатор з великою ємністю більш точно зберігає напругу, але при цьому може бути неприйнятно великий час захоплення. В ході використання ПВЗ в АЦП час зберігання, як правило, не набагато перевищує час перетворення АЦП. Тому для заданого номіналу конденсатора ми можемо оцінити повний спад напруги за час одного перетворення. Номінал конденсатора вибирається так, щоб отримати найкращий час захоплення за умови, що спад напруги за час одного перетворення не перевищує величини максимального заряду-розряду МЗР.

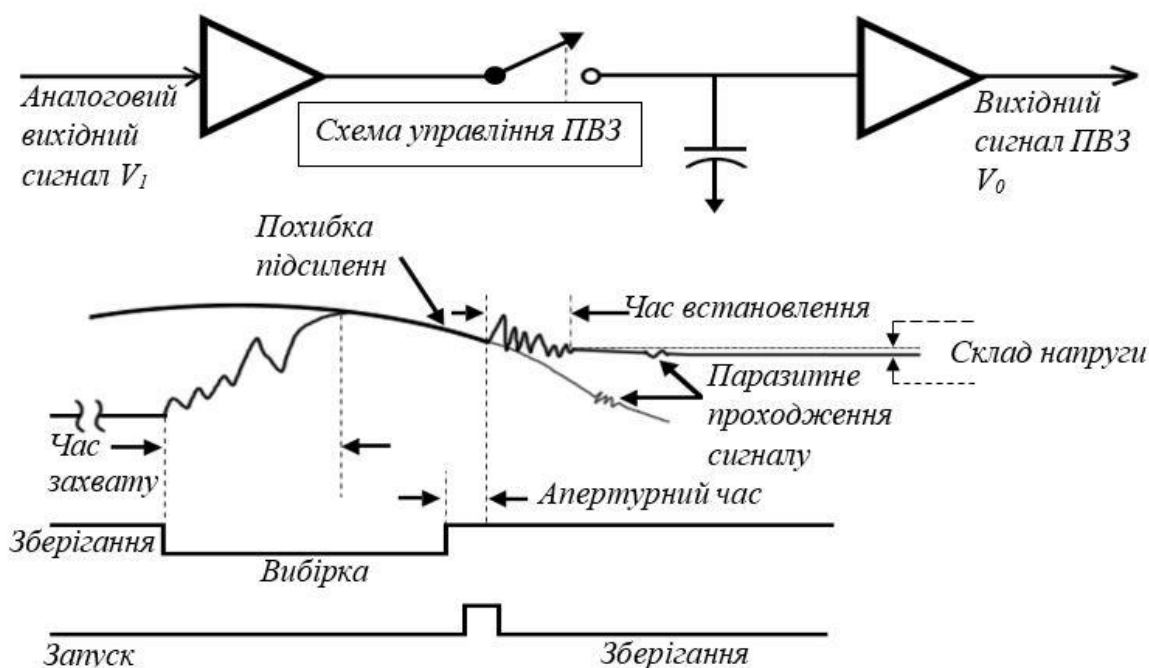


Рисунок 8.2 – Пояснення роботи ПВЗ: а) – спрощена принципова схема;
 б) – часова діаграма сигналів із зазначенням
 найважливіших характеристик ПВЗ

Тип обраного конденсатора також має велике значення, оскільки діелектричні втрати в запам'ятовуючому конденсаторі є одним з джерел похибок. Найкраще тут працюють конденсатори з діелектриком з поліпропілену, полістиролу та тефлону. Слюдяні і полікарбонатні конденсатори мають досить посередні характеристики. І зовсім не слід використовувати керамічні конденсатори, які характеризуються високою діелектричної абсорбцією.

Кілька фірм випускають монолітні пристрої вибірки – зберігання ПВЗ загального призначення з типовими значеннями часу захоплення 4 мкс з точністю 0,1% або 10...20 мкс з точністю 0,01%. Середні робочі характеристики з низькою вартістю роблять ці пристрої найбільш прийнятними для більшості застосувань. Якщо потрібні більш високі робочі характеристики, можна використовувати гібридні та модульні ПВЗ, що випускаються фірмами Datel-Intersil, Burr-Brown, Analog Devices тощо.

8.2 Багатоканальні системи

Існують два основні підходи до обробки більш ніж одного аналогового сигналу. Тривалий час найбільш популярним був спосіб аналогового мультиплексування всіх вхідних каналів з використанням одного АЦП для виконання перетворень. Однією з причин популярності цього способу була висока вартість АЦП. В альтернативному підході використовуються окремі АЦП для кожного каналу. Цей спосіб має деякі переваги, і він стає все більш привабливим для практичної реалізації в зв'язку зі зменшенням вартості АЦП.

Аналогове мультиплексування. На рис. 8.3 показано найбільш часто використовувану конфігурація системи збору даних з аналоговим мультиплексуванням каналів. За командою мультиплексор з'єднує зворотний канал з пристроєм вибірки-зберігання ПВЗ, який робить вибірку і потім зберігає її для перетворення в АЦП. Зауважимо, що ПВЗ дозволяє мультиплексору за необхідності переключитися на інший канал, в той час як АЦП ще може

конвертувати. Це означає, що час перемикання мультиплексора і його час встановлення не впливають на продуктивність системи. Однією з модифікацій цієї конфігурації є система одночасної вибірки. ПВЗ встановлюються на входах мультиплексора і запускаються за однією і тією самою командою «SAMPLE». Це дозволяє отримати відліки значень двох або більшого числа сигналів точно в один і той же момент часу, що часто потрібно для систем управління та обробки сигналів.

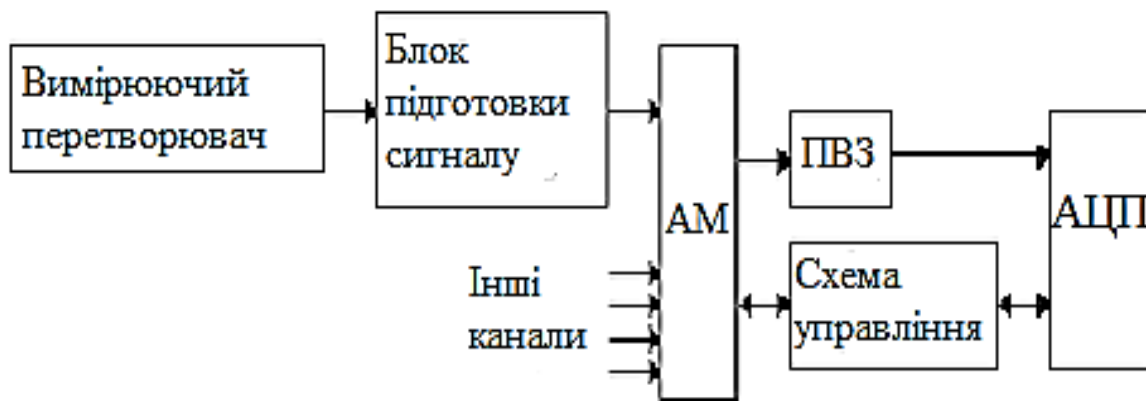


Рисунок 8.3 – Блок-схема багатоканальної системи збору даних з використанням аналогового мультиплексора і одного АЦП
(АМ – аналоговий мультиплексор)

В аналогових мультиплексорах найчастіше використовуються напівпровідникові ключі (на польових транзисторах з керованим рп-переходом і КМОН-транзисторах – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник). Матриця керованих ключів виготовляється у вигляді монолітної інтегральної схеми ІС, яка, як правило, містить і дешифратор, що дозволяє використовувати лише кілька керуючих ліній для вибору будь-якого сигнального каналу. Широке застосування отримали мультиплексори на 4, 8 і 16 каналів, що допускають роботу з заземленими або диференціальними вхідними сигналами. Мультиплексор має спочатку відключати поточний комутований вхід і тільки потім підключати наступний, щоб гарантувати відсутність короткого замикання двох вхідних ліній. Важливими робочими

характеристиками аналогового мультиплексора є опір його ключів у відкритому стані, струми витоку ключів у закритому стані, точність коефіцієнта передачі, перехресні завади і час встановлення. На опорі відкритого ключа вхідний сигнал створює деяке падіння напруги, що призводить до похибки коефіцієнта передачі. Цю похибку можна мінімізувати, навантажуючи мультиплексор схемою з великим вхідним опором. Зокрема, зменшення похибки коефіцієнта передачі сприяє високий вхідний опір підключається до виходу мультиплексора пристрою вибірки-зберігання ПВЗ. *Точність коефіцієнта передачі* – це виражена у відсотках похибка передачі вхідного сигналу на вихід мультиплексора. Перехресні завади виникають в результаті паразитного зв'язку між виходом мультиплексора і входом закритого ключа. *Час встановлення* – це час, необхідний для того, щоб значення вихідного сигналу мультиплексора відповідало деякому встановленому діапазону значень поблизу рівня вхідного сигналу, що підключається. Розробник повинен знати величину цього параметра, щоб запускати ПВЗ тільки після зазначеної стабілізації рівня вихідного сигналу мультиплексора.

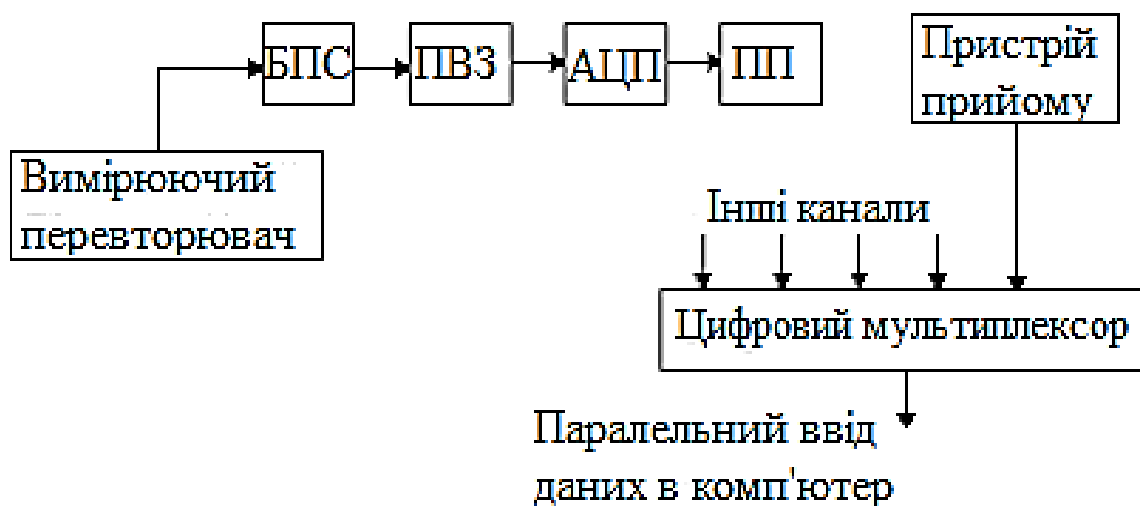


Рисунок 8.4 – Блок-схема багатоканальної системи збору даних з використанням окремих АЦП для кожного каналу і цифрового мультиплексора (БПС – блок підготовки сигналів, ПП – передатний пристрій)

Паралельне перетворення. При паралельному способі збору даних для кожного каналу використовується окремий АЦП (рис. 8.4). Переваги такого підходу виявляються в промислових системах збору даних, коли вимірювальні перетворювачі розподілені по великій площі і, як правило, працюють в умовах сильних зовнішніх завад. Установка АЦП поблизу вимірювальних перетворювачів і передача перетворених даних в цифровій формі запобігають проходженню аналогових сигналів через області дії перешкод. З таким підходом забезпечується також гальванічна розв'язка і виключається поява земляних контурів.

Наявність окремого АЦП для кожного каналу дозволяє реалізувати набагато більшу частоту дискретизації в розрахунку на канал.

8.3 Вибір АЦП і системи збору даних

8.3.1 *Серійно випускаються АЦП і системи збору даних*

Фірми, що випускають АЦП, пропонують пристрої з дуже широким діапазоном робочих параметрів. Використовуваний метод перетворення (послідовного наближення, двотактового інтегрування, паралельного перетворення) і технологія виготовлення схем (монолітна, гібридна, модульна) визначають найбільш істотні характеристики АЦП – швидкодія, дозвіл, вартість.

Найбільш широкий вибір АЦП послідовного наближення, використовуваних у більшості випадків застосування аналого-цифрового перетворення. Найдешевшими є монолітні АЦП. За останні кілька років зроблений величезний стрибок у поліпшенні їх робочих параметрів. Монолітні АЦП виготовляються з використанням КМОН і біполярної технології. КМОН АЦП характеризуються дуже малим енергоспоживанням і допускають реалізацію на самому кристалі аналогового мультиплексора, вхідного ПВЗ, дешифратора і тристабільного буфера. Однак у

КМОН технології виникають труднощі з формуванням прецизійного джерела опорного сигналу і прецизійного швидкодіючого компаратора.

Біполярна технологія забезпечує просту реалізацію цих функцій, але при відносно невисокому рівні інтеграції. Ці обмеження можна обійти під час використання схмотехніки на основі інжекційної інтегральної логіки. У цьому випадку вдається створити закінчений інтегральний АЦП з тактовим генератором, джерелом опорного сигналу і відповідними буферними схемами на одному кристалі.

Для побудови швидкодіючих перетворювачів з високою роздільною здатністю використовуються гібридні конструкції, що поєднують кілька монолітних компонентів в одному корпусі інтегральної схеми. Удосконалення конструкції цих окремих компонентів призвело до значного поліпшення робочих характеристик гібридних АЦП з одночасним зменшенням їх вартості. Тому все більше число гібридних АЦП використовується для заміни дискретних або модульних конструкцій в системах збору даних з високими робочими характеристиками.

Найвищі параметри мають АЦП модульної конструкції. Вони, однак, призначені тільки для вузькоспеціалізованих додатків.

8.3.2 Вибір АЦП

Щоб правильно вибрати АЦП для конкретного застосування, потрібно знати вимоги до його робочих параметрів – роздільної здатності, часу перетворення, допустимої похибки тощо. Ці вимоги визначаються проєктованими технічними характеристиками системи збору даних, що розробляється. Найбільш важливими є такі характеристики:

- *число аналогових каналів;*
- *продуктивність (враховується як продуктивність всієї системи, так і максимальної продуктивності для окремих каналів);*

- розташування вимірювальних перетворювачів (поблизу або у віддаленні від вихідного терміналу);
- точність перетворення;
- оточення, зокрема, важливо знати рівень електричних завад і діапазон зміни навколишньої температури;
- вартість системи.

Розробка системи зазвичай починається з вибору її архітектури. Потім з'ясовуються вимоги до робочих характеристик кожного компонента системи. Обговоримо це етап на прикладі АЦП.

Точність АЦП. Вимоги до точності перетворювача впливають з відповідної технічної характеристики розроблюваної системи збору даних з урахуванням похибок, що вносяться усіма іншими компонентами цієї системи. Поширена помилка – вибір АЦП з роздільною здатністю, що відповідає цій вимозі за точністю, оскільки фактична точність перетворювача гірше того значення, на яке вказує дозвіл, в силу наявності різних похибок перетворювача. Список вкладів основних похибок, що називається бюджетом похибок, допомагає розрахувати реальну точність перетворювача. Приклад складання бюджету похибок і розрахунку точності наведено нижче.

Розрахунок точності. Для розрахунку точності системи використовується список основних джерел похибок в системі, починаючи від її аналогового входу і закінчуючи цифровим виходом. Похибка коефіцієнта передачі аналогового мультиплексора і похибка, що виникає в результаті спаду напруги на виході пристрою вибірки - зберігання ПВЗ у режимі зберігання, дуже малі (менше 0,01%) і тому не вказані в бюджеті похибок (табл. 8.1).

Таблиця 8.1 – Бюджет похибок, %

Невизначеність напруги пристрою вибірки - зберігання ПВЗ	0,2
Похибка посилення пристрою вибірки - зберігання ПВЗ	0,01
Невизначеність квантування в АЦП	0,2
Похибки зсуву, посилення і нелінійність АЦП (3/4 МЗР в інтервалі температур 0 ... 70 ° С)	0,3
Похибка АЦП, пов'язана з дрейфом опорного сигналу (в інтервалі температур 0 ... 70 ° С)	0,1
Максимальна повна похибка (алгебраїчна сума)	0,81
Повна статистична похибка (середньоквадратична)	0,42

Таким чином, гарантується точність не гірше 1%. Фактична точність для гладких вхідних сигналів при кімнатній температурі, ймовірно, краще, ніж 0,5%.

Час перетворення. Необхідне від АЦП число перетворень, які виконуються за одну секунду, визначається проектною продуктивністю системи збору даних, числом каналів і обраною конфігурацією системи. Частота дискретизації по одному каналу дорівнює продуктивності АЦП тільки в тому випадку, коли для кожного каналу використовується окремий АЦП. Список усіх часових затримок, пов'язаних з одним перетворенням, називається *часовим бюджетом*. Продуктивність АЦП розраховується виходячи з цього часового бюджету. Приклад розрахунку продуктивності АЦП приведено нижче.

Розрахунок продуктивності. Продуктивність системи розраховується шляхом оцінки повного часу, що витрачається на одне перетворення. Список усіх важливих часових затримок, що називається *часовим бюджетом*, полегшує розрахунок продуктивності. У часовому бюджеті, поданому нижче, затримка, пов'язана з роботою аналогового мультиплексора, окремо не вказується, тому що це частина часу захоплення ПВЗ (табл. 8.2).

