

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

АКПМ - 50.00.00.000 ПЗ

гр. АКПМ-24-2

Назарій ПАНЬКІВ

2025 рік

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Паньків Назарій Мирославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681. 5

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення мікропроцесорної системи контролю та керування

(назва роботи)

параметрами газороздільного процесу

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та роботехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Н.М.Паньків

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доц., к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

В.С.Борин

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент-опонент

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

М.В.Шавранський

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ - 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« » 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Паньківу Назарію Мирославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення мікропроцесорної системи контролю та керування параметрами газороздільного процесу

керівник роботи доцент, к.т.н. Борин Василь Степанович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Літературні джерела, матеріали переддипломної практики, технологічний регламент

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз побудови сучасних мікропроцесорних систем в газокомпресорних агрегатах. 2. Науковий аналіз напрямків проектування мікропроцесорних систем збору. 3. Автоматизована система контролю технологічних параметрів ГПА. 4. Проектування мікропроцесорної системи обробки технологічної інформації ГПА. Загальні висновки. Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	15.03 2025	
2.	Аналіз побудови сучасних мікропроцесорних систем в газокompресорних агрегатах	01.04 2025	
3.	Науковий аналіз напрямків проектування мікропроцесорних систем збору технологічної інформації	15.06.2025	
4.	Автоматизована система контролю технологічних параметрів ГПА	30.09.2025	
5	Проектування мікропроцесорної системи обробки технологічної інформації ГПА	30.11.2025	

Студент

_____ (підпис)

Паньків Н.М.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Борин В.С.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена розробленню мікропроцесорної системи контролю та керування параметрами газороздільного процесу, що є ключовою ланкою у підвищенні ефективності, енергоощадності та надійності сучасних технологічних комплексів газопереробної промисловості. У роботі проаналізовано особливості функціонування газороздільних установок, визначено критичні технологічні параметри, від яких залежить стабільність процесу, зокрема тиск, температура, витрати компонентів та показники фазового розділення. На основі цих даних сформовано вимоги до автоматизованої системи керування та алгоритмів її роботи.

Запропонована мікропроцесорна система побудована на базі сучасного високопродуктивного обчислювального модуля з розвиненими комунікаційними інтерфейсами, що забезпечує швидкодію, точність вимірювань і можливість інтеграції з усталеними SCADA-та DCS-системами підприємства. У роботі розроблено структурну та функціональну схеми системи, обрано датчики та виконавчі пристрої, а також реалізовано програмне забезпечення для обробки інформаційних сигналів, формування керувальних впливів і виконання алгоритмів адаптивного регулювання.

Проведене моделювання підтвердило працездатність запропонованого технічного рішення, підвищення швидкодії регулювання та зменшення відхилень контрольованих параметрів від оптимальних значень. Результати роботи демонструють, що впровадження мікропроцесорної системи керування дає змогу поліпшити технологічні показники, мінімізувати ризики аварійних ситуацій і забезпечити високий рівень автоматизації газороздільних процесів.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, КОНТРОЛЬ, СТРУКТУРА, УСТАНОВКА, ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИЙ АГРЕГАТ

ANNOTATION

The master's thesis is devoted to the development of a microprocessor system for monitoring and controlling the parameters of the gas separation process, which is a key link in increasing the efficiency, energy efficiency and reliability of modern technological complexes of the gas processing industry. The paper analyzes the features of the functioning of gas separation plants, identifies critical technological parameters on which the stability of the process depends, in particular, pressure, temperature, component consumption, and phase separation indicators. Based on this data, requirements for the automated control system and its operating algorithms were formed.

The proposed microprocessor system is built on the basis of a modern high-performance computing module with advanced communication interfaces, which ensures speed, measurement accuracy, and the ability to integrate with established SCADA and DCS systems of the enterprise. The work developed a structural and functional diagram of the system, selected sensors and actuators, and implemented software for processing information signals, forming control influences, and executing adaptive control algorithms.

The simulation confirmed the operability of the proposed technical solution, increased regulation speed, and reduced deviations of controlled parameters from optimal values. The results of the work demonstrate that the implementation of a microprocessor control system makes it possible to improve technological performance, minimize the risks of emergency situations, and ensure a high level of automation of gas separation processes.

Keywords: AUTOMATION, INFORMATION SYSTEM, CONTROL, STRUCTURE, INSTALLATION, GAS PUMPING UNIT

ЗМІСТ

	ст.
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОБУДОВИ СУЧАСНИХ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ В ГАЗОКОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТАХ	13
1.1 Основні принципи побудови мікропроцесорних систем	13
1.2 Типи контролерів.....	16
1.3 Аналогово-цифрові перетворювачі	19
Висновки до розділу 1.....	33
РОЗДІЛ 2. НАУКОВИЙ АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ ЗБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	34
2.1 Мікропроцесорна система збору ГПА на станції “Гребенівська”	34
2.2 Опис роботи КМУВ за функціональною схемою й алгоритму функціонування	39
2.3 Пристрій вилученого збору даних і керуванням ADAM-4000.....	40
2.4 Інтерфейс зв'язку ЕОМ з об'єктом	44
Висновки до розділу 2.....	45
РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГПА	47
3.1 Модель об'єкта контролю	47
3.2. Загальне формулювання задачі контролю	49
3.3 Вибір контрольованих величин	51
3.4 Алгоритмічна структура, системи контролю.....	53
3.5 Визначення частоти опитування датчиків.....	58
Висновки до розділу 3.....	65

РОЗДІЛ 4. ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ

ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ГПА	66
4.1 Розробка системи обробки технологічної інформації.....	66
4.2 Розробка функціональної і принципової електричних схем мікроконтролера	67
4.3 Розробка програмного забезпечення.....	72
Висновки до розділу 4.....	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічними процесами

БД – база даних

ІТП – інженерно-технічний працівник

КВП – контрольовано-вимірювальний пристрій

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій

ПЛК - програмований логічний контролер

СУ – система управління

ПД – пропорційний інтегрально-диференціальний закон регулювання

КС – компресорна станція

ГПА – газоперекачуючий агрегат

ГТУ – газотурбінна установка

ККД – коефіцієнт корисної дії

КПГ – клапан пускового газу

РК – регулюючий клапан

СК – стопорний клапан

КНТ – компресор низького тиску

КВТ – компресор високого тиску

ТНТ – турбіна низького тиску

ТВТ – турбіна високого тиску

ТН – турбіна нагнітача

ПАРР – початкова автоматична робота регулятора

АПК – антипомпажний клапан

ПОП – повітроочисний пристрій

САК – система автоматичного керування

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна газопереробна та газотранспортна промисловість характеризується високими вимогами до стабільності, точності та безпеки технологічних процесів. Газороздільні установки, що забезпечують поділ багатокомпонентних газових потоків, є критично важливими елементами технологічних комплексів, адже від якості та швидкодії їх роботи залежать енергетична ефективність, економічні показники та надійність систем транспортування й підготовки газу. Традиційні системи контролю й регулювання, особливо побудовані на застарілій елементній базі, часто не забезпечують необхідної точності вимірювань, швидкості реакції на зміни технологічних параметрів та стійкості до зовнішніх завад і дестабілізуючих факторів.

У цих умовах особливої актуальності набуває розроблення мікропроцесорних систем нового покоління, здатних забезпечувати комплексний контроль параметрів газороздільного процесу, ефективно обробляти великі обсяги даних у реальному часі та реалізовувати адаптивні алгоритми керування. Використання сучасних мікроконтролерів і вбудованих обчислювальних модулів дозволяє суттєво підвищити точність регулювання, мінімізувати похибки вимірювань, оптимізувати режими роботи обладнання та своєчасно реагувати на зміни технологічного середовища.

Актуальність теми також зумовлена потребою у підвищенні промислової безпеки. Газороздільні процеси є потенційно небезпечними через можливість різкого зростання тиску, відхилення температурних режимів або зміни складу газової суміші. Мікропроцесорні системи дають змогу реалізувати багаторівневий моніторинг, швидке виявлення аварійних ситуацій і запобігання негативним наслідкам за рахунок автоматизованого переходу в безпечний режим.

Таким чином, створення ефективної мікропроцесорної системи контролю та керування параметрами газороздільного процесу є важливою науково-технічною

задачею, що відповідає сучасним тенденціям цифровізації промисловості та сприяє підвищенню технологічної надійності й енергоефективності виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана магістерська робота виконувалась автором відповідно до основного наукового напрямку діяльності кафедри «Автоматизації та комп'ютерно - інтегрованих технологій» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР №011U005890) та комплексної цільової програми «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР №0115U007099). Автор був виконавцем розділу, що стосується створення мікропроцесорних систем обробки технологічної інформації газороздільних систем.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення високоефективної мікропроцесорної системи контролю та керування параметрами газороздільного процесу, яка забезпечуватиме підвищення точності вимірювань, стабільність технологічних режимів, швидкодію регулювання та безпечну роботу газороздільного обладнання за рахунок впровадження сучасних алгоритмів і засобів автоматизації.

Завдання дослідження:

- проаналізувати особливості газороздільного процесу, визначити ключові технологічні параметри, що впливають на ефективність і стабільність роботи установки.;
- дослідити існуючі системи автоматичного контролю та керування газороздільними процесами, оцінити їхні переваги, недоліки та обмеження;
- обґрунтувати вимоги до мікропроцесорної системи, включно з вибором апаратної платформи, датчиків, виконавчих механізмів та комунікаційних інтерфейсів;

- розробити структурну та функціональну схему мікропроцесорної системи, що забезпечуватиме комплексний моніторинг та автоматизоване регулювання параметрів газороздільного процесу;
- виконати аналіз ефективності запропонованого технічного рішення та обґрунтувати перспективи його впровадження у промислові умови..

Об'єктом дослідження є процес перекачування газу в компресорному цеху, а також управління магістральних газопроводів.

Предметом дослідження є мікропроцесорні системи обробки технологічної інформації з ГПА (газокомпресорного агрегату)..

Методи дослідження. Методом дослідження є розробка контролера збору 16 аналогових сигналів напруги від датчиків (стандартний діапазон +/-10В). Розглянути недоліки мікропроцесорної системи обробки технологічної інформації газорозподільних систем, дослідити можливі варіанти вирішення проблем. Розробити сучасне програмне забезпечення яке б змогло забезпечити бажані характеристики програми..

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано комплексний підхід до створення мікропроцесорної системи керування газороздільним процесом, що поєднує багатоканальний збір даних, адаптивні алгоритми регулювання та інтелектуальні методи оцінювання стану технологічного обладнання в єдиному керувальному модулі..

2. Розроблено удосконалену модель інформаційної взаємодії між сенсорними модулями та мікропроцесорним контролером, яка забезпечує підвищення точності вимірювань і зменшення впливу завад завдяки використанню комбінованих методів фільтрації та цифрової корекції сигналів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження мають важливе прикладне значення для підвищення ефективності та надійності функціонування газороздільних установок. Розроблена мікропроцесорна система контролю та керування може бути використана як основа для модернізації

існуючих систем автоматизації на підприємствах газопереробної, газотранспортної та нафтохімічної промисловості. Запропоновані технічні рішення забезпечують суттєве підвищення точності вимірювань технологічних параметрів, зменшення похибок, а також покращення стабільності підтримання режимів розділення газових сумішей.

Упровадження системи дозволяє оптимізувати роботу обладнання, знизити енерговитрати, збільшити продуктивність та скоротити експлуатаційні витрати завдяки впровадженню адаптивних алгоритмів керування та засобів інтелектуальної діагностики. Розроблене програмне забезпечення може бути інтегроване у більші автоматизовані комплекси, включно з SCADA- та DCS-системами, що забезпечує сумісність з сучасними промисловими стандартами та підвищує універсальність застосування.

Суттєвим практичним результатом є впровадження модулів самодіагностики та прогнозування відхилень у роботі технологічного обладнання, що дозволяє завчасно виявляти потенційно небезпечні ситуації та запобігати аварійним режимам. Це підвищує рівень промислової безпеки, зменшує ймовірність простоїв та підвищує надійність роботи газороздільних установок.

Отримані результати можуть бути використані у навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, а також як основа для подальших наукових досліджень у сфері мікропроцесорних систем і цифровізації технологічних процесів.

Особистий внесок. Всі наукові результати та положення магістерської роботи, які виносяться на захист, одержані автором на основі результатів аналізу літературних джерел і власних досліджень.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати роботи доповідались і одержали позитивну оцінку на міжнародній конференції. Borun V.S., Pankiv N.M. Development of a microprocessor-based system for control and management of gas separation process parameters. Modern aspects of modernization of science: status, problems, development trends. Materials of the 63th International

Scientific and Practical Conference. December 7, 2025, Olomouc (Czech Republic). Pp. 232-235. DOI: <https://doi.org/10.52058/63>

Публікації. Основні результати магістерської роботи викладено у 1 публікації (тези міжнародної конференції).

Структура і обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Обсяг роботи 81 сторінок машинописного тексту.

Магістерська робота містить 20 рисунків, 6 таблиць, список використаних літературних джерел із 26 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПОБУДОВИ СУЧАСНИХ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ В ГАЗОКОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТАХ

1.1 Основні принципи побудови мікропроцесорних систем

Перш ніж починати детальне проектування програмних і апаратних засобів, необхідно визначити, які функції краще виконуються за допомогою програмного забезпечення мікропроцесора, а які- за допомогою апаратних засобів. Усі функції попередньо повинні бути розподілені між програмними й апаратними засобами. Бажано, щоб з цього моменту в структуру проекту не вносилися ніякі зміни, хоча на практиці це рідко вдається. Під час детального проектування апаратних і програмних засобів часто стає очевидним, що деякі апаратні функції можуть бути краще виконані за допомогою програмних засобів і навпаки. Таким чином, під час наступних стадій процесу проектування може мати місце модифікації попереднього проектного рішення.

Типова ЕОМ (рис.1.1) містить об'єднані загальною внутрішньою магістраллю процесор, пам'ять, контролери й адаптер магістралей. Продовженням внутрішньої магістралі є зовнішня магістраль, до якої в даному прикладі підключений контролер, зв'язаний з деяким об'єктом керування. Як пристрої вводу-виводу можуть, наприклад, використовуватися: графічний дисплей, накопичувач на гнучких магнітних дисках і друкувальний пристрій.

Центральною ланкою ЕОМ є пара процесор-пам'ять, інші елементи забезпечують зв'язок із зовнішнім світом. Контролер призначений для сполучення одного чи декількох пристроїв вводу-виводу з зовнішньою чи внутрішньою магістраллю ЕОМ.

Магістраль реалізується у виді набору чи проводів друкованих провідників, по яких за допомогою приймально-передавальних елементів передаються різного роду сигнали.

Адаптер магістралей виконує функцію їхнього електричного і, можливо, логічного сполучення. У найпростішому випадку він «прозорий» по обидва боки і виконує лише функцію електричного перетворення рівнів сигналів.

Пам'ять звичайно містить постійне й оперативне запам'ятовуючі пристрої(ПЗП й ОЗП).Можливе використання перепрограмувальних постійних запам'ятовуючих пристроїв (ПЗПУ). У пам'яті ЕОМ тримається два види інформації-команди і дані, причому з точки зору пам'яті ці види інформації не відрізняються. Про тім, де знаходяться дані, а де-команди, знає тільки процесор.

Процесор здатний обмінюватися інформацією з об'єктами за його границями тільки в тому випадку, якщо ці об'єкти мають адреси. Такі об'єкти називають адресованими чи програмно-доступними. Це код, що однозначно визначає той чи інший елемент усередині чи поза ЕОМ: комірку пам'яті, регістр, тригер, вхід логічного елемента і т.п.

Елементарний цикл роботи ЕОМ складається з двох етапів: процесор витягає з пам'яті код, що він розглядає як команду; потім він виконує команду і готується до вибору наступної команди. Такі цикли повторюються незалежно від змісту виконуваної задачі. З їхньої послідовності складається машинний час ЕОМ. Тому можна затверджувати, що процесор уміє виконувати тільки дві дії: вибирати команди з пам'яті і виконувати їх.

Список команд процесора нараховує звичайно порядку ста команд. У цей список, зокрема, входять:

1. Безадресні команди, чи команди типу регістр-регістр. При виконанні таких команд дія робиться над вмістом одного чи двох внутрішніх регістрів процесора, результат відразу залишається в одному з регістрів. Виконання цієї команди не зв'язано зі звертанням за границі процесора.

2. Адресні команди, чи команди типу регістр-пам'ять. Вони наказують процесору робити дію з вмістом зазначеної в команді комірки пам'яті. Виконання цієї команди зв'язано з витягом з «зовнішнього світу» операнду для обробки.

Функціональна схема ЕОМ, приведена на рис. 1.1, не є єдино можливою.

Можна уявити собі більш складні структури з декількома внутрішніми і зовнішніми магістралями, з декількома процесорами, із багатовхідною пам'яттю і т.д. Усі ці структури є в більшому чи меншому ступені спеціалізованими, тобто, що відображають особливості типової розв'язуваної задачі. Тут діє простий принцип: чим ближче апаратна структура пристрою до алгоритмічної структури розв'язуваної задачі, тим краще.

Однак, перш ніж зробити перший крок на шляху до спеціалізації стандартних мікропроцесорних пристроїв, потрібно добре зважити усі *за* і *проти*, оскільки це є великим кроком назад: адже сама поява в 70-х роках універсальних ЕОМ обумовлено в першу чергу прагненням до уніфікації і здешевлення апаратури. Іншими словами, на цьому етапі проектування ми повинні відповісти на запитання: чи не можна використовувати для рішення задачі стандартні мікропроцесорні засоби?



