

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки

(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

Діагностика аналогових елементів в електронних модулях промислових систем управління

Виконала студентка 2 курсу, групи АУТПм-19-1

Спеціальність «Автоматизоване управління технологічними процесами».

Освітньої програми 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Тип програми освітньо-професійна.

Керівник проф. Омаров М.А..

Допускається до захисту
зав. кафедри

Невлюдов І.Ш.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	<u>Автоматики і комп'ютеризованих технологій</u>
Кафедра	<u>Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки</u>
Рівень вищої освіти	<u>другий (магістерський)</u>
Спеціальність	<u>Автоматизоване управління технологічними процесами</u>
Тип програми	<u>освітньо-професійна</u>
Освітня програма	<u>151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u> (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. Кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

студентові Равлик Ольга Валеріївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Діагностика аналогових елементів в електронних модулях промислових систем управління
затверджена наказом по університету від 02.11.2020 р. № 1510Ст
2. Термін подання студентом роботи (проекту) 16.12.2020 р.
3. Вихідні дані до роботи (проекту) Час перевірки одного елемента в середньому становить 3 хвилини; подача зовнішніх імпульсів на вихідні виводи мікросхем не призводить до виходу з ладу вихідних каскадів в зв'язку з малим часом впливу і обмеженням максимального імпульсного струму ($I_{\max} = 50$ мА); обмеження по струму необхідно також і для перевірки аналогових мікросхем (наприклад, компараторів), вхідні кола яких з'єднані або з вихідними каскадами з відкритим колектором, або з колами живлення
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити)
 - 4.1 Вступ
 - 4.2 Аналіз процесу діагностування аналогових елементів
 - 4.3 Огляд існуючих промислових систем управління
 - 4.4 Процес діагностування
 - 4.5 Ефективність розробленого методу відносно поняття АСК ТП
 - 4.5 Висновки
 - 4.6 Перелік посилань

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів) _____

Графічний матеріал у вигляді презентації - арк. ф.А4 _____

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи (проекту)	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз вихідних даних та літератури за темою	02.11.2020	виконала
2	Аналіз процесу діагностування аналогових елементів	10.11.2020	виконала
3	Процес діагностування аналогових елементів	22.11.2020	виконала
4	Теоретичні дослідження	30.11.2020	виконала
5	Перевірка надійності розробленого методу	10.12.2020	виконала
7	Подання роботи до ДЕК	16.12.2020	виконала

7. Дата видачі завдання _____ 02.11.2020р. _____

Студент _____
(підпис)

Равлик О.В.

Керівник роботи (проекту) _____
(підпис)

_Омаров М.А.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 77 с., 21 рис., 43 джерел посилань.

ТИПОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА, СХЕМИ АЦП, ЦАП, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМ.

Темою атестаційної роботи є дослідження методів підвищення продуктивності процесу контролю систем управління технологічного обладнання за рахунок розробки та застосування програмно-апаратного комплексу.

Об'єкт дослідження – системи управління технологічним обладнанням.

Предмет дослідження – процес контролю технологічного обладнання.

Методи дослідження – метод діагностики багатопроцесорних систем підвищеної складності має декількома перевагами.

В ході виконання атестаційної роботи були проаналізовані сучасні методи діагностики аналогових елементів, їх класифікація і методи їх проектування. Існуючі методи мають недоліки діагностики систем та високу та високі умови ЕОМ, з чого можна зробити висновок, що необхідно удосконалити методи діагностики аналогових елементів.

Запропонований метод застосування примусової діагностики, дозволяє проводити діагностику аналогових елементів, без випаювання їх з плати.

ABSTRACT

Explanatory note contains: 77 pages, 21 figures, 43 sources.

TYPICAL TECHNOLOGICAL PROCESS OF PRODUCTION, ADC
DIAGRAMS, DAC, MATHEMATICAL MODEL, ALGORITHM,

The topic of certification work is the study of methods to increase the productivity of the process of control of control systems of technological equipment through the development and application of software and hardware.

Object of research – control systems of technological equipment.

The subject of research – the process of control of technological equipment.

Research methods – the method of diagnostics of multiprocessor systems of increased complexity has several advantages.

During the attestation work the modern methods of diagnostics of analog elements, their classification and methods of their design were analyzed. Existing methods have the disadvantages of diagnosing systems and high and high computer conditions, from which we can conclude that it is necessary to improve the methods of diagnosis of analog elements.

The offered method of application of compulsory diagnostics, allows to carry out diagnostics of analog elements, without soldering them from a pay

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	6
Вступ.....	7
1 Теоретичні узагальнення в галузі діагностики в електронних модулях промислових систем управління	9
1.1 Аналіз особливостей діагностики в електронних модулях промислових систем управління	9
1.2 Огляд методів технічної діагностики	20
1.2.1 Вібраційний метод діагностування.....	21
1.2.2 Акустичний метод діагностування.....	22
1.3 Теплові методи діагностування.....	25
1.4 Огляд існуючих промислових систем управління.....	27
2 Дослідження процесу діагностики і контролю як складової частини загального технологічного процесу	31
2.1 Класифікація аналогових елементів	31
2.2 Вибір об'єкту дослідження.....	37
2.2.1 Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП)	37
2.2.2 Аналого-цифровий перетворювач (АЦП).....	41
2.2.3 Дешифратор.....	52
2.3 Розробка методу діагностики.....	55
2.3.1 Алгоритм формування пірамідальної мережі.....	57
2.3.2 Опис процесу діагностування аналогових модулів радіоелектронних систем.....	64
2.3.3 Теоретичні дослідження.....	67
3 Надійність розробленого методу.....	75
3.1 Методи розрахунку надійності.....	76
3.2 Ефективність розробленого методу відносно поняття АСК ТП.....	78
Висновки.....	81
Перелік джерел посилання.....	82
Додаток А Презентаційний матеріал	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК ТП – автоматизована система контролю технологічного процесу;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВІС – великі інтегральні мікросхеми;

ІКМ – імпульсно-кодова модуляція;

ІМС – інтегральні мікросхеми;

МЗМ – модифікованої зростаючої мережі;

ПК – амплітудне (позитивне) значення сигналу;

РЕА – радіоелектронна апаратура;

СКЗ – середньо-квадратичне значення сигналу;

СПД – система примусової діагностики;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

ВСТУП

Технічне обслуговування та контроль електронних систем управління технологічного обладнання організовується по-різному в умовах виробництва і експлуатації. При виробництві електронних систем на заводі-виробнику практично немає обмежень на складність використовуваних засобів технічної діагностики (контрольні стенди, прилади, ЕОМ і т. д.). При експлуатації електронних систем обслуговуючий персонал має значно меншими апаратними можливостями, тому в основному застосовуються засоби тестової діагностики.

Використання засобів тестової діагностики в цьому випадку не виключає, а доповнює апаратний контроль, як параметричний, так і функціональний (наприклад, кодів з перфострічки). До особливостей контрольованих електронних систем відносяться їх складність і різноманітність. Наприклад, при контролі щодо простого виробничого модуля доводиться використовувати систему автоматизованого контролю мікропроцесорних блоків, пристрої для контролю і налагодження приводів, пристрої для перевірки систем введення-виведення інформації та т. д. Кожна зі складових частин системи самостійно не функціонує, а пов'язана з іншими частинами, що впливають один на одного, причому при появі збоїв або відмов характер цих зв'язків важко піддається аналізу. Тому контрольована система часто є людино-машинну систему з досить невизначеними функціями, покладеними на людину.

В даний час існують значні проблеми в проведенні процесу діагностики і контролю керуючих систем технологічного обладнання при появі збоїв або відмов на етапі експлуатації. Ці проблеми обумовлені тим, що заводські служби ремонту промелектроніки мають необхідними технічними засобами та повної технічної документації на керуючі системи технологічного обладнання. При відмові такого технологічного обладнання служба ремонту не в змозі оперативно

знайти відмову і його усунути. Крім того, відсутність методів, а також спеціального технологічного устаткування не дозволяє автоматизувати процес діагностики і контролю керуючих системи технологічного обладнання. Отже, для оптимізації процесу налаштування, регулювання і контролю систем управління технологічного обладнання необхідно наявність універсального комплексу діагностики та контролю, що дозволяє зменшити трудовитрати, пов'язані з пошуком відмови, і відновленням обладнання.

Темою атестаційної роботи є дослідження методів підвищення продуктивності процесу контролю систем управління технологічного обладнання за рахунок розробки та застосування програмно-апаратного комплексу.

Об'єкт дослідження – системи управління технологічним обладнанням.

Предмет дослідження – процес контролю технологічного обладнання.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- огляд сучасних методів діагностики аналогових елементів в електронних системах управління;
- огляд моделей опису об'єктів діагностики;
- аналіз та обґрунтування використання інтегрального методу діагностики аналогових елементів РЕА;
- математичне моделювання інтегрального методу діагностики аналогових елементів РЕА.

Атестаційна робота виконана згідно [1-3].

1 ТЕОРЕТИЧНІ УЗАГАЛЬНЕННЯ В ГАЛУЗІ ДІАГНОСТИКИ В ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛЯХ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

1.1 Аналіз особливостей діагностики в електронних модулях промислових систем управління

Спочатку під особливостями в електронних модулях промислових систем управління розглянемо сигнали, що циркулюють в цих модулях.

Аналоговий сигнал – сигнал (напруга, струм тощо), неперервний на всьому проміжку часу. Аналоговий сигнал є або вираженим синусоїдальним коливанням, або, у загальному випадку, розкладеним у ряд (Фур'є) накладанням синусоїдальних коливань певної амплітуди і частоти.

Протилежністю аналоговим сигналам є дискретний сигнал, який має обмежені часові рамки (дискрета, імпульс). Аналоговий сигнал (рис. 1.1) є традиційним для використання у радіо-телекомунікаційних системах, системах автоматичного керування тощо. При передачі інформації аналоговим сигналом, його видозміна можлива шляхом зміни частоти чи амплітуди коливань [4].

Перевагою аналогового сигналу над дискретним є відсутність невизначеності між відліками, яку має дискретний сигнал.

Аналоговий сигнал використовує певні властивості середовища для передачі інформації.

Наприклад, анаероїдний барометр використовує поворотну позицію як сигнал для передачі інформації про тиск. В електричних сигналах для передачі інформації, може змінюватися напруга, струм, фаза або частота сигналу.

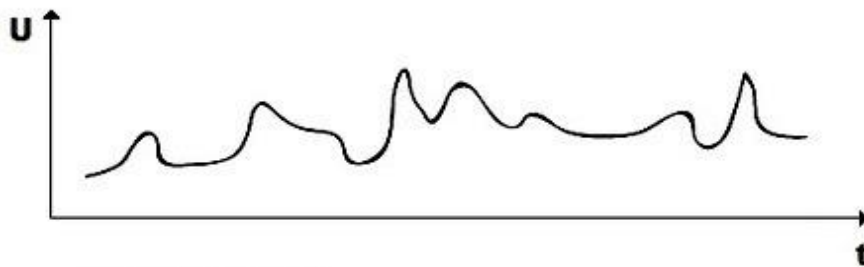


Рисунок 1.1 – Форма аналогового сигналу

Будь-яка інформація може передаватися в формі аналогового сигналу; часто такий сигнал це виміряна реакція на зміну фізичного явища, такого як звук, світло, температура, позиція, або тиск. Фізична величина перетворюється на аналоговий сигнал за допомогою перетворювача. Наприклад, при записуванні звуку, коливання тиску повітря, що діє на діафрагму мікрофона яка приводить до відповідних коливань струму, що створюється котушкою електромагнітного мікрофону, або напруги, яку створює конденсаторний мікрофон.