Таблиця 8.2 – Часовий бюджет

Час захоплення	6 мкс
Час встановлення виходу пристрою вибірки - зберігання ПБЗ	1 мкс
Час перетворення АЦП	110 мкс
Затримки, пов'язані з виконанням команд «IN / OUT»	40 мкс
Повний час одного перетворення	157 мкс
Максимальна продуктивність (відліків / сек)	6360

Тип АЦП. Для вибору типу АЦП зазвичай достатньо інформації про використовувану конфігурацію системи, необхідному вирішенні АЦП і часу перетворення. Наприклад, для забезпечення середньої або високої швидкодії слід вибрати АЦП послідовного наближення. Якщо одночасно потрібно також високий дозвіл, то доведеться, мабуть, застосувати АЦП, виконаний за гібридною технологією. З високою роздільною здатністю, але низькій швидкодії більш відповідним буде двотактовний інтегруючий АЦП. Двотактовному інтегруючому АЦП слід віддати перевагу і в тих випадках, коли потрібно забезпечити високу стійкість перед завадами або послабити наведення з частотою 60 Гц. Аналогічно в системах дистанційного збору даних найкраще використовувати АЦП на основі перетворення напруги в частоту.

Інші фактори. З'ясувавши, який тип АЦП нам потрібен, ми повинні потім вибрати серед АЦП даного типу пристрій, що задовольняє всім іншим вимогам. Наприклад, діапазон температур, в якому передбачається використовувати АЦП, визначає експлуатаційний клас обраного пристрою: чи має воно належати до класу комерційних пристроїв (діапазон робочих температур 0...70 °С), або призначається для промислових (-25...+85 °С), або військових (-55...+125 °С) застосувань. Потрібно перевірити також вхідний діапазон пристрою, його сумісність з біполярними вхідними сигналами, форму подання вихідних цифрових даних (послідовна або паралельна) і, якщо це необхідно, можливість реалізації інтерфейсу з мікропроцесорами.

8.3.3 Рекомендації щодо використання АЦП

Використання повного вхідного діапазону АЦП. Якщо вхідний сигнал змінюється тільки від 1 до 3 В у ході використання АЦП з вхідним діапазоном 0 ... 5 В, похибка перетворювача фактично подвоюється. Щоб запобігти цьому невинновданому погіршенню робочих характеристик перетворювача, використовуйте попереднє масштабування сигналу для забезпечення максимально можливої відповідності діапазону його зміни і вхідного діапазону АЦП.

Використання джерел опорного сигналу. Температурний і часовий дрейф опорного сигналу виявляються як похибка посилення і тому повинні утримуватися на мінімальному рівні.

Звертати увагу на швидкість зміни вхідного сигналу. Зміни вхідного сигналу протягом часу перетворення призводять до похибки посилення в АЦП послідовного наближення. Якщо характер зміни вхідного сигналу непередбачуваний, використовуйте ПВЗ. Моделі ПВЗ загального призначення досить дешеві. Використовуйте високоякісні поліпропіленові або полістирольні конденсатори як запам'ятовуючі конденсатори в ПВЗ.

Застосовуйте окремі загальні проводи для цифрових і аналогових схем. Цифрові сигнали створюють великі викиди струму на загальних проводах. Загальні проводи аналогових і цифрових компонентів схеми мають бути окремими і з'єднуватися тільки в одній спільній точці.

Питання для самоконтролю

1. Одноканальні системи збору даних.
2. Багатоканальні системи збору даних.
3. АЦП і системи збору даних. Особливості вибору та використання АЦП.

9 ПРИНЦИПИ ОБМІНУ ІНФОРМАЦІЄЮ

У цьому розділі обговорюються принципи обміну інформацією, переданої в послідовній формі, між комп'ютером типу IBM PC і такими зовнішніми пристроями, як датчики і контролери. Розглянемо лише ті важливі, з точки зору практики, особливості засобів сполучення, які необхідно знати, щоб ефективно використовувати інтерфейси в більшості додатків. Хоча паралельний інтерфейс для сполучення різних пристроїв простіше в реалізації і вимагає меншого обсягу апаратних засобів, послідовний інтерфейс більш універсальний.

9.1 Послідовний інтерфейс

Один з практичних прикладів, коли послідовний інтерфейс краще паралельного, – це передача даних на відносно віддалений периферійний пристрій. Для такої передачі в послідовному інтерфейсі потрібен лише один провід, тоді як у разі передачі даних у паралельній формі необхідно, як правило, вісім проводів. *Однопровідна передача має дві переваги.* Одна з них пов'язана з тим, що вартість кабелю (проводу) і необхідного набору лінійних формувачів та приймачів буде для неї істотно нижче, ніж вартість технічних засобів для еквівалентної багатопровідної конфігурації. Зважаючи на це, і особливо за необхідності передачі на великі відстані, послідовний інтерфейс, швидше за все, виявиться значно економічнішим паралельного. Крім того, послідовна передача даних дає можливість користуватися комерційними системами зв'язку, наприклад звичайною телефонною мережею або стандартними каналами передачі цифрової інформації.

У разі послідовного інтерфейсу всі розряди передаються по одному проводу. Можна контролювати будь-який розряд, знаючи його положення в послідовному потоці даних, а також його тривалість. Відповідно до сформованої практики першим у слові передається молодший розряд. Зверніть

увагу, що для забезпечення правильності передачі зазвичай потрібно виконати процедуру *квитування* – *встановлення зв'язку між передавачем і приймачем*. Це необхідно завжди, за винятком тих випадків, у яких швидкість передачі настільки мала, що практично неможлива ситуація, коли система не встигатиме сприймати дані. Число ліній, необхідних для передачі сигналів квитування, не залежить від типу передачі (послідовний або паралельний). Для передачі одного символу послідовному каналу потрібно більше часу, ніж паралельному. Передача n -розрядного символу по послідовному каналу займає щонайменше в n разів більше часу, ніж його передача через паралельний інтерфейс. Однак швидкість обміну даними, значно перевершує ті, які необхідні в більшості систем, де використовуються датчики і контролери, і досягається іншими методами. Послідовна передача часто застосовується і в засобах управління механічними пристроями, наприклад, принтерами, без будь-якого програшу в їхній швидкодії, оскільки час реакції такого пристрою істотно перевищує тривалість передачі керуючого слова при середній швидкості послідовного обміну двійковою інформацією.

9.1.1 *Квитування встановлення зв'язку*

Щоб встановити надійний зв'язок, пристрої, як правило, видають сигнали, за допомогою яких вони "інформують" один одного про те, чи є у них дані для передачі або чи готові вони до прийому даних. Якщо один пристрій направляє будь-який символ іншому пристрою, який в той момент зайнятий виконанням будь-якої іншої задачі, то переданий сигнал буде втрачено. *Квитування* – це процедура обміну сигналами для встановлення зв'язку, що здійснюється тільки за певних умов.

Щоб інформувати приймач про наявність даних для передачі, передавач направляє сигнал "запит передавача" (RTS). Цей сигнал або перериває поточну операцію, або приймач фіксує його надходження в процесі циклічного опитування. Виявивши такий сигнал, приймач закінчує поточну операцію і

відповідає передавачу сигналом "скидання передавача" (CTS), що вказує, що приймач готовий до прийому символів. Передавач не передає жодних додаткових даних до тих пір, доки на його вхід не надійде сигнал CTS.

Сигнали квіттування встановлення зв'язку мають різні назви в різних системах. У більш досконалих системах використовуються також додаткові сигнали квіттування. У системах з односторонньою передачею, наприклад, у системі збору інформації від датчиків, де комп'ютер тільки приймає інформацію, а датчик тільки передає, достатньо використовувати лише два сигнали квіттування – *вхідний і вихідний*.

Бувають ситуації, коли необхідний швидкий відгук на сигнал, що надійшов по лінії квіттування. Так, наприклад, датчик через короткий час після його переходу в активний стан буде, ймовірно, видавати достовірну інформацію. В даному випадку комп'ютер звертається до цього датчика, переводить його в активний стан, "вичікує" протягом короткого проміжку часу, а потім зчитує сигнали, що формуються датчиком.

9.1.2 Асинхронний метод передачі

У послідовній системі зв'язку розряди даних передаються одним потоком. Асинхронна послідовна система зв'язку дозволяє передавати за "один прийом" по одному символу (тобто один набір двійкових розрядів). У синхронних системах зв'язку передача багаторозрядних або багатосимвольних повідомлень здійснюється у вигляді одного безперервного потоку двійкових даних. У системах збору даних застосовується, як правило, асинхронний метод передачі.

Тривалість одного двійкового розряду визначається обраною швидкістю передачі, виходячи з робочих характеристик передатного і приймального пристроїв. Комп'ютер IBM PC може передавати і приймати дані зі стандартною швидкістю, що знаходиться в межах від 50 до 115000 бод (бод – одиниця виміру символьної швидкості, кількість змін інформаційного параметра носійного періодичного сигналу в секунду).

У кожному такті на передатну лінію через інтерфейс направляється один розряд i , як правило, інтерфейс програмується на передачу даних наборами по одному байту (тобто по одному символу). Передавач не синхронізовано з приймачем – приймач "не знає", коли передавач направлятиме йому дані. Отже, необхідні засоби, здатні сигналізувати про те, що на приймач готовий надійти новий байт. Це завдання вирішується шляхом передачі на вхід приймача додаткового розряду, який називається стартовим і надходить безпосередньо перед початком передачі байта даних. Передавач, перебуваючи в стані очікування, постійно передає рівень напруги, відповідний логічній одиниці (іноді він називається маркером). Перемикання з одиниці на нуль сигналізує приймачу, що незабаром почнеться передача потоку даних, що становлять символ.

Після виявлення переходу з 1 на 0 приймач зчитує сигнал з вхідних ліній через інтервал часу, рівний половині тривалості одного розряду – це гарантує, що прийнятий – логічний 0 буде дійсно нулем, а не завадою через перехідний процес. У цей момент часу, якщо лінія як і раніше знаходиться в стані логічного 0, приймач сприймає стартовий розряд як дійсний і приступає до послідовного зчитування вхідної лінії з однорозрядними інтервалами. Якщо ж стартовий розряд визнається недійсним, приймач ігнорує виявлений 0 і повертається в стан очікування до надходження наступного дійсного стартового розряду (0). Ймовірність виявлення помилкового стартового розряду або ігнорування дійсного стартового розряду дуже мала, оскільки дуже малоймовірно, що шумові сплески виникнуть в ті самі моменти часу, коли здійснюється зчитування вхідної лінії приймача.

При асинхронній передачі символ закінчується передачею одного або двох степових розрядів (логічних одиниць), причому для будь-якої швидкості передачі, що перевищує 40 бод, як правило, використовується один стоповий розряд. Передавач направляє на лінію послідовність одиниць у всіх випадках, коли немає готового до передачі символу.

Найважливішу роль при послідовній передачі даних відіграють тактові сигнали. При асинхронному методі передачі на них накладається єдине обмеження: частоти проходження тактових сигналів у передавачі і приймачі мають бути однаковими, причому допуск на їх розбіжність дуже мала. Значення частоти проходження тактових сигналів має бути рівним цілому кратному частоті проходження двійкових розрядів, які видаються передавачем (найчастіше використовується тактова частота, що в 16 разів перевищує частоту проходження розрядів).

Операції послідовної передачі реалізуються спеціалізованою ІС, що отримала назву "універсальний асинхронний прийомопередавач" (УАПП).

9.2 Декодування послідовних потоків двійкових розрядів і виявлення помилок

Програмування УАПП на режим обміну даними, відповідний встановленим вимогам, тобто завдання довжини (розрядності) символу, типу контролю парності, числа степових розрядів і швидкість передачі інформації, здійснюється шляхом запису відповідної комбінації двійкових розрядів у регістр команд. Після такого програмування УАПП здатний виділяти символи з потоку розрядів, які надійшли на лінію послідовного введення, і здійснити їх перетворення у восьмирозрядний паралельний формат, у якому передана інформація використовується в процесорі. УАПП може також виконувати перетворення восьмирозрядних символів, що надходять від мікропроцесора, у відповідний потік послідовних розрядів і потім передавати цей потік з введеними в нього стартовими і степовими розрядами, а також розрядами парності через лінію послідовного виведення.

Крім того, УАПП видає сигнали квіткування встановлення зв'язку. Він також здатний виявляти помилки в потоці даних, що приймаються, і посилати мікропроцесору повідомлення про помилки, що попередньо записуються в регістр

стану УАПП. Універсальний асинхронний приймач здатний виявляти *помилки трьох типів: помилки парності, помилки через перезapis, помилки кадрування переданих даних.*

9.2.1 Помилки парності

Розряд контролю за парністю є старшим розрядом символу. Користувач може передбачити контроль за парністю або за непарністю, або взагалі відмовитися від такого контролю. У разі вибору контролю за парністю, розряд контролю, що генерується на передатній стороні, встановлюється в 1 або скидається в 0 з таким розрахунком, щоб в символі (включаючи і сам розряд контролю) повне число розрядів, що містять логічну 1, було парне. Таким же чином встановлюється розряд контролю за непарністю – він вибирається так, щоб повне число одиниць у символі було непарним. Наприклад, при передачі семирозрядного знаку 0100110 (в коді ASCII) восьмий розряд, який є старшим, має встановлюватися в 1 при виборі контролю за парністю, і в 0 при контролі за непарністю. Якщо на приймальній стороні виявляється неправильне значення розряду парності, то в реєстрі стану УАПП встановлюється відмітка помилки за парністю.

9.2.2 Помилки через перезapis

УАПП декодує символ, що надійшов на його лінію послідовного введення, попередньо вилучивши з нього стартовий і степовий розряди, а потім поміщає цей символ у приймальний буфер. Після того як символ буде декодовано повністю, УАПП помістить його в буфер шини даних, звідки його зможе зчитати мікропроцесор. Потім УАПП встановлює відмітку готовності приймача, який вказує на наявність знаку. Опитування стану цієї відмітки може здійснюватися програмним шляхом. Можна також з'єднати вихідну лінію, на яку виводиться стан відмітки, безпосередньо з лінією переривання, з'єднаної зі схемою обробки переривань в процесорі.

Якщо мікропроцесор не зможе зчитати отриманий символ своєчасно, приймач занесе в буфер шини даних новий вміст відразу після декодування нового символу. В силу цього останній символ буде втрачено ще до зчитування його мікропроцесором. Це викличе установку відмітки помилки через перезапис в регістрі стану. Щоб виявити таку помилку, мікропроцесору необхідно переглянути вміст регістра стану до зчитування нового символу з буфера шини даних, оскільки сигнал зчитування вмісту цього буфера одночасно скидає відмітку помилки через перезапис.

9.2.3 Помилки кадрів переданих даних

Відмітка помилки кадрів в регістрі стану УАПП встановлюється в тих випадках, коли приймач, очікуючи надходження 1, тобто стопового розряду (або розрядів) в кінці символу, замість цього зчитує 0. Помилка кадрів виникає в результаті появи помилкових розрядів, обумовлених дією шумових викидів. Така ж ситуація може спостерігатися у тих випадках, коли потік двійкових розрядів зчитується при неправильно обраній швидкості передачі.

Набув поширення метод, за якого всі відмітки помилок ігноруються і за програмою обчислюється контрольна сума після надходження попередньо заданого числа символів (такий набір символів називається *блоком*). Контрольна сума додається в кінці блоку символів, типова довжина якого становить 128 або 256 байт, хоча сама контрольна сума, як правило, має довжину всього 1 байт. Для отримання контрольної суми користуються різними угодами. У деяких випадках як вона використовується сума всіх байтів у блоці, за винятком перенесення і переповнення, а іноді – додатковий код цієї суми. Аналогічний байт контролю помилок, службовець для так званого поздовжнього контролю надлишковим кодом, є просто зростаючим підсумком операцій "виключне АБО" над усіма переданими символами блоку. Очевидно, що для генерації контрольної суми прийнятого блоку символів у приймачі має використовуватися той самий

алгоритм, що і в передавачі, оскільки в іншому випадку буде виключена можливість порівняння переданої і отриманої контрольних сум.

Розбіжність переданої і обчисленої в приймачі контрольних сум говорить про помилку, що виникла при передачі блоку. Отже, необхідна його повторна передача. Залежно від структури системи приймач може посилати або не посилати передавачу сигнал підтвердження прийому в кінці кожного блоку або в кінці сеансу передачі. Якщо передавач буде поінформований про помилку у контрольній сумі, то він передаватиме повторно або повідомлення цілком, або той блок, в контрольній сумі якого була виявлена помилка.

Контроль циклічним надлишковим кодом (ЦНК) є методом, подібним до методу обчислення контрольної суми, відрізняючись від останнього лише тим, що циклічний надлишковий код має, як правило, довжину два байта і обчислюється на основі полінома дільника. Слово ЦНК є 16-розрядний залишок від ділення. При такому методі в кожен момент часу передається блок певного розміру. Будь-який переданий розряд так чи інакше впливає на ЦНК, завдяки чому такий підхід контролю помилок є найбільш ефективним серед подібних методів. Передавач направляє символ ЦНК після кожного блоку даних і потім очікує до тих пір, доки від приймача не прийде підтвердження цілісності прийнятих даних. У приймачі має застосовуватися той же спосіб генерації ЦНК для прийнятого блоку. ЦНК передавача порівнюється в приймачу з обчисленим ЦНК для прийнятого блоку. Якщо вони повністю не збігаються, приймач відкидає отриманий блок даних і передає деякий символ (зазвичай control-U) назад на передавач, вказуючи тим самим на помилку, і очікує до тих пір, доки передавач не відправить той самий блок даних повторно. Якщо система не виявляє розбіжності в циклічних надлишкових кодах передавача і приймача, то він "передбачає", що отримані дані є достовірними, і направляє символ підтвердження прийому на передавач. Потім він переходить в стан очікування до надходження від передавача

наступного блоку даних. і очікує до тих пір, доки передавач не відправить той самий блок даних повторно.

З огляду на особливості обраних методів і засобів передачі, а також характер вирішуваних завдань, розробник системи сам повинен вирішувати, яка схема контролю помилок найкраще відповідає вимогам проекрованої їм системи.

9.3 Особливості ліній передачі

У світлі викладеного слід розглянути особливості використовуваних ліній передачі. Тут будуть дані тільки основні відомості, необхідні для висвітлення проблем, які має враховувати проектувальник, щоб розробити досить ефективний канал зв'язку.