Рис.1.1. Функціональна структура типової ЕОМ

1.2 Типи контролерів

На рис.1.2 показана типова схема зв'язку ЕОМ з об'єктом. Таким об'єктом може бути стандартний пристрій вводу-виводу (дисплей, накопичувач на магнітних дисках і т.д.) чи нестандартне (система датчиків і виконавчих органів технологічної установки, цехова система збору інформації з робочих місць і т.д.).

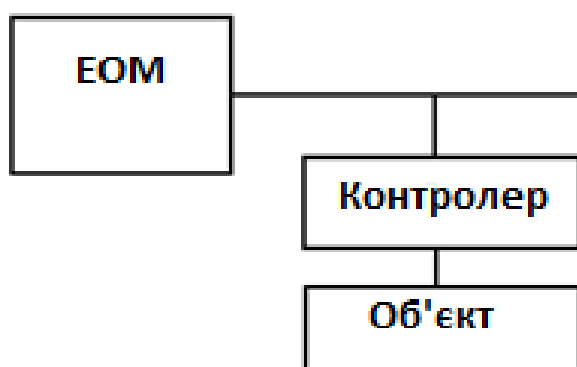


Рис. 1.2. Типова схема зв'язку ЕОМ з об'єктом

Можливості обміну процесора ЕОМ із контролером вичерпуються усього лише трьома режимами: режимом читання інформації з програмно-доступних елементів контролера (регістрів, тригерів) як з комірок пам'яті; режимом запису інформації в програмно-доступні елементи контролера як у комірки пам'яті; режимом переривання основної (фонові) програми по сигналу з контролера з переходом на підпрограму обслуговування даного контролера. (Процесор вмie читати, писати і перериватися, тільки і всього!). Цей факт у значній мірі спрощує підхід до проектування контролерів.



Рис. 1.3. Класифікація контролерів

На рис.1.3 приведена класифікація контролерів. Синхронний обмін використовується рідко і тільки для процесів, строго фіксованих у часі і цілком визначених. Зовнішній пристрій повинний бути готовий для здійснення обміну. Програма роботи ЕОМ при синхронному обміні проста і зрозуміла (рис.1.4,а). Прикладами пристроїв, з якими може здійснюватися синхронний обмін, є: обмотка реле, датчик випадкових чисел на неоновій лампочці й інші завжди готові пристрої, в основному з низьким інтелектом.

Асинхронний обмін (рис.1.4,б) використовується дуже часто. Він здійснюється під керуванням програми, але лише в тому випадку, коли зовнішній пристрій знаходиться в стані готовності. Команда перевірки готовності використовується для введення в ЕОМ інформації про стан зовнішнього пристрою. Потім процесор робить аналіз стану і приймає рішення. Якщо пристрій не готовий, то процесор повертається до команди перевірки готовності і т.д. Коли пристрій перейде в стан готовності, процесор приступає до обміну. Основним недоліком асинхронного обміну є втрати часу на чекання того моменту, коли пристрій виявиться готовим до обміну.

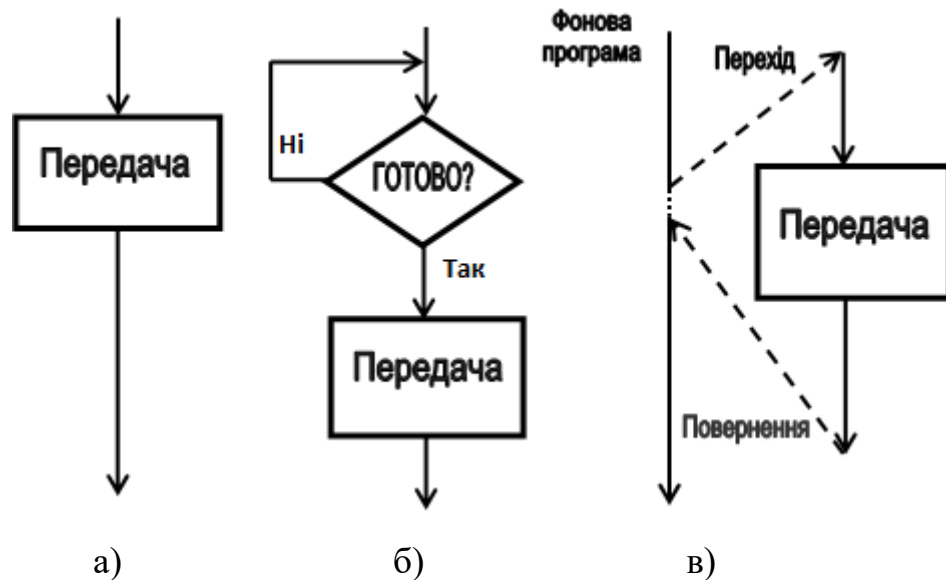


Рис. 1.4. Алгоритми роботи контролерів

Обмін по перериванню дозволяє більш ефективно використовувати машинний час. Обмін у цьому випадку здійснюється під керуванням програми, але ЕОМ багаторазово не перевіряє готовність зовнішнього пристрою до моменту її встановлення. ЕОМ може виконувати роботу, не зв'язану з даним обміном (фонову програму). Коли зовнішній пристрій готовий для обміну, вона формує сигнал переривання, що викликає припинення фонові програми і перехід до виконання підпрограми обробки переривання. Ці дії схематично показані на рис.1.4,в. Після виконання підпрограми керування знову передається фоновій програмі.

Канал прямого доступу являє собою інтелектуальний пристрій, здатний самостійно, без допомоги центрального процесора вводити інформацію в пам'ять ЕОМ чи виводити її з пам'яті. Центральний процесор може брати участь лише в постановці задачі каналу. Після видачі завдання він уже не приймає участі в передачі і, якщо є така можливість, продовжує роботу з власної програми. Канал прямого доступу по закінченні передачі масиву йому сигналу переривання.

Як правило, на пристрої зв'язку з об'єктом покладаються наступні функції:

1) Нормалізація аналогового сигналу -приведення границь шкали первинного безупинного сигналу до одного зі стандартних діапазонів вхідного

сигналу АЦП вимірювального каналу. Найбільш поширені наступні діапазони: від 0 до 5 В; від -5 до 5 В; від 0 до 10 В.

2) Попередня низькочастотна фільтрація аналогового сигнал-обмеження смуги частот первинного безупинного сигналу з метою зниження впливу на результат виміру перешкод різного походження. На промислових об'єктах найбільш поширені перешкоди з частотою мережі перемінного струму, а також хаотичної імпульсної перешкоди, викликані впливом на технічні засоби вимірювального каналу перехідних процесів і наведень при комутації виконавчих механізмів підвищеної потужності.

3) Забезпечення гальванічної ізоляції між джерелом аналогового чи дискретного сигналу і вимірювальним і/чи статусним каналами системи. В однаковій мірі це відноситься до ізоляції між каналами дискретного висновку системи і керованим силовим устаткуванням. Крім власне захисту вихідних і вхідних ланцюгів гальванічна ізоляція дозволяє знизити вплив на систему перешкод по ланцюгах заземлення за рахунок повного поділу Загального обчислювальної системи і контрольованого устаткування. Відсутність гальванічної ізоляції допускається тільки в технічно обґрунтованих випадках.

Крім перерахованих функцій, ряд пристроїв зв'язку з об'єктом може виконувати більш складні задачі за рахунок наявності в їхньому складі підсистеми аналого-цифрового перетворення і дискретного введення-висновку, мікропроцесора і засобів організації одного з інтерфейсів послідовної передачі даних.

1.3 Аналого-цифрові перетворювачі

По своїй структурі схеми АЦП поділяються на два типи: схеми, що містять цифроаналоговий перетворювач, і схеми, що не містять ЦАП.

АЦП багатотактного інтегрування

Спрощена схема АЦП, що працює в два основних такти (АЦП двотактного інтегрування).

Перетворення проходить двох стадій: стадію інтегрування і стадію рахунка. На початку першої стадії ключ S_1 замкнутий, а ключ S_2 розімкнутий. Інтегратор І інтегрує вхідну напругу $U_{вх}$. Час інтегрування вхідної напруги t_1 постійний; як таймер використовується лічильник з коефіцієнтом перерахування $K_{сч}$, так що

До моменту закінчення інтегрування вихідна напруга інтегратора складає

Стадія рахунка закінчується, коли вихідна напруга інтегратора переходить через нуль. При цьому компаратор К переключується і рахунок зупиняється. Інтервал часу, у якому проходить стадія рахунка, визначається рівнянням

Необхідно тільки зажадати, щоб тактова частота протягом часу t_1+t_2 залишалася постійною. Це можна забезпечити при використанні простого тактового генератора, оскільки істотні тимчасові чи температурні дрейфи частоти відбуваються за час непорівнянне більше, ніж час перетворення.

АЦП послідовного наближення

Перетворювач цього типу, називаний у літературі також АЦП із порозрядним *зрівноважуванням*, є найбільш розповсюдженим варіантом послідовних АЦП.

В основі роботи цього класу перетворювачів лежить принцип *дихотомії*, т.т послідовного порівняння вимірюваної величини з $1/2$, $1/4$, $1/8$ і т.д. від можливого максимального значення її. Це дозволяє для N-розрядного АЦП послідовного наближення виконати весь процес перетворення за N послідовних кроків (ітерацій) замість 2^N-1 при використанні послідовного рахунка й одержати істотний вигравш у швидкодії. Так, уже при $N=10$ цей вигравш досягає 100 разів і дозволяє одержати за допомогою таких АЦП до $10^5 \dots 10^6$ перетворень у секунду. У той же час статична погрішність цього типу перетворювачів, обумовлена в основному використанням у ньому ЦАП, може бути дуже малою, що дозволяє реалізувати

здатність, що дозволяє, до 18 розрядів при частоті вибірок до 200 кГц (наприклад, DSP101 фірми Burr-Brown).

Розглянемо принципи побудови і роботи АЦП послідовного наближення на прикладі класичної структури 4-розрядного перетворювача, що складає з трьох основних вузлів: компаратора, регістра послідовного наближення (РПН) і ЦАП.

Після подачі команди "Пуск" із приходом першого тактового імпульсу РПН примусово задає на вхід ЦАП код, дорівнює половині його шкали (для 4-розрядного ЦАП це $1000_2=8_{10}$). Завдяки цьому напруга U_{oc} на виході ЦАП

$$U_{oc}=2^3h.$$

де h - квант вихідної напруги ЦАП, що відповідає одиниці молодшого розряду (ОМР). Ця величина складає половину можливого діапазону перетворених сигналів. Якщо вхідна напруга більше, ніж ця величина, то на виході компаратора встановлюється 1, якщо менше, то 0. У цьому останньому випадку схема керування повинна переключити старший розряд d_3 назад у стан нуля. Безпосередньо слідом за цим залишок у такий же спосіб порівнюється з найближчим молодшим розрядом і т.д.

$$U_{вх} - d_3 2^3 h$$

Після чотирьох подібних кроків, що вирівнюють, у регістрі послідовного наближення виявляється двоїчне число, з якого після цифро-аналогового перетворення виходить напруга, що відповідає $U_{вх}$ із точністю до 1 ОМР. Вихідне число може бути лічене з РПН у виді рівнобіжного двоїчного коду по N лініях. Крім того, у процесі перетворення на виході компаратора, як це видно з мал. 9б, формується вихідне число у виді послідовного коду старшими розрядами вперед.

Швидкодія АЦП даного типу визначається сумою часу встановлення $t_{уст}$ ЦАП до сталого значення з погрішністю, що не перевищує 0,5 ЕМР, часу переключення компаратора t_k і затримки поширення сигналу в регістрі послідовного наближення t_3 . Сума $t_k + t_3$ є величиною постійної, а $t_{уст}$ зменшується зі зменшенням ваги розряду. Отже для визначення молодших розрядів може бути використана більш висока тактова частота. При поразрядній варіації $f_{такт}$ можливе

зменшення часу перетворення $t_{пр}$ на 40%. Для цього до складу АЦП може бути включений контролер.

При роботі без пристрою вибрання-збереження (ПВЗ) апертурний час дорівнює часу між початком і фактичним закінченням перетворення, що так само, як і в АЦП послідовного рахунка, по суті залежить від вхідного сигналу, тобто є перемінним. Виникаючи при цьому апертурні погрішності носять також нелінійний характер. Тому для ефективного використання АЦП послідовного наближення, між його входом і джерелом перетвореного сигналу варто включати ПВЗ. Більшість, що випускаються в дійсний час ІМС АЦП послідовного наближення (наприклад, 12-розрядний MAX191, 16-розрядний AD7882 і ін.), має вбудовані пристрої чи збереження, частіше, пристрої спостереження-збереження (track-hold), керовані сигналом запуску АЦП. Пристрій спостереження-збереження відрізняється тим, що постійно знаходиться в режимі вибірки, переходячи в режим збереження тільки на час перетворення сигналу.

Даний клас АЦП займає проміжне положення по швидкодії, вартості і здатності, що дозволяє, між послідовно-рівнобіжними й інтегруючими АЦП і знаходить широке застосування в системах керування, контролю і цифрової обробки сигналів.

Сіigma-дельта АЦП

АЦП багатотактного інтегрування мають ряд недоліків. По-перше, нелінійність перехідної статичної характеристики операційного підсилювача, на якому виконують інтегратор, помітним образом позначається на інтегральній нелінійності характеристики перетворення АЦП високого дозволу. Для зменшення впливу цього фактора АЦП виготовляють багатотактними. Наприклад, 13-розрядний AD7550 виконує перетворення в чотири такти. Іншим недоліком цих АЦП є та обставина, що інтегрування вхідного сигналу займає в циклі перетворення тільки приблизно третю частину. Дві третини циклу перетворювач не приймає вхідний сигнал. Це погіршує перешкодоподавляючі властивості інтегруючого АЦП. По-третє, АЦП багатотактного інтегрування повинний бути

постачений досить великою кількістю зовнішніх резисторів і конденсаторів з високоякісним діелектриком, що значно збільшує місце, займане перетворювачем на платі і, як наслідок, підсилює вплив перешкод.

Ці недоліки багато в чому усунуті в конструкції сігма-дельта АЦП (у ранній літературі ці перетворювачі називалися АЦП із чи зрівноважуванням балансом зарядів). Своєю назвою ці перетворювачі зобов'язані наявністю в них двох блоків: суматора (позначення операції $-\Sigma$) і інтегратора (позначення операції $-\Delta$). Один із принципів, закладених у такого роду перетворювачах, що дозволяє зменшити погрішність, внесену шумами, а отже збільшити здатність, що дозволяє - це усереднення результатів виміру на великому інтервалі часу.

Основні вузли АЦП - це сігма-дельта модулятор і цифровий фільтр. Схема n -розрядного сігма-дельта модулятора першого порядку приведена на рис.1.8. Робота цієї схеми заснована на вирахуванні з вхідного сигналу $U_{вх}(t)$ величини сигналу на виході ЦАП, отриманої на попередньому такті роботи схеми. Отримана різниця інтегрується, а потім перетворюється в код рівнобіжним АЦП невисокої розрядності. Послідовність кодів надходить на цифровий фільтр нижніх частот.

Порядок модулятора визначається чисельністю інтеграторів і суматорів у його схемі. Сігма-дельта модулятори N -го порядку містять N суматорів і N інтеграторів і забезпечують більше співвідношення сигнал/шум при тій же частоті відрахунків, чим модулятори першого порядку. Прикладами сігма-дельта модуляторів високого порядку є одноканальний AD7720 сьомого порядку і двохканальний ADMOD79 п'ятого порядку.

Найбільше широко в складі ІМС використовуються однобітнісігма-дельта модулятори, у яких у якості АЦП використовується компаратор, а в якості ЦАП - аналоговий комутатор. Принцип дії пояснений у табл.1.1 на прикладі перетворення вхідного сигналу, рівного 0,6 В, при $U_{оп}=1$ В. Нехай постійна часу інтегрування інтегратора чисельно дорівнює періоду тактових імпульсів. У нульовому періоді вихідна напруга інтегратора скидається в нуль. На виході ЦАП також

установлюється нульова напруга. Потім схема проходить через показану в табл. 1.1 послідовність станів.