Теоретично аналоговий сигнал має нескінченну роздільну здатність. На практиці аналоговий сигнал піддається електронному шуму і спотворенню, що спричинені каналами передачі і операцій з обробки сигналів, що можуть значно погіршити співвідношення сигнал-шум (SNR). Перетворення аналогового сигналу в цифрову форму породжує постійний шум низького рівня, який називають шумом квантування, але якщо сигнал уже перетворено в цифрову форму в основному він може передаватися або оброблятися без появи додаткового шуму або спотворення. В аналогових системах, важко встановити коли така деградація відбулася. Однак, в цифрових системах, деградацію можна не лише виявити але і виправити.

Цифровий сигнал – дискретний сигнал з певним значенням інформативного параметра, яке визначається у цифровій формі. Цифрові сигнали (рис. 1.2) є цифровим зображенням дискретного сигналу, який часто видобувається шляхом квантування аналогового сигналу [5].

В комп'ютерах та інших цифрових системах, цифровий сигнал є хвилею, що переключється між двома рівнями напруги (0 та 1). У більшості

комп'ютерних програм цифровий сигнал зображається у вигляді двійкових чисел і тому точність квантизації вимірюється у бітах. Так, наприклад, 4-бітова система забезпечить підтримку $2^4 = 16$ дискретних значень, 7-бітова – $2^7 = 128$, 16-бітова – $2^{16} = 65536$ дискретних значень і т. ін.

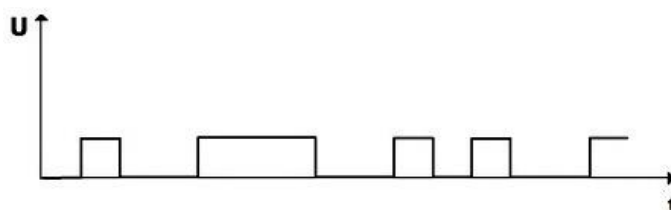


Рисунок 1.2 – Отримання цифрового сигналу

Цифрові технології отримали широке розповсюдження у 1990-ті роки і включають у себе різноманітні медіа пристрої. Сучасні телекомунікації та побутова електроніка працює майже виключно на цифрових технологіях.

В цифровій електроніці цифровий сигнал це послідовність імпульсів (сигнал в імпульсно-амплітудній модуляції), тобто. послідовність електричних імпульсів квадратної форми із фіксованою довжиною, кожен з яких може займати один із рівнів амплітуди, яких можлива дискретна кількість. Особливим випадком є логічний сигнал або двійковий сигнал, який змінюється між високим і низьким рівнем сигналу.

В цифровій обробці сигналів, цифровий сигнал подається дискретизованим і квантованим фізичним сигналом. Цифровий сигнал є абстрацією, яка дискретна у часі і амплітуді. Значення сигналу існує лише в регулярних часових інтервалах, оскільки лише в ці квантовані моменти часу значення відповідного фізичного сигналу є важливими для подальшої цифрової обробки. Цифровий сигнал це послідовність кодів отриманих із кінцевого набору значень.

Цифровий сигнал може зберігатися, оброблюватися чи передаватися фізично як сигнал імпульсно-кодової модуляції (ІКМ).

У цифровому передаванні даних, цифровий сигнал представлений неперервним у часі фізичним сигналом а, що чергується між дискретною кількістю форм хвилі і представляє бітовий потік. Форма хвилі сигналу залежить

від схеми передачі, яка може бути або схемою кодування; або схемою модуляції. Така модульована носієм синусова хвиля вважається цифровим сигналом у літературі із цифрового зв'язку і передавання даних, але в електроніці і комп'ютерних мережах розглядається як перетворений у аналоговий сигнал бітовий потік.

У системах зв'язку, як правило присутні джерела перешкод, які вносять шум у сигнал, що часто є суттєвою проблемою. Ефект інтерференції, як правило, зводять до мінімуму за допомогою фільтрації зашумлених сигналів, наскільки це можливо, а також використовують надмірність інформації. Основною перевагою цифрових сигналів в системах зв'язку завадостійкість при дії шуму, і можливість в багатьох випадках використовувати стиснення даних, як наприклад із радіо та відео даними, що дозволяє значно зменшити необхідну пропускну здатність засобів комунікації.

Перевагами цифрового сигналу над аналоговими є:

- більша захищеність від дії шумів, наводок і перешкод;
- невеликі відхилення від дозволених значень ніяк не викривляє цифровий сигнал, так як завжди існують зони допустимих відхилень;
- дозволяє складнішу і багатоступеневу обробку;
- більш довге зберігання без втрат;
- якісніша передача;
- цифрові пристрої легше проектувати, відлагоджувати. Їхня поведінка більш точно прогнозується та розраховується.

Цифровий сигнал передає інформацію кількома (переважно двома) своїми рівнями і зміною цих рівнів, а аналоговий більш ємний, оскільки несе інформацію кожним поточним своїм значенням. Крім того, цифровий сигнал потребує перебування в певному рівні деякий період часу, інакше його неможливо буде розпізнати. Тому цифрові пристрої працюють повільніше за аналогові і швидкість передачі та обробки інформації аналоговими пристроями завжди може бути більша.

Принципи побудови електронних пристроїв, режими роботи приладів залежать від характеру сигналів, які підлягають обробці. Сигналом називають процес зміни у часі фізичного стану деякого параметру електричного пристрою, який параметр використовується для відображення, реєстрації та передачі повідомлень. Повідомлення нерозривно пов'язані з закладеною у них інформацією.

Сигнали, що використовуються в електронній техніці, розділяються на аналогові, дискретні (імпульсні) та цифрові.

Аналогові сигнали описуються неперервними функціями напруги, струму тощо. Джерелами аналогових сигналів є датчики різноманітних фізичних величин. У залежності від характеру зміни, сигнали розділяються на постійні (такі, що повільно змінюються у часі) та змінні. Носієм інформації в постійних сигналах є його рівень відносно нуля напруги чи струму. Математична модель детермінованого змінного сигналу в загальному вигляді описується формулою:

$$X(t) = \sum_{N=0}^{N-1} X_{m,n} \sin(\omega_n t + \varphi_t)$$

де X – амплітуда;

m – частота;

n – гармоніка;

ω_n, φ_n – початкова та кінцева фази n -ої гармоніки;

N – кількість гармонік.

Електронні схеми поділяються на два класи – аналогові та цифрові. Схеми першого типу призначені для обробки аналогових сигналів, схеми другого типу – для роботи з цифровим сигналом. Цифрові електронні схеми поступово витісняють аналогові навіть із областей традиційного застосування, наприклад, у телебаченні.

Цифровий або дискретний сигнал отримують, квантуючи аналоговий. Передача й зберігання сигналу в цифровому вигляді надійніша, незважаючи на часткове спотворення сигналу при дискретизації.

Прикладом аналогового приладу є аналоговий тип радіоприймача. Аналогова електроніка потребує різноманітних електронних схем: генераторів, підсилювачів, модуляторів та демодуляторів. Радіоприймач отримує від антени модульований електричний сигнал широкого набору частот. Він фільтрує сигнал, виділяючи певну частоту, підсилює його, демодулює, перетворює в сигнал частоти звукового діапазону й передає на динамік для відтворення звуку.

Схеми аналогових приладів зазвичай будуються із стандартних блоків, які виконують певну функцію. Кількість розроблених аналогових схем величезна – від окремих елементів, до схем, що включають тисячі елементів.

Аналогові схеми:

- операційні підсилювачі;
- компаратори;
- генератори сигналів;
- фільтри (у тому числі на п'єзоефекті);
- аналогові помножувачі;
- аналогові атенюатори і регульовані підсилювачі;
- стабілізатори джерел живлення: стабілізатори напруги і струму;
- мікросхеми управління імпульсних блоків живлення;
- перетворювачі сигналів;
- схеми синхронізації.
- різні датчики (температури та ін.).

Одним з перших публічно сформулював першочергові завдання інтегральної аналогової схемотехніки Роберт Відлар: пошук способів компенсації температурного дрейфу, технологічного розкиду параметрів компонентів, і створення стабільних джерел напруг і струмів. Відлар був правий, вважаючи продаж аналогових схем особливим мистецтвом: мало було випустити

продукт, треба було скласти й опублікувати рекомендації по його застосуванню та донести їх до колег – інженерів, учених і замовників.

Перші серійні мікросхеми Fairchild Semiconductor вийшли на ринок влітку 1962 року. Головний розробник компанії Гордон Мур зробив ставку на логічні схеми, так як вважав, що тільки вони можуть бути зроблені з прийнятною вартістю та надійністю. Аналогові схеми були більш чутливі до відхилень в технології, тому вихід придатних аналогових схем був заборонно низький. Три аналогові мікросхеми, випущені Fairchild в 1963 році для військових замовників, становили мізерну частку у виробничій програмі компанії.

Ці підсилювачі були спроектовані так, як проектувалися схеми на дискретних компонентах. У «звичайній» електроніці активні прилади (транзистори і лампи) були дорогі, а пасивні (резистори, конденсатори, невеликі індуктивності) – дешеві, причому ціна резистора практично не залежала від величини його опору.

Планарний процес обмежив вибір схемотехніка до біполярних транзисторів рпн-типу, діодів, і резисторів середніх номіналів (сотні або тисячі Ом). Вартість такого резистора, похідна від займаної ним площі, була порівнянна з вартістю базового транзистора. За межами цього діапазону площа та вартість резистора різко зростали, резистор в 150 кОм вважався нереалізованим, оскільки займав більшу частину типового кристала мікросхеми. Разом з площею резистора росла і його паразитна ємність, яка обмежувала частотний діапазон схеми.

Паразитні ємності і струми витоку транзисторів були також неприйнятно великі. Створення ємностей понад декілька десятків пікофарад і будь-яких індуктивностей було і зовсім неможливо. При цьому традиційна схемотехніка ніяк не використовувала унікальні властивості інтегральних транзисторів – ідентичність умов їх роботи (температура і пов'язані з нею параметри) та ідентичність профілів легування всіх приладів на кристалі.

Вузли електронних схем, що використовують ці властивості, тільки належало винайти. Проектування «за старим звичаєм» в таких умовах було

приречене на невдачу: аналогові мікросхеми «нульового покоління» програвали схемами на дискретних компонентах і в надійності, і в частотному діапазоні, і в споживаній потужності, при ціні від сотень до 20 тисяч доларів за штуку.

Відлар не схвалював стратегію Мура та захоплення цифровою технікою взагалі: «кожен ідіот здатний рахувати до одного». Він зосередився на створенні нової схемотехніки, повністю використовує переваги планарної технології: «Навіть не намагайтеся імітувати дискретні компоненти в кремнії». З часом ця «теорема Відлара» трансформувалася в основне правило аналогової схемотехніки: «Скрізь, де це можливо – замінювати пасивні компоненти на транзистори». Але одного володіння мистецтвом схемотехніки було мало: щоб знайти працездатні рішення, Відлару потрібний доступ на досвідне виробництво. Потрібно було налагодити на практиці виробництво «високовольтних» епітаксійних транзисторів, бічних транзисторів та інших компонентів, що не існували в вигляді дискретних приладів.

Аналогові ІМС призначені для оброблення та перетворення аналогових сигналів і реалізують такі основні аналогові функції: підсилення, порівняння, перемноження, обмеження, частотну фільтрацію. Кожна із названих функцій є відповідною математичною операцією, яку здійснюють ІМС над аналоговими сигналами:

- функція підсилення – це збільшення миттєвих значень сигналу в K разів без нелінійних спотворень у необмеженій смузі частот;
- функція порівняння – це зіставлення двох аналогових сигналів з деякою заданою точністю;
- функція перемноження дає змогу отримати результат перемноження двох аналогових сигналів;
- функція обмеження встановлює межі допустимих змін миттєвих значень сигналу, які він не може перейти. Розрізняють обмеження зверху, знизу та двостороннє обмеження;
- функція частотної фільтрації – це виділення потрібного діапазону частот із повного спектра сигналу, в якому здійснюється передавання його гармонік.