У міру того, як збільшується довжина ліній, що з'єднують передавач і приймач, і збільшуються частоти передачі (тобто швидкості передачі двійкової інформації), все більшої важливості набувають характеристики ліній передачі. У разі дуже довгих ліній, а іноді і щодо коротких ліній, але з високою швидкістю передачі з'єднувальний кабель більше не можна розглядати просто як провідник з дуже малим активним опором.

Нижче перераховані проблеми, що виникають в системі обміну даними, які безпосередньо пов'язані з особливостями лінії передачі:

1. Якщо навантаження не узгоджено з лінією, то в лінії виникають відбиття. Отже, якщо затримка на поширення велика порівняно з тривалістю одного двійкового розряду, то розряд може записуватися в буферний регістр до досягнення сталого режиму, в результаті чого його значення може бути ідентифіковано неправильно. Крім того, відбиття, обумовлене передачею одного розряду, може викликати помилки при детектуванні наступних розрядів. Найпростішим вирішенням цієї проблеми можна вважати вибір такого навантаження для лінії, яка матиме опір, що дорівнює її характеристичному імпедансу, щоб виключити відбиття.

2. Ослаблення сигналу при дуже великій довжині ліній може виявитися досить значним. У результаті можливе виникнення помилки при детектуванні логічного рівня. Дана проблема може бути вирішена шляхом установки повторювачів.

3. Підвищення частоти проходження переданих сигналів призводитиме до підвищення ступеня спотворення сигналу і появи перехресних завад, а, отже, до зростання частоти помилок. Характеристики ліній передачі і обраний протокол передачі (зокрема, угоди щодо представлення логічних 1 і 0) обмежують швидкість передачі.

4. Різниця в напрузі рівня "землі" на передатному і приймальному кінцях може викликати помилки при детектуванні логічного рівня сигналу на приймальному кінці. Ця проблема може бути вирішена шляхом заземлення загального проводу тільки в одній точці.

Екрановані лінії, наприклад, коаксіальні кабелі і екрановані скручені пари дротів, краще захищені від завад, ніж неекрановані. Деякими найбільш поширеними типами ліній передачі, що дозволяють поліпшити техніко-економічні показники систем передачі, є скручена пара дротів, екранована скручена пара дротів, коаксіальний і здвоєний коаксіальний кабелі. Коаксіальні кабелі, як правило, мають чисто резистивний характеристичний імпеданс від 50 до 100 Ом, а скручені пари – інші значення, зазвичай менші 200 Ом. Значення характеристичного імпедансу Z_0 кабелю вказує виробник. Якщо з яких-небудь причин ця інформація відсутня, то значення Z_0 можна приблизно обчислити, користуючись результатами вимірювань за допомогою вимірювача імпедансу.

9.4 Лінійні формувачі і приймачі

Ємність передатної лінії і струмоформуюча здатність джерела сигналів обмежують довжину лінії, за якої можлива надійна передача. Так, ТТЛ-формуваць (ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка) може надійно активізувати лінію, довжина якої не перевищує 70 см. Для розширення

діапазону передачі використовуються спеціалізовані інтегральні схеми, які називаються лінійними формувачами (служать для активізації лінії передачі), і лінійні приймачі (підключаються до лінії).

Щоб задовольнити вимоги різних класів стандартів, встановлених Асоціацією електронної промисловості США (EIA), випускаються різноманітні типи лінійних формувачів і приймачів. Так, наприклад, RS-232 є найбільш поширеним стандартом на інтерфейс для мікрокомп'ютерних систем, тоді як стандарти RS-422 і RS-423 застосовуються лише в тих випадках, коли інтерфейс типу RS-232 не може задовольнити вимоги системи. На основі трьох цих стандартів будуються однопровідна, симетрично-диференційний і несиметрично-диференційний інтерфейси.

9.4.1 Одноканальний (1-Wire) інтерфейс

До приладів, що працюють зі стандартним інтерфейсом RS-232C, належать формувач MC1488 і приймач MC1489 фірми Motorola, еквівалентні їм мікросхеми SN75188 і SN75189 фірми TI (Texas Instruments), а також аналогічні компоненти інших виробників. Швидкістю зростання сигналу на виході формувача можна управляти за допомогою зовнішнього конденсатора, який встановлюється на виході приладу. Для інтерфейсу RS-232C максимальна швидкість встановлення вихідного сигналу формувача складає 30 В/мкс. Це, як правило, досягається без використання зовнішнього конденсатора, оскільки сам кабель зазвичай має власну ємність, рівну щонайменше 330 пФ, що достатня для забезпечення стандартної швидкості зростання вихідного сигналу. У цьому стандартному інтерфейсі прийнята негативна логіка (коли логічному нулю відповідає позитивна напруга, а логічній одиниці – від'ємна).

Прилад MC1489 є одноканальним приймачем, у якого поріг спрацьовування вхідної логіки може встановлюватися зовнішнім сигналом. Його вхідний імпеданс значно перевищує середній характеристичний імпеданс лінії передачі. Отже, можна поліпшити характеристики системи, навантаживши лінію передачі її характеристичним імпедансом. Це має значення тільки в тих

випадках, коли часовий інтервал між послідовно переданими розрядами малий порівняно із затримкою розповсюдження сигналу в лінії (тобто вважають випадки високої швидкості передачі даних і довгої передатної лінії). Щоб забезпечити узгодження з лінією, вхід приймача просто шунтується шляхом замикання на землю, для чого використовується резистор, опір якого дорівнює характеристичному імпедансу лінії.

9.4.2 Симетричний диференціальний інтерфейс

Стандарт RS-422 характеризується найбільшим запасом завадостійкості, можливістю роботи з найдовшими лініями передачі і максимальною швидкістю передачі серед усіх розглянутих нами стандартів. До мікросхем, які придатні для реалізації цього стандарту, належать формувач MC3486 і приймач MC3487 фірми Motorola, які можна порівняти з ними формувач 9636 і приймач 9637 фірми TI (Texas Instruments), а також аналогічні компоненти інших виробників.

Симетричний диференціальний формувач має два виходи. Один з виходів є буферизований еквівалент входу формувача, тоді як інший є його доповненням. Пара скручених дротів з'єднує два цих виходи з двома входами приймача (диференційний вхід). Оскільки обидва переданих сигнали однаковою мірою піддаються впливу синфазних завад, останні усуваються завдяки використанню диференціального входу в приймачі.

Цей інтерфейс функціонує ефективно в присутності синфазних завад з амплітудою до ± 3 В, які наводяться в лінії передачі (загальний рівень напруги не може перевищувати меж, які визначаються рівнем насичення транзисторного підсилювача). Допускаються довжина лінії, що дорівнює приблизно 1300м, і швидкість передачі даних до 10 Мбод.

Як і в разі одноканального (1-Wire) інтерфейсу, впливають відбиття, що виникають в лінії передачі. Виходи формувача мають різні полярності, оскільки вони взаємно доповнюють один одного. Отже, відбиття, що виникають на двох кінцях лінії, мають різні полярності і їх не можна розглядати як синфазні завади. Такі відбиття впливають на диференціальні входи приймача. З цієї

причини, щоб мати можливість передавати дані з високою швидкістю і працювати з лініями передачі великої довжини, необхідно домогтися виключення відбиття на приймаючому кінці.

9.4.3 Несиметричний диференційний інтерфейс

Єдина відмінність несиметричного диференціального інтерфейсу від симетричного в тому, що у першого інтерфейсу зворотний провід заземлення є загальним для декількох сигнальних кіл. Несиметричні диференціальні інтерфейси використовуються для побудови систем, що відповідають вимогам стандарту RS-423. Інтерфейс RS-422 відповідає і вимогам стандарту RS-423, однак зворотної відповідності не передбачено. Несиметричний диференційний інтерфейс допускає довжину ліній передачі до 1300 м і швидкість передачі даних до 100 кбод. Ті ж інтегральні схеми приймача і передавача, які використовуються для реалізації інтерфейсу RS-422, можуть застосовуватися і для побудови несиметричного диференціального інтерфейсу.

У телетайпу старих конструкцій для послідовного обміну даними замість рівнів напруги використовувалися імпульси струму. Всі пристрої, які обговорювалися вище, мали відношення до інтерфейсів, які працюють з рівнями напруги. Струмові формувачі в мікрокомп'ютерних системах зараз, як правило, не застосовуються.

9.5 Збір даних у ході використання послідовного інтерфейсу

До технічних засобів загального призначення, які можна з'єднувати один з одним за допомогою послідовного інтерфейсу, належать пристрої збору даних і управління. Такі пристрої дозволяють перетворювати аналогові сигнали під керуванням персонального комп'ютера. Головна перевага цього підходу в тому, що для його реалізації не потрібно вводити в комп'ютер будь-які додаткові плати. Всі з'єднання є зовнішніми і здійснюються через асинхронний зв'язковий

адаптер. Цим забезпечується додаткова розв'язка між комп'ютером і установкою для збору даних – порівняно з системою збору даних з шинним з'єднанням. Основним недоліком такого підходу можна вважати ту обставину, що досяжна тут швидкість передачі обмежується необхідністю передавати всі дані по послідовному каналу.

На рис. 9.1 показаний приклад, як за допомогою кабелю інтерфейсу RS-232 можна з'єднати кілька подібних пристроїв збору інформації. В даному прикладі вузол "Головний ПК" управляє доступом до пристроїв збору в заданий момент часу, використовуючи власну адресу цього пристрою для перекладу його в активний стан. Оскільки доступ до послідовного інтерфейсу здійснюється в режимі колективного користування, тільки один пристрій може взаємодіяти з головним ПК у конкретний момент часу. Пристрій, розташований ближче всіх до головного ПК, отримує повідомлення і потім ретранслює його на наступний пристрій через послідовний інтерфейс. У типовому випадку комп'ютер вибирає той або інший пристрій і видає команди на виконання таких операцій, як:

- завдання частоти відліків при дискретизації даних;
- завдання числа вибірок даних, що підлягають перетворенню;
- початок перетворення.

Після того як пристрій виконає це завдання, йому буде видана з комп'ютера команда на передачу дискретизованих даних головному ПК, який здійснює необхідну обробку отриманих даних, заносить їх у пам'ять і відображає на екрані дисплея.

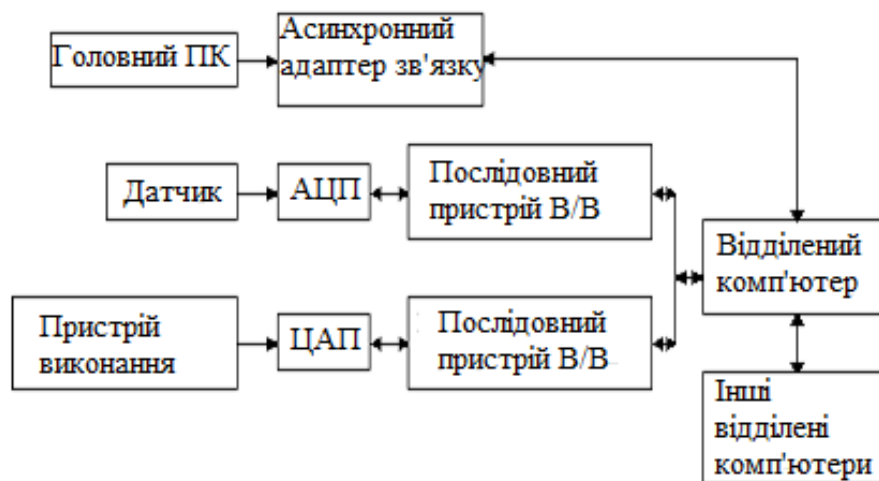


Рисунок 9.1 – Схема комп'ютерного управління дистанційними датчиками, підключеними до комп'ютера через послідовний інтерфейс

Як приклад такого підходу можна навести контроль температури на різних стадіях виробничого процесу. Кожний віддалений пристрій може виконувати дискретизацію вимірюваних значень температури в місці свого розташування і за запитом направляти отримані результати знову на ПК.

9.5.1 Волоконно-оптичні лінії передачі (зв'язку)

За останні роки значного поширення набули волоконно-оптичні лінії передачі. В умовах дії електричних шумів вони функціонують краще, ніж звичайні провідні лінії. Крім того, вони, як правило, мають більш широку смугу частот, ніж провідні лінії, тобто забезпечують більш високі швидкості передачі даних або об'єднання більшої кількості каналів передачі в одному кабелі.

Оптична лінія передачі функціонує так само, як розглянутий вище інтерфейс. Як формувач сигналів, які передаються по волоконно-оптичному кабелю, використовуються інфрачервоні світлодіоди, а як лінійні приймачі – інфрачервоні детектори. Волоконно-оптичні формувачі і приймачі, сумісні з ТТЛ-сигналами, є у відкритій продажі.

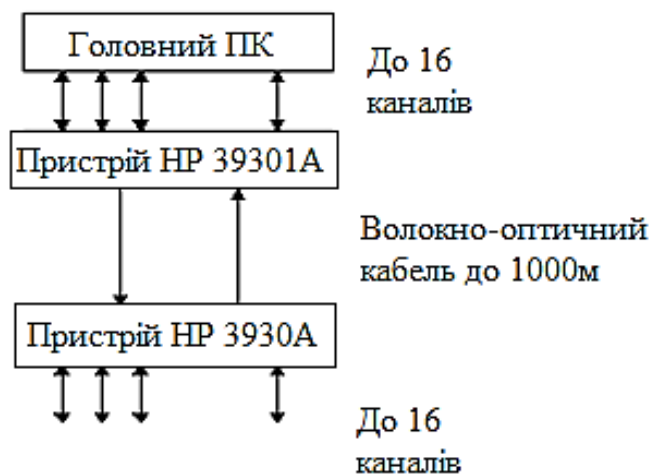


Рисунок 9.2 – Взаємодія з допомогою мультиплексора HP 39301A з убудованим перетворювачем сигналів RS-232 в сигнали, що передаються по оптичному кабелю

Основні труднощі застосування волоконно-оптичних кабелів у тому, що їх легко можна пошкодити. Фірма Hewlett-Packard випускає набори мініатюрних компонентів для волоконно-оптичних ліній, що містять формувачі, приймачі, кабель, з'єднувачі і керівництво з їхнього використання. Вона також пропонує комплект приладдя і інструментів для монтажу і перевірки таких ліній. Показана на рис. 8.2 схема з приладом HP 3930A є 16-канальним мультиплексором з убудованим перетворювачем сигналів RS-232 в сигнали, що передаються по волоконно-оптичному кабелю. Він дозволяє збільшити до 1000м довжину 16 незалежних 19,2-кбод дуплексних (тобто розрахованих на одночасні передачу і прийом) каналів, реалізованих у вигляді одного оптичного кабелю. Крім того, таке технічне рішення забезпечує захист системи передачі від впливу джерел електричних завад, наприклад, ударів блискавок, і виключає небезпеку виникнення завад від електричних розрядів, що відбуваються в нестійкій атмосфері. В системі передбачені засоби локалізації несправностей, і вона відрізняється невисоким рівнем витрат на установку, що пояснюється малою масою волоконно-оптичного кабелю.

9.6 Інтерфейсні модулі введення-виведення даних

Простий і ефективний спосіб побудови системи, що відповідає перерахованим вище вимогам до ІВС – реалізація вводу аналогових сигналів у ПК за допомогою спеціалізованих інтерфейсних плат (їх ще називають *платами збору даних* (ПЗД)), які підключаються до рознімів розширення системної плати комп'ютера і розміщуються всередині корпусу ПК. Подібні пристрої пропонують компанії L-CARD, НТК "Інструментальні системи" і зарубіжні фірми. При виборі варіанта ПЗД часто потрібно забезпечити повний набір функціональних модулів, необхідних для інтегрованої системи введення-виведення даних: АЦП, ЦАП, лічильники-таймери реального часу, цифрові порти введення-виведення, контролер прямого доступу до пам'яті (ПДП). Канал ПДП при обміні даними між ПЗД і ПК необхідний для забезпечення необхідного частотного діапазону вводяться в ПК сигналів без втрат у відліках, оскільки основні обмеження обумовлені граничною швидкістю передачі даних по системній шині ПК. Під час введення сигналів в режимі ПДП швидкість обміну даними між ПЗД і ПК становить 200–400 Кбайт/с (залежно від швидкодії комп'ютера), що при двобайтових відліках забезпечує смугу частот 100–200 кГц на один канал.

9.6.1 Типова структура модуля збору даних

Спрощена блок-схема модуля збору даних наведена на рис. 9.3. Основним вузлом модуля є АЦП на базі регістра послідовного наближення 155ІР17 і ЦАП 1108ПА1А.

Буферна пам'ять є масивом з двох блоків ємністю 16384 12-розрядних слів і призначена для забезпечення обміну даними з комп'ютером без втрати відліків з максимальною швидкістю (реалізована схема почергового зчитування даних з буферів).