У тактові періоди 2 і 7 стани системи ідентичні, тому що при незмінному вхідному сигналі $U_{вх}=0,6$ В цикл роботи займає п'ять тактових періодів. Усереднення вихідного сигналу ЦАП за цикл дійсно дає величину напруги 0,6В:

$$(1-1+1+1+1)/5=0,6.$$

Таблиця 1.1

Такти сігма-дельта АЦП

$U_{вх}=0,6$ В					$U_{вх}=0$ В				
N такту	U_{\square} , У	$U_{и}$, У	$U_{к}$, біт	$U_{ЦАП}$, У	N такту	U_{\square} , У	$U_{и}$, У	$U_{к}$, біт	$U_{ЦАП}$, У
1	0,6	0,6	1	1	1	1	1	1	1
2	-0,4	0,2	1	1	2	-1	0	0	-1
3	-0,4	-0,2	0	-1	3	1	1	1	1
4	1,6	1,4	1	1	4	-1	0	0	-1
5	-0,4	1,0	1	1	5	1	1	1	1
6	-0,4	0,6	1	1	6	-1	0	0	-1
7	-0,4	0,2	1	1	7	1	1	1	1
8	-0,4	-0,2	0	-1	8	-1	0	0	-1
9	1,6	1,4	1	1	9	1	1	1	1
10	-0,4	1,0	1	1	10	-1	0	0	-1
11	-0,4	0,6	1	1	11	1	1	1	1
12	-0,4	0,2	1	1	12	-1	0	0	-1
13	-0,4	-0,2	0	-1	13	1	1	1	1
14	1,6	1,4	1	1	14	-1	0	0	-1
15	-0,4	1,0	1	1	15	1	1	1	1
16	-0,4	0,6	1	1	16	-1	0	0	-1

Для формування вихідного коду такого перетворювача необхідно яким-небудь образом перетворити послідовність біт на виході компаратора у виді унітарного коду в послідовний чи рівнобіжний двоїчний позиційний код. У найпростішому випадку це можна зробити за допомогою двоїчного лічильника. Візьмемо в нашому прикладі 4-розрядний лічильник. Підрахунок біт на виході компаратора за 16-ти тактний цикл дає число 13. Нескладно побачити, що при $U_{вх}=1$ В на виході компаратора завжди буде одиниця, що дає за цикл число 16,

тобто переповнення лічильника. Навпроти, при $U_{\text{вх}}=-1$ В на виході компаратора завжди буде нуль, що дає рівне нулю вміст лічильника наприкінці циклу. У випадку, якщо $U_{\text{вх}}=0$ те, як це видно з табл. 1.1, результат рахунка за цикл складе 8_{10} чи 1000_2 . Це значить, що вихідне число АЦП представляється в зміщеному коді. У розглянутому прикладі верхня границя повної шкали складе 1111_2 чи $+7_{10}$, а нижня - 0000_2 чи -8_{10} . При $U_{\text{вх}}=0,6$ В, як це видно з лівої половини табл. 2, вміст лічильника складе 1310 у зміщеному коді, що відповідає $+5$. З огляду на, що $+8$ відповідає $U_{\text{вх}}=1$ В, знайдемо

$$5 \cdot 1/8 = 0,625 > 0,6 \text{ В.}$$

При використанні двоїчного лічильника як перетворювач потоку бітів, що надходять з виходу компаратора, необхідно виділяти фіксований цикл перетворення, тривалість якого дорівнює добутку $K_{\text{сч}} \cdot f_{\text{такт}}$. Після його закінчення повинне вироблятися зчитування результату, наприклад, за допомогою реєстра-засувки й обнуління лічильника. У цьому випадку з погляду перешкодозахисних властивостей сігма-дельта АЦП близькі до АЦП багатотактного інтегрування. Більш ефективно з цього погляду застосування в сігма-дельта АЦП цифрових фільтрів з кінцевою тривалістю перехідних процесів.

У сігма-дельта АЦП звичайно застосовуються цифрові фільтри з амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) виду $(\sin x/x)^3$. Передатна функція такого фільтра в z -області визначається вираженням

$$W(z) = \left[\frac{1 - z^{-M}}{M(1 - z^{-1})} \right]^3, \quad (1.6)$$

де M - ціле число, що задається програмно і дорівнює відношенню тактової частоти модулятора до частоти відрахунків фільтра. (Частота відрахунків - це частота, з яким обновляються дані). Наприклад, для АЦП AD7714 це число може приймати значення від 19 до 4000. У частотній області модуль передатної функції фільтра]

$$H(f) = \left[\frac{\sin(M\pi f / f_{\text{макс}})}{M \sin(\pi f / f_{\text{макс}})} \right]^3. \quad (1.7)$$

В додатку В приведений графік амплітудно-частотної характеристики цифрового фільтра, побудованої відповідно до вираження (2.10) при $f_{\text{такт}}=38,4$ кГц і $M=192$, що дає значення частоти відрахунків, що збігає з першою частотою режекції фільтра АЦП, $f_{\text{отсч}}=50$ Гц. Порівняння цієї АЧХ з АЧХ коефіцієнта придушення перешкод АЦП із двохкратним інтегруванням показує значно кращі перешкодозахисні властивості сігма-дельта АЦП.

У той же час застосування цифрового фільтра нижніх частот у складі сігма-дельта АЦП замість лічильника викликає перехідні процеси при зміні вхідної напруги. Час устанавлення цифрових фільтрів з кінцевою тривалістю перехідних процесів, як впливає з їхньої назви, звичайно і складає для фільтра виду $(\sin x/x)^3$ чотири періоди частоти відрахунків, а при початковому обнулінні фільтра - три періоди. Це знижує швидкодію систем збору даних на основі сігма-дельта АЦП. Тому випускаються ІМС AD7730 і AD7731, оснащені складним цифровим фільтром, що забезпечують переключення каналів згодом устанавлення 1 мс при збереженні ефективної розрядності не нижче 13 біт (так називаний Fast-Step режим). Звичайно цифровий фільтр виготовляється на тій же кристалі, що і модулятор, але іноді вони випускаються у виді двох окремих ІМС (наприклад, AD1555 - модулятор четвертого порядку і AD1556 - цифровий фільтр).

Порівняння сігма-дельта АЦП з АЦП багатотактного інтегрування показує значні переваги перших. Насамперед, лінійність характеристики перетворення сігма-дельта АЦП вище, ніж в АЦП багатотактного інтегрування рівної вартості. Це порозумівається тим, що інтегратор сігма-дельта АЦП працює в значно більш вузькому динамічному діапазоні, і нелінійність перехідної характеристики підсилювача, на якому побудований інтегратор, позначається значно менше. Ємність конденсатора інтегратора в сігма-дельта АЦП значно менше (десятки пікофарад), так що цей конденсатор може бути виготовлений прямо на кристалі ІМС. Як наслідок, сігма-дельта АЦП практично не має зовнішніх елементів, що істотно скорочує площу, займану їм на платі, і знижує рівень шумів. Сігма-дельта АЦП високого дозволу мають розвитку цифрову частину, що включає

6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Підключення пріоритетного шифратора безпосередньо до виходу АЦП може привести до помилкового результату при зчитуванні вихідного коду. Розглянемо, наприклад перехід від трьох до чотирьох, чи в двоїчному коді від 011 до 100. Якщо старший розряд унаслідок меншого часу затримки змінить свій стан раніш інших розрядів, то тимчасово на виході виникне число 111, тобто сім. Величина помилки в цьому випадку складе половину вимірюваного діапазону.

Тому що результати АЦ-перетворення записуються, як правило, у запам'ятовуючий пристрій, існує імовірність одержати цілком невірну величину. Вирішити цю проблему можна, наприклад, за допомогою пристрою вибрання-збереження (ПВЗ). Деякі інтегральні мікросхеми (ІМС) рівнобіжних АЦП, наприклад МАХ100, забезпечуються надшвидкісними ПВЗ, що мають час вибірки порядку 0,1 нс. Інший шлях складається у використанні коду Грея, характерною рисою якого є зміна тільки однієї кодової позиції при переході від одного кодового значення до іншого. Нарешті, у деяких АЦП (наприклад, МАХ1151) для зниження імовірності збоїв при рівнобіжному АЦ-перетворення використовується двотактний цикл, коли спочатку стану виходів компараторів фіксуються, а потім, після встановлення стану пріоритетного шифратора, подачею активного фронту на синхровхід вихідного регістра в нього записують вихідне слово АЦП.

Як видно з табл.1.2, при збільшенні вхідного сигналу компаратори встановлюються в стан 1 по черзі - знизу нагору. Така черговість не гарантується при швидкому наростанні вхідного сигналу, тому що через розходження в часах затримки компаратори можуть переключатися в іншому порядку. Пріоритетне кодування дозволяє уникнути помилки, можливої в цьому випадку, завдяки тому, що одиниці в молодших розрядах не приймаються в увагу пріоритетним шифратором.

Завдяки одночасній роботі компараторів рівнобіжний АЦП є найшвидшим. Наприклад, восьмирозрядний перетворювач типу MAX104 дозволяє одержати 1 млрд відліків у секунду при часі затримки проходження сигналу не більш 1,2 нс. Недоліком цієї схеми є висока складність. Дійсно, N -розрядний рівнобіжний АЦП стримає 2^{N-1} компараторів і $2N$ погоджених резисторів. Наслідком цього є висока вартість (сотні доларів США) і значна споживана потужність. Той же MAX104, наприклад, споживає близько 4 Вт.

Параметри АЦП

При послідовному зростанні значень вхідного аналогового сигналу $U_{вх}(t)$ від 0 до величини, що відповідає повній шкалі АЦП $U_{пш}$ вихідний цифровий сигнал $D(t)$ утворить східчасту кусочно-постійну лінію. Таку залежність за аналогією з ЦАП називають звичайно характеристикою перетворення АЦП. Під час відсутності апаратних погрішностей середні крапки сходинок розташовані на *ідеальній прямій* 1 (рис.1.5), що відповідає ідеальна характеристика перетворення. Реальна характеристика перетворення може істотно відрізнитися від ідеальної розмірами і формою сходинок, а також розташуванням на площині координат. Для кількісного опису цих розходжень існує цілий ряд параметрів.

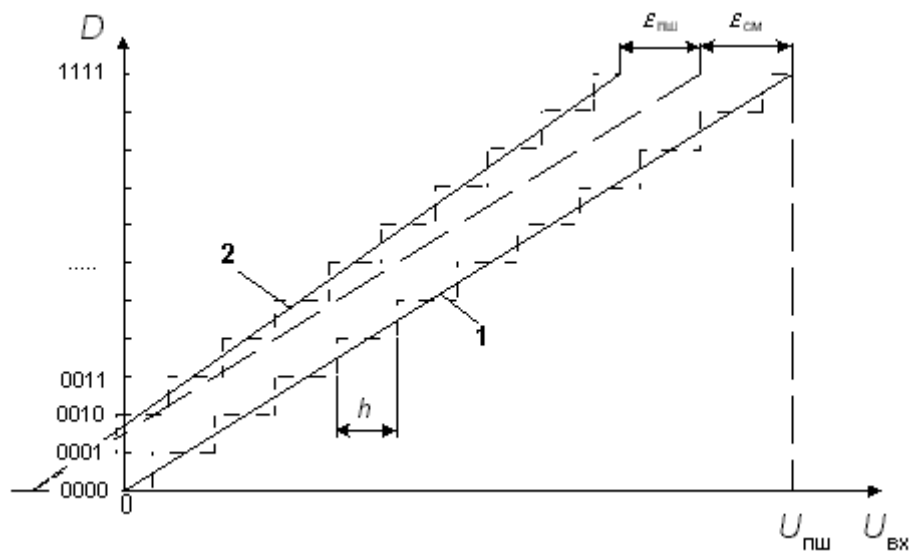


Рис. 1.5. Статична характеристика перетворення АЦП

Статичні параметри

Здатність, що дозволяє - величина, зворотна максимальному числу кодових комбінацій на виході АЦП. *Здатність, що дозволяє*, виражається у відсотках, чи розрядах децибелам і характеризує потенційні можливості АЦП із погляду досяжної точності. Наприклад, 12-розрядний АЦП має *здатність, що дозволяє*, $1/4096$, чи $0,0245\%$ від повної шкали, чи $-72,2$ дБ.

Здатності, що дозволяє, відповідає збільшення вхідної напруги $U_{вх}$ при зміні D_j на одиницю молодшого розряду (ОМР). Це збільшення є кроком квантування. Для двоїчних кодів перетворення номінальне значення кроку квантування $h=U_{пш}/(2^N-1)$, де $U_{пш}$ - номінальна максимальна вхідна напруга АЦП (напруга повної шкали), що відповідає максимальному значенню вихідного коду, N - розрядність АЦП. Чим більше розрядність перетворювача, тим вище його *здатність, що дозволяє*.

Погрішність повної шкали - відносна різниця між реальним і ідеальним значеннями межі шкали перетворення при відсутності зсуву нуля.

Ця погрішність є мультиплікативної складовий повної погрішності. Іноді указується відповідним числом ОМР.

Погрішність зсуву нуля - значення $U_{вх}$, коли вхідний код ЦАП дорівнює нулю.

Погрішності повної шкали і зсуву нуля АЦП можуть бути зменшені або підстроюванням аналогової частини схеми, або корекцією обчислювального алгоритму цифрової частини пристрою.

Погрішності лінійності характеристики перетворення не можуть бути усунуті такими простими засобами, тому вони є найважливішими метрологічними характеристиками АЦП.

Нелінійність - максимальне відхилення реальної характеристики перетворення $D(U_{вх})$ від *оптимальної* (лінія 2). Оптимальна характеристика

знаходиться емпірично так, щоб мінімізувати значення погрішності нелінійності. Нелінійність звичайно визначається у відносних одиницях, але в довідкових даних приводиться також і в ОМР. Для характеристики,приведеної на рис.1.5

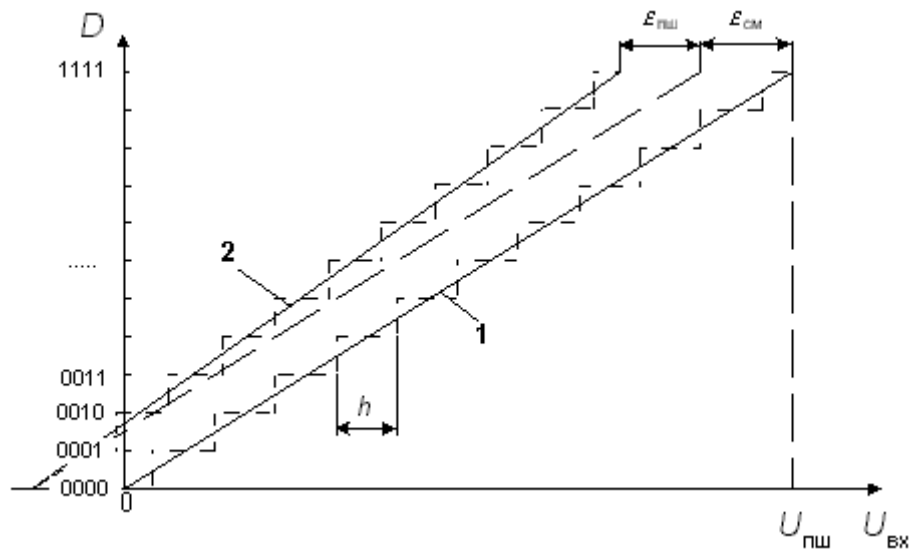


Рис. 1.6. Статична характеристика перетворення АЦП

Диференціальною нелінійністю АЦП у даній крапці k характеристики перетворення називається різниця між значенням кванта перетворення hk і середнім значенням кванта перетворення h . У специфікаціях на конкретні АЦП значення диференціальної нелінійності виражаються в частках ОМР чи відсотках від повної шкали. Для характеристики, приведеної на рис. 1.7.

Похибка диференціальної лінійності визначає дві важливих властивості АЦП: непровалля кодів і монотонність характеристики перетворення. Непровалля кодів - властивість АЦП видавати всі можливі вихідні коди при зміні вхідної напруги від початкової до кінцевої крапки діапазону перетворення. Приклад провалля коду $i+1$ приведений на рис. 1.7. При нормуванні непровалля кодів вказується еквівалентна розрядність АЦП - максимальна кількість розрядів АЦП, для яких не пропадають відповідні їм кодові комбінації.

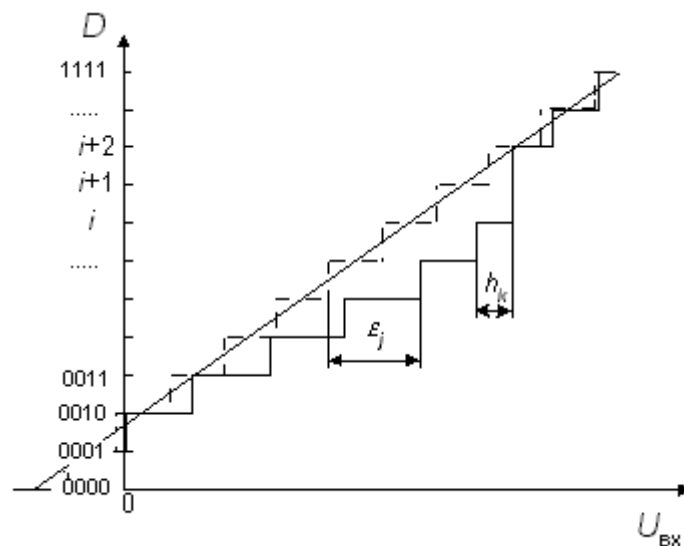


Рис. 1.7. Лінійна характеристики АЦП

Монотонність характеристики перетворення - це незмінність знака збільшення вихідного коду D при монотонній зміні вхідного перетвореного сигналу. Монотонність не гарантує малих значень диференціальної нелінійності і непровалля кодів.

Температурна нестабільність АЦ-перетворення характеризується температурними коефіцієнтами погрішності повної шкали і погрішності зсуву нуля.

Динамічні параметри

Виникнення динамічних погрішностей зв'язано з дискретизацією сигналів, що змінюються в часі. Можна виділити наступні параметри АЦП, що визначають його динамічну точність.

Максимальна частота дискретизації (перетворення) - це найбільша частота, з яким відбувається утворення вибірових значень сигналу, при якій обраний параметр АЦП не виходить за задані межі. Вимірюється числом вибірок у секунду. Обраним параметром може бути, наприклад, монотонність характеристики чи перетворення погрішність лінійності.

Час перетворення (t_{np}) - це час, відлічуваний від початку імпульсу чи дискретизації початку перетворення до появи на виході стійкого коду, що відповідає даній вибірці. Для одних АЦП, наприклад, послідовного чи рахунка багатотактного інтегрування, ця величина є перемінної, залежної від значення вхідного сигналу, для інших, таких як рівнобіжні чи послідовно-рівнобіжні АЦП, а також АЦП послідовного наближення, приблизно постійної. При роботі АЦП без ПВЗ час перетворення є апертурним часом

Час вибірки - час, протягом якого відбувається утворення одного вибірового значення.

Висновки до розділу 1

Проведено аналіз і характеристикний огляд сучасних середовищ проектування систем керування та контролю з використанням мікроконтролерів. Розглянуто основні способи керування газоперекачувальним агрегатом з використанням класичних та новітніх прогресивних методів та технологій, що дозволило визначити найбільш ефективний спосіб керування, а також підвищити клас точності.

РОЗДІЛ 2

НАУКОВИЙ АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ ЗБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Мікропроцесорна система збору ГПА

Система є реальною системою диспетчеризації, що брала участь в конкурсі систем подібного класу з метою виявити систему найбільше придатною для компресорних цехів, після чого ця система стала застосовується не тільки на станції “Гребенковская”, але і на деяких інших станціях.