Перелічені основні аналогові функції утворюють у сукупності повний набір операцій, необхідних для перетворення та оброблення аналогових сигналів. Аналогові ІМС виготовляють переважно у вигляді напівпровідникових ІМС та великих інтегральних мікросхем (ВІС).

Операційні підсилювачі (ОП) першого покоління (1964-1965).

Відлар взяв за основу схему транзисторного ОП з трьома каскадами посилення напруги і замінив високоомний емітерний резистор вхідного каскаду на струмове дзеркало, а ємності частотної корекції – на єдину зовнішню ємність. Він розробив і налагодив на дослідних кристалах схему сполучення вхідного диференціального каскаду з одноктактним другим каскадом без втрати посилення і схему зсуву рівнів на транзисторах одного типу провідності. У травні 1964 року дослідний зразок, виготовлений Телбертом, продемонстрував рекордну для свого часу смугу пропускання в 25-30 МГц. Схема, вперше в світі, використовувала тільки кремнієві дифузійні резистори і транзистори – від використання ненадійних плівкових резисторів Відлар відмовився.

Якщо $\mu A702$ був першим інтегральним ОП, то $\mu A709A$ став першим масовим ОП, «типовим видом» першого покоління аналогових мікросхем. Незважаючи на «дитячі хвороби» $\mu A709$, усунення яких зайняло півроку і завершилося переходом на вдосконалений $\mu A709A$, продажі були виключно успішні. Вже до кінця 1965 року продажі аналогових схем склали 40 % виручки Fairchild, компенсуючи відставання компанії на ринку логічних схем. $\mu A709$ став стандартним ОП ВПК США, а потім, у міру зниження ціни, завоював і цивільний ринок.

Наступним за $\mu A709$ були розроблені Відларом швидкісні компаратори $\mu A710$ і $\mu A711$ і прецизійна транзисторна двійка $\mu A726$. Fairchild не продавала ліцензії на винаходи Відлара, але і не перешкоджала їх копіюванню конкурентами, і до 1967 року клони $\mu A709$ випускали Motorola, Texas Instruments, Philco, ІТТ та Westinghouse. У 1970 році випуск всіх версій 709 оцінювався від 20 до 30 мільйонів штук на рік.

Операційні підсилювачі (ОП) другого покоління (1966-1970)

У 1967 році Відлар розробив операційний підсилювач LM101 – перший ОП другого покоління. Його структурна схема стала основою для всіх наступних універсальних ОП. Активні навантаження забезпечили LM101 більші, ніж у попередників, коефіцієнти посилення кожного каскаду, а вхідні емітерні повторювачі, навантажені на диференціальний каскад на pnp-транзисторах – широкий діапазон допустимих вхідних напруг і малі струми зміщення. Коефіцієнт посилення по постійному струму досяг 500 тис. проти 50-100 тис. у підсилювачів першого покоління. Вхідний каскад був захищений від високих напруг, вихідний каскад мав повноцінний захист від короткого замикання. Головна ж відмінність від попередників полягала у використанні двох, а не трьох, каскадів посилення напруги (саме двокаскадна схема і стала «родовою ознакою» другого покоління ОП. Як наслідок, LM101 був гарантовано стійкий при використанні єдиної зовнішньої корегуючої ємності всього в 30 пФ. Відлар скоїв стратегічну помилку, не спробувавши «упакувати» цю ємність на кристал ОП. Рік потому пробіл заповнили конкуренти з Fairchild, випустивши μ A741 – клон LM101 з внутрішньою частотною корекцією.

Саме ця мікросхема і завоювала ринок універсальних ОП, відтіснивши LM101 на узбіччя. Ринок зволів простоту використання μ A741 гнучкості і настроюваності відларівських схем.

У 1968-1969 роках Відлар і Телберт винайшли і відладили у виробництві нові активні прилади - «супер-бета-транзистори» (біполярні pnp-транзистори з надтонким шаром бази і коефіцієнтом посилення понад тисячу), багатоколекторний біполярний транзистор і епітаксимальний польовий транзистор (англ. epiFET). У лютому 1969 вийшов розроблений Відларом за участю Квамме LM108 – перший операційний підсилювач на супер-бета-транзисторах. У грудні 1969 року National випустила новий ОП Відлара і Добкіна, LM101A – функціональний еквівалент LM101 на новій елементній базі, а в 1970 році вийшла його версія з вбудованою корегуючою ємністю – LM107. Новий, шестимасочний технологічний процес Телберта дозволив вперше реалізувати на одному кристалі і пінч-резистори, і польові транзистори, і супер-

бета-транзистори, і бічні pnp-транзистори з коефіцієнтом посилення по струму понад 100. Кількість транзисторів, «обслуговуючих» джерела струму LM101A, було зменшено за рахунок використання багатоколекторних pnp-транзисторів.

Вхідний опір ОП, без складених транзисторів на вході, вперше перевищив 1 Мом.

Інтегральні стабілізатори напруги (1966-1970)

У 1966 році National Semiconductor випустила розроблений Відларом LM100 - перший в історії інтегральний стабілізатор напруги. LM100 дозволяла стабілізувати напруги від 2 до 30 В з сукупною помилкою у військовому діапазоні температур (від -55 до +125°C) не більше 1 %. Джерелом опорної напруги виступав стабілітрон на 6.3 В, регулюючим елементом – відносно малопотужний складений транзистор, тому на практиці LM100 використовувався не як закінчений стабілізатор, а як схема управління зовнішнім силовим транзистором. Попит перевершив найоптимістичніші очікування .

Замовники вимагали зробити наступний крок і об'єднати схему управління і силовий транзистор на одному кристалі, упакувавши повноцінний стабілізатор в корпус з трьома виводами: вхід, вихід і загальний.

Виробництво LM109, першого в світі інтегрального трьохвиводного стабілізатора на напругу +5 В, прямого попередника більш знаменитого (і менш точного) uA7805, почалося в першій половині 1970 року. Нова мікросхема відрізнялася від LM100 не тільки граничними значеннями струму і потужності та зручністю застосування, але і тим, що джерелом опорного напруги в ньому служив не стабілітрон, а так званий бандгап Відлара – транзисторне джерело опорної напруги, приблизно рівної ширині забороненої зони кремнію (близько 1,2 В). Принцип дії бандгапа сформулював ще в 1964 році Девід Хілбібер, але першу практичну схему, що працює на цьому принципі, спроектував саме Відлар. Першою мікросхемою з вбудованим бандгапом і стала LM109, а в 1971 році за ним пішла LM113 – двухвивідний «прецизійний діод» (англ. reference diode) на бандгапі Відлара. Заміна «високовольтного» (близько 6 В) стабілітрона

на низьковольтний (1,2 В) бандгап зробила можливим створення економічних стабілізаторів на низькі вихідні напруги (3,3 В, 2,5 В і нижче) і підсилювачів з низьковольтним живленням (від 1,1 В), проте в 1969 році ця ніша ще не була затребувана промисловістю.

Першою областю масового застосування бандгапів, крім ІС стабілізаторів напруги, стали ранні інтегральні аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі. У 1976 році компанія випустила LM10 – мікропотужний операційний підсилювач і джерело опорної напруги, здатний працювати при нарузі живлення від 1,1 до 40 В, - перший ОП, повністю придатний для роботи від єдиного гальванічного елемента на 1,4 В. За ним пішов LM11 – прецизійний біполярний ОУ, розрахований на електрометричні вимірювання. У 1987 році Відлар запусив у виробництво перший у своєму роді потужний (10 А, 80 Вт) операційний підсилювач LM12.

1.2 Огляд методів технічної діагностики

Технічна діагностика – галузь науково-технічних знань, сутність якої складають теорія, методи і засоби постановки діагнозу про стан технічних об'єктів [6]

Технічна діагностика вивчає методи отримання і оцінки діагностичної інформації, діагностичні моделі і алгоритми прийняття рішень. Метою технічної діагностики є підвищення надійності та ресурсу технічних систем. Як відомо, найважливішим показником надійності є відсутність відмов під час експлуатації технічної системи. Відмова авіаційного двигуна в польотних умовах, суднових механізмів під час плавання корабля, енергетичних установок в роботі під навантаженням може призвести до важких наслідків. Технічна діагностика завдяки ранньому виявленню дефектів і несправностей дозволяє усунути подібні відмови в процесі технічного обслуговування, що підвищує надійність і ефективність експлуатації, а також дає можливість експлуатації технічних систем відповідального призначення за станом.

Основним завданням технічної діагностики є розпізнавання стану технічної системи в умовах обмеженої інформації.

Технічну діагностику іноді називають безрозбірною діагностикою, тобто діагностикою, що проводиться без розбирання чи руйнування виробу. Аналіз технічного стану проводиться в умовах експлуатації, при яких отримання інформації вкрай складне. Часто буває неможливо за наявною інформацією зробити однозначний висновок і доводиться застосовувати статистичні методи.

Теоретичним фундаментом для вирішення основного завдання технічної діагностики слід вважати загальну теорію розпізнавання образів. Технічна діагностика вивчає алгоритми розпізнавання щодо завдань діагностики, які зазвичай можуть розглядатися як завдання класифікації.

Алгоритми розпізнавання в технічній діагностиці частково ґрунтуються на діагностичних моделях, що встановлюють зв'язок між станами технічної системи та їх відбиттям у просторі діагностичних сигналів. Важливою частиною проблеми розпізнавання є правила прийняття рішень (вирішувальні правила).

Вирішення діагностичної задачі (віднесення виробу до справного чи несправного) завжди пов'язане з ризиком помилкової тривоги. Для прийняття обґрунтованого рішення доцільно залучати методи теорії статистичних рішень. Рішення задач технічної діагностики завжди пов'язане з прогнозуванням надійності на найближчий період експлуатації (до наступного технічного огляду). Тут рішення повинні ґрунтуватися на моделях відмов, що вивчаються в теорії надійності.

Діагностування здійснюється або людиною безпосередньо (наприклад, зовнішнім оглядом, «на слух», оцінкою ступеня нагріву через дотик рукою та ін.), або за допомогою апаратури. Об'єкт і засоби його діагностування в сукупності утворюють систему діагностування. Взаємодіючи між собою, об'єкт і засоби реалізують деякий алгоритм діагностування. Результатом цієї взаємодії є висновок про технічний стан об'єкта – технічний діагноз.

Залежно від технічних засобів і діагностичних параметрів, які використовують при проведенні діагностування, можна навести наступний перелік:

- вібраційні методи діагностування;
- акустичні методи діагностування;
- теплові методи;
- специфічні методи для кожної з галузей техніки (наприклад, за вмістом заліза в машинній оливі можна судити про ступінь зносу деталей механізму, за тиском оливи в автомобільному двигуні можна оцінити ступінь зносу вкладишів колінчастого вала і т. ін.)

1.2.1 Вібраційний метод діагностування

Вібраційна діагностика – це метод діагностування технічних систем і устаткування, заснований на аналізі параметрів вібрації, що створюється працюючим обладнанням або є вторинною вібрацією, яка зумовлена структурою досліджуваного об'єкта. Вібраційна діагностика, як і інші методи технічної діагностики, покликана здійснювати пошук несправностей і оцінювати технічний стан досліджуваного об'єкта.

При вібраційному діагностуванні аналізуються:

- вібропереміщення – миттєве значення кожної з координат, які описують положення тіла чи матеріальної точки під час вібрації;
- віброшвидкість – похідна вібропереміщення за часом;
- віброприскорення – похідна віброшвидкості за часом.
- Діагностичними параметрами можуть бути наступні:
 - ПШК – амплітудне (позитивне) значення сигналу;
 - СКЗ – середньо-квадратичне значення (діюче значення) сигналу;
 - ПШК-фактор – відношення параметра ПШК до СКЗ;
 - ПШК-ПШК – різниця між позитивною амплітудою і модулем від'ємної амплітуди.