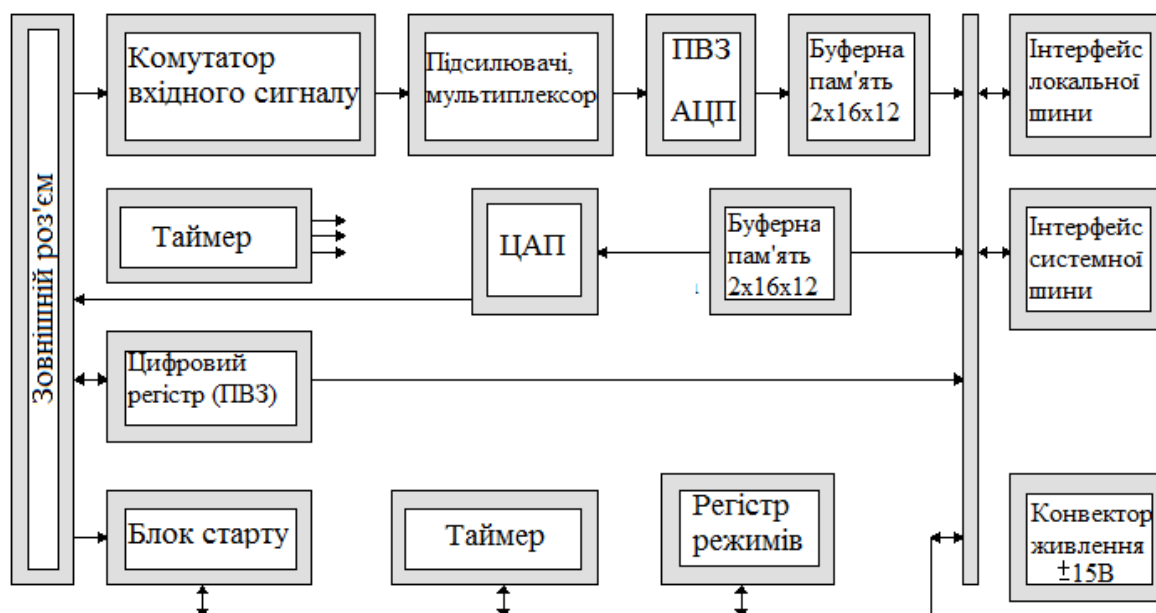


Рисунок 9.3 – Спрощена блок-схема модуля ADC12/200

ЦАП виконаний на базі мікросхеми 1108ПА1А і має буферну пам'ять.

Цифровий регістр становить 16-розрядний цифровий порт виводу загального призначення з трьома станами виходу і призначений для управління зовнішніми пристроями.

Блок старту призначений для визначення (шляхом програмування) початку введення даних.

Таймер синхронізується від кварцового генератора і задає часову діаграму введення і виведення даних.

Регістр режимів управляє режимами роботи блоків модуля.

Інтерфейси системної і локальної шин забезпечують обмін з комп'ютером і з додатковими модулями на базі цифрових процесорів сигналів.

Конвертор живлення забезпечує прецизійним живленням $\pm 15V$ аналогові кола модуля.

9.6.2 Проходження сигналів під час введення даних

Аналогові сигнали надходять із зовнішнього розніму на комутатор. Вхідні мультиплексори зводять 16 вхідних сигналів у два шляхом почергової комутації

каналів попарно (2, 4, 6, 8) залежно від режиму введення або не перемикаються взагалі, включаючи тільки задану пару каналів. Далі два мультимплексованих сигнали надходять на відповідний інструментальний підсилювач коефіцієнтом посилення $G = 1, 2, 4, 8$, що перемикається. До виходів інструментальних підсилювачів підключений диференційний підсилювач, що обчислює різницю між напругою на виходах. Далі за схемою включені мультимплексори 2×1 , які залежно від встановленого режиму роботи вибирають або виходи інструментальних підсилювачів, або вихід диференціального підсилювача. Отримані таким чином сигнали надходять на два пристрої вибірки-зберігання (ПВЗ), які фіксують відліки сигналів в моменти часу, що задаються таймером. При цьому можна задавати програмований *міжканальний зсув* за часом.

Залежно від режиму роботи модуль забезпечує перетворення як симетричних сигналів, так і несиметричних (одиначні сигнали із загальною "землею"). В обох випадках це біполярні сигнали. При несиметричному включенні каналів подальше зведення двох каналів в один виробляє мультимплексор 2×1 , включений безпосередньо перед ПВЗ.

Блок старту визначає початковий момент введення даних з точністю до одного періоду таймера. За допомогою регістра режимів можна вибрати один із таких способів старту:

- від зовнішнього цифрового сигналу;
- від компаратора, який би порівнював аналоговий сигнал з спеціального 17-го входу з пороговою напругою, що задається програмно за допомогою спеціального восьмирозрядного ЦАП (при такому способі запуск введення буде розпочато при перетині сигналом заданого порогу від низу до верху або зверху вниз); в цьому випадку робота модуля нагадує роботу осцилографа з очікуючого розгорткою і зовнішнім запуском;
- програмно за командою користувача.

Цифрові дані після АЦП надходять у блок буферної пам'яті. Буферна пам'ять організована у вигляді двох блоків ємністю в 16 12-розрядних відліків, які

працюють змінно. На початку процесу введення дані з АЦП накопичуються в одному з блоків буферної пам'яті. Після заповнення блоку пристрій видає запит на контролер прямого доступу до пам'яті ПДП, а АЦП перемикається на інший блок буферної пам'яті, надаючи процесору деякий час для реакції на запит ПДП. Водночас відліки накопичуються в другому буферному блоці. Так забезпечується розв'язка асинхронних процесів введення даних при передачі їх у комп'ютер.

Для більш повної оптимізації процесу введення даних на максимальній швидкості використовується чергування передачі даних по двох каналах контролер прямого доступу до пам'яті ПДП. Це зроблено для того, щоб збільшити ліміт часу процесора на переініціалізацію контролера доступу до пам'яті ПДП під час введення великих масивів даних (більше 128 Кбайт).

Процес виведення даних через ЦАП також здійснюється з використанням прямого доступу до пам'яті, але при цьому задіяний тільки один канал ПДП.

Особливістю модуля ADC12 є застосування двох пристроїв вибірки-зберігання ПВЗ з можливістю завдання різного часового зсуву між вибірками сигналів. У ході програмування модуля задається два часових параметри: період вибірок T і зсуву між ними dT . *Період T* є час між послідовними спрацьовуваннями пристрою вибірки-зберігання ПВЗ1 (або ПВЗ2), і може приймати значення в діапазоні від 12 до 65535 мкс. Таким чином за період T в недиференціальному режимі виконується два цикли перетворення. Мінімальний термін визначається часом вибірки (ПВЗ), рівним 1 мкс, і часом аналого-цифрового перетворення, що становить приблизно 5 мкс. У результаті з урахуванням дискретності таймера обробка кожного відліку вимагає 6 мкс.

Під час введення даних одночасно по декількох каналах для забезпечення синфазності відліків застосовується зовнішній блок плати збору даних ПВЗ. Управління зовнішнім ПВЗ здійснюється за допомогою спеціального цифрового регістра, який управляється відповідним драйвером введення.

Модуль ADC12A / 200 має два інтерфейси для обміну з комп'ютером. Один з них є інтерфейсом в стандарті IBM PC/AT (шина ISA) і призначений для

управління платою і обміну даними під час її роботи безпосередньо з ПК. Другий інтерфейс (локальна шина) призначений для управління платою і обміну даними під час роботи модуля в комплексі з високопродуктивними модулями цифрової обробки сигналів на базі процесора TMS320C30. Застосування таких модулів дозволяє вирішувати завдання поточної обробки даних (спектральний аналіз, фільтрація) в реальному масштабі часу.

По відношенню до комп'ютера ПЗД є зовнішній пристрій, адресується через порти введення-виведення і займає адресний простір I / O від «Base» до «Base + 15», де параметр «Base» задається перемикачами на платі рівним 240h, 250h і т.ін.

Зазначимо, що передача даних у ПК за допомогою модуля ADC12A / 200 може здійснюватися тільки через контролер прямого доступу до пам'яті ПДП.

9.7 Введення-виведення даних в персональний комп'ютер

Алгоритм управління та програмні засоби введення даних розробляються з урахуванням максимально можливої автоматизації. Процес збору даних (вибір необхідних каналів з 16 можливих, встановлення частоти дискретизації аналогових сигналів, коефіцієнтів підсилення, виконання аналого-цифрового перетворення, пересилання цифрових відліків в оперативну пам'ять комп'ютера, запис результатів на магнітний диск) реалізується апаратно-програмними засобами, якими управляє користувач. Частотний діапазон вимірювальних сигналів становить десятки кілогерц, тому для виключення втрат при введенні даних у комп'ютер використовується режим прямого доступу до пам'яті.

9.7.1 *Налаштування параметрів плати збору даних і драйвери введення даних в комп'ютер*

Призначення параметрів і режимів апаратури збору даних, введення даних у ПК і виведення через ЦАП здійснюються за допомогою програм-драйверів, роботу яких ініціює *керуюча програма по командах користувача*, що

вводиться в середовищі функціональних меню. Для забезпечення введення-виведення даних зазвичай розробляються такі програмні модулі:

- драйвер введення даних в основну пам'ять комп'ютера для режиму;
- поточного перегляду;
- драйвер введення даних з АЦП на твердий диск;
- програма запису ділянки сигналу з пам'яті на твердий диск;
- драйвер виводу даних з пам'яті і файла через ЦАП;
- програма сортування даних у ході запису на твердий диск (перетворення "кадрового" формату проходження даних плати збору даних ПЗД до формату записи по каналах програмного комплексу);
- програма зчитування-розпакування стислих даних з диска в пам'ять ПК.

Продуктивність системи в цілому визначається багатьма факторами, але наявність "вузьких" місць в процесі введення даних визначає швидкодію системи. Одним з важливих чинників є ефективність драйвера введення даних. На драйвер введення даних покладається вся низькорівнева робота з управління платою. Завдання драйверів, які забезпечують введення даних у ПК:

- програмування режиму роботи плати;
- введення даних у пам'ять в блоковому режимі;
- введення даних з прямим записом на твердий диск у реальному масштабі часу;
- упаковка даних;
- сортування даних.

Драйвер виведення даних здійснює зворотну задачу.

В обох випадках дані мають бути введені або виведені в реальному масштабі часу без втрати відліків між передачею послідовних блоків даних.

Алгоритм роботи драйверів введення і виведення даних можна розділити на дві частини: *апаратне програмування плати збору даних ПЗД і контролера прямого доступу до пам'яті ПДП і більш високорівневий блок первинної обробки даних і їх упаковки*. Підпрограми обробки і упаковки даних

реалізуються мовою C++. Програмування ПЗД і контролера ПДП відбувається під час передачі даних і критично з точки зору швидкості виконання. У зв'язку з цим реалізація низькорівневого інтерфейсу (або найбільш критичних до часових затримок підпрограм) часто виконується мовою асемблера.

Драйвер введення даних працює так: після виклику драйвера з призначеної для користувача програми, спочатку обробляються вхідні параметри, потім проводиться скидання самої плати і каналів ПДП. Далі програмується мікросхема таймера I8253, наявна на платі, встановлюються швидкість введення і часові співвідношення введення між каналами. Після цього програмується режим роботи плати (посилення, число каналів, спосіб старту і т.ін.). Після установки попередніх параметрів програмується канал 5 контролера ПДП, і драйвер запускає плату на старт. Потім відбувається перевірка кількості введених даних. Якщо всі дані вже введені, то драйвер очікує кінця введення даних і записує їх на диск з подальшим виходом з програми, інакше відбувається програмування каналу 6 мікросхеми ПДП. Якщо всі дані вже введені, відбувається очікування кінця введення по каналу 6 та запис введеного блоку на диск з подальшим виходом з програми. Інакше програмується канал 5 ПДП, і після очікування кінця введення по каналу 6 відбувається програмний старт і запис введеного масиву на диск. Таким чином, передача даних здійснюється по черзі по двох каналах ПДП. Причому, коли по одному з каналів йде передача даних, інший канал переініціалізується і проводиться запис введеного блоку на диск.

Для коректного вибору параметрів і режимів користувачеві необхідно надати довідкову інформацію про поточні ресурси оперативної і дискової пам'яті, а також допустимі розміри буфера обміну для вибраної кількості каналів і числа відліків у реалізації. Налаштування ПЗД здійснюється шляхом попереднього запису параметрів через відповідні порти введення-виведення в блок зберігання параметрів настройки. Параметри роботи ПЗД задаються

записом керуючого слова в регістр режиму. Залежно від значень відповідних біт керуючого слова можуть бути визначені такі параметри роботи ПЗД:

- вибір активного пристрою: АЦП або/і ЦАП;
- призначення способу запуску АЦП (режим очікування за заданим граничним значенням сигналу, старт по ТТЛ сигналу, програмний старт);
- дозвіл установки диференціального режиму роботи вхідних каналів;
- дозвіл передачі даних по локальній шині;
- активізація цифрового порту;
- вибір числа активних каналів;
- встановлення коефіцієнта посилення інструментальних підсилювачів.

Залежно від режиму збору даних задається число каналів у "кадрі" і затримка між каналами або номер каналу (збір з селекцією каналів). Частота дискретизації задається шляхом переключу таймера в режим програмованого дільника з визначенням необхідного коефіцієнта ділення. Програмування таймера також здійснюється шляхом запису керуючих слів до відповідних портів введення-виведення.

Програмування зовнішнього ПВЗ, що підключається до плати, зводиться до запису в цифровий регістр модуля певного коду відповідно до кількості підключаються каналів.

Питання для самоконтролю

1. Послідовний інтерфейс. Принцип роботи та переваги.
2. Визначення поняття квітування.
3. Декодування послідовних потоків двійкових розрядів і виявлення помилок.
4. Особливості ліній передачі
5. Лінійні формувачі і приймачі: де і навіщо використовуються? Переваги та недоліки таких приймачів.
6. Послідовний інтерфейс.
7. Введення-виведення даних в персональний комп'ютер.

10 ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Комп'ютерні системи реального часу знаходять застосування в різних областях науки і техніки: експериментальні наукові дослідження, вимірювальна техніка, автоматизовані системи управління, медицина, ядерна енергетика, військова техніка тощо.

Формальне визначення систем реального часу можна дати у такому вигляді: *система реального часу – це система типу збудження – відгук (причина – наслідок), в якій час реакції на збудження (відгук або наслідок) або обмежена виникненням будь-якого іншого порушення, або проходить паралельно з новим збудженням.* Часто під обчислювальною системою реального часу розуміють апаратно-програмний комплекс, що дозволяє сформувати певні сигнали або параметри в темпі часу, відповідному зміни даних на вході.

Системи реального часу сильно прив'язані до навколишніх подій. Будь-яка дія або бездіяльність такої системи не залишається без наслідків. Досить складним є організація дій системи на паралельні запити, тому особлива увага в роботі приділяється синхронізації процесів. Для програм реального часу особливо важливою проблемою стає розподіл ресурсів і їх керованість.

Створення програмного забезпечення для інформаційної системи ІС реального часу досить складне завдання. Аналіз результатів роботи в жорстких часових обмеженнях і умовах паралелізму значно важче, ніж у послідовних системах. У разі виявлення помилки в роботі ІС реального часу досить складно буває виявити причину помилки. Операції, що виконуються в реальному часі і в режимі багатозадачності, відіграють важливу роль в будь-якій системі збору інформації та управління, але *основною завадою до їх реалізації є недосконалість операційної системи комп'ютера (особливо персонального).* Необхідність режиму реального часу пояснюється тим, що *потрібно миттєво розпізнавати процеси і реагувати на них.* Немає ніякого сенсу реєструвати

збудження процесу і аналізувати їх після події. Крім того, система повинна мати здатність виконувати одночасно кілька завдань. Наприклад, може виникнути аварійна ситуація, що вимагає регулювання виконавчого пристрою і отримання звітних даних, що описують подію.

Після завершення збору даних може виникнути необхідність вивести їх в графічній або табличній формі, виконати перетворення або розрахунки, отримати друковані документи або записати дані на диск. Багатозадачність в реальному часі дозволяє операторам, технікам і інженерам приймати рішення під час роботи системи, ґрунтуючись на значущій інформації. Крім того, вона дозволяє аналізувати дані ретроспективно як для того, щоб повернутися до події, яка сталася дуже швидко, так і для того, щоб провести статистичний аналіз і порівняння на більш високому рівні, не перериваючи процес збору даних.

Автоматизоване управління процесами може бути прямим або диспетчерським. *Пряме управління*: інформаційно-вимірювальна система ІВС має засоби прямого управління, і регулюючі дії формуються на основі оцінки параметрів процесів, їх порівняння з встановленими або розрахунковими значеннями. ІВС здійснює регулювання, які залежать від встановлених меж або є результатом виконання певного алгоритму. Приклад – система автоматичної підтримки клімату, охорони та сигналізації в приміщенні. У кожному приміщенні встановлені датчики і прилади підтримки клімату та охорони. Комп'ютер опитує датчики, порівнює свідчення з встановленими межами, перевіряє права доступу і формує керуючі сигнали, відповідні інтерфейсу приладів підтримки клімату та охорони.

Диспетчерське управління: комп'ютер ІВС не виконує прямих дій з вимірювання параметрів процесів і управління виконавчими пристроями. Комп'ютер служить лише диспетчером для автономних контролерів, з'єднаних цифровою магістраллю. Комп'ютер завантажує значення аварійних меж, контрольні інтервали, константи і профілі виконання регулювань – інформацію, необхідну контролерам для здійснення регулювань і вимірювань. Після цього

контролери працюють автономно. У наведеному вище прикладі комп'ютер лише формує профілі управління і контрольні інтервали з відображенням стану датчиків.

ІС реального часу необхідні як для прямого, так і для диспетчерського управління.

Одна з найбільш серйозних проблем у процесі створення систем реального часу – продуктивність системи. Необхідні не тільки швидкі алгоритми обробки даних, а й організація істинної синхронізації різних частин системи. Немає необхідності в швидких алгоритмах обробки, якщо користувач ІВС чекатиме поновлення даних. Частини програм, які працюють в однопроцесорній системі, можуть виявитися неефективними або просто не працювати в багатопроцесорній системі. *Системи реального часу дуже вимогливі до ресурсів комп'ютера, тому все частіше в ІВС реального часу використовується кілька процесорів.*

Ще одна проблема, що виникає в процесі створення систем – *доступ до проміжних результатів* (наприклад, оцінка та відображення на екрані параметрів реєстрованих сигналів). Саме по собі отримання їх може виявитися складним завданням, а робити це в обмежених часових рамках з можливістю їх відображення і збереження не завжди вдається.

Трудомісткість побудови систем реального часу багато в чому пов'язана з жорсткою прив'язкою до конкретних процесорів. Незалежність від апаратури може бути реалізована на рівні операційної системи і (або) за рахунок перекодування програм. Якщо програма дозволяє користувачеві розподіляти завдання по процесорах (визначати, який блок програми виконується тим чи іншим процесором) і визначати часові інтервали (співвідношення робота/очікування для певного процесора), то користувач може скорегувати розподіл програмних модулів між процесорами. Розробка таких систем безпосередньо пов'язана з новим напрямком – *паралельні обчислення з*

використанням об'єктно-орієнтованого підходу і становить великий інтерес для розвитку ІВС реального часу.