Об'єктом диспетчеризації є Компресорний Цех (КЦ) у який установлені шість газоперекачувальних агрегатів (ГПА) типу ГТН-6 з нагнітачами газу, а також загальцехове технологічне устаткування. Кожний із ГТН-6 оснащений установками агрегатної автоматики типу А705-15-04, що здійснюють автоматичне керування пуском і зупинкою ГПА, захист від аварійних ситуацій, сигналізацію і вимір технологічних параметрів.

Режим роботи технологічного устаткування й установок агрегатної автоматики цілодобовий з періодичними зупинками для проведення профілактичних і регламентних робіт.

Система контролю параметрів за принципом свого функціонування відноситься до автоматизованих діалогових систем, у яких інформаційні функції виконуються автоматично, а режим допоміжних функцій може бути як діалоговим так і автоматичним.

На рисунку 2.1 схематично показана комутація елементів один з одним. ЕОМ через розширник СОМ - портів (послідовний порт) QCOM8, що дозволяє приєднати до один СОМ порту до 8 контролерів, комутується з контролером мережі введення висновку, що опитує датчики і по запиті від ЕОМ посилає необхідну інформацію на комп'ютер. Разом з тим такі елементи системи диспетчеризації, як Контролер мережі введення-висновку, Розширник послідовних

портів QCOM8 і Розширник дискретних сигналів є створеними спеціально для даних систем.

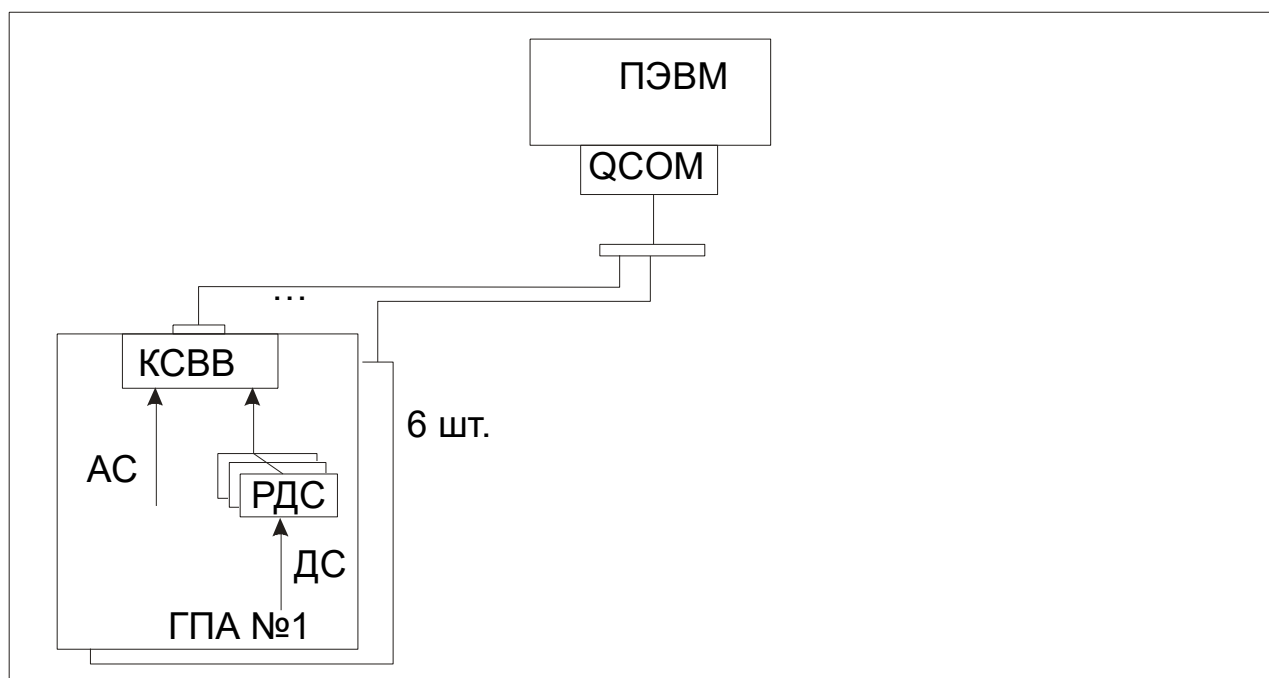


Рис. 2.1. Структурна схема системи контролю параметрів ГПАКЦ

Контролер Мережі вводу-виводу (КМУВ) застосовується для збору, первинної обробки і нагромадження інформації з датчиків, установлених на ГПА, і передачі її в ЕОМ (сумісних з ІВМ РС/ХТ) на пульті диспетчера. Т. т. дана система диспетчеризації є системою на базі персонального комп'ютера і керується за допомогою програмного забезпечення.

Для комутації ЕОМ і КМУВ використовується радіальний послідовний зв'язок. Інтерфейс ІРПС служить для передачі інформації між пристроями з радіальним послідовним зв'язком. Підключення здійснюється радіально за допомогою кабелю. Інтерфейс забезпечує асинхронну передачу постійним струмом по 4-провідному дуплексному зв'язку. Формат переданої інформації (у бітах) наступний: старт - 1біт; передані дані - 6,7,8біт; парність - 1 чи відсутній; стіп - 1,5 чи 2. Основною особливістю цього інтерфейсу є використання в якості несущої не напруга, а струм, що робить цей інтерфейс більш надійним і більш

перешкодзахисний, оскільки будь-яка схема на прийомній стороні розрахована на виключення ушкодження при замиканні провідників у ланцюзі взаємозв'язку. Ланцюга взаємозв'язку забезпечують передачу сигналів зі швидкістю 9600 біт/з на відстань від 0 до 500 метрів.

На рис.1.2(див. додаток 1) зображена функціональна схема системи контролю параметрів ГПАКЦ. Схема відображає принцип роботи системи контролю параметрів загалом, а схема КМУВ представлена в більш докладному виді. Побудова схеми дає наочне представлення про хід роботи як усієї системи, так і КМУВ зокрема. Дана система КМУВ містить наступні функціональні вузли:

- вузол процесора;
- вузол оптронної розв'язки ланцюгів телесигналізації (ТС);
- вузол комутації дискретних сигналів;
- вузол захисту від перешкод вимірювальних каналів;
- двоступінчастий комутатор датчиків з диференціальними ланцюгами;
- двоступінчастий комутатор датчиків із загальним висновком;
- диференціальний вимірювальний підсилювач;
- перетворювач напруги у код;
- схеми контролю джерела живлення;
- дешифратор адреси групи каналів;
- вторинне джерело живлення;
- вузол сполучення з лінією зв'язку.

Вузол процесора керує двостороннім зв'язком з ПЕОМ, керує опитуванням датчиків, виконує первинну обробку інформації, що надходить від датчиків.

-Основні характеристики вузла процесора:

- Розрядність процесора 8 біт;
- Обсяг ППЗУ 2 Кбайта;
- Обсяг ОЗУ 2 Кбайта;

-тактова частота

1 МГц.

На вибір процесора впливали наступні причини:

- Необхідність послідовного входу/виходу і команд працюючого з ним;(ця вимога сильна звузило коло можливих рішень)
- Живлення від одного джерела +5В,+15В, -15В (це ж стало причиною вибору більшості мікросхем)
- Розширена система команд
- Мале споживання

Як процесор був обраний процесор серії 1821ВМ85.

До числа особливостей мікропроцесора відносяться:

- використання для живлення лише одного джерела напруги +5В (для мікропроцесора КР580ВМ80А необхідно три джерела напруги +5В, -5В и +12В);
- наявність внутрішнього синхрогенератора (у КР580ВМ80А - відсутній), для запуску якого необхідно приєднати до висновків Х1і Х2 мікропроцесори LC-чи RC-ланцюгів. Х1 може служити також входом для зовнішніх синхроімпульсів, що надходять через логічний вентиль. Вхідна частота поділяється на два для одержання необхідної процесором внутрішньої частоти;
- наявність лінії послідовного введення даних;
- наявність лінії послідовного висновку даних;
- можливість обробки переривань загального призначення;
- можливість обробки переривання повторного запуску;
- можливість обробки немаскованого переривання при виникненні непередбаченої ситуації, що викликає виконання команди RESTART.

Технічні дані

1.Контролер КМУВ працює з датчиками, що мають аналогові і дискретні вихідні сигнали;

2. Загальна кількість датчиків з вихідними аналоговими сигналами, які можна підключити до контролера-48. При цьому перші 16 датчиків можна підключити до входів за диференціальною схемою, а наступні 32 із загальним плюсом;

3. Діапазон змін всіх аналогових сигналів від 0 до мінус 10;

4. Час повного циклу знімання і нагромадження інформації в ОЗУ не більш 2с;

5. Точність перетворення аналогових сигналів у цифровий код не гірше 0.5%;

6. Загальна кількість вхідних дискретних (двохпозиційних) сигналів-16;

7. Інформація про усі вхідні сигнали накопичується в ОЗУ за 11 циклів опитування;

8. КМУВ працює в режимі відновлення інформації до моменту звертання ЕОМ;

9. При одержанні від ЕОМ запиту з адресою контролера КМУВ, останній закінчує поточний цикл відновлення інформації і переходить у режим видачі інформації в ЕОМ. Затримка відповіді не перевищує 1с;

10. Обсяг переданої інформації в ЕОМ визначається на основі аналізу інформації, що надійшла від ЕОМ;

11. Живлення контролера виробляється від постійної напруги 27 \pm 4В. Струм споживання не перевищує 0.08А;

12. Конструкція забезпечує як горизонтальне, так і вертикальне кріплення контролера;

13. Габаритні розміри контролера не перевищують 280/300/30 мм

14. Маса контролера не перевищує 2 кг.

2.2 Опис роботи КМУВ за функціональною схемою й алгоритму функціонування

При включенні живлення чи при натисканні на кнопку «СКИДАННЯ» починає виконуватися підпрограма тестування і діагностики системи. Здійснюються два алгоритми діагностування: Луна-тест і Тест-Інверт. При виявленні будь-якої несправності, підпрограма видає сигнал помилки і завершує свою роботу. Якщо програма-тест не знайшла несправність системи, то керування передається основній програмі роботи системи.

Мікропроцесор (CPU) через вузол сполучення з магістраллю (УСМ) визначає наявність запиту від ЕОМ. При його наявності здійснюється аналіз цього запиту і вибірка необхідних даних з ОЗУ. Вибір осередків ОЗУ і читання даних здійснюється по шині адреси і даних (ШАД). Підключення мікросхеми ОЗУ до ШАД здійснюється за допомогою селектора адреси (СА). Після вибірки даних з ОЗУ, здійснюється передача відповіді на запит на ЕОМ.

Якщо запиту від ЕОМ ні, то програма визначає наявність у системі розширника дискретних сигналів (РДС). При його відсутності здійснюється читання станів дискретних входів через гальванічну розв'язку (Г/Р), вузол комутації дискретних сигналів (ВКДС) і порт уведення-висновку (МС порт I/O). Після чого керування передається на комутатор диференціальних сигналів (КДС) і комутатор сигналів із загальним плюсом (КСЗП) через порт уведення-висновку для комутації визначеного каналу. Через порт уведення-висновку здійснюється також і запуск аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Після тимчасової затримки, необхідної для перетворення мікросхемою АЦП аналогового сигналу в цифровий, через порт уведення-висновку відбувається читання з АЦП значення обраного параметра каналу, що комутирується. Після завершення цієї процедури, мікропроцесор знову визначає наявність запиту від ЕОМ.

Якщо в системі встановлений РДС, то керування передається на групу входів РДС і здійснюється читання стану обраної тетради дискретних входів через Г/Р, УКДС і МС порт І/О. Після чого керування передається на КДС і КСОП.

На підставі викладеного матеріалу можна зробити висновок:

До достоїнств КМУВ варто віднести збір великої кількості технологічної інформації одночасно (128 дискретних і 48 аналогових сигналів), а також через низьку швидкодію вплив перешкод на високих частотах усунуто самою собою.

До недоліків даної системи варто віднести:

- низька швидкодія;
- «застаріла» елементна база, на якій зібраний КМУВ;
- комутатори не мають внутрішнього захисту;
- інтерфейс ІРПС не дозволяє збільшити кількість контролерів на лінії

2.3 Пристрій вилученого збору даних і керуванням ADAM-4000

Модулі серії ADAM-4000 призначені для організації взаємодії між обчислювальною системою і датчиками безупинних і дискретних параметрів, а також для видачі керуючих впливів на виконавчі механізми. Кожен модуль являє собою функціонально закінчений пристрій, укладений у пластмасовий корпус.

Модулі забезпечують виконання наступних основних функцій:

- прийом і дешифрацію команд по каналі RS-485;
- введення і нормалізацію аналогових сигналів (струм, напруга);
- опитування стану дискретних входів;
- фільтрацію аналогових і дискретних входних сигналів;
- висновок аналогових (струм, напруга) і дискретних сигналів;
- аналого-цифрове (для модулів аналогового введення) перетворення (далі – АЦ перетворення);

- цифро-аналогове (для модуля аналогового висновку) перетворення (далі –ЦА перетворення);
- перетворення шкали значень безупинних параметрів у попередньо задані одиниці виміру;
- формування і передачу на адресу основної обчислювальної системи інформації, що містить результат чи виміру стан дискретних входів, після одержання відповідного запиту по каналу RS-485.

Модулі аналогового вводу і виводу мають гальванічну ізоляцію між ланцюгами, що реалізують функції нормалізації, низькочастотної фільтрації й АЦ/ЦА перетворення, і вбудованим мікропроцесором.

Настроювання і калібрування модулів здійснюється програмним способом шляхом передачі на їх адресу відповідних команд по інформаційній мережі на основі інтерфейсу RS-485.

Параметри конфігурації модулів, такі як швидкість обміну по послідовному каналу зв'язку, наявність перевірки контрольної суми в прийнятому повідомленні, діапазон зміни вхідного сигналу і його розмірність, вид представлення обмірюваних значень при передачі на адресу основної обчислювальної системи, верхнє і нижнє

граничні значення вхідного сигналу, по яких виробляється автоматичне керування дискретними виходами, зберігаються в убудованому ре-програмувальному ПЗУ з електричним записом/електричним стиранням. Електричне харчування модулів здійснюється напругою 10...30 У постійного струму. Розмах пульсацій, що допускається, напруги харчування складає ± 5 В за умови перебування його значення в зазначених межах.

Загальні технічні характеристики модулів серії ADAM 4000 приведені в табл.2.1. Основна обчислювальна система для простоти викладу далі буде називатися контролером мережі(КМ). Взаємодія між КМ і модулями, об'єднаними в мережу, здійснюється шляхом послідовної передачі КМ на адресу кожного модуля запиту, що містить префікс типу команди, символічне представлення

мережної адреси запитуваного модуля, число, що відповідає підтипу команди, і символ «повернення каретки».

Для програмного забезпечення КМ видача запиту означає висновок рядка символів у послідовний порт. При одержанні команди убудоване програмне забезпечення модуля ADAM робить перевірку її коректності й ідентифікацію, після чого посилає на адресу КМ запитувану інформацію у виді рядка символів. Як указувалося раніше, інформаційна мережа модулів серії ADAM 4000 будується на базі інтерфейсу RS 485.

Таблиця 2.1

Загальна технічна характеристика ADAM-4000

Протокол фізичного рівня	EIA RS-485
Лінія передачі	Симетрична екранована кручена пари. Хвильове Опір (100 120)Ом, погонна ємність(20 40)пф/м
Швидкість передачі, біт/з	1200,2400,4800,9600,19200
Довжина сегмента мережі, м	1200
Кількість модулів у межах сегмента	32
Максимальна кількість модулів у мережі	255
Протокол каналного рівня	Символьний ASCII з безпосередньою адресацією Абонентів
Вірогідність	Контрольна сума довжиною 2 байти
Режим обміну даними	Асинхронний, напівдуплексний, 1 старт біт, 1 стіп біт, 8 біт даних, без контролю парності
Протокол прикладного рівня	Символьний ASCII
Умови експлуатації: діапазон робочих температур діапазон температур збереження відносна вологість повітря	10 ...70 °C 25...85...85C 5...95%при 25 °C без конденсації вологи

Принцип функціонування модулів аналогового введення буде розглянутий на прикладі модуля ADAM 4012, що має один диференціальний аналоговий вхід, один дискретний вхід лічильника зовнішніх подій і два дискретних виходи, що дозволяють здійснювати керування (включення і відключення) виконавчими механізмами при виході значення вимірюваного параметра за межі попередньо встановленого діапазону.

Вхідний сигнал, що є присутнім на диференціальному вході модуля, надходить на малошумний інструментальний підсилювач із програмувальним коефіцієнтом підсилення.

Коефіцієнт підсилення може приймати значення від 1 до 128. Далі сигнал, напруга якого лежить у діапазоні від мінус 2,5 до плюс 2,5В, піддається низькочастотної фільтрації у фільтрі низьких частот із граничною частотою, рівної 10 Гц, і надходить на вхід сигма дельта АЦП. Результат АЦ перетворення через ланцюги оптоізоляції надходить в убудований мікропроцесор. Програмне забезпечення мікропроцесора виконує наступні функції:

- порівняння значення вхідного сигналу з попередньо заданими верхнім і нижньою граничними значеннями і керування (чи включення відключення) відповідними дискретними виходами у випадку досягнення вхідним сигналом рівня, що виходить за межі за даного діапазону;
- при одержанні запиту по послідовному каналі зв'язку перетворення цифрового відліку в символний рядок попередньо заданого формату і її передачу на адресу КМ.

У таблиці 2.2 приведені основні характеристики контролера ADAM-4018, що має 8 каналів аналогового введення.