Найбільшого розвитку метод отримав при діагностуванні підшипників кочення. Також вібраційний метод успішно застосовується при діагностуванні колісно-редукторних блоків на залізничному транспорті.

Заслужують на увагу віброакустичні методи пошуку витоків газу у гідроустаткуванні. Суть цих методів полягає у тому, що рідина або газ, дроселюючись через щілини і зазори, створює турбулентність, що супроводжується пульсаціями тиску, і, як наслідок, в спектрі вібрацій і шуму з'являються гармоніки відповідних частот. Аналізуючи амплітуду цих гармонік, можна судити про наявність (відсутність) витоків.

Інтенсивний розвиток методу в останні роки пов'язаний із здешевленням електронних обчислювальних засобів і спрощенням аналізу вібраційних сигналів.

1.2.2 Акустичний метод діагностування

Акустичний контроль або акустичний неруйнівний контроль – неруйнівний контроль, що ґрунтується на застосуванні пружних коливань, які збуджуються чи виникають в об'єкті контролю.

Використання акустичного (ультразвукового) неруйнівного контролю в дефектоскопії з метою виявлення дефектів базується на поширенні пружних механічних коливань у контрольованому виробі та прийманні їх після відбиття від межі поділу (неоднорідність, тріщини) або від протилежного боку виробу (донний сигнал).

Акустичний контроль застосовують для виявлення несучільностей у матеріалі (тріщини, раковини, пори, розшарування тощо), визначення структурного стану матеріалу, а також для розв'язання інших задач в дефектоскопії, структуроскопії, проведенні вимірювань та досліджень.

Акустичні методи неруйнівного контролю поділяються на дві підгрупи: активні та пасивні. До активних належать методи, що засновані на випроміненні акустичного сигналу (зондувального імпульсу) в об'єкт контролю (ОК), та дослідженні сигналу, що пройшов та/або відбитого сигналу.

До пасивних відносять методи, що ґрунтуються на реєстрації та вивченні сигналів, утворених у результаті проходження в об'єкті контролю певних фізичних процесів (наприклад розвиток тріщини під навантаженням). Пасивні методи також називають ще методами акустичної емісії.

Активні методи у свою чергу поділяють на:

- методи проходження – використовують випромінювальний та приймальний перетворювачі, розташовані по різні боки об'єкту контролю, або контрольованої ділянки; при цьому аналізуються зміни інтенсивності сигналу, що пройшов крізь об'єкт;

- методи відбиття – ґрунтуються на реєстрації та аналізі акустичних імпульсів що відбилися від несучільностей або від границь об'єкту контролю;

- комбіновані методи – комбінація методів проходження та відбиття; аналізують акустичні сигнали, що пройшли крізь об'єкт контролю а також сигнали, що відбилися від несучільностей або від границь об'єкту контролю;

- методи власних коливань – використовують вільні або вимушені коливання об'єкту контролю, аналізуючи їх параметри (частоту, спектри коливань, згасання тощо);

- імпедансні методи – аналізують характер зміни механічного імпедансу у зоні контакту перетворювача та об'єкту контролю.

Акустичний контроль є одним з найпоширеніших методів неруйнівного контролю, та використовується для оцінки якості металевої і неметалевої продукції.

1.2.3 Теплові методи діагностування

Температура як кількісний показник внутрішньої енергії тіл є універсальною характеристикою об'єктів і процесів фізичного світу, в якому безперервно відбувається генерація, перетворення, передача, накопичення і використання енергії в її різних формах. Аналіз теплових процесів (теплових полів, втрат тепла і т. ін.) дозволяє отримати різноманітну інформацію про стан

об'єктів і протікання фізичних процесів у природі, енергетиці, будівництві, промисловості і т.ін.

Будь-яке тіло з температурою, відмінною від абсолютного нуля, є джерелом інфрачервоного (теплого) випромінювання. Наявність безпосереднього зв'язку інтенсивності теплового випромінювання тіла з його температурою, обґрунтованої в законах теплового випромінювання Стефана-Больцмана, Планка, Вина, дозволило здійснювати дистанційне вимірювання (контроль) температури шляхом реєстрації теплового випромінювання. Ця особливість техніки отримала назву термографія (або тепlobачення).

Під термографією (рис. 1.3) розуміють метод аналізу просторового та часового розподілу теплової енергії (температури) у фізичних об'єктах, що супроводжується, як правило, побудовою теплових зображень (термограм).

Принцип теплової діагностики полягає в порівнянні еталонного і аналізованого полів температури. Аномалії температури служать індикаторами дефектів, а величина температурних сигналів і їх поведінка в часі лежать в основі кількісних оцінок тих чи інших параметрів об'єктів [6].

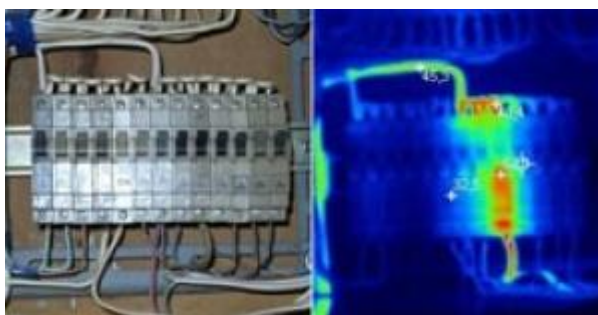


Рисунок 1.3 – Принцип термографії

Для тепловізійного методу характерна загальна проблема технічної діагностики дефектів: як правило, дефекти виявляють у функціонуючому об'єкті, отже, оцінка можливого збитку носить імовірнісний характер.

1.3 Математичні моделі об'єктів для задач діагностування

У загальному випадку організація процесів діагностування аналогових вузлів РЕА потребує розв'язання таких основних задач:

- формування математичних моделей об'єктів діагностування;
- аналіз математичних моделей об'єктів і вибір сукупності показників якості, (прямих і непрямих), що будуть підлягати діагностуванню;
- оцінювання вірогідності діагностування в обраному просторі показників якості і його оптимізація;
- розробка методів діагностування, алгоритмів і програм для їх реалізації, а також засобів для визначення вимірювальної інформації.

При цьому особливе значення мають задача синтезу математичних моделей об'єктів і вибір, на їх основі, сукупності показників якості, оскільки неправильне моделювання процесів діагностування призводить до створення неефективних методів і відповідних їм технічних засобів.

У роботі розглядаються аналогові вузли РЕА, якими є друковані плати із змонтованими на ній елементарними компонентами різних типів і номіналів. Множина елементарних компонент друкованих вузлів складається з підмножин двополюсних і багатопольсних компонент. Множину двополюсних компонент утворюють пасивні лінійні двополюсники (резистори, конденсатори і котушки індуктивності), нелінійні двополюсники (діоди, стабілітрони і т. ін.) і незалежні джерела напруги і струму. Множину багатопольсних компонент складають транзистори (біполярні і польові), трансформатори, оптрони, інтегральні схеми (аналогові, гібридні і цифрові) і т. ін. Елементарні компоненти своїми виводами підключаються до схеми монтажу у відповідних монтажних точках. Провідники друкованого монтажу, при цьому, складають множину елементів зв'язку.

Реальні об'єкти завжди лежать в основі синтезу їх математичних моделей. При цьому вихідна інформація знаходиться в схемах електричних принципів. Ці схеми вже самі по собі є моделями об'єктів, що описуються у графічному вигляді. На їх основі, застосовуючи фундаментальні закони електричних кіл, можуть бути отримані будь-які залежності. Проте, така модель не може бути

безпосередньо сприйнята ЕОМ, в зв'язку з чим виникає необхідність формалізації опису схем електричних принципів.

На рис. 1.4 наведена класифікація математичних моделей різних рівнів опису об'єктів, які на даний час використовуються в системах діагностування.



Рисунок 1.4 – Класифікація математичних моделей об'єктів для задач діагностування аналогових вузлів РЕА

Відповідно наведеній класифікації виділяють три класи моделей, які відрізняються ступенем деталізації опису об'єктів. До них відносяться:

- моделі об'єктного рівня опису;
- моделі, що засновані на декомпозиції об'єктів;
- моделі об'єктів комбінованого типу.

При цьому розрізняють рівні діагностування простих і складних компонент, несправностями яких є неприпустимі відхилення значень параметрів, що їх описують. До простих компонент відносять елементарні компоненти і елементи зв'язку між ними, при цьому, задачам їх діагностики відповідають моделі поелементної декомпозиції ОД, що складаються із сукупності незалежних моделей елементарних компонент і моделі топології друкованого монтажу. До

складних компонент відносяться фрагменти об'єктів, що описуються як композиція взаємозв'язаних елементарних компонент. Аналогічно з першими на даному рівні об'єкти описуються сукупністю математичних моделей фрагментів декомпозиції і моделями з'єднань між ними.

1.4 Огляд існуючих промислових систем управління

Модуль технічного обслуговування (рис. 1.5) призначений для забезпечення контролю працездатності, діагностики, управління та відновлювального ремонту типових елементів заміни (ТЕЗ), що входять до складу РЛС: цифрових, цифроаналогових і аналогових осередків; високочастотних блоків і субблоків; друкованих плат і джерел вторинного живлення [7].



Рисунок 1.5 – Модуль технічного обслуговування

До складу МТО входять робочі місця (рис. 1.6) [8]:

РМ1 (робоче місце1) призначене для діагностування і відшукування несправності до елемента (групи елементів) цифрових і цифро-аналогових ТЕЗ,

побудованих на ТТЛ, КМОП або змішаної ТТЛ-КМОП логікою, а також ТЕЗ, що мають аналогові елементи з рівнями сигналів від -7В до $+9$.



Рисунок 1.6 – Робочі місця для діагностування і відшукування несправностей

РМ1 виконано із застосуванням автоматизованого діагностичного комплексу і комплектується універсальним програматором мікросхем пам'яті "UNIPROG".

Діагностичний комплекс складається з апаратної частини, програмного забезпечення (ПЗ) і ремонтних баз даних (РБД) на тестовані ТЕЗ.

Апаратна частина складається з 135-ти каналного тест-процесора, 16-ти каналного логічного і сигнатурного аналізатора, 6-ти каналного аналогового генератора і виконує наступні функції:

- тестування плати через роз'єми з одночасною реєстрацією реакції плати на тест;

- РМ-2 (робоче місце 2) – автоматизований вимірювально-діагностичний комплекс на базі персонального комп'ютера. Призначений для діагностування і вимірювання параметрів високочастотних ТЕЗ.

Комплекс включає в себе:

- блок ВЧ і СВЧ керованих генераторів;

- цифровий осцилограф;

- РМ-3 (робоче місце 3) – універсальне робоче місце. Призначено для діагностики несправностей осередків, вузлів, субблоків і блоків, що забезпечують комутацію, контроль і управління, отримання вторинних напруг, обробку і перетворення аналогових сигналів в складі блоків і шаф РЛС.

РМ-4 (робоче місце 4) – універсальне ремонтне місце. Оснащено набором інструментів і пристосувань.

На РМ-4 здійснюється демонтаж несправних радіо- елементів, формування висновків радіоелементів, пайка знову встановлюємих елементів, лакування.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТИКИ І КОНТРОЛЮ ЯК СКЛАДОВОЇ ЧАСТИНИ ЗАГАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

2.1 Класифікація аналогових елементів

Дерево – в інформатиці та програмуванні одна з найпоширеніших структур даних (рис. 2.1).

Формально дерево визначається як скінченна множина T з однією або більше вершин (вузлів, nodes), яка задовольняє наступним вимогам:

- 1) існує один відокремлений вузол – корінь (root) дерева;
- 2) інші вузли (за винятком кореня) розподілені серед $m \geq 0$ непересічних множин $T_1 \dots T_m$ і кожна з цих множин, в свою чергу, є деревом. Древа $T_1 \dots T_m$ мають назву піддерев (subtrees) даного кореня.