Використання мов високого рівня в процесі створення систем реального часу дозволяє полегшити створення програмного забезпечення ПЗ і підвищити його надійність. Сьогодні для забезпечення синхронізації у ході використання декількох процесорів в основному використовуються низькорівневі методи, засновані на перериваннях і повідомленнях (статичний розподіл завдань). Все частіше в ІВС реального часу стали застосовуватися програмні засоби, що дозволяють організувати потоки (або нитки), які краще підходять для систем реального часу і реалізуються на рівні операційної системи (динамічний розподіл завдань між процесорами). Сенс їхній в тому, що після ініціалізації якоїсь частини програми як потоку, ми дозволяємо операційній системі виконувати її на вільному, в даний момент, процесорі.

На рис. 10.1 та рис. 10.2 наведено два спрощених варіанти організації обробки в системі реального часу.

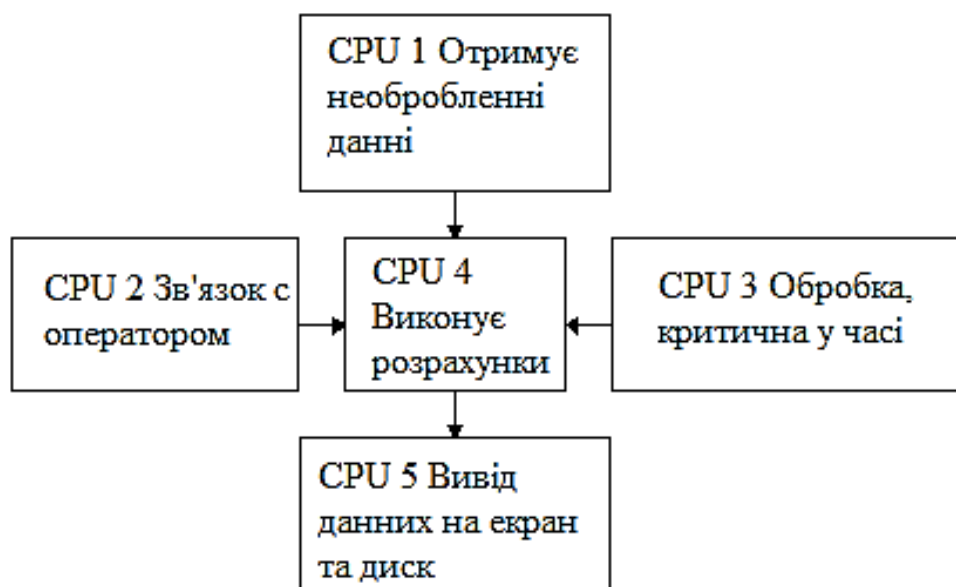


Рисунок 10.1 – Схема багатозадачності, реалізована апаратними засобами (з'єднання декількох мікропроцесорів)

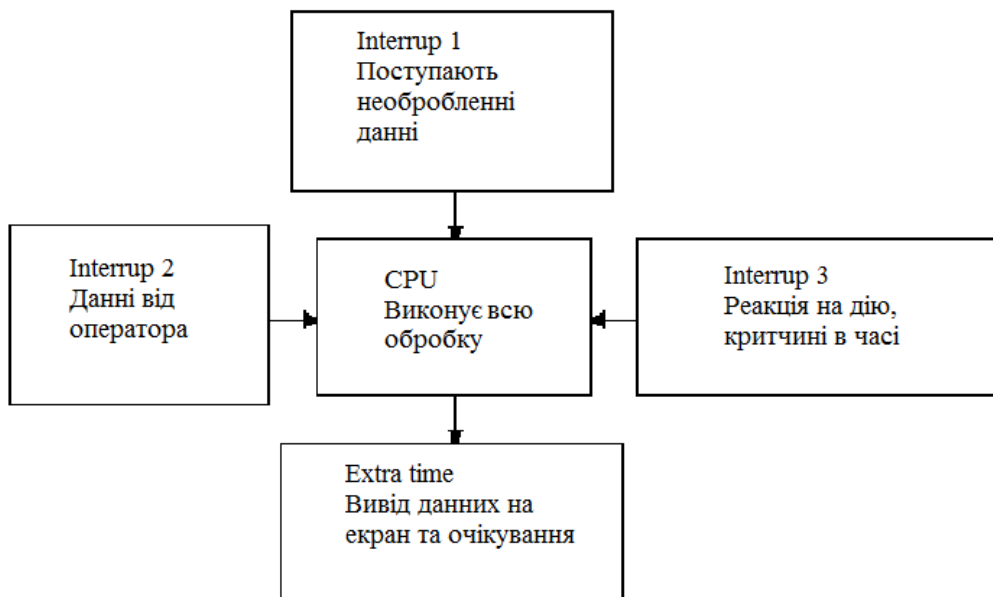


Рисунок 10.2 – Багатозадачність, реалізована програмними засобами

10.1 Багатопроцесорні архітектури

Ще кілька років тому багатопроцесорні системи були екзотикою, якою могли насолодитися тільки в дослідницьких лабораторіях. З появою комп'ютера Cray X-MP наявність декількох процесорів стало обов'язковим атрибутом усіх суперкомп'ютерів. Але збільшення обсягів обчислень, зростаюча складність прикладних задач і здешевлення апаратних засобів призвели до появи багатопроцесорних систем. Спочатку багатопроцесорними стали сервери, потім робочі станції і обчислювальні комплекси ОК.

Процесори можуть бути об'єднані в систему різними способами відповідно до конкретної архітектури паралельної обробки. Існують також різні методи програмування для таких систем.

Розрізняють такі типи паралельних архітектур:

Множинні потоки команд, один потік даних (МКОД) – кілька процесорів одночасно виконують різні команди над одним потоком даних; типовий приклад такої архітектури – конвеєрні системи.

Один потік команд, множинні потоки даних (ОКМД) – кілька процесорів одночасно виконують одну і ту ж команду над різними потоками даних; прикладом такої архітектури є матричні процесори.

Множинні потоки команд, множинні потоки даних (МКМД) – кожен процесор може виконувати різні потоки команд над різними даними. Ця архітектура вважається найбільш перспективною.

Найчастіше використовується (особливо в серверах локальних обчислювальних мереж – ЛОМ) архітектура *МКМД – множинні потоки команд, множинні потоки даних*. В рамках цієї архітектури є два класи систем: *із симетричною багатопроцесорною обробкою – СБО (SMP – symmetrical multi processing)* і *асиметричною багатопроцесорною обробкою – АБО (AMP – asymmetrical multi processing)*.

СБО (SMP). Всі процесори функціонально ідентичні, кожен може обмінюватися даними з усіма іншими через загальну оперативну пам'ять; симетричні пам'ять (всі процесори використовують загальний простір ОЗП і можуть виконувати єдину копію операційної системи) і підсистема вводу-виводу (всі процесори мають доступ до одних і тих пристроїв введення-виведення, і будь-який процесор може отримати переривання від будь-якого джерела); робота всіх прикладних програм не залежить від числа процесорів в ОК. Важко забезпечити паралельну роботу процесорів, тому що використовується динамічний паралелізм, який забезпечується на рівні операційної системи.

АБО (AMP). Кожен процесор має свою власну пам'ять і зовнішні пристрої; використовується статичний паралелізм – процеси розподіляються між процесорами до початку їхнього виконання (на етапі компіляції прикладних програм); взаємодія між процесорами здійснюється через механізм передачі повідомлень. Недолік – неможливо оперативно перепризначувати завдання процесорам, оскільки це вимагає внесення змін у програмний код, важко масштабувати, і модернізація – складне завдання. Перевага – більше можливостей для створення спеціалізованих продуктивних алгоритмів з використанням

особливостей спеціальних обчислювачів (обробка зображень, векторні процесори), легше програмувати паралельні процеси з невеликою кількістю процесорів (але важко забезпечити ефективну взаємодію без "простоювання" процесорів). Може функціонувати кілька копій ОС і кілька копій прикладних програм, що дозволяє, працюючи з одним набором даних, вирішувати одночасно різні завдання. Більше підходить для безпріоритетних ОС, коли не відбувається перерозподілу процесів в ході виконання. Розподіл завдань між спеціалізованими процесорами забезпечує асиметричній моделі суттєву перевагу в продуктивності.

10.2 Багатопроцесорні архітектури та промислові системи

У сфері комп'ютерної техніки малих форм (ПК) рішень, що забезпечують багатопроцесорну роботу, зовсім небагато. Популярна і знайома СБО від Intel (в оригіналі SMP – Symmetrical Multi Processing). SMP сьогодні – невід'ємна приналежність сервера і не тільки. SMP часто застосовується в науці, промисловості, бізнесі, де програмне забезпечення спеціально розробляється для багатопотокового виконання. Водночас, більшість споживчих товарів, таких як текстові редактори і комп'ютерні ігри написані так, що вони не можуть отримати багато користі від SMP систем. У разі ігор це часто пов'язано з тим, що оптимізація програми під SMP системи призведе до втрати продуктивності під час роботи на однопроцесорних системах, які займають більшу частину ринку. В силу природи різних методів програмування, для максимальної продуктивності будуть потрібні окремі проекти для підтримки одного процесора і SMP систем. І все ж програми, запущені на SMP системах, отримують приріст продуктивності навіть тоді, якщо вони були написані для однопроцесорних систем. Це пов'язано з тим, що апаратні переривання зазвичай припиняють виконання програми для їхньої обробки ядром, можуть оброблятися на вільному процесорі. Ефект у більшості додатків проявляється не стільки в прирості продуктивності, скільки у відчутті, що програма

виконується більш плавно. У деяких додатках, зокрема програмних компіляторах і деяких проектах розподілених обчислень, підвищення продуктивності буде майже прямо пропорційно числу додаткових процесорів.

Другий шлях – кластеризація. Він пов'язаний з операційним середовищем не менше ніж SMP. Мабуть першим кроком до створення кластерів можна вважати широко поширені в пору розквіту міні-комп'ютерів системи «гарячого» резерву. Одна або дві такі системи, що входять в мережу з кількох серверів, не виконують ніякої корисної роботи, але готові почати функціонувати, як тільки вийде з ладу будь-яка з основних систем. Таким чином, сервери дублюють один одного на випадок відмови або поломки одного з них. Але в ході об'єднання комп'ютерів бажано, щоб вони не просто дублювали один одного, а й виконували іншу корисну роботу, розподіляючи навантаження між собою. Для цього в багатьох випадках як не можна краще підходять кластери.

Спочатку кластери використовувалися для потужних обчислень і підтримки розподілених баз даних, особливо таких, для яких потрібна підвищена надійність. Надалі їх стали застосовувати для сервісу Web. Однак зниження цін на кластери призвело до того, що подібні рішення все активніше використовують і для інших потреб. Кластерні технології нарешті стали доступні рядовим організаціям – зокрема, завдяки використанню в кластерах початкового рівня недорогих серверів Intel, стандартних засобів комунікації і поширених ОС. У ряді випадків привабливість кластера багато в чому визначається можливістю побудувати унікальну архітектуру, що володіє достатньою продуктивністю, стійкістю до відмов апаратури і ПО. Така система до того ж має легко масштабуватися і модернізуватися універсальними засобами, на основі стандартних компонентів і за помірну ціну (незрівнянно меншу, ніж ціна унікального стійкого до відмов комп'ютера або системи з масовим паралелізмом).

Технологію SMP прийнято відносити до "сильнопов'язаних" мультипроцесорних архітектур, а кластери відповідно – до "слабкозв'язаних". З точки зору споживчих якостей та стійкості до відмов, відмінність очевидна: грубий електричний дефект одного процесора багатопроцесорного складання SMP виводить з ладу все складання, а якщо відмовив і вузол кластера, то ця відмова не перешкоджає подальшому функціонуванню всього кластера. Живучість кластерів, безперечно, поза конкуренцією, і тільки виключна складність та висока ціна мають вплив на вибір системи для вирішення поставлених задач.

10.2.1 Індустріальні застосування

Відомі такі конструктиви обчислювальних машин: індустріальні ПК і робочі станції; мініатюрні ПК (міні-ПК) для установки в панелі управління; панельні ПК у конструктиві "відкрита рама"; одноплатні ПК для промислового застосування.

Області застосування: Вбудовані системи, торгові автомати, засоби зв'язку, медичне обладнання, банківські системи, автоматизована система управління технологічним процесом (АСУ ТП), системи охорони, пульти управління атракціонів, бортові системи на транспорті, лабораторні системи автоматичного управління та контролю, вимірювальні системи, переносні діагностичні комплекси.

У будь-якому виконанні (за винятком одноплатних ПК) індустріальні машини побудовані в основному на пасивних інтерфейсних з'єднувачах і активних процесорних картах. Цим практично і вичерпується загальна конструктивна відмінність промислових машин від офісних ПК. Тому на рівні робочих станцій (потужних керуючих і диспетчерських комп'ютерів) немає завад для використання тих самих мультипроцесорних рішень, які згадувалися вище.

Висока надійність, відмовостійкість, готовність, саморезервування і самовідновлення в більшості промислових додатків є сувора і усвідомлена необхідність. Існує багато апаратних рішень для обчислювальних систем (мереж), проте найнадійніше з них – *використання універсальної платформи*.

Питання для самоконтролю

1. Визначення системи реального часу.
2. Схеми організації обробки даних в системі реального часу.
3. Багатопроцесорні архітектури.

11 ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ

11.1 Призначення і типи

Інформаційно-вимірювальний комплекс (ІВК) є сукупністю програмно-керованих вимірювальних, обчислювальних і допоміжних технічних засобів, що функціонують на основі єдиного метрологічного забезпечення і реалізують алгоритм отримання, обробки та використання вимірювальної інформації.

Комплекси при цьому забезпечують: первинну обробку результатів вимірювання; отримання результатів непрямих, сукупних і сумісних вимірювань, у тому числі в темпі надходження даних; управління функціонуванням окремих вузлів у ході експерименту, включаючи організацію запитів, черг, встановлення пріоритетів, діалоговий режим з оператором; контроль працездатності трактів комплексів, включаючи контроль метрологічних характеристик; сервісну обробку одержуваної інформації (подання результатів у вигляді таблиць, графіків тощо); зберігання отримуваної інформації; вироблення управляючих впливів на досліджуваний об'єкт у вигляді *аналогових і дискретних сигналів*.

У *ІВК вимірювальні та обчислювальні засоби* взаємодіють на основі єдиного алгоритму, що забезпечує отримання, обробку та використання вимірювальної інформації.

ІВК будуються на основі технічних засобів, що мають блоково-модульний принцип виконання, що забезпечує можливість створення ІВК з структурою, що перебудовується. Такі ІВК призначені для створення автоматизованих систем наукових досліджень (АСНД), для автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), а також для управління такими складними об'єктами, як космічні кораблі, морські судна та інші транспортні засоби.

Залежно від призначення розрізняють такі типи ІВК:

- *універсальні* – призначені для створення АСНД, а також для випробувань різних виробів і матеріалів; їх характерною особливістю є наявність структури, що перебудовується, а також розвиненого програмно-алгоритмічного забезпечення;
- *проблемно-орієнтовані* – призначені для обмеженого набору однотипних завдань АСНД або АСУ ТП;
- *унікальні* – призначені для одиничних (специфічних) завдань дослідження або випробувань.

Програмне управління ІВК здійснюється програмованим процесором, який забезпечує реалізацію алгоритму функціонування системи відповідно до необхідної обробкою вимірювальної інформації.

Працездатність ІВК визначають технічне, математичне і метрологічне забезпечення.

До складу *технічного забезпечення* належать вимірювальні, обчислювальні і допоміжні пристрої.

До *вимірювальних засобів* належать: цифрові і аналогові вимірювальні прилади; нормуючі, лінійні, функціональні вимірювальні перетворювачі; комутатори вимірювальних кіл, калібратори, вимірювальні джерела живлення і т. ін.

Як обчислювальні засоби в ІВК можуть бути використані аналогові, гібридні та цифрові обчислювальні пристрої мікро- і міні-ЕОМ.

Основним змістом *математичного забезпечення* ІВК є *алгоритми та програми*.

Алгоритми передбачають виконання процедур, пов'язаних з вимірюванням фізичних величин, обробкою результатів вимірювання, виконанням плану експерименту і т. ін.

Програми забезпечують функціонування ІВК, тому містять інструкції з самоорганізації комплексу і самоконтролю його вузлів, підпрограми для виконання алгоритмів типових процедур і рішень типових задач.

Метрологічне забезпечення передбачає законодавчо закріплені процедури знаходження оцінок метрологічних характеристик окремих вузлів, їх самоперевірки на основі відповідних алгоритмів і програм.

Метрологічному забезпеченню належать:

- *теорія метрології*, пов'язана з розрахунком, повіркою і контролем метрологічних характеристик, і проведенням випробувань засобів вимірювань (ЗВ);
- *зразкові ЗВ*, призначені для проведення повірки, контролю метрологічних характеристик і випробування ЗВ;
- *нормативні документи*: державні та галузеві стандарти, керівні технічні матеріали та методичні вказівки, що визначають законодавчі процедури розрахунку, повірки і контролю метрологічних характеристик і випробувань ЗВ, що забезпечують єдність вимірювань.

11.2 Системна сумісність

Науково-технічною основою створення будь-якого комплексу є системна сумісність всіх функціональних елементів, що входять до його складу.