Таблиця 2.2

Параметри ADAM-4018

Кількість каналів аналогового введення	8
Діапазон вхідного сигналу	± 15 мВ, ± 50 мВ, ± 100 мВ, ± 500 мВ, ± 1 В, $\pm 2,5$ В, ± 20 ма, Термопара типу J, K, T, E, R, S, B
Основна погрішність	не гірше $\pm 0,10\%$
Температурний коеф-т зсуву нуля	$\pm 0,3$ мкВ/°С
Температурний коеф-т зсуву діапазону	± 25 ppm/°С
Напруга ізоляції	3000 В
Коефіцієнт ослаблення синфазної складовий перешкоди на частоті 50 Гц	92 дБ
Смуга пропущення	13,1 Гц
Час АЦ перетворення	100 мс (8 каналів)
Споживана потужність	1,2 Вт

2.4 Інтерфейс зв'язку ЕОМ з об'єктом

Основними достоїнствами промислових мереж є недорогі лінії і надійність передачі даних. Дані передаються послідовно біт за бітом, як правило, по одному фізичному каналі (одному провідникові). Такий режим передачі не тільки заощаджує кабельне устаткування, але і дозволяє вирішувати задачі по надійній передачі даних на великі відстані. Час передачі, однак, збільшується пропорційно довжині бітового рядка.

Інтерфейс RS-232C

Цей широко використовуваний стандартний інтерфейс забезпечує роботу стандартного устаткування передачі даних між модемами, терміналами і комп'ютерами. Електрично система заснована на імпульсах ± 12 В, що кодує послідовності "0" і "1". Механічно цей стандарт визначає 9- і 25-контактні рознімання. Основні сигнали передаються по лініях "передача/прийм"

даних. Швидкість передачі вибирається з діапазону від 50 до 38400 бод. Інші сигнальні лінії передають статусну інформацію пристроїв, що комутируються.

Інтерфейс RS-422

Симетричний інтерфейс RS-422 використовує диференціальні сигнальні лінії. На прийомному кінці використовуються дві інформаційні лінії і лінія заземлення. В основі кодування переданих/прийнятих даних лежить принцип зміни напруги на сигнальних лініях. Реалізований принцип кодування робить цей стандарт стійким до зовнішніх збурювань.

Використання цього стандарту дозволяє значно подовжувати фізичні лінії передачі даних і збільшувати швидкість. За допомогою інтерфейсу RS-422 можна будувати і шинні структури.

Інтерфейс RS-485

Цей тип інтерфейсу відповідає специфікації симетричної передачі даних, описаної в американському стандарті IEC RS-485. Цей інтерфейс придатний для високошвидкісної передачі даних. Максимальна довжина варіюється від 1,2 км на швидкості до 90 кбод і до 200 м - на швидкості до 500 кбод.

Таблиця. 2.3

Порівняльні характеристики стандартних фізичних інтерфейсів

Порівняльні характеристики	RS-232C	RS-422	RS-485
1. Макс. число приймачів передавачів на лінії	1/1	1/10	
2. Макс. довжина лінії (без повторювачів)	15 м	1220 м	1220 м
3. Макс. швидкість передачі	38,4 кбод	90 кбод	90-500 кбод

Висновок до розділу 2

У результаті проведеного наукового аналізу сучасних підходів до проектування мікропроцесорних систем збору технологічної інформації встановлено, що розвиток таких систем є ключовим фактором підвищення рівня

автоматизації та ефективності функціонування промислових об'єктів. Аналіз літературних джерел, нормативних вимог та існуючих технічних рішень показав, що на сучасному етапі пріоритетними тенденціями є інтеграція високопродуктивних мікроконтролерів, застосування багатоканальних сенсорних модулів, використання інтерфейсів реального часу та розширення можливостей систем щодо обробки великих масивів даних безпосередньо на периферійному рівні.

Виявлено, що традиційні системи збору даних, побудовані на застарілій елементній базі, часто не відповідають сучасним вимогам щодо точності вимірювань, швидкодії та стійкості до завад. Тому все більшого значення набувають мікропроцесорні платформи з вбудованими функціями цифрової фільтрації, самодіагностики, адаптивної корекції сигналів та підтримкою інтелектуальних алгоритмів аналізу. Особливу увагу приділено системам, що здатні виконувати локальну обробку інформації (edge computing), що дозволяє зменшити навантаження на центральні контролери та підвищити швидкість реакції системи в цілому.

Проведений аналіз підтвердив, що основними науково-технічними напрямками розвитку є: удосконалення сенсорних технологій, підвищення точності та стабільності вимірювання технологічних параметрів; уніфікація та стандартизація комунікаційних протоколів; інтеграція мікропроцесорних модулів у комбіновані системи автоматизації; розроблення механізмів кіберзахисту інформаційних потоків; а також розширення можливостей цифрової обробки сигналів і прогнозного аналізу.

РОЗДІЛ 3

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГПА

3.1 Модель об'єкта контролю

Автоматичний контроль - абсолютно необхідна операція при будь-якому замкнутому процесі автоматичного керування. Крім того, автоматичний контроль у вигляді автоматичних систем (пристроїв), або у вигляді автоматичних підсистем АСУТП має для виробництва також велике самостійне значення. Він допомагав здійснити централізацію керування виробництвом, сприяв стабілізації технологічних параметрів, зменшує простой обладнання, викликані несвоєчасним виявленням порушень і неполадок, дозволяє швидко коректувати режими роботи устаткування при зміні зовнішніх умов, дає необхідні техніко-економічні дані для повного і своєчасного аналізу ходу процесу і прийняття відповідних рішень. Крім того, повний і своєчасний автоматичний контроль режиму роботи агрегатів дозволяє глибоко аналізувати хід технологічних процесів і прискорити вирішення найважливіших задач оптимального керування технологічними процесами.

Основними частковими функціями систем і пристроїв автоматичного контролю на підприємствах нафтової і газової промисловості є:

- 1) контроль технологічних параметрів.
- 2) контроль технічного стану і працездатності технологічних установок, обладнання та ін.
- 3) контроль техніко-економічних показників роботи керованих об'єктів.
- 4) визначення місця і причин порушень і неполадок (передаварійних ситуацій, ускладнень). Загальною функцією автоматичного контролю є визначення станів об'єкта контролю і виявлення подій, які вимагають керуючих впливів.

Стан об'єкта контролю в кожен момент часу t з певною точністю можна охарактеризувати набором величин $Z=(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$ (рис 3.1).

Процес функціонування об'єкта можна розглядати, як послідовну зміну його станів. При переході від одного миттєвого стану до другого значення Z_1, Z_2, \dots, Z_m в загальному випадку змінюються, тобто функціями стану і часу.

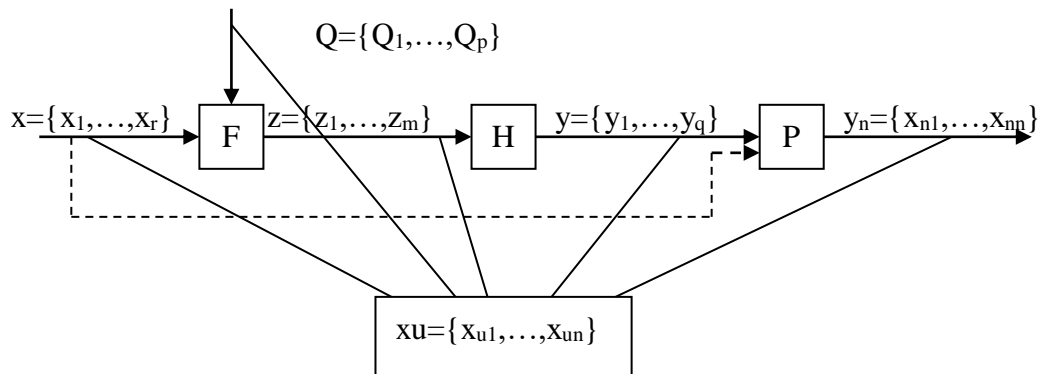


Рис. 3.1. Загальна модель об'єкта контролю

Величини Z_1, Z_2, \dots, Z_m , наділені згаданою властивістю, називають параметрами (або характеристиками) стану об'єкта.

Об'єкт зазнає впливу різних зовнішніх впливів, але далеко не всі вони суттєві. З множини зовнішніх впливів можна відібрати тільки ті, які в умовах вирішуваної задачі контролю суттєво впливають на стан об'єкта. Ці зовнішні впливи називають вхідними величинами $X=(X_1, X_2, \dots, X_r)$. Також об'єкт характеризується деяким числом постійних величин $Q=(Q_1, Q_2, \dots, Q_p)$, які називаються параметрами об'єкта. Від них залежать характеристики його стану.

Таким чином, характеристики стану об'єкта $Z_i(t)$, зв'язані з вхідними величинами X і параметрами об'єкта деякою, функціональною або операторною залежністю

$$Z_i(t)=F_i[X,Q,t], i=1, \dots, m. \quad (3.1)$$

Вплив об'єкта контролю на другі процеси і об'єкти характеризується значеннями його вихідних змінних $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_q)$.

Кожна з вихідних змінних визначається через параметри стану Z своєю функціональною залежністю $Y_j(t)=H_j(Z,t), j=1, \dots, q$.

Необхідність введення в розгляд вихідних величин виникає в тих випадках, коли задача полягає в контролі величин, функціонально зв'язаних з станом контрольованого об'єкта.

Окрему групу характеристик об'єкта складають техніко-економічні показники роботи об'єкта. До них належать, наприклад, питома витрата енергії, собівартість, затрати, продуктивність процесу, прибуток та ін.

Техніко-економічні показники об'єкта звичайно визначаються як деякі функціонали або функції від вхідних і вихідних змінних об'єкта, тобто

$$Y_{nl}(t) = P_l(X, Y, t), \quad l=1, \dots, d. \quad (3.2)$$

Таким чином, параметри стану об'єкту $Z(t)$ є найбільш універсальними характеристиками контрольованого об'єкта. Однак, визначення і вибір параметрів стану об'єктів на практиці зустрічає певні труднощі, тому що не завжди є можливість використовувати які-небудь формальні правила для вибору характеристик стану і тоді доводиться керуватись тільки власною інтуїцією, яка опирається на постановку задачі контролю і розуміння природи процесу функціонування об'єкта. У зв'язку з цим в склад контрольованих величин $X_n = (X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kt})$ в загальному випадку можуть входити вхідні, вихідні величини, а також параметри і техніко-економічні показники об'єкта.

3.2 Загальне формулювання задачі контролю

Контроль можна розглядати як процес визначення області в просторі станів Z до якої відноситься стан об'єкта в будь-який момент часу t . Кожній точці простору Z відповідає можливий результат спостереження Y . Тоді можна сформулювати наступні основні класи задач, які виникають при розробці алгоритмів і систем контролю.

I клас. Кожній точці простору параметрів Z одночасно відповідає точка в просторі спостережень Y_n і навпаки. Це відповідає випадку, коли безперервно спостерігаються всі параметри стану (або однозначно зв'язані з ними величини) і

похибкою вимірювання можна знехтувати. В цьому випадку задача контролю спрощується і зводиться до безпосередньої перевірки ознак стану об'єктів.

II клас. Між точками простору параметрів і простору спостережень немає однозначної відповідності, тобто простори суттєво відрізняються. Цей випадок відповідає виявленню подій в умовах невизначеності і є найбільш загальним.

Джерелами невизначеності можуть бути:

1. Похибки вимірювання величин, джерелами яких є зовнішні перешкоди ξ , і похибка датчика ΔZ , яка визначається його метрологічними характеристиками (рис.3.2).

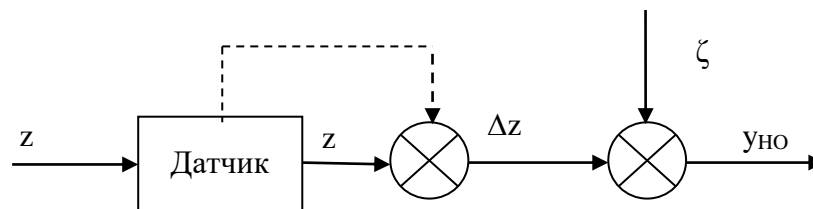


Рис. 3.2. Схема контролю в умовах перешкод з урахуванням похибки датчика

2. Квантування по рівню і дискретність спостереження величини в часі при періодичному контролі.

3. Спосіб вимірювання, який базується на тому, що замість змінної стану вимірюється стохастично зв'язана з нею величина Y_l у цьому випадку при кожному значенні Z величина, яка спостерігається Y_l , приймає одне з значень у відповідності з умовною функцією розподілу $f(Z/Y_l)$ (рис. 3.3).

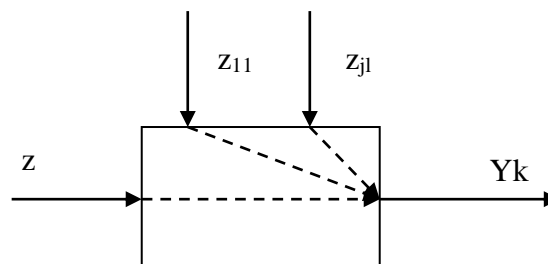


Рис. 3.3. Схема контролю стохастично зв'язаних величин

4. Спосіб, при якому для контролю вибрана тільки частина параметрів стану, при цьому про стан об'єкта контролю судять тільки з деякою ймовірністю $P(Z/Y_1)$, де $P(Z/Y_1)$ - умовна ймовірність стану Z при спостереженні значення Y_1 .

Якщо похибку, що визначається приведеними та іншими можливими джерелами, позначити через $\delta(Z, t)$ то результат спостереження в загальному випадку можна подати у вигляді, приведенному на рис 3.4.

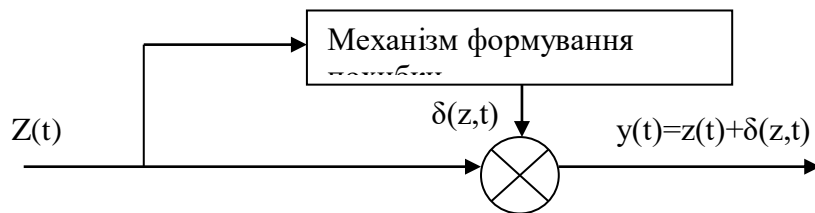


Рис. 3.4. Схема спостереження в загальному випадку

III клас. Не виявляється можливим визначити простір станів складного об'єкта і задати в ньому ознаки подій, однак людина-оператор вміє ці події розпізнавати. У цьому випадку для розробки алгоритму контролю необхідно побудувати модель людини-оператора.

3.3 Вибір контрольованих величин

Контрольовані величини повинні бути вибрані таким чином, щоб їх значення з достатньою для практики достовірністю характеризували стан об'єкта контролю. У ряді випадків контрольовані величини і області, їх нормальних значень задаються заздалегідь у відповідності з технічними або технологічними вимогами, які ставляться до об'єкта контролю. Тоді, природно, набір величин, що підлягають контролю, визначений.

В загальному випадку процес визначення об'єму контролю включає як евристичні методи, які базуються на колективному досвіді фахівців, так і науково-обґрунтовані формалізовані методи. Можна виділити три послідовних етапу при виборі об'єму контролю:

1. На першому етапі вивчається структурна схема об'єкта і попередньо вибираються істотні параметри і величини $X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kn}$ (рис.3.1). Цей етап є неформальним і виконується найбільш кваліфікованими фахівцями, а об'єм контролю на даному етапі завжди завищений.

2. На другому етапі проводяться розрахунки, які попередньо уточнюють призначений об'єм контролю. Розрахунки полягають в побудові моделі об'єкта контролю, упорядкування послідовності величин $X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kn}$ і побудові графіка методичної достовірності контролю D як функції кількості контрольованих величин (рис. 3.5).

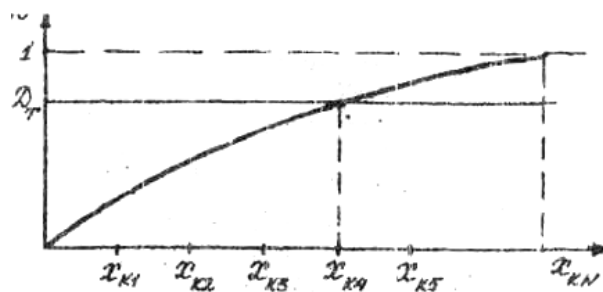


Рис. 3.5. Графік достовірності контролю

Методичною достовірністю контролю називають достовірність при абсолютному точному вимірюванні величин. Графік будується наступним чином. Спочатку вираховується достовірність визначання стану об'єкта при контролі однієї величини, далі при контролі двох величин і т.д. При контролі всіх величин методична достовірність контролю рівна одиниці. Визначення об'єму контролю проводиться шляхом проведення прямої D_T , яка відповідає необхідному значенню достовірності контролю.

3. На третьому етапі проводиться подальше коректування об'єму контролю з врахуванням точності і методів вимірювання величин. При цьому необхідний об'єм контролю для забезпечення заданої достовірності може збільшитись.

Найбільш загальний підхід до вибору контрольованих величин полягає в тому, що аналізуються втрати, зв'язані з відсутністю контролю тієї чи іншої величини. Вибір контрольованих величин здійснюється таким чином, щоб втрати були мінімальними або не перевищували заданого значення.

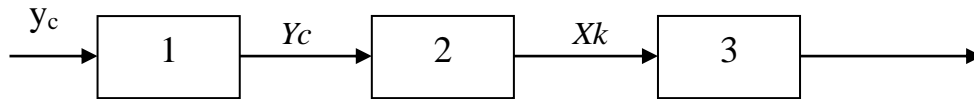
3.4 Алгоритмічна структура, системи контролю

Після визначення комплексу контрольованих величин, які повинна видавати система контролю, встановлюється необхідна сукупність величин, що спостерігаються Y_{c1}, \dots, Y_{ck} і відповідних датчиків, які можуть бути використані як джерела початкової інформації. По кожному датчику необхідно мати дані по точності його роботи і градууювальну характеристику.