Дерево (можливо, нелінійне) – структура даних, яка складається з вузлів (вершин) і ребер, без будь-яких циклів. Дерево без вузлів називається нульовим або порожнім деревом. Дерево, яке не є порожнім, складається з кореневого вузла і багатьох рівнів додаткових вузлів, які утворюють ієрархію.



Рисунок 2.1 – Проектування комп'ютеризованих систем управління

При формуванні структур даних використовується наступна термінологія:

- 1) Корінь – верхній вузол в дереві.

- 2) Дитина – вузол, безпосередньо приєднаний до іншого на шляху від кореня.
- 3) Батько – зворотне поняття до дитини.
- 4) Брати, сестри – вузли з того ж батька.
- 5) Нащадок – вузол, досяжний послідовними переходами від батька до дитини.
- 6) Предок – вузол, досяжний послідовними переходами від дитини до батька.
- 7) Лист (також зовнішній вузол) – вузол, який не має дітей.
- 8) Внутрішній вузол – вузол, який має щонайменше одну дитину.
- 9) Степінь вузла – кількість піддерев даного вузла.
- 10) Ребро – з'єднання від одного вузла до іншого.
- 11) Шлях – послідовність вершин і ребер, що з'єднують вузол з нащадком.
- 12) Рівень – $1 +$ число зв'язків між вузлом і коренем.
- 13) Висота дерева – число ребер найдовшого шляху між коренем і листом.
- 14) Висота вузла – число ребер на найдовшому низхідному шляху від заданого вузла до листа.
- 15) Глибина – число ребер від кореневого вузла дерева до заданого.
- 16) Ліс – набір $n \geq 0$ непересічних дерев.

Властивості структур дерев:

З визначення випливає, що кожна вершина є в свою чергу коренем деякого піддерева. Кількість піддерев вершини має назву ступеня (degree) цієї вершини. Вершина ступеню нуль має назву кінцевої (terminal) або листа (leaf). Некінцева вершина також має назву вершини розгалуження (branch node).

Нехай x – довільна вершина дерева з коренем r . Тоді існує єдиний шлях з r до x .

Усі вершини на цьому шляху називаються предками (ancestors) x ; якщо деяка вершина y є предком x , то x називається нащадком (descendant) y . Нашадки та предки вершини x , що не збігаються з нею самою, називаються власними

нащадками та предками. Кожну вершину x , в свою чергу, можна розглядати як корінь деякого піддерева, елементами якого є вершини-нащадки x .

Якщо вершина x є предком y та не існує вершин поміж ними (тобто x та y з'єднані одним ребром), а також існують предки для x (тобто x не є коренем), то вершина x називається батьком (parent) до y , а y – дитиною (child) x . Коренева вершина єдина не має батьків.

Вершини, що мають спільного батька, називаються братами (siblings). Вершини, що мають дітей, називаються внутрішніми (internal).

Глибиною вершини x називається довжина шляху від кореня до цієї вершини. Максимальна глибина вершин дерева називається висотою.

Якщо існує відносний порядок на піддеревах $T_1 \dots T_m$, то таке дерево називається впорядкованим (ordered tree) або пласким (plane tree).

Лісом (англ. forest) називають множину дерев, які не перетинаються.

Найчастіше дерева в інформатиці зображують з коренем, який знаходиться зверху (говорять, що дерево в інформатиці «росте вниз»).

Важливим окремим випадком корневих дерев є бінарні дерева, які широко застосовуються в програмуванні і визначаються як множина вершин, яка має виокремлений корінь та два піддерева (праве та ліве), що не перетинаються, або є пустою множиною вершин (на відміну від звичайного дерева, яке не може бути пустим).

Піддерево – частина деревоподібної структури даних, яка може бути представлена у вигляді окремого дерева. Будь-який вузол дерева T разом з усіма його вузлами-нащадками є піддеревом дерева T . Для будь-якого вузла піддерева або має бути шлях в кореневий вузол цього піддерева, або сам вузол повинен бути корневим. Тобто піддерево пов'язано з корневим вузлом цілого дерева, а відносини піддерева з усіма іншими вузлами визначаються через поняття відповідне піддерево (за аналогією з терміном «відповідна підмножина»).

Упорядкування дерев.

Існує два основних типи дерев. У рекурсивному або неупорядкованому дереві має значення лише структура самого дерева без урахування порядку нащадків для кожного вузла. Дерево, в якому є заданий порядок (наприклад, кожному ребру, провідному до нащадка, присвоєні різні натуральні числа) називається деревом з іменованими ребрами або впорядкованим деревом зі структурою даних, заданої перед ім'ям. Впорядковані дерева є найбільш поширеними серед деревовидних структур. Двійкове дерево пошуку – одне з різновидів упорядкованого дерева.

Двійкове дерево – структура даних у вигляді дерева, в якому кожна вершина має не більше двох дітей. Зазвичай такі діти називаються правим та лівим. На базі двійкових дерев будуються такі структури, як двійкові дерева пошуку та двійкові купи.

Існує безліч різних способів представлення дерев. Найбільш загальний спосіб представлення зображує вузли як записи, розташовані в динамічно виділеній пам'яті з вказівниками на своїх нащадків, предків (або і тих і інших), або, як елементи масиву, пов'язані між собою відносинами, визначеними їх позиціями в масиві (наприклад, двійкова купа).

В теорії графів, дерево – зв'язний ациклічний граф.

Кореневе дерево – це граф з вершиною, виділеною як коренева. У цьому випадку будь-які дві вершини, пов'язані ребром, успадковують відносини «батько-нащадок». Незв'язний граф, що складається виключно з дерев, називається лісом.

Методи обходу.

Покроковий перебір елементів дерева по зв'язкам між вузлами-предками і вузлами-нащадками називається обходом дерева. Найчастіше, операція може бути виконана переходами вказівника на окремі вузли. Обхід, при якому кожен вузол-предок проглядається раніше його нащадків називається предвпорядкованим обходом або обходом в прямому порядку (pre-order walk), а коли проглядаються спочатку нащадки, а потім предки, то обхід називається післявпорядкованим обходом або обходом у зворотному

порядку (post-order walk). Існує також симетричний обхід, при якому відвідується спочатку ліве піддерево, потім вузол, потім — праве піддерево, і обхід в ширину, при якому вузли відвідуються рівень за рівнем (N-й рівень дерева – безліч вузлів з висотою N). Кожен рівень обходиться зліва направо.

Обхід бінарного дерева передбачає відвідування усіх вершин бінарного дерева, при цьому кожна з вершин відвідується тільки один раз. Існують три види таких обходів, кожний з яких визначається рекурсивно:

1) Прямий порядок (англ. preorder) наступної послідовності:

- відвідати корінь;
- відвідати ліве піддерево;
- відвідати праве піддерево.

Тобто, в такому порядку обходу кожна вершина відвідується до того, як будуть відвідані її діти.

2) Зворотний порядок (англ. postorder) наступної послідовності:

- відвідати ліве піддерево;
- відвідати праве піддерево;
- відвідати корінь.

Тобто, в такому порядку кожна вершина відвідується лише після того, як будуть відвідані її діти.

3) Центрований (центральний) порядок (англ. inorder) наступної послідовності:

- відвідати ліве піддерево;
- відвідати корінь;
- відвідати праве піддерево.

В такому порядку кожна вершина відвідується між відвіданням лівої та правої дитини. Такий порядок особливо часто застосовується в бінарних деревах пошуку (рис. 2.2), тому що дає можливість обходу вершин у порядку збільшення їхніх порядкових номерів.

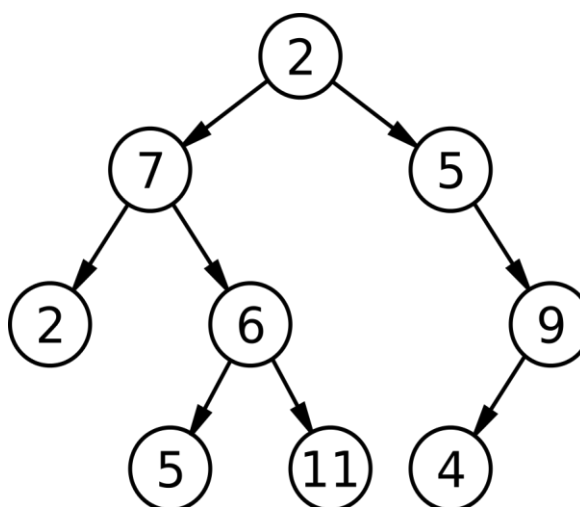


Рисунок 2.2 – Бінарне дерево пошуку

Для цього бінарного дерева розглянемо нище.

Прямий порядок: 2, 7, 2, 6, 5, 11, 5, 9, 4.

Зворотний порядок: 2, 5, 11, 6, 7, 4, 9, 5, 2.

Центрований (центральный) порядок: 2, 7, 5, 6, 11, 2, 5, 4, 9.

Операції над деревом:

- обхід вершин в різному порядку;
- перенумерація вершин;
- пошук елемента;
- додавання елемента у визначене місце в дереві;
- видалення елемента;
- видалення цілого фрагмента дерева;
- додавання цілого фрагмента дерева;
- трансформації (повороти) фрагментів дерева;
- знаходження кореня для будь-якої вершини.

Найбільшого розповсюдження ці структури даних набули в тих задачах, де необхідне маніпулювання з ієрархічними даними, ефективний пошук в даних, їхнє структуроване зберігання та модифікація (рис. 2.3).

Загальне застосування структур:

- управління ієрархією даних;

- спрощення пошуку інформації (див. обхід дерева);
- управління сортованими списками даних;
- синтаксичний аналіз виразів (англ. parsing), оптимізація програм;
- як технологія компонування цифрових зображень для отримання різних візуальних ефектів;
- форма прийняття багатоетапного рішення (див. ділові шахи).



Рисунок 2.3 – Класифікація елементів

2.2 Вибір об'єкту дослідження

До аналогових схем відносять, як вказано вище, велику кількість елементів та приладів, в тому числі, і перетворювачі сигналів (шифратори, дешифратори, мультиплексори, демультимплексори, АЦП, ЦАП тощо), компаратори. Розглянемо деякі аналогові пристрої та їх характеристики.

2.2.1 Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП)

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП; DAC – Digital-to-Analog Converter) – електронний пристрій для перетворення цифрового (як правило двійкового) сигналу на аналоговий. Пристрій, що виконує зворотну дію, називається аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

Як правило ЦАП отримує на вхід цифровий сигнал в імпульсно-кодовій модуляції РСМ (англ. pulse-code modulation). Перетворення різних стиснутих форматів в РСМ виконується відповідними кодеками.

ЦАП використовується завжди, коли необхідно перетворити сигнал з цифрового формату в аналоговий. ЦАП використовується в системах керування технологічними процесами, обчислювальних комплексах, програвачах CD/DVD, звукових картах ПК.

У найпростішому випадкові ЦАП може бути реалізований за схемою суматора струмів, наприклад, на основі диференціального підсилювача в інвертуючому ввімкненні, на інверсному вході якого відбувається складання струмів. Зважаючи на те, що при заземленому неінверсному вході операційний підсилювач, охоплений негативним зворотним зв'язком, буде підтримувати нульовий потенціал і на інверсному вході, вхідні струми будуть однозначно визначатись вхідними напругами та опорамі вхідних резисторів. Тим часом струм у ланцюзі зворотнього зв'язку визначається вихідною напругою та опором резистора зворотнього зв'язку. Позаяк сума вхідних струмів буде дорівнювати струму зворотнього зв'язку, вихідна напруга буде пропорційною сумі вхідних струмів.