Основними категоріями сумісності є сумісність:

- *інформаційна*, що забезпечується шляхом уніфікації та нормування видів і параметрів сигналів з урахуванням їхніх часових і логічних співвідношень, фізичної реалізації і правил передачі;
- *метрологічна*, яка передбачає однотипність метрологічних характеристик усіх засобів вимірювальної техніки, які використовуються в комплексі і забезпечують отримання кількісної оцінки достовірності виконуваних вимірювань;

– *програмна*, що досягається за рахунок узгодженості використовуваних програм і підпрограм, мов програмування, за рахунок нормування правил обміну потоками інформації між вузлами комплексу;

– *конструктивна*, що передбачає уніфікацію використовуваних модулів, виконаних на єдиному технологічному рівні; нормалізації їх конструктивних параметрів, а також умов їх механічного сполучення;

– *експлуатаційна*, що забезпечується за рахунок уніфікації та нормування джерел живлення, умов навколишнього середовища, надійності тощо.

Інформаційна і конструктивна сумісність усіх блоків комплексу досягається за рахунок використання стандартних інтерфейсів.

Існують два способи реалізації названої сумісності в ІВК.

При першому способі для всього комплексу використовується єдиний інтерфейс *ЕОМ*, що належить до складу ІВК.

При другому – для узгодження вимірювальної та обчислювальної апаратури комплексу використовується спеціальний інтерфейс, який має свій блок управління (контролер).

11.3 Структурна організація

ІВК, що випускаються промисловістю, мають загальні принципи побудови на основі керуючих електронних обчислювальних машин, засобів вимірювань та інтерфейсу «Загальна шина», що об'єднує всі периферійні пристрої за допомогою єдиної системи сигналів і єдиного магістрального каналу зв'язку.

До складу периферійних пристроїв (ПП) входять комутатори аналогових сигналів аналого-цифровий (АЦП) і цифро-аналоговий (ЦАП) перетворювачів, графічний пристрій (ГП), пристрій введення-виведення дискретної інформації (ПВВДІ), підсилювачі постійного струму (ППС), калібратор напруги (КБР), цифровий вольтметр(ЦВ).

Сполучення ПП з центральним «процесором» комплексу здійснюється за допомогою «пристроїв сполучення».

Розширювач загальної шини (РЗШ) дозволяє розділити магістраль «загальна шина» на незалежні частини з однаковими технічними можливостями нарощувань периферійних пристроїв. До складу комплексу входить панель автономного управління (ПАУ), призначена для перевірки функціонування в статичному режимі (без включення «процесора»).

Побудова багаторівневих ІВК може бути виконана за рахунок нарощування різного поєднання приладових, внутрішньо приладових і машинних інтерфейсів.

Основними функціями ІВК є:

- первинна обробка отриманих результатів;*
- сервісна обробка вимірювальної інформації;*
- управління функціонуванням окремих блоків і вузлів.*

Питання для самоконтролю

1. Призначення і типи вимірювально-обчислювальних комплексів.
2. Системна сумісність вимірювально-обчислювальних комплексів.
3. Структурна організація вимірювально-обчислювальних комплексів.

Інформація від об'єкта діагностики ОД через датчики D_1-D_n з уніфікованими вихідними сигналами і вимірювальний комутатор BK_1 надходить на пристрій контролю параметрів ПКП, що містить пристрої вимірювання та порівняння параметрів з нормами. Результати контролю надходять в пристрій обробки ПО, де можуть порівнюватися зі зразковими результатами, отримуваними з оперативного пристрою, що запам'ятовує ОЗП. Крім того, в ОЗП може бути записана програма перевірки, яка надходить від пристрою введення програми ПВП через пристрій розподілу інформації ПРІ, який управляє також роботою генератора стимулюючих сигналів ГСС і вимірювального комутатора BK_2 , на вхід якого подаються напруги від ГСС. Ці напруги з виходів перетворюються перетворювачами $\Pi_1-\Pi_n$ у відповідні сигнали, що впливають на ОД. Такими сигналами можуть бути як електричні сигнали, так і неелектричні. Подання інформації оператору О здійснюється засобом подання інформації ЗПІ. Залежно від отриманої інформації оператор через пристрій управління ПУ може впливати на ПВП, змінюючи програму перевірки.

Питання для самоконтролю

1. Системи технічної діагностики: різновиди.
2. Схема системи технічної діагностики.

13 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧАСОВЕ ПОДАННЯ ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Детерміновані сигнали – це сигнали, які можна описати явними математичними залежностями і значення яких в будь-який момент часу, або в довільній точці простору (або залежно від будь-яких інших аргументів) є апіорно відомими, або можуть бути досить точно визначені.

Сигнали, закони зміни яких неможливо описати явними математичними залежностями, оскільки вони носять випадковий характер, належать до випадкових. Переважно, їхня сукупність оцінюється статистичними характеристиками процесу, які вони утворюють, і характеризується законами розподілу ймовірностей, кореляційними функціями, спектральними густинами енергії.

Реальні сигнали завжди випадкові.

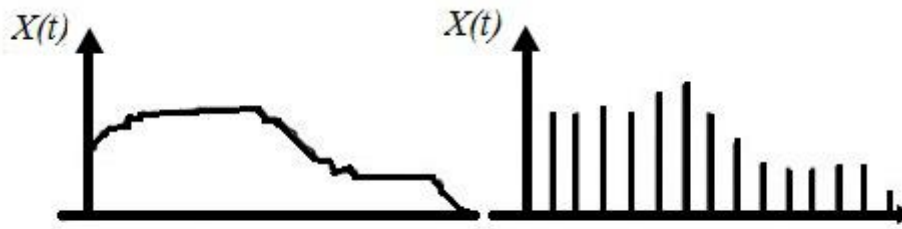
На практиці, в більшості випадків, мають місце квазидетерміновані сигнали, які описуються функціями з невідомими випадковими параметрами.

Як приклад детермінованого сигналу можна навести синусоїдальну хвилю, яка графічно описується синусоїдою. Синусоїда разом з трикутним, пилкоподібним, прямокутним і іншими сигналами належить до періодичних сигналів, тобто до таких сигналів, які повторюють свою форму через деякий стійкий проміжок часу.

За формою сигнали діляться на *безперервні* і *дискретні*. *Безперервні сигнали* можуть приймати безперервну множину значень (континуум) в певному інтервалі (в часі і за рівнем).

Дискретні сигнали описуються за допомогою кінцевого набору цифр або дискретних значень певної функції.

Безперервні сигнали (рис. 13.1, а) зображуються функцією, безперервною в часі на відрізку спостереження, а дискретні (рис. 13.1, б) надходять тільки в певні моменти часу і зображуються дискретною функцією.



а) Безперервний сигнал

б) Дискретний сигнал

Рисунок 13.1 – Безперервні і дискретні сигнали

До елементарних детермінованих сигналів належить, в тому числі, і одинична функція (стрибок). Сукупність амплітуд і відповідних частот гармонік прийнято називати *спектром амплітуд*. Сукупність початкових фаз і відповідних частот гармонік називаються *спектром фаз*. Спектр амплітуд і спектр фаз однозначно визначають сигнал, проте для багатьох практичних завдань достатньо обмежитися розглядом тільки спектра амплітуд (рис. 13.2).

Характерною рисою спектра періодичного сигналу є його уривчастість (дискретність). Відстань між сусідніми спектральними лініями однакова і дорівнює частоті основної гармоніки.

Для опису випадкових процесів використовують методи теорії ймовірностей. У загальному випадку повною характеристикою випадкового процесу є його *багатовимірні щільності ймовірностей*. Для стаціонарних гауссових процесів одновимірні щільності ймовірності визначається дисперсією випадкового процесу. Для опису процесів Гаусса достатньою характеристикою є і кореляційна функція процесу.

Однією з характеристик випадкового сигналу є його *спектральна щільність потужності*, пов'язана з кореляційною функцією узагальненим перетворенням Фур'є. Спектр випадкового процесу є суцільним. Для випадкових процесів з постійною спектральною щільністю і нескінченною смугою частот потужність нескінченна, а кореляційна функція є дельта-функцією. Такий процес має нескінченну дисперсію, є некорельованим і називається *білим шумом*. У випадковому процесі з постійною спектральною

щільністю в обмеженому діапазоні частот потужність є кінцевою і її можна визначити.

У більшості випадків для характеристики випадкових процесів використовують моментні функції перших двох порядків: *математичне очікування, дисперсія*, а також *кореляційна функція* (оцінки ступеня статичної залежності миттєвих значень процесу $U(t)$ у будь-які моменти часу t_1 і t_2). Розглянемо спектральне зображення стаціонарних випадкових процесів. Спектри потужності випадкових функцій визначаються аналогічно спектрами потужності детермінованих сигналів. Середня потужність випадкового процесу $X(t)$, зареєстрованого в процесі однієї реалізації на інтервалі $0 \dots T$ на засадах рівності Парсеваля можуть бути обчислена за формулою:

$$W_{\tau} = \int_0^T \left[\frac{X^2(t)}{T} \right] dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{X_T(f)^2}{T} \right] df, \quad (13.1)$$

де $X_T(f)$ – спектральна щільність одиничної реалізації. Зі збільшенням інтервалу енергія процесу на інтервалі необмежено зростає, а середня потужність прагне до певної межі:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X_T(f)|^2 \right] df, \quad (13.2)$$

де підінтегральна функція є спектральною щільністю потужності даної реалізації випадкового процесу. Досить часто цей вислів називають просто *спектром потужності*. *Щільність потужності є суттєвою, невід'ємною і парною функцією частоти*. У загальному випадку щільність потужності необхідно усереднювати за безліччю реалізацій, але для ергодичності процесів допустимо усереднювати за однією тривалою в часі реалізацією.

13.1 Спектри дискретних сигналів

Будь-який складний періодичний сигнал може бути поданий за допомогою ряду Фур'є як сума простих гармонійних коливань.

Сукупність простих гармонійних коливань, на які може бути розкладений складний періодичний сигнал, називається його *спектром*.

Розподіл амплітуд гармонік за частотою називають *амплітудно-частотним спектром* або скорочено *амплітудним спектром*, а розподіл їхніх початкових фаз за частотою – *фазочастотним спектром* або *фазовим спектром*.

Лінії дискретного спектра мають розмірність амплітуди сигналу.

Безперервний спектр вказує на розподіл амплітуд за всім спектром і має розмірність щільності амплітуд сигналу. Якщо діапазон сигналу є необмеженим, то під час визначення ширини нехтують гармоніками, амплітуди яких невеликі і не перевищують певного (заданого) рівня. Найчастіше користуються рівнем 0,707 за амплітудою або 0,5 за потужністю від максимального значення. Перетворення Фур'є – інтегральне перетворення однієї комплекснозначної функції дійсної змінної на іншу, тісно пов'язане з перетворенням Лапласа і *аналогічне розкладанню в ряд Фур'є для неперіодичних функцій*. Це перетворення розкладає функцію на осциляторні функції. Використовується для того, щоб розрахувати спектр частот для змінних у часі сигналів. Перетворення Фур'є застосовуються для отримання частотного спектра неперіодичної функції, наприклад, електричного сигналу, тобто для подання сигналу у вигляді *суми гармонійних коливань*. При цьому використовується *властивість згортки*.

Важливим висновком з цього перетворення є те, що *вихідний спектр виходить з вхідного простим множенням на функцію відгуку системи $A(\omega)$* .

Відомо, що будь-яка періодична функція, що задовольняє умови Діріхле, може бути подана у вигляді нескінченної, в загальному випадку, суми гармонійних складових – рядом Фур'є.

Умова Діріхле полягає в тому, що: функція $x(t)$ має бути обмеженою, кусково-безперервною і мати протягом періоду кінцеве число екстремумів. Відомо дві форми розкладання в ряд Фур'є: *тригонометрична* і *комплексна*. Тригонометрична форма розкладання виражається у вигляді:

$$x(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(K\omega_0 t - \varphi_k), \quad (13.3)$$

де $\frac{1}{2}A_0$ – стала складова функції; $A_k \cos(K\omega_0 t - \varphi_k)$ – k -та гармонічна складова; $A_k, K\omega_0, \varphi_k$ – амплітуда, частота і початкова фаза k -ї гармонічної складової;

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ – частота основної (першої) гармоніки; T – період зміни функції.

У математичному відношенні зручніше оперувати комплексною формою ряду Фур'є, поданою у вигляді:

$$x(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp\{jK\omega_0 t\}, \quad (13.4)$$

де $A_k \exp\{jK\omega_0 t\}$ – комплексна амплітуда гармонічної складової частоти $\omega_k = K\omega_0$. Комплексна амплітуда визначається через часову функцію $x(t)$ за допомогою формули:

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) \exp\{-jK\omega_0 t\} dt. \quad (13.5)$$

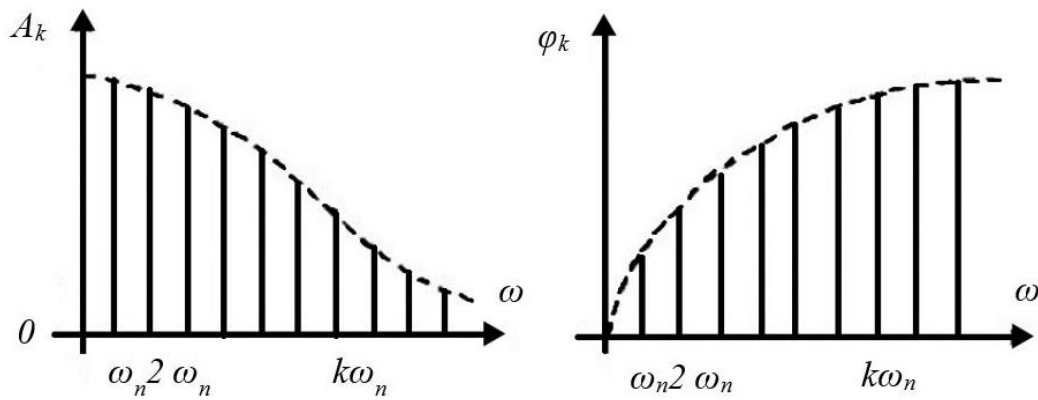


Рисунок 13.2 – Графічні зображення спектра амплітуд і спектра фаз періодичного сигналу

Будь-який неперіодичний сигнал можна розглядати як періодичний, період зміни якого дорівнює нескінченності. У зв'язку з цим, розглянутий раніше спектральний аналіз періодичних процесів може бути узагальнений і на неперіодичний сигнал. Розглянемо, як змінюватиметься спектр неперіодичного сигналу з необмеженим збільшенням періоду зміни сигналу. Зі збільшенням періоду T інтервали між суміжними частотами в спектрі сигналу і амплітуди спектральних складових зменшуються, і в межі при $T \rightarrow \infty$ стають нескінченно малими величинами. При цьому спектральний розподіл неперіодичного сигналу відображається рядом Фур'є. Комплексна форма неперіодичного сигналу має вигляд:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) \cdot \exp(j\omega t) d\omega, \quad (13.6)$$

де $S(j\omega) = S(\omega) \exp(j\varphi(\omega))$ – спектральна щільність сигналу; $S(\omega) = |S(j\omega)|$ – амплітудно-частотна характеристика сигналу; $\varphi(\omega)$ – фазочастотна характеристика сигналу. Попередній вираз називається формулою оберненого перетворення Фур'є. Таким чином, спектр неперіодичного сигналу, на відміну від спектра періодичного сигналу, є суцільним і є сумою нескінченної кількості гармонійних складових з нескінченно малими складовими.

13.2 Спектри одиночних і періодичних імпульсних послідовностей

Аналіз перехідних процесів у колі при впливі на нього складної (негармонійної) електрорушійної сили ЕРС, класичним методом виявляється досить складно. Більш зручні, в таких випадках, методи, засновані на спектральному поданні зовнішньої ЕРС і принципі суперпозиції. Тому, перш ніж переходити до аналізу таких перехідних процесів, розглянемо спектри деяких найбільш важливих для радіотехніки періодичних і неперіодичних ЕРС. Теорема про суму спектрів і теорема запізнення дозволяють обчислити спектр групи однакових імпульсів, які рівно відстають.

Нехай є два однакових імпульси $f_1(t)$ і $f_2(t) = f_1(t - \tau)$, розділених інтервалом часу τ . Можна записати спектральну функцію другого імпульсу через спектральну функцію першого $\bar{S}_2(\omega) = \bar{S}_1(\omega)e^{-j\omega\tau}$. Тоді на основі виразу для спектральної функції суми двох імпульсів отримаємо:

$$\begin{aligned}\bar{S}(\omega) &= \bar{S}_2(\omega) + \bar{S}_1(\omega) = \bar{S}_1(\omega)(1 + e^{-j\omega\tau}) = \bar{S}_1(\omega)[1 + \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau] = \\ &= \bar{S}_1(\omega)\sqrt{(1 + \cos \omega\tau)^2 + \sin^2 \omega\tau}e^{-j\psi(\omega)} = \bar{S}_1(\omega)2 \cos \frac{\omega\tau}{2}e^{-j\psi(\omega)},\end{aligned}\quad (13.7)$$

де

$$\psi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\sin \omega\tau}{1 + \cos \omega\tau}. \quad (13.8)$$

Зі збільшенням кількості імпульсів спектр групи імпульсів наближається за структурою до лінійного спектра періодичної послідовності імпульсів. Практично всі канали зв'язку мають обмежену смугу пропускання. Отже, при передачі сигналу через реальний канал зв'язку може бути передана тільки частина його частотного спектра. За практичну ширину спектра сигналу приймають діапазон частот, у межах якого знаходиться найбільш вагома частина спектра сигналу. Вибір практичної ширини спектра сигналу

визначається двома критеріями: енергетичним критерієм і критерієм допустимих викривлень форми сигналу. Розглянемо для прикладу послідовність прямокутних імпульсів тривалістю τ , висотою імпульсу h , з періодом проходження T (рис. 13.3).