Для датчиків, які мають значення в порівнянні з коливаннями величини, де спостерігається динамічне запізнення, необхідно знати динамічні характеристики (постійну часу і транспортне запізнення). По всіх або по найменш надійно працюючих датчиках доцільно мати хоча би грубо орієнтовані характеристики їх надійності в умовах експлуатації на об'єкті: середнє напрацювання на відмову і середній час ремонту. Наявність цих відомостей дозволяє перейти до складання алгоритмічної структури системи контролю.

Складання алгоритмічної структури системи контролю зводиться до визначення групи датчиків, частоти їх описування і алгоритмів відпрацювання одержуваних від них сигналів, необхідних для визначення кожної контрольованої величини з заданою точністю і одержання необхідних результатів контролю.

В алгоритмічній структурі системи контролю в загальному випадку можна виділити три основні частини (рис. 3.6).



- 1 - блок одержання найбільш точних оцінок поточних або прогнозованих значень величин, що спостерігаються Y_c .
- 2 - блок формування шуканих контрольованих величин X_k обчислювальні та інші операції по вже відомих оцінках величин., що спостерігаються.
- 3 - блок виконання операцій контролю над контрольованими величинами, необхідних для одержання результатів контролю (індикації, реєстрація, сигналізація, виявлення подій і т.д.).

Рис. 3.6. Алгоритмічна структура системи контролю

Алгоритмічна структура системи складається з алгоритмічних ланцюгів для кожної контрольованої величини. Для складання алгоритмічного ланцюга весь процес обробки величин., що спостерігаються, подається у вигляді послідовності виконуваних типових і специфічних перетворень. В число перетворень входить і перетворення величини, що спостерігається, самим датчиком. Алгоритмічний ланцюг в загальному випадку має вигляд послідовно-паралельного з'єднання окремих перетворювачів, кожен з яких зображається прямокутником. Необхідні перетворення задаються у вигляді конкретних функцій, функціоналів або операторів від однієї, або декількох величин. Зокрема, для одержання найбільш точних оцінок по значеннях величин, які спостерігаються, застосовуються наступні операції: аналітичне градування датчика, фільтрація, екстраполяція, інтерполяція; динамічна корекція датчика.

Аналітичне градування датчика, застосовується, якщо похибка $\delta(Z, t)$ (рис.3.4) викликана існуючою неврахованою нелінійністю шкали вимірювального приладу.

Фільтрація вимірювального сигналу від перешкод застосовується, якщо джерелами похибки величини, що спостерігається, є перешкоди f , всередині об'єкта або датчика ΔZ (рис. 3.2).

Екстра – та інтерполяція вимірюваного сигналу використовується, якщо значна похибка оцінки величини, що спостерігається, в інтервалі між моментами її вимірювання.

Корекція динамічної похибки датчика необхідна у випадку, коли датчик представляє собою ланку значної інформації, а величина, що спостерігається, змінюється в часі зі значною швидкістю.

Для формування декількох контрольованих величин \hat{X}_k , типовими операціями використовують: масштабування, обробку даних по заданих формулах, інтегрування, усереднення, диференціювання, визначення поточних статистичних характеристик, відновлення невідомої функції, компенсацію динаміки об'єкта та ін.

Для виконання операцій контролю (блок 3) типові наступні операції: визначення знака функції, порівняння з нормою, порівняння двох функцій, логічні операції та ін.

Для вирішення практично всіх задач в області вимірювання параметрів технологічних процесів за кордоном використовують вимірювальні перетворювачі (ВП), обладнані мікропроцесорами. Починаючи з 1983 року, ці ВП називають цифровими або "інтелектуальними" ВП. "Інтелектуальні" ВП мають більш високу точність і пропускну можливість, можуть працювати в режимі діалогу, забезпечувати автоматичне протоколювання результатів вимірювання і здійснювати само діагностику. Дані про передавальну функцію між входом і виходом, структуру і параметри перетворювача закладені в пам'яті, тому зміна структури і параметрів ВП може проводитись з центрального пульта по певній програмі в реальному масштабі часу. ;

"Інтелектуальні" можливості ВП можна розмістити по зростаючому рівню складності виконуваних функцій:

перший рівень сприймання вимірюваного параметра, перетворення його в електричний сигнал і доопрацювання для подальшого використання;

другий рівень – можливість компенсації впливів навколишнього середовища (температура, тиск, магнітні перешкоди і т.п.) з метою внесення корекції у вихідний сигнал;

третій рівень – можливість підключення в систему контролю і керування. На цьому рівні можуть забезпечуватись додатково аналого-цифрове перетворення, адресування., використання різноманітних інтерфейсів;

четвертий рівень - наявність функції самодіагностики, видача інформації про неполадки або відмови з метою своєчасного ремонту або заміни перетворювача;

п'ятий рівень – можливість виконання логічних керуючих операцій і прийняття рішень про послідовність їх виконання.

Поява "інтелектуальних" перетворювачів принесла з собою нові можливості, які були відсутні в аналогових приладах ідентифікація, висока точність, наявність самодіагностики, цифрова форма сигналу, більш широкі діапазони вимірювання, можливість роботи в режимі діалогу, двостороння передача цифрових даних (рис. 3.7).

Основними характеристиками, які дозволяють віднести "інтелектуальні" датчики до приладів нового покоління:

- безпосереднє обчислювання вимірюваної фізичної величини і корекцією зовнішніх впливів на рівні датчика;
- використання цифрового сигналу замість аналогового ;
- можливість ідентифікації датчика, реалізація в датчиках функцій по опрацюванню сигналу;
- можливість самодіагностики.

Кожна типова та інші операції алгоритмічного ланцюга можуть бути реалізовані різними методами і технічними засобами. Різні варіанти відрізняються точністю виконання операцій, об'ємом необхідної пам'яті, часом виконання і т.д.

Точність, з якою працює алгоритмічний ланцюг, і, значить, точність оцінки контрольованих величин X_k визначається похибкою датчиків, складом алгоритмічного ланцюга, конкретним видом алгоритмів перетворення і похибками їх реалізації.

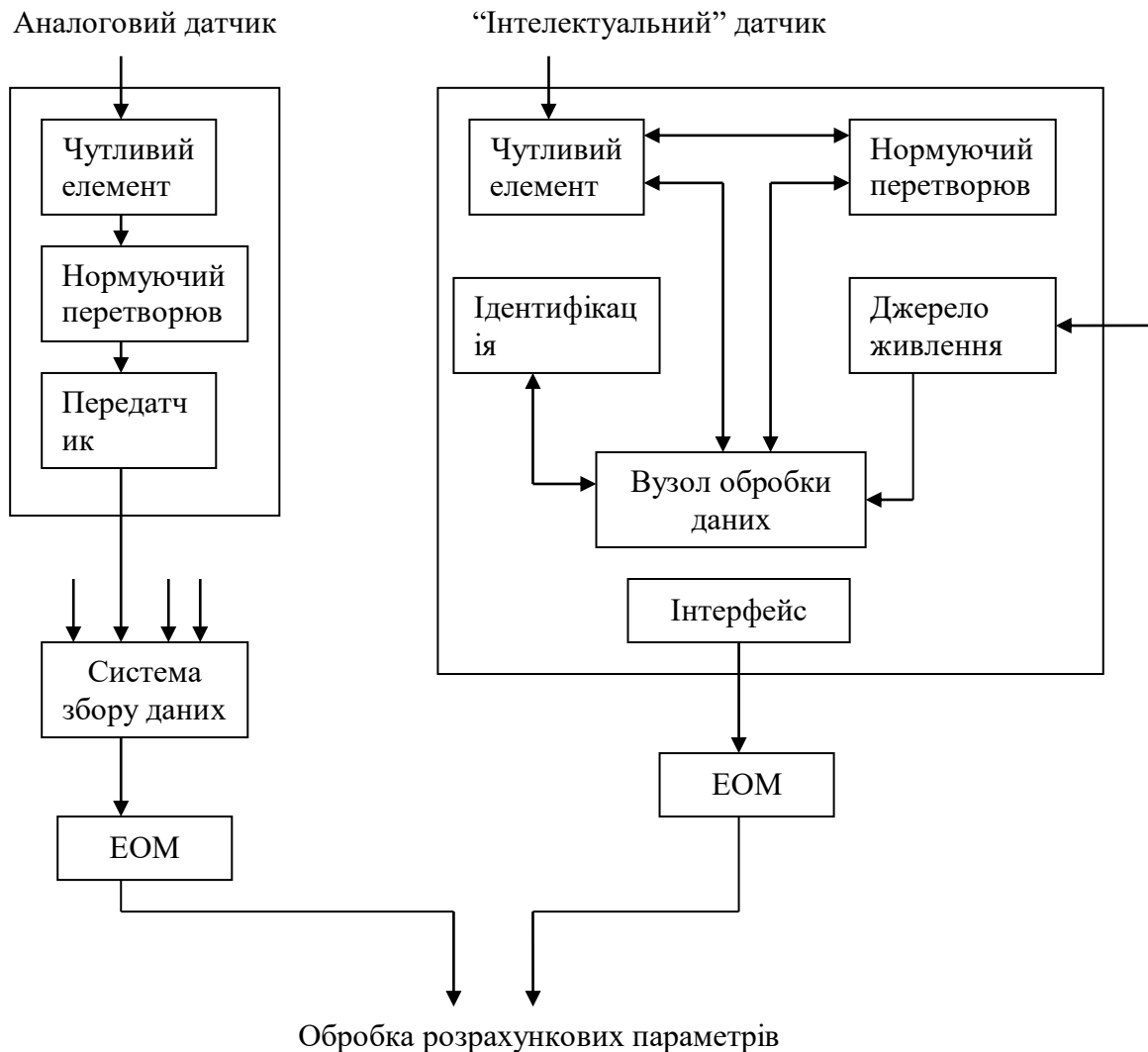


Рис. 3.7. Структурні схеми взаємозв'язку аналогового і "інтелектуального" датчиків з ЕОМ

Знаючи середнє квадратичне похибки датчиків і перетворювачів і задавшись середніми квадратичними похибками роботи окремих алгоритмів, які у сукупності складають алгоритмічні ланцюги, можна оцінити середню квадратичну похибку розрахунку будь-якої контрольованої величини X_{ki} .

3.5 Визначення частоти опитування датчиків

В системах централізованого контролю або системах послідовної дії, в яких здійснюється послідовний збір і обробка інформації від декількох датчиків, виникає задача визначення допустимих інтервалів між моментами вимірювання кожної величини. У зв'язку з цим контролювані величини X_c , що характеризують безперервні процеси, можна умовно поділити на дві групи:

1. Величини, які можуть впливати на характеристики стану об'єкта своїми миттєвими значеннями в часі, наприклад, викликати в об'єкті аварійний режим.

2. Величини одиничні, короткочасні, коливання яких суттєво впливають на режим роботи об'єкта. Такі величини звичайно контролюються не по миттєвих, а по середніх або сумарних значеннях за якийсь проміжок часу. До них відносяться, наприклад, більшість техніко-економічних показників роботи об'єкта.

Нехай величина $X(t)$ вимірюється в дискретні моменти часу t_j , $i = 0, 1, 2, \dots$ з інтервалом $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. В інтервалі між вимірюваннями дійсні значення величини $X(t)$ невідомі, отже, величину спостереження можна подати у вигляді

$$Y_c(t) = X(t) + \delta(Y_i, t), \quad t_i \leq t \leq t_{i+1}, \quad (3.3)$$

де $\delta(Y_j, t)$ - похибка спостереження.

Величина $\delta(Y_j, t)$ приймає наступні значення:

$$\delta(Y_i, t) = \begin{cases} \Delta X_{и}, & \text{при } t = t_i \\ \delta_l(X, t), & \text{при } t_i < t < t_{i+1} \end{cases}, \quad (3.4)$$

де $\Delta X_{и}$ - похибка вимірювання; $\delta_l(X, i)$ - похибка екстраполяції значень величини в інтервалі між вимірюваннями:

$$\delta_l(X, t) = X_1(t) - X(t) \quad (3.5)$$

де $X_1(t)$ - екстрапольовані значення величини.

Для різних величин і систем контролю до похибки спостереження $\delta_l(X, t)$ висуваються різні вимоги.

Математичним виразом цих вимог звичайно в деякий функціонал $F\{\delta(X, t)\}$ від помилки $\delta_l(X, t)$ визначений на інтервалі. Чисельне значення функціоналу для

даної величини визначається похибкою вимірювання ΔX_1 , похибкою екстраполяції δ_1 та інтервалом між вимірюваннями

$$F\{\delta(X,t)\}=\varepsilon(\Delta X_1 \delta_1 \Delta t) \quad (3.6)$$

Задавшись допустимим значенням функціоналу помилки $E_{\text{доп}}$ і розв'язуючи рівняння

$$E(\Delta X_1 \delta_1 \Delta t)=E_{\text{доп}} \quad (3.7)$$

відносно Δt знаходимо шуканий інтервал між вимірюваннями. Величини, які відносяться до першої групи, вимагають, як правило, безперервного контролю. У випадку його неможливості або недоцільності інтервал Δt вибирається з умови, щоб максимальне відхилення величини $X(t)$ на цьому інтервалі не перевищувало деякої заданої додатної величини $E_{\text{доп}}$. Отже, в даному випадку функціонал помилки має вигляд

$$F\{\delta(X,t)\}=\max|\delta(X,t)|, t \leq t \leq t_{i+1}. \quad (3.8)$$

Найбільш часто застосовується метод ступінчастої екстраполяції (рис. 3.8), при якому значення величини інтервалі в інтервалі між вимірюваннями приймаються рівними значенню в останній момент часу, тобто

$$X_1(t)=X(t_i)+\Delta X(t_i).$$

У цьому випадку похибка екстраполяції рівна:

$$\delta_1(X, t)=X(t_i)+\Delta X(t_i)-X(t) \text{ і } \delta_{1\text{max}}(\Delta t)+\Delta X_{1\text{max}}=E_{\text{доп}} \quad (3.9)$$

$\Delta X_{1\text{max}}$ – максимальна абсолютна похибка вимірювання; $\delta_{1\text{max}}(\Delta t)$ – максимальна абсолютна похибка екстраполяції величини $X(t)$ при $\Delta X_{1\text{max}}=0$.

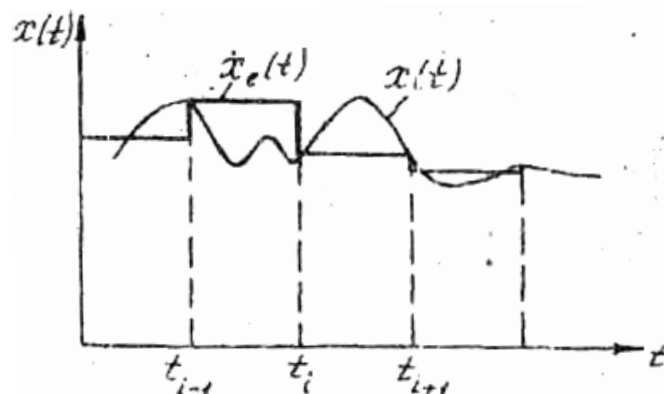


Рис. 3.8. Ступінчаста екстраполяція вимірювання величини

Максимальну помилку ступінчатої екстраполяції $\delta_{lmax}(\Delta t)$ можна оцінити різними способами. Зокрема, використовуючи формулу Лагранжа для достатньо малих Δt , одержимо

$$\delta_{lmax}(\Delta t) \approx |X'_{max}(t^*)| \Delta t, \quad (3.10)$$

де максимальне значення похідної $X'_{max}(t^*)$ оцінюється по достатньо тривалому запису вимірювання величини $X(t)$ або використовуючи нерівність С.Бернштейна

$$|X'_{max}(t^*)| < 10_c |\Delta X_{max}|, \quad (3.11)$$

де 10_c - частота зрізу спектра функції $X(t)$, що має обмежений спектр; ΔX_{max} - максимальне відхилення $X(t)$ від середнього значення.

Тоді

$$\Delta t = \frac{\varepsilon_{доп} - \Delta X_{umax}}{|X'_{max}(t^*)|} \quad (3.12)$$

Інший спосіб визначення $\delta_{lmax}(\Delta t)$ можна застосувати, якщо $X(t)$ є вихідною величиною деякого об'єкта з відомою імпульсною або перехідною функціями. Припустимо, що імпульсна функція представляє собою додатну монотонно спадаючу функцію. До цього випадку можна віднести більшість об'єктів, які описуються лінійними диференціальними рівняннями, в яких перехідна функція добре апроксимується функцією з монотонно спадаючою похідною і чистим запізненням. При цих припущеннях максимально можливий приріст $X(t)$ на відріжку $[t_{i+1}; t_i + \Delta t]$ і значить, максимальна похибка ступінчатої екстраполяції визначається перехідною функцією

$$\delta_{lmax}(\Delta t) = h(\Delta t). \quad (3.13)$$

Тоді при малих значеннях $E = E_{доп} - \Delta X_{lmax}$ можна прийняти.

$$h(\Delta t) \approx h'(0) \Delta t \quad (3.14)$$

інтервал Δt визначити по тій же формулі, де тепер $|X'_{max}(t^*)| = h'(0)$.

Зокрема, для інерційної ланки з перехідною функцією $h(\Delta t) = A(1 - e^{-\Delta t/T})$, інтервал визначається по такій формулі

$$\Delta t = -T \ln(1 - j) \quad (3.15)$$

або по наближеній $\Delta t \approx jT$, яка дає хороші результати при $j < 10\%$. T - постійна часу об'єкту.