Необхідність здійснення операції відновлення вихідного сигналу з дискретних відліків, а також необхідність здійснення операцій формування еталонних сигналів при аналого-цифровому перетворенні висуває задачу цифро-аналогового перетворення. Суть операції цифро-аналогового перетворення полягає у формуванні аналогових сигналів, що відповідають кодовим словам дискретного сигналу. Технічно це формування здійснюється цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП).

Аналоговий сигнал на виході ЦАП може бути сформований шляхом множення опорної напруги:

$$E_{on} = q ,$$

на вагові розрядні коефіцієнти кодового слова:

$$a_i = 2^i,$$

таким чином, що:

Технічно найпростіше ЦАП реалізується на принципі підсумовування розрядних струмів (рис. 2.4):

$$U_{\text{вих}} = \sum I_i R_{\text{он}} = R_{\text{он}} (a_0 I_1 + a_1 I_2 + \dots + a_n I_n)$$

Схема реалізації ЦАП для підсумовування струму містить джерело стабільної напруги E_0 , матрицю двійково-зважених резисторів ($R \cdot 2^i$), набір ключів KE_i , що реалізують розрядні коефіцієнти a_i і перетворювач струму в напругу на операційному підсилювачі ОП.

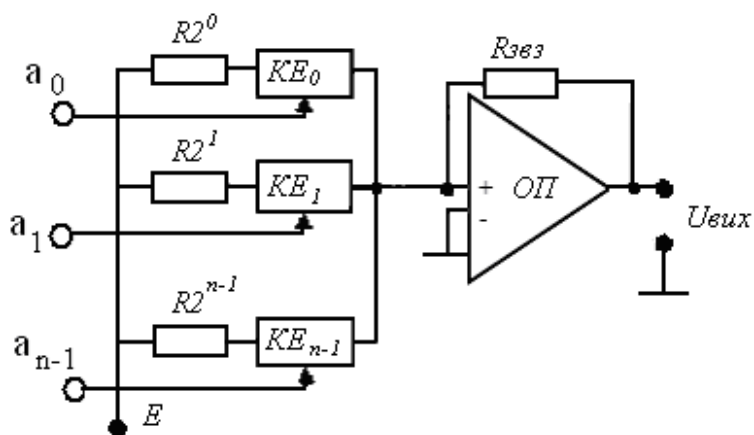


Рисунок 2.4 – ЦАП для підсумовування струму

Часова діаграма класичного процесу цифро-аналогового перетворення має вигляд (рис. 2.5) [9-11].

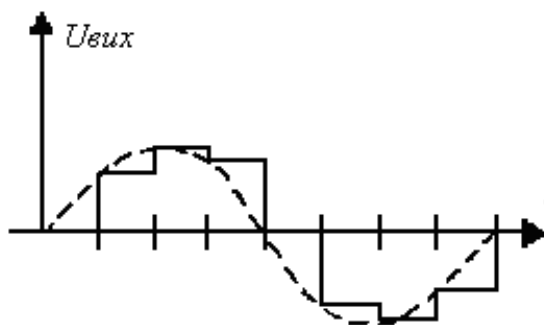


Рисунок 2.5 – Часова діаграма процесу ЦА перетворення

При малій кількості дискретних вибірок миттєвих значень сигналу, цей сигнал мало нагадує вихідний, однак може бути наближеним до нього шляхом аналогової фільтрації або інтерполяції.

Типи ЦАП:

1) Широтно-імпульсний модулятор – найпростіший тип ЦАП. Стабільне джерело струму чи напруги періодично вмикається на час, пропорційний перетворюваному цифровому коду, далі отримана імпульсна послідовність фільтрується аналоговим фільтром низьких частот. Такий спосіб часто використовується для керування швидкістю електромоторів, а також стає популярним в Hi-Fi аудіотехніці.

2) ЦАП передискретизації, такі, як дельта-сигма ЦАП, основані на змінюваній густоті імпульсів. Передискретизація дозволяє використовувати ЦАП з меншою розрядністю для досягнення більшої розрядності кінцевого перетворення; часто дельта-сигма ЦАП будується на основі найпростішого однобітового ЦАП, який є практично лінійним. На ЦАП малої розрядності надходить імпульсний сигнал з модульованою густиною імпульсів (з постійною тривалістю імпульсу, але зі змінною шпаруватістю), створений з використанням негативного зворотного зв'язку. Негативний зворотний зв'язок виступає в ролі фільтра високих частот для шуму квантування. Більшість ЦАП більшої розрядності (більше 16 біт) побудовані на цьому принципі внаслідок його високої лінійності і низької вартості. Швидкодія дельта-сигма ЦАП сягає сотень тисяч відліків в секунду, розрядність – до 24 біт. Для генерації сигналу з модульованою густиною імпульсів можна використати простий дельта-сигма

модулятор першого порядку чи більш високого порядку як MASH (англ. Multi stage noise SHaping). Зі збільшенням частоти передискретизації знижуються вимоги до вихідного фільтра низьких частот і поліпшується приглушення шуму квантування.

3) ЦАП зважування, в якому кожному біту перетворюваного двійкового коду відповідає резистор чи джерело струму, підключене до спільної точки додавання. Сила струму джерела (провідність резистора) пропорційна вазі біта, якому він відповідає. Таким чином, всі ненульові біти коду додаються з вагою. Метод зважування – один з найшвидших, але йому властива низька точність через необхідність наявності набору множини різних прецизійних джерел чи резисторів. Через цю причину ЦАП зважування мають розрядність не більше восьми біт.

4) Ланцюгова R-2R схема є варіацією ЦАП зважування. В R-2R ЦАП зважені значення створюються в спеціальній схемі, яка складається з резисторів опорам R і 2R. Це дозволяє суттєво збільшити точність порівняно зі звичайним ЦАП зважування, оскільки порівняно просто виготовити набір прецизійних елементів з однаковими параметрами. Недоліком методу є більш низька швидкість внаслідок паразитної ємності.

5) Сегментний ЦАП містить по одному джерелу струму чи резистору на кожне можливе значення вихідного сигналу. Так, наприклад, восьмибітовий ЦАП цього типу містить 255 сегментів, а 16-бітовий – 65535. Теоретично, сегментні ЦАП мають найбільшу швидкодію, оскільки для перетворення достатньо замкнути один ключ, який відповідає вхідному коду.

6) Гібридні ЦАП використовують комбінацію перерахованих вище способів. Більшість мікросхем ЦАП належать до цього типу, вибір конкретного набору способів є компромісом між швидкодією, точністю і вартістю ЦАП.

2.2.2 Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)

Аналого-цифровими перетворювачами (АЦП) називають пристрої, що перетворюють вхідні аналогові сигнали у вихідні цифрові.

Цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП) називають пристрої, що виконують зворотну функцію, тобто перетворюють вхідні цифрові сигнали у вихідні аналогові.

Ці сигнали придатні для подальшої взаємодії з елементами цифрової техніки, зокрема, з мікропроцесорами. Таким чином, при використанні АЦП відбувається перетворення безперервної в часі функції, яка описує вихідний аналоговий сигнал, в безперервну послідовність цифрових сигналів, віднесених до деяких фіксованих моментів часу.

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) це пристрої, які приймають вхідні аналогові сигнали та генерують відповідні до них цифрові сигнали, які придатні для обробки мікропроцесорами та іншими цифровими пристроями.

Принципово не виключена можливість безпосереднього перетворення різних фізичних величин в цифрову форму, однак це завдання вдається розв'язати тільки досить рідко через складність таких перетворювачів. Тому зараз найраціональнішим вважається спосіб перетворення різних за фізичною природою величин спочатку в функціонально пов'язані з ними електричні, а потім уже за допомогою перетворювачів напруга - код – в цифрові. Саме ці перетворювачі і мають на увазі, коли говорять про АЦП.

Параметри та класифікація АЦП:

- роздільна здатність;
- точність;
- швидкодію.

За схемою реалізації АЦП поділяють на чотири групи.

1) Паралельні.

2) Послідовні, в тому числі:

- послідовні;
- послідовного наближення;
- послідовного рахунку;
- інтегруючи, включаючи однотоктні та багатотоктні,

перетворювачі напруга-частота, сигма-дельта перетворювачі.

3) Комбіновані або послідовно-паралельні, в тому числі:

- багатотактні;
- багатоступінчасті;
- конвеєрні;
- з подвійним інтегруванням.

4) Прямого перетворення.

Зараз відома велика кількість методів перетворення напруга – код. Ці методи суттєво відрізняються один від одного потенційною точністю, швидкістю перетворення та складністю апаратної реалізації. На рис. 2.6 наведена класифікація АЦП за методами перетворення.

В основу класифікації АЦП покладено ознаку, яка вказує на те, як в часі розгортається процес перетворення аналогової величини в цифрову. В основі перетворення вибіркового значення сигналу в цифрові еквіваленти лежать операції квантування та кодування. Вони можуть проводитись за допомогою або послідовної, або паралельної, або послідовно-паралельної процедур наближення цифрового еквівалента до перетворюваної величини.



Рисунок 2.6 – Класифікація аналогово-цифрових перетворювачів

Процедура аналого-цифрового перетворення неперервних сигналів, яку реалізують за допомогою АЦП, це перетворення неперервної функції

часу $U(t)$, яка описує вхідний сигнал, у послідовність чисел ($U(t_j)$), $J = 0, 1, 2, \dots$, що віднесені до деяких фіксованих моментів часу. Цю процедуру можна розділити на дві самостійні операції: дискретизацію і квантування.

Найпоширенішою формою дискретизації, як зазначалось, є рівномірна дискретизація, в основі якої лежить теорема відліків. Згідно з цією теоремою як коефіцієнти a_j потрібно використовувати миттєві значення сигналу $U(t_j)$ в дискретні моменти часу:

$$t_j = j\omega t ,$$

а період дискретизації вибирати з умови:

$$t = 1/2 F_m$$

де F_m – максимальна частота спектра сигналу, що перетворюється.

Тоді отримаємо відомий вираз теореми відліків:

$$U(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} U(j\omega\Delta t) \frac{\sin[2\pi F_m(t - j\Delta t)]}{2\pi F_m(t - j\Delta t)}$$

Для сигналів зі строго обмеженим спектром цей вираз є тотожністю. Однак спектри реальних сигналів прямують до нуля тільки асимптотично. Застосування рівномірної дискретизації до таких сигналів викликає виникнення в системах обробки інформації специфічних високочастотних спотворень, які зумовлені вибіркою. Для зменшення цих спотворень необхідно або збільшувати частоту дискретизації, або використовувати перед АЦП додатковий фільтр нижніх частот, який обмежуватиме спектр вхідного сигналу перед його аналого-цифровим перетворенням.

У загальному випадку вибір частоти дискретизації буде залежати також від вигляду функції $f_j(t)$ та допустимого рівня похибок, які виникають при відновленні початкового сигналу за його відліками. Усе це необхідно враховувати при виборі частоти дискретизації, яка визначає необхідну швидкодію АЦП. Часто цей параметр задають розробнику АЦП.

Розглянемо докладніше місце АЦП при виконанні операції дискретизації.

Для достатньо вузькосмугових сигналів операцію дискретизації можна виконувати за допомогою самих АЦП і суміщати таким чином з операцією квантування. Основною закономірністю такої дискретизації є те, що за рахунок скінченного часу одного перетворення та невизначеності моменту його закінчення, який, у загальному випадку, залежить від параметрів вхідного сигналу, не вдається отримати однозначної відповідності між значеннями відліків та моментами часу, до яких їх потрібно віднести. В результаті при роботі із сигналами, які змінюються в часі, виникають специфічні похибки, динамічні за своєю природою, для оцінки яких вводять поняття апертурної невизначеності, яка переважно характеризується апертурним часом.