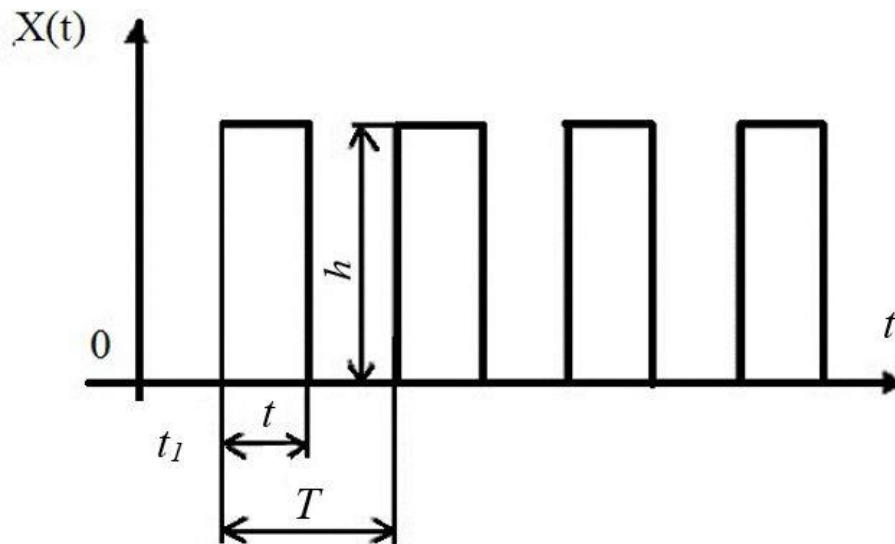


Рисунок 13.3 – Прямокутні імпульси

Розкладання в ряд Фур'є періодичної послідовності прямокутних імпульсів подається у такому вигляді:

$$x(t) = \frac{\tau h}{T} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{K \omega_0 \tau}{2}}{\frac{K \omega_0 \tau}{2}} \cos K \omega_0 \tau \right] \quad (13.9)$$

Спектр амплітуд такого сигналу показаний на рис. 13.4.

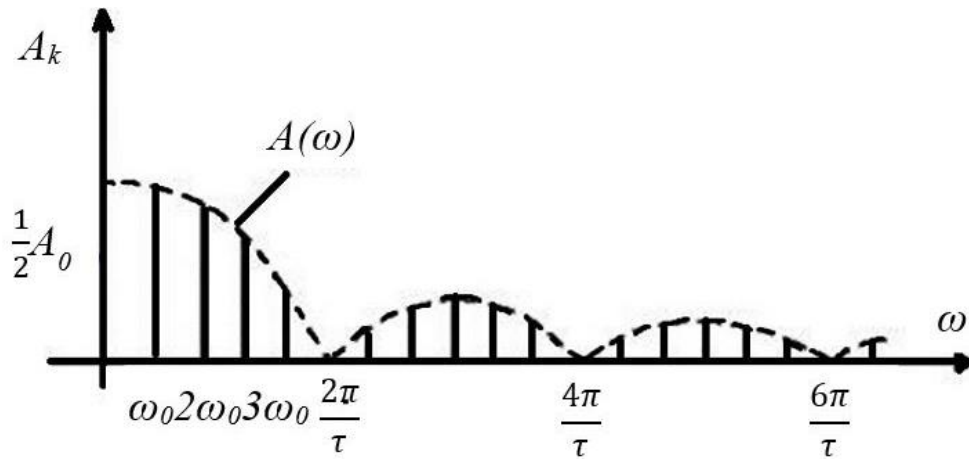


Рисунок 13.4 – Спектр амплітуд

Його обвідна визначається рівнянням:

$$A(\omega) = 2 \frac{\tau h}{T} \left[\frac{\sin \frac{\omega \tau}{2}}{\frac{\omega \tau}{2}} \right], \quad (13.10)$$

де $\omega = K \omega_0$ – для k -ї гармоніки.

Для періодичної послідовності імпульсів прямокутної форми тривалістю $\tau = \frac{T}{2}$ достатньо практичну ширину спектра вибрати рівною $3\omega_0 = \frac{6\pi}{T} = \frac{3\pi}{\tau}$.

У цій області частот зосереджено 95% усієї потужності сигналу. Розглянемо одиничний прямокутний імпульс тривалістю T і величиною h , спектральна щільність такого сигналу визначається виразом:

$$S(j\omega) = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} x(t) \exp\{-j\omega t\} dt = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} h \exp\{-j\omega t\} dt = \tau h \frac{\sin \frac{\omega \tau}{2}}{\frac{\omega \tau}{2}} \quad (13.11)$$

Енергія сигналу, зосереджена в смузі частот від 0 до ω_0 .

Питання для самоконтролю

1. Визначення детермінованого сигналу.
2. Розподіл сигналів за формою. Визначення. Графічне зображення таких сигналів.
3. Визначення випадкового сигналу. Характеристики випадкового сигналу та причини виникнення.
4. Спектри дискретних сигналів.
5. Графічні зображення спектра амплітуд і спектра фаз періодичного сигналу.
6. Спектри одиночних і періодичних імпульсних послідовностей.

14 ВИБІР ЧАСТОТНОЇ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ

Під дискретизацією сигналів розуміють перетворення функцій безперервних змінних у функції дискретних змінних, за якими вихідні безперервні функції можуть бути відновлені з заданою точністю.

Роль *дискретних відліків* виконують, як правило, *квантовані значення функцій* у дискретній шкалі координат. Система дискретного часу – це алгоритм із вхідною послідовністю $s(k)$ і вихідною послідовністю $y(k)$, може бути лінійною або нелінійною, інваріантною або змінною в часі. Система дискретного часу лінійна і інваріантна в часі, якщо вона відповідає принципу суперпозиції (відгук на кілька входів дорівнює сумі відгуків на кожен вхід окремо), а затримка вхідного сигналу викликає таку ж затримку вихідного сигналу.

Сенс дискретизації аналогових сигналів в тому, що безперервність у часі аналогової функції $s(t)$ замінюється послідовністю коротких імпульсів, амплітудні значення яких визначаються за допомогою вагових функцій, або безпосередньо вибірками (відліками) миттєвих значень сигналу $s(t)$ в моменти часу t_n . Відображення сигналу $s(t)$ на інтервалі T сукупності дискретних значень c_n записується у вигляді:

$$(c_1, c_2, \dots, c_n) = A[s(t)], \quad (14.1)$$

де A – оператор дискретизації.

Запис операції відновлення сигналу:

$$s'(t) = B[(c_1, c_2, \dots, c_n)]. \quad (14.2)$$

Вибір операторів A і B визначається необхідною точністю відновлення сигналу. Найбільш простими є лінійні оператори. У загальному випадку:

$$c_n = q_n(t)s(t)dt, \quad (14.3)$$

де $q_n(t)$ – система вагових функцій. Відлік в останньому виразі пов'язаний з операцією інтегрування, що забезпечує високу стійкість перед завадами дискретизації. Однак в силу складності технічної реалізації «зваженого» інтегрування, останнє використовується досить рідко, при високих рівнях завад. Більш широке поширення отримали методи, за яких сигнал $s(t)$ замінюється сукупністю його миттєвих значень $s_n(t)$ в моменти часу. Роль вагових функцій у цьому випадку виконують гратчасті функції. Відрізок часу t між сусідніми відліками називають *кроком дискретизації*. Дискретизація називається *рівномірною* з частотою $F = \frac{1}{t}$, якщо значення t постійно по всьому діапазону перетворення сигналу. При *нерівномірній* дискретизації значення між вибірками може змінюватися за певною програмою або залежно від зміни будь-яких параметрів сигналу. *Оптимальними* є методи дискретизації, що забезпечують мінімальний числовий ряд при заданій похибці відтворення сигналу.

З *неортогональними базисними функціями* використовуються, в основному, статичні алгебраїчні поліноми вигляду:

$$s'(t) = c_n t_n. \quad (14.4)$$

Вимогою до вибору частоти дискретизації є внесення мінімальних викривлень в динаміці змін сигнальних функцій. Логічним буде те, що викривлення інформації будуть тим менше, чим більша їхня кількість. Чим більше значення, тим більшою кількістю цифрових даних відображатимуться сигнали, і тим більший час буде витрачено на їхню обробку. В оптимальному варіанті значення частоти дискретизації сигналу має бути необхідним і достатнім для обробки інформаційного сигналу з заданою точністю, тобто забезпечувати допустиму похибку відновлення аналогової форми сигналу (середньоквадратичне в цілому за інтервалом сигналу, або за максимальними

відхиленнями від істинної форми в характерних інформаційних точках сигналів).

14.1 Поняття про ширину спектра й інтервали кореляції

При спектральних перетвореннях випадкових процесів важливого значення набуває ширина спектра процесу. Ефективна ширина енергетичного спектра визначається так:

$$\Delta\omega_{ef} = \frac{1}{\dot{X}_{T\max}} \int_0^{\infty} \dot{X}_T(\omega) d\omega, \quad (14.5)$$

де $\dot{X}_T(\omega)$ – спектральна щільність. Цьому визначенню можна дати графічну інтерпретацію. На рис. 14.1 зображена крива одностороннього енергетичного спектра (на ньому замість X відмічена G).

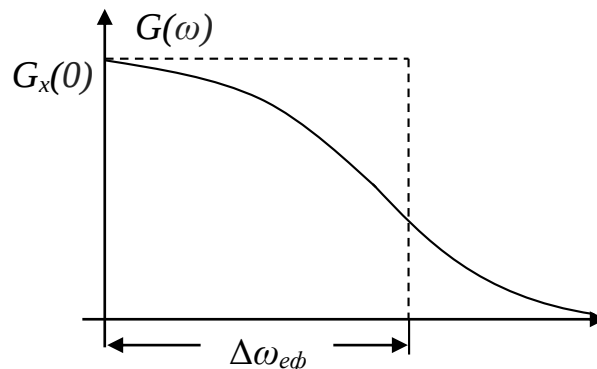


Рисунок 14.1 – Односторонній енергетичний спектр

Побудуємо прямокутник з площею, яка дорівнює площі по кривій $\dot{X}_T(\omega)$, одна сторона якого становить величину $\dot{X}_{T\max}$. Тоді друга сторона прямокутника характеризуватиме ефективну ширину енергетичного спектра $\Delta\omega_{ef}$.

Перепишемо останній вираз у вигляді:

$$\dot{X}_{T \max} \Delta \omega_{ef} = \int_0^{\infty} \dot{X}_T(\omega) d\omega. \quad (14.6)$$

Ліва сторона цієї рівності є *середньою потужністю випадкового процесу* з рівномірним енергетичним спектром в межах смуги частот $\Delta \omega_{ef}$, а права – *середню потужністю розглянутого випадкового процесу*.

Автокореляційна функція випадкового процесу характеризує ступінь статистичного зв'язку між значеннями процесу, розділеними інтервалом часу τ . При цьому, для ергодичних процесів, які вивчаються в радіотехніці, автокореляційна функція прагне до нуля при необмеженому зростанні τ . Очевидно, при певному значенні τ , значення випадкового процесу $x(t)$ і $x(t + \tau)$ можна вважати *статистично непов'язаними (некорельованими)*. Таке значення називається *інтервалом кореляції*.

Інтервал кореляції визначається відповідно до виразу:

$$\tau_K = \frac{1}{B_x(0)} \int_0^{\infty} |B_x(\tau)| d\tau = \int_0^{\infty} |R_x(\tau)| d\tau, \quad (14.7)$$

де $R_x(\tau)$ – нормована автокореляційна функція. На рис. 14.2 наведена графічна інтерпретація поняття інтервалу кореляції.

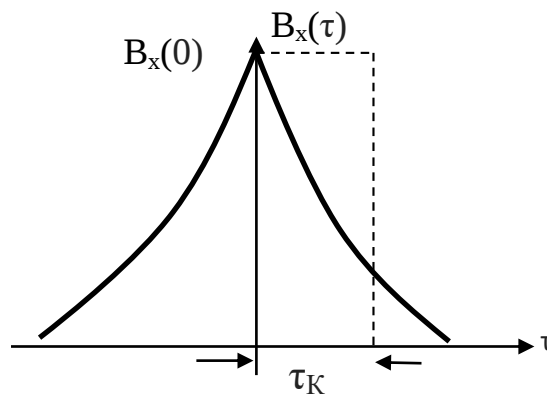


Рисунок 14.2 – Графічна інтерпретація інтервалу кореляції

Інтервал кореляції є стороною прямокутника, по площі рівному площі під кривою $B_x(\tau)$ при $\tau \geq 0$.

Встановимо зв'язок між ефективною шириною спектра й інтервалом кореляції в припущенні, що $\dot{X}_{T_{\max}} = \dot{X}_T(0)$, а функція кореляції є невід'ємною монотонно спадною функцією, що дозволяє в останньому виразі вважати при $|B_x(\tau)| = B_x(\tau)$:

$$\Delta\omega_{ef}\tau_K = \frac{1}{\dot{X}_T(0)} \int_0^\infty \dot{X}_T(\omega) d\omega \frac{1}{B_x(0)} \int_0^\infty |B_x(\tau)| d\tau = \frac{\pi}{2} = const. \quad (14.8)$$

Таким чином, добуток ефективної ширини спектра та інтервалу кореляції є постійною величиною. З цього випливає, що *чим ширше енергетичний спектр, тим менше інтервал кореляції між його значеннями і навпаки*.

В ході спектральних перетворень випадкових процесів важливого значення набуває ширина спектра процесу. Ефективна ширина енергетичного спектра визначається наступним чином.

Встановимо зв'язок між ефективною шириною спектра й інтервалом кореляції в припущенні, що $G_{x_{\max}} = G_x(0)$, а функція кореляції є *невід'ємною монотонно спадною функцією*, що дозволяє в (14.8) вважати $|B_x(\tau)| = B_x(\tau)$. Знайдемо множину $\Delta\omega_{ef}$ і τ_K з урахуванням (14.5) і (14.7):

$$\Delta\omega_{ef}\tau_K = \frac{1}{G(0)} \int_0^\infty G_x(\omega) d\omega \cdot \frac{1}{B_x(0)} \int_0^\infty B_x(\tau) d\tau. \quad (14.9)$$

Підставляючи в цей вираз попередні формули, після нескладних перетворень отримаємо:

$$\Delta\omega_{ef}\tau_K = \frac{\pi}{2} = const. \quad (14.10)$$

Аналогічно, можна отримати:

$$\Delta f_{ef} \tau_K = \frac{1}{4} = const . \quad (14.11)$$

Ширина енергетичного спектра визначає швидкість зміни значень випадкового процесу: *чим більше (або чим менше), тим вище швидкість зміни процесу.*

Питання для самоконтролю

1. Визначення поняття дискретизації сигналів та системи дискретного часу. У чому полягає сенс дискретизації аналогових сигналів?
2. Методи дискретизації.
3. Поняття про ширину спектра і інтервали кореляції.
4. Автокореляційна функція випадкового процесу. Графічна інтерпретація інтервалу кореляції.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

Автоматизована електронна система – сукупність керованого об'єкта та автоматичних пристроїв, у яких частину функцій керування виконує людина (оператор).

Автоматична електронна система – сукупність керованого об'єкта і автоматичних пристроїв, що виконують певну задачу згідно із заданою програмою без участі людини.

Аналоговий сигнал – сигнал, що може приймати будь-які значення в певних межах (наприклад, напруга може плавно змінюватися в межах від нуля до десяти вольтів).

Біт – найменша кількість інформації, двійкова система.

Вимірювальний канал – засіб вимірювання, який є складовою частиною вимірювальних систем у вигляді сукупності засобів вимірювальних операцій, засобів (каналів або ліній) зв'язку для послідовних перетворень і передачі вимірювальної інформації.

Гнучкість – це здатність системи налаштовуватися під різні задачі.

Дискретизація за часом – перетворення функції неперервного аргументу у функцію дискретного аргументу.

Дисперсія – математичне сподівання квадрата відхилення величини від математичного сподівання у певний момент часу.

Електронна підсистема – частина системи, до складу якої входить більше, ніж один елемент (проміжний елемент поділу системи) і яка має певне функціональне призначення нижчого рівня, ніж система.

Електронна система – сукупність електронних компонентів, що з'єднані між собою й діють як одне ціле завдяки спеціальним сигналам управління та виконують задану функцію.

Ентропія – логарифмічна міра невизначеності стану джерела повідомлень, що характеризує середній ступінь невизначеності стану цього джерела.

Ємність каналу – гранична швидкість передавання інформації цим каналом.

Завади – сигнали, що впливають на електронну систему ззовні та викривляють корисний сигнал (наприклад, електромагнітні випромінювання від радіопередавачів або від трансформаторів).

Задача – набір функцій, виконання яких потрібно від електронної системи.

Імпульсний сигнал – сигнал, що зростає в тактовий момент, а спадає в межах даного такту.

Інтерфейс – узгодженість обміну інформацією та правил обміну інформацією, під якою розуміють електричну, логічну й конструктивну сумісність пристроїв, що беруть участь в обміні.

Інформація – сукупність відомостей про всілякі об'єкти, явища, процеси.

Канал зв'язку – сукупність передавача, приймача та лінії зв'язку, призначених для передачі інформації від відправника (джерела) до адресата.

Квантування за амплітудою – процес заміни реальних (вимірних) значень амплітуди сигналу значеннями, наближеними з деякою точністю.

Квантування за рівнем – перетворення неперервної функції в дискретну множину значень.

Кодування – подання за певними правилами дискретних повідомлень у деякі комбінації, складені з певного числа елементів-символів.

Комп'ютеризовані системи – системи, під якими розуміють сукупність технічних засобів, яка має в своєму складі керуючу ЕОМ, засоби збору, перетворення, передачі, відбиття, а також спеціальне математичне та програмне забезпечення, що виконує весь комплекс оброблення інформації.

Лінія зв'язку – фізичне середовище, по якому передаються сигнали.

Мікроконтролер – обчислювально-керуючий пристрій, призначений для виконання функцій логічного контролю й керування периферійним устаткуванням, виконаний у вигляді однієї ВІС, що поєднує в собі мікропроцесорне ядро і набір вбудованих пристроїв введення-виведення

Мікропроцесор – програмно-керований пристрій, призначений для оброблення цифрової інформації й керування процесом цього оброблення, виконаний у вигляді однієї (або декількох) інтегральної схеми з високим ступенем інтеграції електронних елементів.