Величини, які відносяться до другої групи, вимагають, як правило, періодичного контролю. При цьому можна скористатись і іншим функціоналом помилки - максимальним середнім квадратом помилки в інтервалі Δt .

$$\{\delta(X,t)\} = \max M \{[\delta(X,t)]^2\} = G_{\delta_{\max}}^2, t_i \leq t \leq t_{i+1} \quad (3.16)$$

При ступінчастій екстраполяції маємо похибку екстраполяції

$$\delta_1(X,t) = X(t_i) + \Delta X_u(t_i) - X(t) \quad (3.17)$$

$$G_{\delta_{\max}}^2 = \max M \{X(t_i) + \Delta X_u(t_i) - X(t)\}^2, t_i \leq t \leq t_{i+1} \quad (3.18)$$

Якщо похибку вимірюванню $\Delta X_u(t_i)$ можна вважати незалежною від вимірюваних значень величини $X(t)$ і її систематична складова рівна нулю, то наступний вираз приводиться до вигляду:

$$G_{\delta_{\max}}^2 = \max \{2[R_x(0) - R_x(T) + G_u^2]\}, G \leq T \leq \Delta t, \quad (3.19)$$

де $R_x(t)$ - кореляційна функція процесу $X(t)$, G_u дисперсія похибки вимірювання.

Звідси видно, що для більшості практичних випадків, коли крива кореляційної функції монотонно спадає на інтервалі від 0 до Δt , максимальне значення $G_{\delta_{\max}}^2$ має місце в момент часу, що передуює наступному вимірюванню, тобто $T = \Delta t$.

Задавшись максимально допустимим значенням $G_{\delta_{\max}}^2$, одержимо рівняння

$$R_x(\Delta T) = R_x(0) - \frac{G_{\delta_{\max}}^2 - G_u^2}{2} \quad (3.20)$$

з якого визначається інтервал Δt між вимірюваннями.

Якщо кореляційна функція задана графічно, то процес визначення Δt можна зрозуміти, розглянувши рис. 1.9.

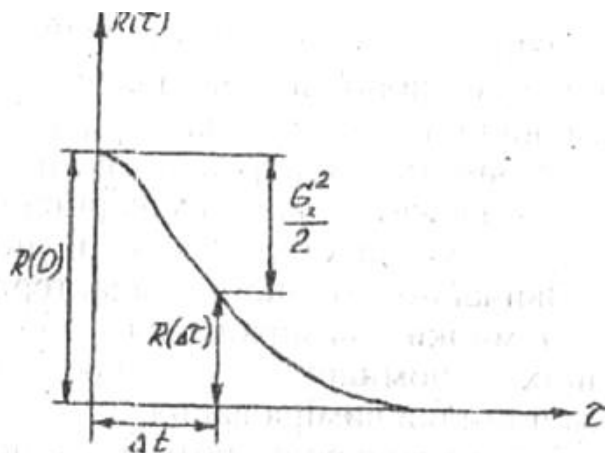


Рис. 3.9. Графік нормованої автокореляційної функції

Задавшись довільним значенням Δt , визначаємо для нього G_x і порівнюємо з заданим значенням G_x . Процес повторюється до співпадання середньоквадратичної похибки з заданою.

В таблиці 3.1 приведені вимірні значення тиску на вході і виході нагнітача.

Таблиця 3.1

Дані вимірювання тиску на виході і на вході нагнітача

№ п/п	Час t , хв.	Тиск на виході, МПа	Тиск на вході, МПа
1	15,42	3,20	2,21
2	15,44	3,27	2,28
3	15,46	3,33	2,33
4	15,48	3,38	2,37
5	15,50	3,40	2,39
6	15,52	3,42	2,41
7	15,54	3,43	2,41
8	15,56	3,45	2,39
9	15,58	3,47	2,45
10	16,00	3,48	2,46
11	16,02	3,43	2,42
12	16,04	3,55	2,52
13	16,06	3,58	2,57
14	16,08	3,60	2,59
15	16,10	3,68	2,64
16	16,12	3,70	2,69
17	16,14	3,75	2,70
18	16,16	3,80	2,80
19	16,18	3,80	2,80
20	16,20	3,80	2,80
21	16,22	3,82	2,80
22	16,24	3,83	2,80
23	16,26	3,83	2,82

Визначаємо закон розподілу вимірних величин. Розбиваємо сукупність вимірних значень на інтервали. Визначаємо інтервали вимірювань для першої і другої групи за формулою $h = (F_{\max} - F_{\min}) / (1 + 3,322 \lg n)$.

3,2 ÷ 3,3256	2,21 ÷ 2,3285
3,3256 ÷ 3,4512	2,3285 ÷ 2,447
3,4512 ÷ 3,5768	2,447 ÷ 2,5655
3,5768 ÷ 3,7024	2,5655 ÷ 2,684
3,7024 ÷ 3,8280	2,684 ÷ 2,8025
3,7024 ÷ 3,8280	2,8025 ÷ 2,921

Використаємо до досліджуваного розподілу критерій Пірсона. Для цього виконаємо ряд додаткових розрахунків і занесемо їх в таблицю 3.2 і 3.3.

Отримуємо наступні функції розподілу

$$f(P_{\text{вих}}) = \frac{1}{5,63} e^{-\frac{(P_{\text{вих}} - 38,06)^2}{10,16}};$$

$$f(P_{\text{вих}}) = \frac{1}{6,45} e^{-\frac{(P_{\text{вих}} - 129,75)^2}{13,35}}.$$

Графіки густини розподілу приведені на рисунках 3.10 і 3.11.

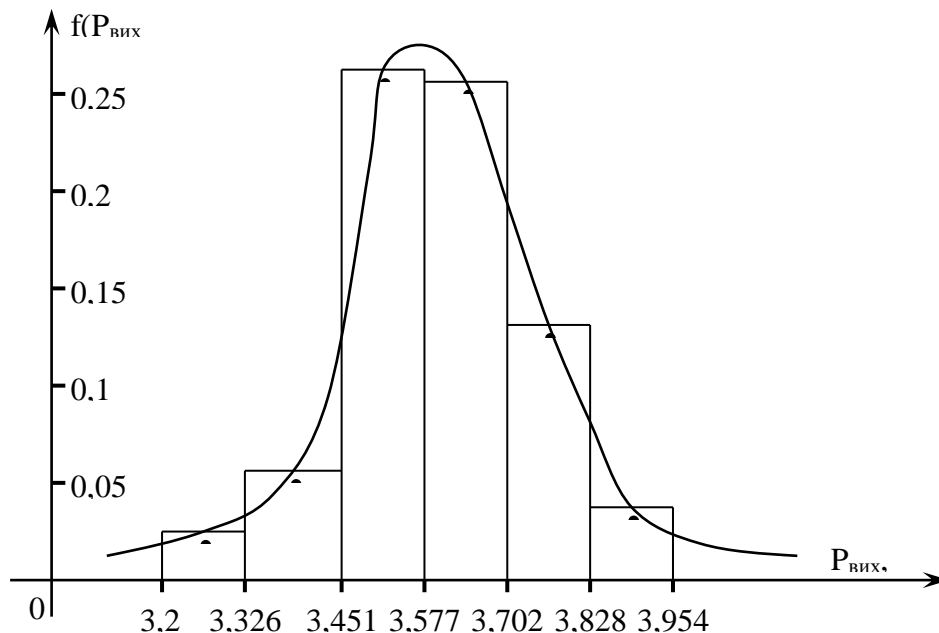


Рис. 3.10. Гістограма і густина розподілу тиску на виході нагнітача

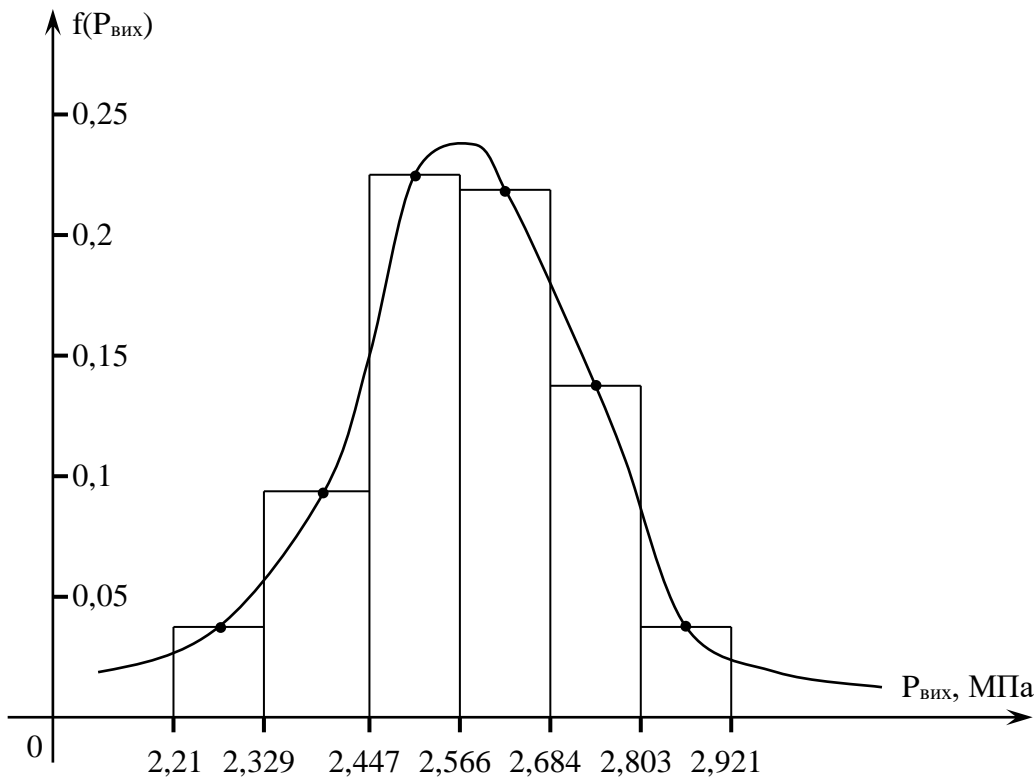


Рис. 3.11. Гістограма і густина розподілу тиску на вході нагнітача

Максимальне значення середньоквадратичної похибки S_{\max}^2 визначається як:

$$S_{\max}^2 = 2(D_x - r_{xx}(h)),$$

$$\text{де } r_{xx}(h) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x(t_{i+1}) \cdot x(t_i).$$

Крок дискретності визначаємо за формулою:

$$h = h_0 \left[\frac{\ln(D_x - 0,5 \cdot S_{\max}^2) / D_x}{\ln r_{xx}(h_0) / D_x} \right]^{1/2}.$$

Задаємось $S_{\max}^2 \leq 0,4$ і початковим кроком дискретизації $h_0=1$ с. Із попередніх розрахунків отримали, що дисперсія вихідної величини $D_x=4,84$ і $r_{xx}(h_0)=2,34$, тоді $h=0,075$ с.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі виконано моделювання роботи автоматизованої системи контролю технологічних параметрів газоперекачувального агрегату (ГПА), що дало змогу комплексно оцінити її функціональні можливості, динамічні характеристики та ефективність реагування на зміни експлуатаційних умов. На основі побудованої математичної моделі було досліджено поведінку ключових параметрів, таких як тиск, температура, витрата та параметри обертання агрегату, у типових та збурених режимах роботи.

Результати моделювання підтвердили, що застосування сучасної автоматизованої системи контролю дозволяє суттєво підвищити точність реєстрації технологічних параметрів, зменшити вплив завад, а також забезпечити стабільність роботи ГПА в широкому діапазоні режимів. Модель продемонструвала здатність системи оперативно реагувати на зміни навантаження, підтримувати необхідні технологічні умови та запобігати виникненню небезпечних відхилень завдяки впровадженню засобів фільтрації сигналів та алгоритмів оцінювання стану обладнання.

Особливу увагу приділено аналізу перехідних процесів, що дало можливість дослідити якість регулювання в умовах різких змін експлуатаційних параметрів. Було встановлено, що система забезпечує прийнятний час стабілізації, мінімальні перерегулювання та високу стійкість до збурювальних впливів. Це підтверджує ефективність реалізованих методів цифрової обробки сигналів та оптимізації вимірювальних каналів.

Проведене моделювання також дозволило виявити потенційні вузькі місця в роботі системи, що є основою для подальшого вдосконалення алгоритмів контролю, підвищення надійності роботи окремих модулів та уточнення технічних вимог до апаратної частини.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ГПА

4.1 Розробка системи обробки технологічної інформації

Об'єктом диспетчеризації є компресорний цех, у якому встановлені 6 ГПА, а також загальноцехове технологічне устаткування

Установки агрегатної автоматики, а також технічні засоби виміру загальноцехових параметрів, є джерелами технологічної інформації для організації пункту диспетчерського контролю.

Як датчики аналогових сигналів використовуються серійні датчики пристосовані для роботи у вибухонебезпечних середовищах з нормованим аналоговим виходом.

Система повинна вирішувати наступні задачі:

- збір технологічної інформації з параметрів ГПА й обміну даними з ЕОМ;
- прийом даних з ЕОМ;
- первинна обробка даних для передачі в ЕОМ

Виходячи з усього вищесказаного, а також прийнявши в увагу функції і задачі розв'язувані системою і контролером, і використовувавши довідкову літературу були прийняті наступні рішення:

- Використовувати персональний ЕОМ у силу простоти придбання й обслуговування;
- Використовувати послідовний порт для прийому-передачі інформації;
- Використовувати вилучені контролери, що будуть опитувати датчики і по запиті від ЕОМ передавати необхідні дані;
- Використовувати інтерфейс RS-485 і перетворювач інтерфейсу RS-232/RS-485;

У силу того, що поставленою задачею є проектування самого мікроконтролера збору аналогових сигналів з підвищеною точністю і швидкодією, опис програмного забезпечення ЕОМ, роботу ГПА і вимір датчиків будемо упускати.

4.2 Розробка функціональної і принципової електричних схем мікроконтролера

4.2.1 Розробка функціональної схеми

При розробці функціональної схеми контролера, що є складовою частиною системи збору технологічних параметрів ГПА компресорного цеху(КЦ) враховувалися вимоги, викладені в технічному завданні. На кресленні ТОСУ.09803.121 Е1 зображена функціональна схема мікроконтролера. Дана схема містить наступні функціональні вузли:

- вузол процесора;
- сторожовий таймер WDT;
- перепрограмоване постійне запам'ятовуюче пристрій(ППЗУ);
- вузол оптронної розв'язки ланцюгів по напрузі;
- аналого-цифровий перетворювач;
- фільтр нижніх частот;
- диференціальний підсилювач;
- контролер інтерфейсу RS-485;
- вторинне джерело живлення
- цифрова схема зв'язку процесора й АЦП;

Найпоширеніший мікроконтролер є MCS-51.

В даний час існує велика кількість різновидів цієї архітектури. MCS52 відрізняється від 51-го збільшеним обсягом пам'яті програм і даних(ПЗУ-8 кб, ОЗУ-256 Б) і убудованим 3-м таймером/лічильником. Вартість такого

мікроконтролера ледве вище. Тому нашу систему збору будемо будувати на базі 52-го контролера. Вибираємо 8-ми розрядний процесор фірми Atmel серії AT89C55-12PC. Напруга живлення 5 В.

Через порт 0 будемо задавати за допомогою джемперів швидкість обміну процесора з ПЕОМ. Швидкості обміну: 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 57600, 115200 б/с.

Через порт 1 будемо «спілкуватися» з АЦП.

Через порт 2 будемо задавати власну адресу контролера, що встановлюється за допомогою джемперів.

Через послідовний порт P3.6(WR), P3.7(RD) будемо одержувати і передавати повідомлення ЕОМ.

Джерелом синхронізації є внутрішній тактовий генератор із зовнішнім кварцовим резонатором. Для різних версій кристалів частота тактового генератора може знаходитися в межах від 3,5 до 33 МГц. Для реалізації необхідної швидкості спілкування ЕОМ і контролера вибираю відомий кварцовий резонатор з частотою 11,059 МГц.

Для «коректного» включення процесора вибираємо сторожовий таймер(Watchdog-WDT) фірми AnalogDevices(Іж=5 В). Процесор буде знаходитися в стані скидання по каналу Reset (Res) доти поки живлення не досягне визначеного рівня. Крім того, у ньому убудований лічильник, що програмно можна скидати. Якщо програма «зависла» лічильник неможливо буде обнулити і при переповненні його процесор «скинеться» по каналі Res. Це забезпечує безпечну роботу процесора в будь-яких непередбачених ситуаціях.

Параметри конфігурації контролера, такі як швидкість обміну по послідовному каналу зв'язку, наявність перевірки контрольної суми в прийнятому повідомленні, діапазон зміни вхідного сигналу і його розмірність, вид представлення обмірюваних значень при передачі на адресу основної обчислювальної системи, верхнє і нижнє граничні значення вхідного сигналу, по яких виробляється автоматичне керування дискретними виходами, зберігаються в

убудованому ре-програмувальному ПЗУ з електричним записом/електричним стиранням..

Перш ніж проектувати аналогову частину необхідно вибрати АЦП. На підставі теоретичного огляду по видах АЦП, описаним вище, найбільш придатним є АЦП, що використовує Σ - Δ перетворення. Тому що АЦП такого виду може мати два вхідних вимірювальних канали, можна, використовуючи вісім АЦП, вимірювати одночасно 16 аналогових величин. Вибираю АЦП фірми AnalogDevices AD7705, що має наступні основні характеристики:

- Розрядність – 16;
- Напруга живлення- 5 В;
- Вхідна напруга - 0 - 2.5 Вт;
- Струм споживання - 450 мкА;
- Час перетворення – 20 мс;
- Нелінійність перетворення - +/- 0.012%

Джерело опорної напруги (ДОН) має своєю функцією виставити зразкову напругу для настроювання АЦП. Через велику кількість АЦП ДОН реалізуємо один із застосуванням повторювача, реалізований на ОУ з $K_u=1$, для підвищення потужності. Використовуючи мікросхему AD780AN одержуємо на виході 2,5В.