Апертурним часом t_a називають час, протягом якого зберігається невизначеність між значенням вибірки та часом, до якого вона відноситься. Ефект апертурної невизначеності проявляється або як похибка миттєвого значення сигналу при заданих моментах вимірювання, або як похибка моменту часу, в який проводиться вимірювання при заданому миттєвому значенні сигналу. При рівномірній дискретизації наслідком апертурної невизначеності є виникнення амплітудних похибок, які називаються апертурними та чисельно рівні приростові сигналу протягом апертурного часу.

Якщо використовувати іншу інтерпретацію ефекту апертурної невизначеності, то її наявність викликає "тремтіння" істинних моментів часу, в які беруться відліки сигналу, відносно моментів, які рівновіддалені на осі часу. В результаті замість рівномірної дискретизації зі строго постійним періодом проводиться дискретизація с флюктуючим періодом повторення. Це викликає

порушення умов теореми відліків та появи уже розглянутих апертурних похибок в системах цифрової обробки інформації.

Таке значення апертурної похибки можна визначити, розклавши вираз для вхідного сигналу в ряд Тейлора в околі точок відліку, який для j -ї точки має вигляд:

$$U(t) = U(t_i) + t_a U'(t_j) + \frac{t_a^2}{2} U''(t_a) + \dots$$

та в першому наближенні дає апертурну похибку:

$$\Delta U_a(t_j) \approx t_a U'(t_j)$$

де t_a – апертурний час, який для розглянутого випадку в першому наближенні є часом перетворення АЦП.

Зазвичай для оцінки апертурних похибок використовують синусоїдальний випробувальний сигнал:

$$U(t) = U_m \sin \omega t .$$

Якщо прийняти, що для N -розрядного АЦП з роздільною здатністю 2^N апертурна похибка не повинна перевищувати кроку квантування (рис. 2.7) [12-15], то залежність між частотою сигналу ω , апертурним часом t_a та відносною апертурною похибкою буде такою:

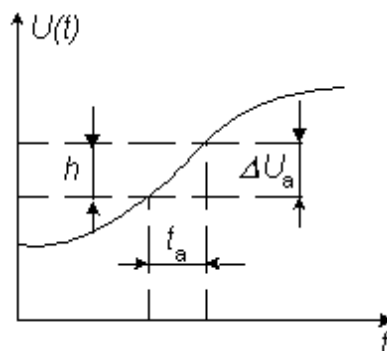


Рисунок 2.7 – Утворення апертурної похибки для випадку, коли вона дорівнює крокові квантування

Для забезпечення дискретизації синусоїдального сигналу частота якого 100 кГц з похибкою 1 % час перетворення АЦП повинен бути рівним 25 нс. У той же час за допомогою такого швидкодіючого АЦП принципово можна дискретизувати сигнали, які мають ширину спектра біля 20 МГц. Таким чином, дискретизація за допомогою самого АЦП викликає суттєве розходження вимог між швидкодією АЦП та періодом дискретизації. Це розходження досягає 2...3 порядків та дуже ускладнює і здорожує процес дискретизації, оскільки навіть для порівняно вузькополосних сигналів потребує досить швидкодіючих АЦП. Для достатньо широкого класу сигналів, які швидко змінюються, цю проблему вирішують за допомогою пристроїв вибірки-зберігання, що мають малий апертурний час.

Функціонування аналого-цифрового перетворення за методом послідовного підрахунку можна проілюструвати за допомогою структурної схеми на рис. 2.8.

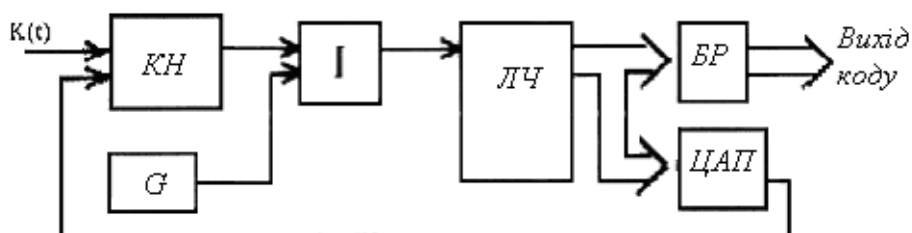


Рисунок 2.8 – АЦП послідовного підрахунку

До складу схеми входять: генератор тактових сигналів (G), компаратор напруги (КН), схема І, лічильник (ЛЧ), буферний регістр (БР), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Схема працює наступним чином. На вхід перетворювача подається аналоговий сигнал $x(t)$, який підключається до одного з входів компаратора напруги КН. На другий вхід компаратора подається еталонна напруга ($U_{\text{ет}}$), яка формується на виході ЦАП під управлінням кодового слова на виході ЛЧ. Компаратор формує на своєму виході сигнал або логічної одиниці, або логічного нуля в залежності від того, яке значення більше. Якщо $U_{\text{ет}} < x(t)$, то на виході компаратора формується одиниця, яка дозволяє проходження імпульсів з тактового генератора через схему І на лічильний вхід лічильника ЛЧ. На виході лічильника йде процес підрахунку цих імпульсів в двійковому коді від 2^0 до 2^{n-1} . Двійковий код з ЛЧ подається на вхід ЦАП, на виході якого формується ступінчатий сигнал $U_{\text{ет}}$. Кожна сходинка цього сигналу відповідає за рівнем інтервалу дискретизації q . Сигнал $U_{\text{ет}}$ порівнюється із сигналом $x(t)$ і в момент, коли $x(t)$ стає меншим за $U_{\text{ет}}$, на виході компаратора формується сигнал логічного нуля. Схема І закривається, лічильник зупиняє підрахунок і набраний двійковий код переписується у вихідний буферний регістр БР для видачі користувачу.

Метод безпосереднього зчитування реалізовується за допомогою так званого АЦП паралельної дії. Такий перетворювач має лінійку 2^{n-1} компараторів напруги, перші входи яких запаралелені і на них подається сигнал $x(t)$. На інші входи під'єднуються виходи подільника еталонної напруги. Виходи компараторів під'єднані до перетворювача одиничного коду в двійковий. Процес перетворення здійснюється за один такт, причому на виході лінійки компараторів до компаратора, який зафіксує $x(t) < U$, буде хвиля одиниць, а далі хвиля нулів одиничного коду. Структурно-функціональна схема перетворення зображена на рис. 4, а часова діаграма аналогічна рис. 2.9.

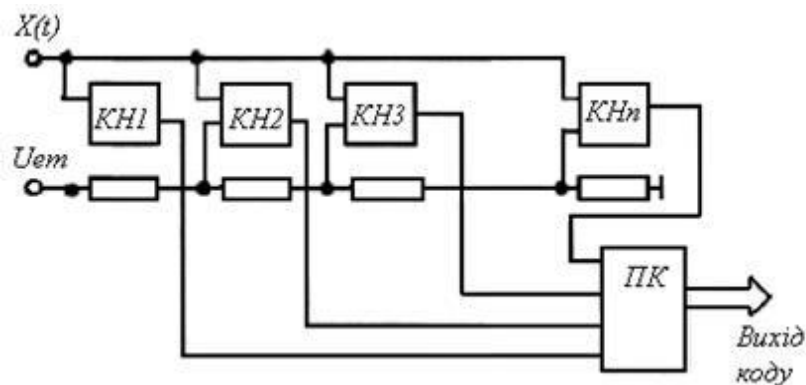


Рисунок 2.9 – АЦП безпосереднього зчитування

Найбільше поширення отримав метод порозрядного зрівноваження, який забезпечує час перетворення від 1 мкс до 1 мс. Структурно-функціональна схема перетворення зображена на рис. 2.10, а часова діаграма – на рис. 2.11.

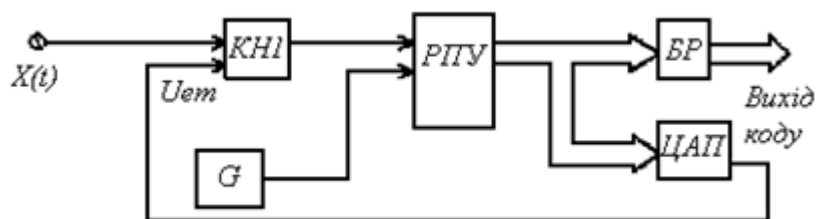
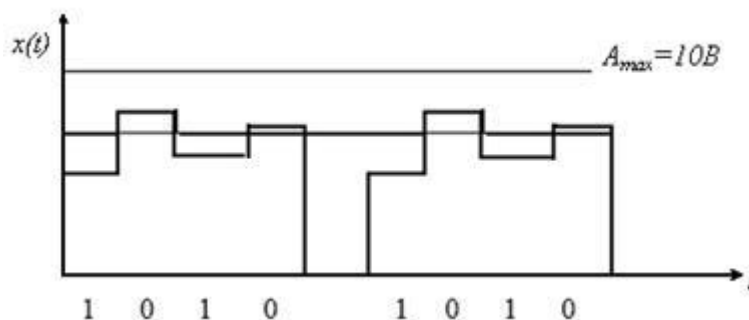


Рисунок 2.10 – АЦП порозрядного зрівноваження

Рисунок 2.11 – Часова діаграма перетворення АЦП за методом порозрядного зрівноваження при $n = 4$

На вхід АЦП подається вхідний сигнал $x(t)$, який порівнюється з еталонним сигналом $U_{ст}$, що формується на виході ЦАП. ЦАП складається із

сукупності $3n$ еталонних джерел сигналів, які управляються за допомогою спеціального регістра порозрядного зрівноваження (РПУ). Перетворення проходить за n часових тактових інтервалів. Причому на першому такті РПУ примусово вмикає в роботу перший розряд ЦАП. Значення першого розряду еталонних величин на виході ЦАП дорівнює половині діапазону перетворення сигналу. Потім в кінці першого тактового інтервалу компаратор проводить порівняння $x(t)$ з $U_{\text{ет}}$. Якщо $x(t) < U_{\text{ем}}$, то примусово увімкнений старший розряд ЦАП залишається ввімкненим до закінчення процесу перетворення. Це забезпечується під управлінням певного сигналу на виході компаратора (1 чи 0). Якщо ж $x(t) > U_{\text{ем}}$, то перший розряд вимикається на початку другого такту. На початку другого такту в роботу примусово вмикається другий розряд ЦАП і знову проводиться порівняння $x(t)$ з $U_{\text{ет}}$. Процедура повторюється доти, поки всі розряди ЦАП не візьмуть участі у процесі зрівноваження. В результаті на виході АЦП формується код, що відповідає вхідному сигналу.

Відомо, що недоліком послідовних АЦП є низька завадостійкість результатів перетворення. Дійсно, вибірка миттєвого значення вхідної напруги, переважно включає доданок у вигляді миттєвого значення завади. Згодом при цифровій обробці послідовності вибірок ця складова може бути подавлена, однак на це потрібен час та обчислювальні ресурси. Переважно у АЦП вхідний сигнал інтегрується або неперервно, або у певному часовому діапазоні, тривалість якого зазвичай вибирається кратною періодові завади. Це дозволяє в багатьох випадках приглушити заваду ще на етапі перетворення. Платою за це є понижена швидкодія інтегруючих АЦП.

Спрощена схема АЦП, який працює в два основних такти (АЦП двотактного інтегрування), наведена на рис. 2.12.