Модель – вибраний спосіб опису об'єкта, процесу або явища, який відображає суттєві з погляду розв'язання даної задачі фактори.

Надмірність – показник ступеня відповідності можливостей системи до розв'язуваної даною системою задачі.

Простір станів – множина можливих значень випадкової величини.

Сигнал – будь-яка фізична величина (наприклад, температура, тиск повітря, інтенсивність світла, сила струму й т.д.), що змінюється в часі.

Система – група різних предметів, які об'єднані так, що утворюють єдине ціле, функціонують узгоджено та підпорядковані єдиній формі управління.

Система реального часу – система, що має реагувати на зовнішні параметри введення і створювати нові результати виведення за обмежений час.

Технічна швидкість передачі – число елементарних сигналів (символів), переданих по каналу за одиницю часу.

Цифровий сигнал – сигнал, що може приймати тільки два (іноді – три) значення з деякими відхиленнями від цих значень.

Швидкодія – показник швидкості виконання електронною системою її функцій.

Шум – внутрішні хаотичні слабкі сигнали будь-якого електронного пристрою.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Автоматизированная электронная система – совокупность управляемого объекта и автоматических приборов, в которых часть функций управления выполняет человек (оператор).

Автоматическая электронная система – совокупность управляемого объекта и автоматических приборов, которые выполняют конкретную задачу согласно с заданной программой без участия человека.

Аналоговый сигнал – сигнал, который может принимать любые значения в определенных рамках (например, напряжение может плавно меняться в пределах от нуля до десяти вольт).

Бит – наименьшее количество информации, двоичная система.

Быстродействие – показатель скорости выполнения электронной системой ее функций.

Гибкость – это способность системы подстраиваться под разные задачи

Дискретизация по времени – преобразование функции непрерывного аргумента в функцию дискретного аргумента.

Дисперсия – математическое ожидание квадрата отклонения величины от математического ожидания в определенный момент времени.

Ёмкость канала – предельная скорость передачи информации по этому каналу.

Задача – набор функций, выполнение которых требуется от электронной системы.

Измерительный канал – способ измерения, который является составляющей частью измерительных систем в виде совокупности средств измерительных операций, средств (каналов либо линий) связи для последовательных превращений и передачи измеренной информации.

Избыточность – показатель степени соответствия возможностей системы решаемой данной системой задаче.

Импульсный сигнал – сигнал, который нарастает в тактовый момент, а спадает в границах данного такта.

Интерфейс – согласованность обмена информацией и правил обмена информацией, под которой понимают электрическую, логическую и конструктивную совместимость приборов, которые берут участие в обмене.

Информация – совокупность данных о всяческих объектах, явлениях, процессах.

Канал связи – совокупность передатчика, приёмника и линии связи, предназначенная для передачи информации от отправителя (источника) адресату.

Квантование по амплитуде – процесс замены реальных (измеренных) значений амплитуды сигнала значениями, приближенными с некоторой точностью.

Квантование по уровню – преобразование непрерывной функции в дискретное множество.

Кодировка – подача по определенным правилам дискретных сообщений в некоторые комбинации, составленные из определенного числа элементов-символов.

Компьютеризированные системы – системы, под которыми понимают совокупность технических средств, состоящая из управляющей ЭВМ, средств сбора, преобразования, передачи, отражения, а также специального математического и программного обеспечения, которое исполняет весь комплекс обработки информации.

Линия связи – физическая среда, по которой передаются сигналы.

Микроконтроллер – вычислительно-управляющее устройство, предназначенное для выполнения функций логического контроля и управления периферическим оборудованием, выполненное в виде одной ИИС, которое объединяет в себе микропроцессорное ядро и набор встроенных приборов ввода-вывода.

Микропроцессор – управляемый программой прибор, предназначенный для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки, выполненный в виде одной (или нескольких) интегральной схемы с высокой степенью интеграции электронных элементов.

Модель – избранный способ описания объекта, процесса или явления, который отображает существенные с точки зрения решения данной задачи факторы.

Помехи – сигналы, которые влияют на электронную систему извне и искажают полезный сигнал (например, электромагнитное излучение от радиопередатчиков или от трансформаторов).

Пространство состояний – множество возможных значений случайной величины.

Сигнал – какая-либо физическая величина (например, температура, давление воздуха, интенсивность света, сила тока и т.д.), которая изменяется во времени.

Система – группа различных предметов, которые объединены так, что образуют одно целое, функционируют согласованно и подчиняются единой форме управления.

Система реального времени – система, которая должна реагировать на внешние параметры ввода и создавать новые результаты вывода за ограниченное время.

Техническая скорость передачи – число элементарных сигналов (символов), переданных по каналу за единицу времени.

Цифровой сигнал – сигнал, который может принимать только два (иногда - три) значения с некоторыми отклонениями от этих значений.

Шум – внутренние хаотичные слабые сигналы какого-либо электронного прибора.

Электронная подсистема – часть системы, в состав которой входит больше одного элемента (промежуточный элемент разделения системы) и

которая имеет определенное функциональное назначение более низкого уровня, чем система.

Электронная система – совокупность электронных компонентов, которые соединены между собой и действуют как одно целое благодаря специальным сигналам управления и выполняют заданную функцию.

Энтропия – логарифмическая мера хаоса состояния источника сообщений, которая характеризует среднюю степень неопределенности состояния этого источника.

GLOSSARY

Amplitude quantization – the process of replacing the real (measured) values of the signal amplitude with values approximated with some accuracy.

Analog signal – a signal that can take any value within certain limits (for example, the voltage can vary smoothly from zero to ten volts).

Automated electronic system – a combination of a managed object and automatic devices, in which part of the control functions is performed by a person (operator).

Automatic electronic system – a combination of a managed object and automatic devices that perform a certain task in accordance with a given program without human intervention.

Bit – minimum amount of information, binary system.

Channel capacity – the maximum speed of information transfer on this channel.

Communication channel – a set of transmitter, receiver and communication line designed to transmit information from the sender (source) to the addressee.

Communication line – the physical medium through which signals are transmitted.

Computerized systems – systems that mean the totality of hardware, which consists of a control computer, means of collecting, transforming, transmitting, reflecting, and also special mathematical and software that executes the whole complex of information processing.

Digital signal – a signal that can take only two (sometimes three) values with some deviations from these values.

Dispersion – the mathematical expectation of the square of the deviation of the magnitude from the expectation at a certain point in time.

Electronic subsystem – a part of a system that includes more than one element (an intermediate element of the system division) and which has a certain functional purpose of a lower level than the system.

Electronic system – a set of electronic components that are interconnected and act as one thanks to special control signals and perform the specified function.

Encoding – the filing of discrete messages according to certain rules into certain combinations made up of a certain number of symbol elements.

Entropy – a logarithmic measure of the chaos of the state of a message source, which characterizes the average degree of state uncertainty of this source.

Flexibility – the ability of the system to adapt to different tasks.

Information – a set of data about all sorts of objects, phenomena, processes.

Interface – the consistency of information exchange and information exchange rules, by which we understand the electrical, logical and structural compatibility of devices that take part in the exchange.

Interference – signals that affect the electronic system from the outside and distort the useful signal (for example, electromagnetic radiation from radio transmitters or from transformers).

Level quantization – conversion of a continuous function to a discrete set of values.

Measuring channel – a method of measurement, which is an integral part of measuring systems in the form of a set of means of measuring operations, means (channels or lines) of communication for successive transformations and transfer of measured information.

A microcontroller – a computing and control device designed to perform the functions of logic control and management of peripheral equipment, made in the form of a single IMS that combines a microprocessor core and a set of embedded input-output devices.

A microprocessor – a software-controlled device designed to process digital information and manage the process of this processing, made in the form of one (or several) integrated circuits with a high degree of integration of electronic elements.

A model – a chosen way of describing an object, process, or phenomenon that displays factors that are significant in terms of solving a given task.

Noise – internal chaotic weak signals of any electronic device

Pulse signal – signal that increases at the tact moment and falls within the boundaries of the tact.

Redundancy – an indicator of the degree of compliance of the system's capabilities with the problem being solved by this system.

Real-time system – a system that must respond to external input parameters and create new output for a limited time.

A signal – any physical quantity (for example, temperature, air pressure, light intensity, current intensity, etc.) that changes over time.

Speed performance – an indicator of the speed of the electronic system performing its functions.

State space – the set of possible values of a random variable.

System – a group of different items that are combined so that they form a single whole, function in concert and submit to a single form of management.

Task – a set of functions that are required from the electronic system.

Technical transfer rate – the number of elementary signals (symbols) transmitted by channel per unit of time.

Time discretization – conversion of a function of a continuous argument to a function of a discrete argument.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ (РЕКОМЕНДОВАНОЇ) ЛІТЕРАТУРИ

1. Томпкинс У. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: пер. с англ. / У. Томпкинс, Дж. Уэбстер. – М. : Мир, 1992. – 592 с.
2. Дженнингс Ф. Практическая передача данных: Модемы, сети, протоколы: пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 272 с.
3. Клингман Э. Проектирование микропроцессорных систем: пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 576 с.
4. Модуль цифровой обработки сигналов DSP30: Руководство программиста. – М. : Инструментальные системы, 1994. – 124 с.
5. Модуль аналогового ввода-вывода ADC12/200: Руководство пользователя. – М. : Инструментальные системы, 1993. – 55 с.
6. Операционная система Deasy для процессорных модулей ЦОС на базе TMS320C3х. – М. : Инструментальные системы, 1994. – 146 с.
7. Крюков В. В. Цифровая обработка сигналов: конспект лекций / В.В. Крюков. – Владивосток : ВГУЭиС, 1998. – 140 с.
8. Оппенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. / под ред. Э. Оппенгейма. – М. : Мир, 1980. – 544 с.
9. Исикава Каору. Японские методы управления качеством / Исикава Каору. – М. : Экономика, 1988. – 199 с.
10. Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике : учеб. пособие / Е.И. Юревич. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 100 с.
11. Климентьев К.Е. Системы реального времени: обзорный курс лекций / К.Е. Климентьев. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2008. – 45 с.
12. Каллер М.Я. Теоретические основы транспортной связи: учебник для вузов ж.-д. трансп. / М.Я. Каллер, А.Ф. Фомин. – М. : Транспорт, 1989. – 383 с.
13. Игнатов В.А. Теория информации и передачи сигналов: учебник для вузов / В.А. Игнатов. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1991. – 280 с.
14. Игнатов В.А. Теория информации и передачи сигналов: учебник для вузов / В. А. Игнатов. – М. : Сов. радио, 1979. – 280 с.
15. Кловский Д.Д. Теория электрической связи: сборник задач и упражнений / Д.Д. Кловский, В.А. Шилкин. – М. : Радио и связь, 1990. – 280 с.
16. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов / И.С. Гоноровский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.

17. Пенін П.І. Радіотехнічні системи передачі інформації: учеб. посібник для вузів / П.І. Пенін, Л.І. Філіпов. – М. : Радіо і зв'язь, 1984. – 256 с.
18. Зюко А.Г. Теорія електричної зв'язі: учебник для вузів / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловський, В.І. Коржик, М.В. Назаров; Под ред. Д.Д. Кловського. – М. : Радіо і зв'язь, 1999. – 432 с.
19. Ілюхін А.А. Радіотехнічні цепі і сигнали: збірник прикладів і задач з рішеннями / А.А. Ілюхін, М.М. Шемаханов. – М. : МГТУ ГА, 2001. – Ч. 1.
20. Чинаєв П.І. Висша математика. Спеціальні глави / П.І. Чинаєв, Н.А. Мінін, А.Ю. Перевозников, А.А. Черенков. – К. : Висш. шк., 1981. – 368 с.
21. Вайнштейн Л.А. Електромагнітні хвилі / Л.А. Вайнштейн. – М. : Радіо і зв'язь, 1988. – 440 с.
22. Баскаков І.С. Радіотехнічні цепі і сигнали / І.С. Баскаков. – М. : Висш. шк., 2005. – 462 с.
23. Росадо Л. Фізическа електроніка і мікроелектроніка / Л. Росадо. – М. : Висш. шк., 1991. – 351 с.
24. Дмитрів В.Т. Електроніка і мікросхемотехніка: навч. посібник / В.Т. Дмитрів, В.М. Шиманський. – Львів : Афіша, 2004. – 175 с.
25. Прищепа М.М. Мікроелектроніка: В 3 ч. Ч. 1: Елементи мікроелектроніки: навч. посібник / М.М. Прищепа, В.П. Погребняк. – К. : Вища шк., 2004. – 431 с.
26. Білінський Й.Й. Електронні системи: навч. посібник / Й.Й. Білінський, К.В. Огороднік, М.Й. Юкиш. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 208 с.
27. Топільський В.Б. Схемотехніка аналого-цифрових перетворювачів. учебное издание / В.Б. Топільський. – М. : Техносфера, 2014. – 288 с.
28. Жеребцов І.П. Основи електроніки / І.П. Жеребцов. – Спб. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
29. Бабич Н.П. Основи цифрової схемотехніки: учеб. посібник / Н.П. Бабич, І.А. Жуков. – М. : Издательский дом «Додэка-ХХІ», К. : МК-Пресс, 2007. – 480 с.
30. Баскаков С.І. Радіотехнічні цепі і сигнали: учебник для вузів / С.І. Баскаков. – М. : Высшая школа, 1988. – 320 с.
31. Бойко В.І. Основи технічної електроніки: У 2 кн. Кн.2 Схемотехніка: підручник / В.І. Бойко, А.М. Гурій, Жуйков В.Я. та ін. – К. : Вища школа, 2007. – 510 с.

32. Васюра А.С. Техніка передавання аналогової та дискретної інформації / А.С. Васюра. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 218 с.
33. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов / Л.М. Гольденберг. – М. : Радио и связь, 1990. – 256 с.
34. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации / В.И. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
35. Кловский Д.Д. Теория передачи сигналов в задачах / Д.Д. Кловский, В.А. Шилкин. – М. : Связь, 1978. – 186 с.
36. Кричевський Р.Е. Сжатие и поиск информации / Р.Е. Кричевський. М. : Радио и связь, 1989. – 168 с.
37. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / И.В. Кузьмин, В.А. Кедру. – К. Выс. шк., 2003. – 220 с.
38. Лукин А.А. Введение в цифровую обработку сигналов (Математические основы) / А.А. Лукин. – М. : МГУ, Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа, 2002. – 616 с.
39. Шувалова В.П. Передача дискретных сообщений: учебник для вузов / Под ред. В.П. Шувалова. – М. : Радио и связь, 1990. – 464 с.
40. Пухальский Г.И. Цифровые устройства: учеб. пособие для ВТУЗов / Г.И. Пухальский, Т.Я. Новосельцев. – Спб. : Политехника, 1996. – 885 с.
41. Рябенський В.М. Цифрова схемотехніка: навч. посібник / В.М. Рябенський, В.Я. Жуйков, В.Д. Гулий. – Львів : Новий світ-2000, 2009. – 736 с.
42. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 608 с.
43. Шувалова А.Н. Системы электросвязи / Под ред. А.Н. Шувалова. – М. : Радио и связь, 1987. – 416 с.
44. Фано Р. Передача информации. Статистическая теория связи / Р. Фано. – М. : Мир, 1965. – 438 с.
45. Хаїмзон І.Я. Техніка передачі інформації. Функціональні вузли та схеми. Частина II / І.Я. Хаїмзон. – Вінниця : ВДТУ, 2000. – 112 с.
46. Хемминг Р.В. Теория кодирования и теория информации / Р.В. Хемминг. – М. : Радио и связь, 1983. – 214 с.
47. Хуанг Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг и др. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.
48. Цымбал В.П. Задачник по теории информации и кодированию / В.П. Цымбал. – К. : Выс. шк., 1976. – 312 с.
49. Чэн Ш.-К. Принципы кодирования систем визуальной информации / Ш.-К. Чэн. – М. : Мир, 1994. – 408 с.

50. Шеннон К. Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М. : Иностранная литература, 1963. – С. 223–332.
51. Сумик Маркиян Основи теорії радіотехнічних систем: навч. посібник / Сумик Маркиян. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
52. Ткачук Василь Електромеханотроніка: підручник / Ткачук Василь. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
53. Еременко Ю.И. Электроника. Элементы технических средств информационных систем: учеб. пособие / Ю.И. Еременко, В.М. Писаренко, С.М. Штангей, А.А. Торба. – Старый Оскол: ООО "ТНТ" 2003. – 240 с.
54. Сиберт У.О. Цепи, сигналы, системы. Т.1,2 / У.О. Сиберт. – М.: Мир, 1988. – 336 с. и 360 с.
55. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации / В.И. Дмитриев. – М.: Выс. шк., 1989.
56. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус. – Киев: Выс. шк., 1986. – 430 с.
57. Бистров Ю.А. Электронные цепи и устройства / Ю.А. Бистров, И.Г. Мироненко. – М.: Высш. шк., 1989. – 287 с.
58. Лесовой Л.В. Електроніка та мікропроцесорна техніка. Частина 2. Лабораторний практикум: навч. посібник / Л.В. Лесовой. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 268 с.
59. КНМЗ з дисципліни "Електронні системи. Методичні вказівки до лабораторних занять для студентів всіх форм навчання за напрямом 6.0908 "Електроніка" / Разроб. О.В. Глухов. – Харків: НУРЕ, 2017. – 279 с.

Навчальне видання

БОНДАРЕНКО Ігор Миколайович

ГЛУХОВ Олег Вікторович

КРАВЧУК Ольга Олександрівна

ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

Навчальний посібник

Відповідальний випусковий

І.М. Бондаренко

Редактор

Б.П. Косіковська

Комп'ютерна верстка

Л.Д. Медведєва

План 2019 (перше півріччя), поз. 1

Підп. до друку 26.06.2019	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 14,0.	Облік. вид. арк. 13,7.	Тираж 50 прим.
Зам. № 1-1.	Ціна договірна.	

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Науки, 14

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ
Харків, просп. Науки 14