Для опитування усіх восьми АЦП використовуємо дешифратор адрес, реалізований на мікросхемі 74НС138N. Для одержання сигналу готовності DRDY від АЦП використовуємо мультиплексор, реалізований на мікросхемі CD4051N.

Більш детальний опис АЦП AD7705, послідовний інтерфейс з мікроконтролером, внутрішня структура неведені на плакаті.

За технічним завданням відомо, що вхідний сигнал мікроконтролера дорівнює +/-10В. Для нормальної роботи АЦП необхідно зменшити сигнал до рівня 2.5В. Для цього використовуємо диференціальний підсилювач.

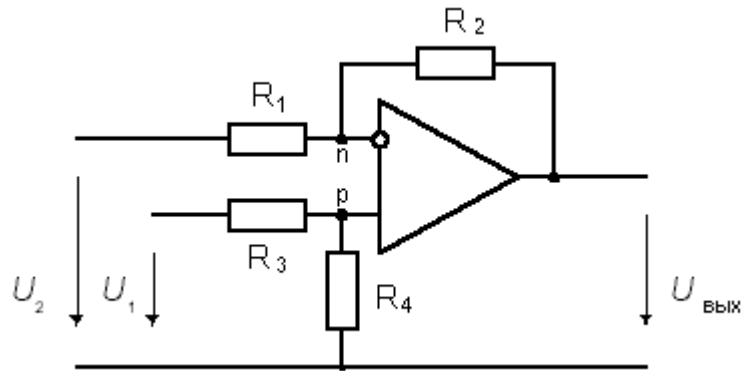


Рис. 4.1. Диференціальне включення ОУ

При виконанні умови $R_1/R_2 = R_3/R_4$ посилення диференціального сигналу набагато більше посилення синфазного сигналу і коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу (КОСС) буде максимальним.

Вибираємо ОУ серії AD8552AR. Тому що живлення ОУ 5В, те для нормальної роботи ОУ сигнал будемо підсилювати не щодо землі, а щодо половини живлення 2.5 В.

Вибираємо номінали резисторів $R_1 = R_3 = 1,2 \text{ Мом}$, $R_2 = R_4 = 200 \text{ кОм}$.

Коефіцієнт передачі ОУ дорівнює: $R_2/R_1 = 0,166(6)$; Напруга на виході ОУ буде лежати в межах $\pm 1,66(6) \text{ В}$, що сприяє нормальній роботі АЦП.

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу, обумовлений неузгодженістю резисторів, дорівнює:

$$K_{\text{сф1}} = (R_1 R_4 - R_2 R_3) / (R_1 (R_3 + R_4)) \quad (4.1)$$

$$K_{\text{сф1}} = 0$$

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу буде визначатися тільки кінцевим значенням КОСС операційного підсилювача.

Для придушення високочастотних перешкод, що впливають на сигнал, між ОУ й АЦП поставимо фільтр нижніх частот першого порядку ($R = 1 \text{ кому}$, $Z = 0,1 \text{ мкф}$).

Для того, щоб «повернути» рівень 0 на вході АЦП необхідно на диференціальний вхід подати $2.5U$.

4.2.2 Розробка принципової схеми

Принципова схема контролера поділяється на дві частини: аналогову і цифрову. Схема проектується за допомогою пакета OrCAD(система проектування цифрових пристроїв).

Джерело вторинного живлення спроектований в інституті автоматики і його можна застосувати в розроблювальному контролері.

Крім видачі стабілізованої напруги 5В, у джерелі живлення реалізована гальванічна розв'язка по живленню процесора і цифрових схем U_{cc} і живлення контролера інтерфейсу RS-485 U_{rs}. Для гальванічної розв'язки приймаємо діодні і транзисторні оптопар. Транзисторні оптопар поруч своїх властивостей вигідно відрізняються від інших видів оптронів. Це насамперед схемотехнічна гнучкість, що виявляється в тім, що колекторним струмом можна керувати як по ланцюзі світодіода (оптично), так і по базовому ланцюзі (електрично), а також у тім, що вихідний ланцюг може працювати й у лінійному й у ключовому режимі. Механізм внутрішнього посилення забезпечує одержання великих значень коефіцієнта передачі струму K_i , так що наступні підсилювальні каскади не завжди необхідні. Важливо, що при цьому інерційність оптопар не дуже велика і для багатьох випадків цілком припустима. Вихідні струми фототранзисторів значно вище, ніж, наприклад, у фотодіодів, що робить їх придатними для комутації широкого кола електричних ланцюгів. Нарешті, слід зазначити, що все це досягається при відносній технологічній простоті транзисторних оптопар.

Для захисту й індикації при неправильній полярності живлення застосовуємо стабілітрон BZV84C32, діод 1N4004 і два світодіода L-53LGD, L-53LID.

Вузол узгодження рівня логічного 0 у каналі передачі від ЕОМ до процесора реалізуємо на двох інверторах серії 74НС00N.

4.3 Розробка програмного забезпечення

Програмне забезпечення зв'язане з роботою мікроконтролера досить велике і торкає практично всіх аспектів функціонування, як самого контролера, так і всієї системи збору параметрів ГПАКЦ.

Програмне забезпечення системи можна підрозділити на дві складові:

1. Програма написана на одній з мов верхнього рівня. Ця програма зберігається і запускається в ЕОМ.
2. Програма написана мовою Асемблер процесора. Ця програма зберігається в ППЗУ контролера і починає свою роботу з моменту включення контролера (подачі на нього харчування).

Формат даних

Зв'язок програмувального контролера з комп'ютером здійснюється по протоколу MODBUS. Контролер визначений як відомий пристрій і може тільки відповідати на запити, що надходять від ведучого.

Параметри обміну:

Швидкість задається перемикачем на платі(1200...115200)

Розрядність 8 біт;

Старт 1 біт;

Стіп 1 біт;

Контроль по паритету немає.

Обмін між пристроями завжди складається з двох повідомлень. Перше повідомлення є повідомленням запиту, що надходить від ведучого до визначеного відомого пристрою. Друге повідомлення-це одиночна відповідь, що надходить від відомого до ведучого. Обоє повідомлення відформатовані, як повідомлення

MODBUS, що називають пакетами. Кожен пакет складається з послідовності байтів згрупованих у чотири поля, що описані нижче:

Адресне поле-перше поле в пакеті повідомлення. Складається з одного байта. У форматі пакета цей байт визначає адресу пристрою, до якого направляється запит. Кожному відомому пристрою в мережі зв'язку MODBUS привласнюється свій неповторюваний адреса.

Функціональне поле-друге поле в пакеті повідомлення. Складається з одного байта. Це поле визначає функцію, що відомий пристрій повинний виконати. Якщо відомий пристрій може виконати запитувану функцію, то функціональне поле відповіді буде таким же, як і поле запиту. Якщо відомий пристрій не може виконати запитувану функцію, то функціональне поле повертається з одиницею в старшому розряді. Це повідомляє ведучому пристрою, що відомий пристрій повертає повідомлення про помилку.

Поле даних- третє поле в пакеті повідомлення. Довжина поля залежить від типу функції.

Поле перевірки- останні два байти в пакеті. Значення цього поля обчислюється шляхом виконання циклічного контролю(CRC—16).

Синхронізація пакетів здійснюється за рахунок завдання обмеження інтервалу часу між послідовними байтами в межах одного повідомлення. Якщо за час необхідний на передачу трьох байт не буде розпізнаний новий, то наступний прийнятий байт буде розглядатися як адресне поле нового повідомлення.

Представлення, внутрішня організація й опитування результатів виміру

Результати виміру по всіх аналогових каналах, представлені у виді двохбайтового цілого значення зі знаком, містяться у внутрішні регістри пам'яті контролера і можуть бути лічені командою читання регістрів. При цьому результат виміру по каналу 0 міститься в регістр з адресою 0000h, по каналу 1 у регістр з адресою 0001h т.д., по каналу 15 у регістр з адресою 000Fh.

Для опитування контролера використовується команда 03-читання регістрів даних.

Формат команди 03

Номер байта	Призначення	Приклад
1	адреса абонента	04
2	команда	03
3	номер рег.(ст.байт)	00
4	номер рег.(мол.байт)	00
5	у рег.(ст.байт)	00
6	у рег.(мол.байт)	04
7	CRC (мол.байт, ст.байт)	445C

Поле значення номера реєстра може приймати значення від 0000h до 00FF.

Поле кількість реєстрів може приймати значення від 0001h до 0010h, тобто однією командою читання можна прочитати шістнадцять реєстрів.

Формат відповіді на команду 03

Номер байта	Призначення	Приклад
1	адреса абонента	04
2	команда	03
3	лічильник інформ.байт	08
4	значення рег.1(ст.байт)	00
5	значення рег.1(мол.байт)	01
6	значення рег.2(ст.байт)	00
7	значення рег.2(мол.байт)	02
8	значення рег.3(ст.байт)	00
9	значення рег.3(мол.байт)	03
10	значення рег.4(ст.байт)	00
11	значення рег.4(мол.байт)	04
12-13	CRC(мол.байт, ст.байт)	1CD8

Формат відповіді на команду 03 з повідомленням про помилку

Номер байта	Призначення	Приклад
1	адреса абонента	04
2	команда	83
3	код помилки	01 чи 02
4	CRC(мол.байт, ст.байт)	1CD8

Поле код помилки може приймати значення:

01-запитана функція не підтримується пристроєм;

02-запитане адресне поле не підтримується пристроєм.

Програма(основний цикл)написана на мові високого рівня PL/M. Вона зберігається в пам'яті контролера. Наведена у додатку А.

Висновок до розділу 4

У даному розділі було виконано комплексне проектування мікропроцесорної системи обробки технологічної інформації газоперекачувального агрегату (ГПА), спрямованої на підвищення точності, швидкодії та надійності контролю ключових параметрів обладнання. Проведений аналіз дозволив сформувані технічні вимоги до системи, враховуючи специфіку функціонування ГПА, характер динаміки параметрів та умови експлуатації у промисловому середовищі.

У межах розроблення було обґрунтовано вибір мікропроцесорної платформи, сенсорних модулів та інтерфейсів обміну даними, що забезпечують багатоканальний збір інформації, високу завадостійкість та сумісність із сучасними системами автоматизації. Розроблена структурна та функціональна схема системи дозволила забезпечити логічну організацію потоків даних, їх попередню фільтрацію, цифрову обробку та формування інформативних показників для подальшого контролю та діагностики стану ГПА.

Результати розроблення підтвердили, що запропонована мікропроцесорна система здатна забезпечити високий рівень автоматизації та інформаційної підтримки процесу керування ГПА. Вона створює передумови для впровадження інтелектуальних систем аналізу стану агрегату, оптимізації режимів роботи та підвищення загальної надійності газотранспортного обладнання. Отримані рішення є важливим етапом у формуванні сучасної технологічної платформи контролю та діагностики ГПА та можуть бути використані у практичних промислових системах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз і характеристичний огляд сучасних середовищ проектування систем керування та контролю з використанням мікроконтролерів. Розглянуто основні способи керування газоперекачувальним агрегатом з використанням класичних та новітніх прогресивних методів та технологій, що дозволило визначити найбільш ефективний спосіб керування, а також підвищити клас точності. На основі їхнього застосування знижуються витрати на автоматизацію основних технічних і допоміжних процесів. У результаті буде вирішена задача комплексної автоматизації виробництва у всіх галузях народного господарства.

2. Принципова схема контролера поділяється на дві частини: аналогову і цифрову. Для гальванічної розв'язки приймаємо діодні і транзисторні оптопари. Транзисторні оптопари поруч своїх властивостей вигідно відрізняються від інших видів оптронів. Це насамперед схемотехнічна гнучкість, що виявляється в тім, що колекторним струмом можна керувати як по ланцюгу світодіода (оптично), так і по базовому ланцюгу (електрично), а також у тім, що вихідний ланцюг може працювати й у лінійному й у ключовому режимі. Механізм внутрішнього посилення забезпечує одержання великих значень коефіцієнта передачі струму K_i , так що наступні підсилювальні каскади не завжди необхідні. Важливо, що при цьому інерційність оптопари не дуже велика і для багатьох випадків цілком припустима. Вихідні струми фототранзисторів значно вище, ніж, наприклад, у фотодіодів, що робить їх придатними для комутації широкого кола електричних ланцюгів. Нарешті, слід зазначити, що все це досягається при відносній технологічній простоті транзисторних оптопар.

3. Розроблено і проведено науковий аналіз напрямків проектування мікропроцесорних систем збору технологічної інформації, а також розроблена модель газоперекачувального агрегату з прилеглими ділянками трубопроводів, що дало можливість провести дослідження даного об'єкту в режимі імітаційного моделювання на реальних експлуатаційних режимах.

4. Синтезована АСК регулювання, а також розроблене програмне забезпечення з використанням мікроконтролера, яке дозволило підтвердити ефективність роботи контролерів. Розглянуто недоліки мікропроцесорної системи обробки технологічної інформації газорозподільних систем, досліджено можливі варіанти вирішення проблем, а також підвищення класу точності до 0,1

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологічний регламент УПГ Богородчанського УМГ ДП “Прикарпаттрансгаз”, 1991р. 303с.
2. Gostev V.I., Chuprin A.Ye., Zakharchuk O.V. Synthesis of Fuzzy-Controller of Control System with "Discrimination Characteristic" -Type Nonlinearity // Telecommunication and Radio Engineering. - 2001, №55(8). - P.68-76.
3. Gostev V.I., Magluy S.A., Chmelev V.O. The synthesis of a digital fuzzy controller of a control system by the object "the steering machine + missile" // Radio Electronics, Computer Science, Control. -2002,№1.-P.3-7.
4. Халатов А.А. Энергетика України: сучасний стан і найближчі перспективи [Текст]/ А.А. Халатов // Вісник НАН України – ISSN 1027-3239. – 2016. – №6. – С.53–61.
5. Shorokhov V.A. Development of a mathematical model simulating the multiply connected automatic control system of a coal-fired power unit equipped with a direct-injection dust feed system [Текст] / А.Р. Smol'nikov, D.A. Kurochkin, et al. // Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 56. - № 10. – P. 868-874.
6. Методичні вказівки і завдання для індивідуальної підготовки студентів по курсах "Проектування, монтаж і експлуатація систем автоматизації" та "Автоматизація технологічних процесів" (Надійність механічних пристроїв автоматики та автоматичних систем керування)
7. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb.2006. P. 41-54.
8. Ковриго Ю.М. Методика налаштування H_{∞} -ПІД регулятора для об'єктів із запізнюванням [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – Київ. – 2019. – № 1. – С. 27-33.

- 9 Silva R.N. Adaptive regulation of super-heated steam temperature: a case study in an industrial boiler [Текст] / R.N. Silva et al. // Control Engineering Practice. – 2020. – Vol. 8. - Issue 12. – P. 1405-1415.
- 10 Шевкопляс Б.В. Мікропроцесорні структури. Інженерні рішення. Довідник.-2-ї вид. Перероб. І доп. -Москва: Радіо і зв'язок,1990.-512с.
- 11 Калабеков Б.А. Цифрові пристрої і мікропроцесорні системи: Підручник для технікумів зв'язку. -Москва: Гаряча лінія-телеком,2000.-336с.
- 12 Контролер мережі уводу-виводу. Технічний опис.
- 13 «СТА»№2/97.Пристрою зв'язку з об'єктом. Модулі фірми Advantech.
- 14 РазевігВ.Д. Система проектування цифрових пристроїв OrCAD.- Москва:Солон-Р,2000.
- 15 , S., Codara, P., Maccari, D., Marra, V. A., Logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, pp. 1-8, 2021.
- 16 Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій та газовій промисловості: навч. посіб. Ч. 1. - Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. - 149 с.
- 17 Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій та газовій промисловості: навч. посіб. Ч. 2. - Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. - 226 с.
- 18 Compernelle, Tine & Witters, Nele & Van Passel, Steven & Thewys, Theo, 2011. "Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO2-emissions," Energy, Elsevier, vol. 36(4), pages 1940-1947. Режим доступу: <https://uhdspace.uhasselt.be/dspace/bitstream/1942/11943/1/compernelle%201.pdf>
- 19 Теорія систем керування: підручник / В. І. Корнієнко, О. Ю. Гусєв, О. В. Герасіна, В. П. Щокін. Дніпро: НГУ, 2017. 497 с.

- 20 Шаруда, В. Г. Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра [Текст]: навч. посіб. / В. Г. Шаруда, В. В. Ткачов, А. В. Бубликов; Держ. ВНЗ "Нац. гірн. ун-т". - Дніпропетровськ: НГУ, 2015. - 489 с.
- 21 Карташов В.В. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Конспект лекцій з дисципліни «Автоматизовані системи керування технологічними процесами». – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 148 с.
- 22 Семенцов Г.Н., Горбійчук М.І., Жуган Л.І., Чеховський С.А. Автоматизація процесів переробки нафти та газу. –Л.; Світ, 1992. -352 с.
- 23 Critten DL, Bailey BJ. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology* 2002;122:1e22.
- 24 Nielsen, B & Madsen, H 1995, 'Identification of Transfer Functions for Control of Greenhouse Air Temperature', *Journal Agric. Engng.Res.*, vol. 60, сторінки. 25 34.
Режим доступу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021863485710931?>
- 25 Лагойда А.І., Шавранський М.В., Когутяк М.І., Борин В.С., Чигур І.І. «Магістерська робота»: Методичні вказівки. – Івано-Франківськ: Факел, 2024. – 30 с.
- 26 Borun V.S., Pankiv N.M. Development of a microprocessor-based system for control and management of gas separation process parameters. Modern aspects of modernization of science: status, problems, development trends. Materials of the 63th International Scientific and Practical Conference. December 7, 2025, Olomouc (Czech Republic). Pp. 232-235. DOI: <https://doi.org/10.52058/63>