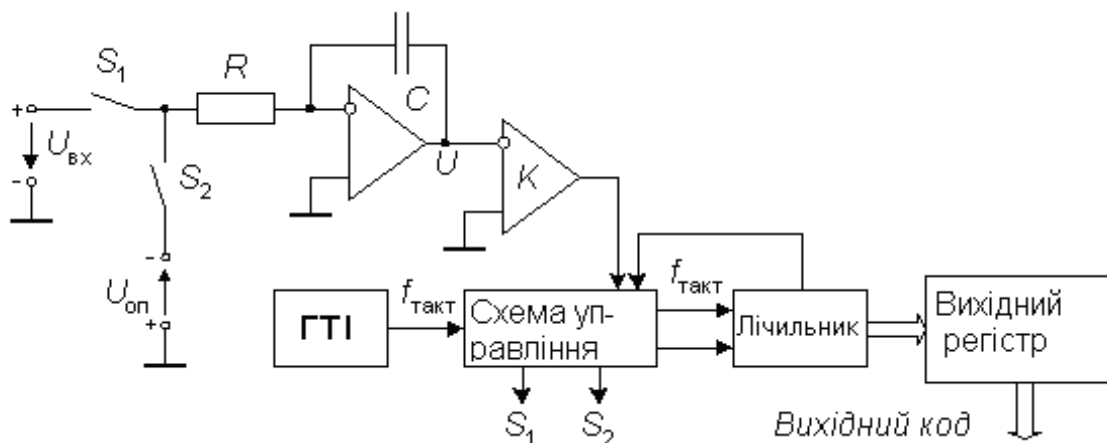


Рисунок 2.12 – Спрощена схема АЦП двотактного інтегрування

Багатоканальні АЦП на сьогодні досить поширені, особливо там, де потрібно об'єднати інформацію, отриману від кількох її джерел, тобто, наприклад, від різних сенсорів. Такі АЦП можна застосовувати, наприклад, для моніторингу напруги на входах, контролю крайніх значень, реєстрації показів, управління виходами (навантаженням) тощо. Схема багатоканального АЦП УМ-АЦП1 на основі мікроконтролера PIC16F876A наведена на рис. 2.13.

Комерційна версія такого пристрою має по 40 входів та виходів, але їх кількість може бути й іншою.

Необхідно відзначити, що висока точність досягається за рахунок як вдосконалення елементної бази, процесу виготовлення, так і застосовуваними матеріалами. Певні відхилення ваг розрядів від необхідних значень зазвичай корегуються шляхом лазерної підгонки в процесі виготовлення резисторів АЦП. При цьому вимагається збільшення площі внутрішньо кристальних компонентів і кристала в цілому, а також виникає проблема вилучення матеріалів кристала в ході пригонки. Ці процеси порушують структуру матеріалів компонентів, зменшують часову і температурну стабільність схеми.

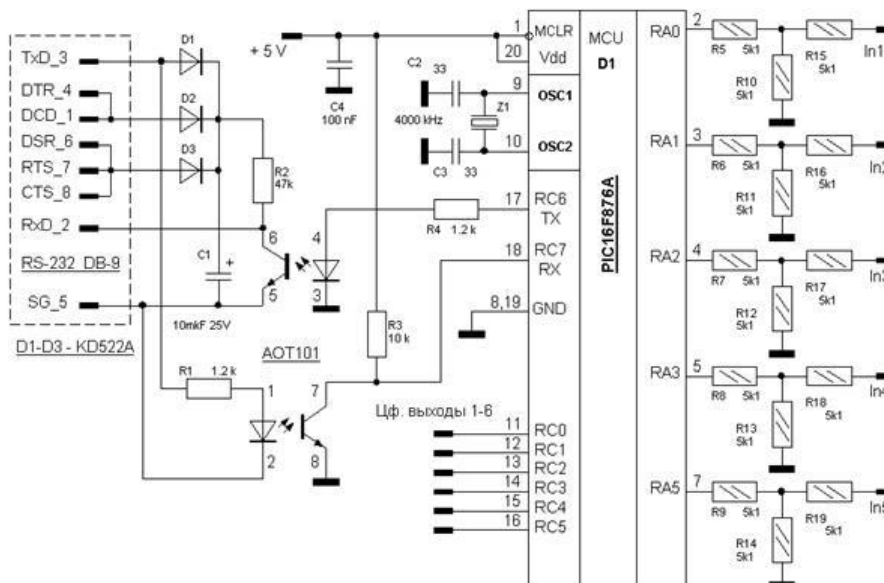


Рисунок 2.13 – Схема багатоканального АЦП УМ-АЦПІ

2.2.3 Дешифратор

Дешифратором називається функціональний вузол комп'ютера, призначений для перетворення кожної комбінації вхідного двійкового коду в керуючий сигнал лише на одному із своїх виходів.

У загальному випадку дешифратор має n однофазних входів (іноді $2n$ парафазних) і $m = 2^n$ виходів, де n – розрядність (довжина) коду, який дешифрується. Дешифратор з максимально можливим числом виходів $m = 2^n$ називається повним.

Класифікують дешифратори за такими ознаками:

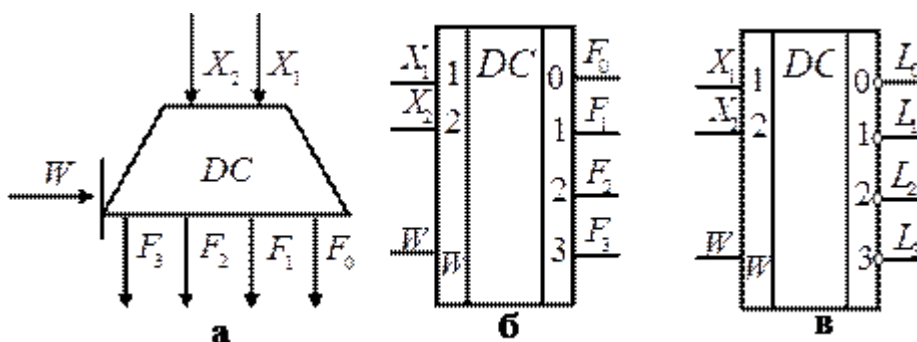
- за способом структурної організації – одноступеневі (лінійні) і багатоступеневі, у тому числі пірамідальні й прямокутні (матричні);
- за форматом вхідного коду – двійкові, двійково-десяткові;
- за розрядністю коду, який дешифрується, – 2, 3, ..., n ;
- за формою подачі вхідного коду – з однофазними і парафазними входами;
- за кількістю виходів – повні й неповні дешифратори;
- за видом вхідних стробуючих сигналів – у прямому або інверсному значеннях;

– за типом використовуваних логічних елементів – І, НІ, АБО, НІ І, НІ АБО і т.ін.

Основними характеристиками дешифратора є:

- число ступенів (каскадів) дешифрування;
- кількість логічних елементів або мікросхем, що використовуються;
- загальне число входів логічних елементів;
- час дешифрації і споживана потужність.

Умовні графічні позначення дешифраторів на електричних схемах показані на рис. 2.14.



- а) позначення дешифратора на функціональних схемах;
б, в) позначення дешифратора на принципових схемах

Рисунок 2.14 – Умовні графічні позначення дешифратора

Літерами DC (decoder від англ.) позначається логічна функція дешифратора. Мітки лівого доповняльного поля в умовному позначенні відображають десяткові ваги входніх змінних, а мітки правого доповняльного поля відповідають десятковим еквівалентам входніх комбінацій двійкових змінних.

Функціонування повного дешифратора описується системою логічних виразів, що мають вигляд:

$$F_0 = \overline{X_n X_{n-1} \dots X_2 X_1};$$

$$F_1 = \overline{X_n X_{n-1} \dots X_2} X_1;$$

$$F_{m-1} = X_n X_{n-1} \dots X_2 X_1,$$

де X_1, X_n, \dots – вхідні двійкові змінні;

F_0, F_1, \dots, F_{m-1} – вихідні логічні функції n змінних.

За принципом дії розрізняють такі види дешифраторів:

- послідовні;
- паралельні;
- паралельно-послідовні.

Розрізняють дешифратори першого та другого роду.

Дешифратори першого роду реалізують систему функцій, кожна з яких приймає одиничне значення при відповідному одиничному значенні вхідного слова.

Дешифратори другого роду реалізують систему функцій, кожна з яких приймає одиничне значення при визначених діапазонах вхідного слова.

За способом побудови розрізняють:

– лінійні дешифратори: n змінних, представляють сукупність не зв'язаних між собою 2^n систем збігу на n входів, кожна з яких реалізує відповідну конститuentу одиниці.

– пірамідальні дешифратори: будуються за принципом послідовних каскадів: на першому каскаді реалізуються конститuentи одиниці для 2 змінних, на $n-1$ реалізуються конститuentи одиниці для n змінних, при цьому, на вході отримується вихід з попереднього каскаду.

2.3 Розробка методу діагностики

Діагностика аналогових модулів інформаційних систем є складним завданням, в зв'язку з безперервним ускладненням, наявністю нелінійних ефектів, а також збільшенням динаміки процесу.

Трудність в моделюванні робить нейронні мережі привабливим інструментом для використання в цій галузі, оскільки вони можуть стиснути інформацію у вигляді ряду параметрів мережі.

Основною проблемою в нейронній мережі є висока складність нейронних мереж, коли число відмов електронного модуля велике. Замість того, щоб формувати велику складну нейронну мережу, пропонується застосовувати прості пірамідальні мережі для кожного виду відмови, що значно підвищує ефективність роботи. У цьому сенсі сама мережа може працювати в якості компактного словника несправностей. Процес створення і перевірки словник несправності будуть завершені одночасно, що значно скорочує час обчислень.

Пошук дефектів в складних аналогових модулів інформаційних системах може виконуватися по жорсткому або гнучкому програмі.

У першому випадку послідовність перевірок при пошуку дефекту не залежить від результату, одержуваного при виконанні кожної перевірки.

У другому випадку послідовність перевірок повністю визначається результатами кожної перевірки.

При гнучкій програмі технічні засоби пошуку ускладнюються, але зате при цьому підвищується їх ефективність (скорочення часу пошуку, використання об'єкта в аварійній ситуації та ін.). Застосування жорсткої програми може дещо спростити технічні засоби, але при цьому знижується ефективність пошуку.

Окремий випадок передбачає використання псевдовипадкового генератора шуму як генератора тестових шаблонів з метою діагностики аналогових елементів і моделюваного контрольного пристрою з метою виявлення несправностей.

Контрольний пристрій в даному випадку реалізовано як багаторівневої випереджаючої нейронної мережі, навченої за допомогою алгоритму зворотного поширення помилок. Але в більшості випадків електронні елементи функціонують в досить вузькому частотному діапазоні. Тому застосування білого шуму в якості тестового сигналу не дозволить зробити однозначний висновок про відмову електронного компонента.

Відомо безліч варіантів і режимів тестового діагностування динамічних систем. У перехідних режимах передбачається вимір реакції системи на стандартні входні впливи, які носять імпульсний, ступінчастий або лінійно зростаючий характер. В якості діагностичних ознак використовуються параметри перехідних функцій. Справність системи можна визначати шляхом контролю фазових характеристик і траєкторій. Безліч вход-вихідних характеристик, фазових траєкторій представляється кінцевої сукупністю функцій в двовимірному векторному просторі.

Крім того, для підвищення ефективності процесу діагностування, необхідно враховувати результати, отримані на попередньому етапі (при подачі відповідного тестового впливу).

Як відомо, за принципом дії технічні засоби пошуку дефектів поділяються на кошти, побудовані по потенційному типу (безперервні), і кошти, побудовані по імпульсного типу (дискретні).

Технічні засоби діагностики, побудовані по потенційному типу, здійснюють безперервне діагностування, а інформація про стан окремих елементів може представлятися як у формі дискретних посилок (0 – 1 і т.ін.), так і безперервними величинами (рівень напруги, струму тощо).

У технічних засобах пошуку імпульсного типу пошук дефектів здійснюється дискретними послідовними запитом.

Таким чином, інформація про стан елемента виходить тільки в момент запиту або слідом за ним.

2.3.1 Алгоритм формування пірамідальної мережі

Більшість попередніх підходів, які використовують нейронні мережі для діагностики несправностей в аналогових модулях були сконцентровані на лінійних колах (ідеальні операційні підсилювачі) або компоненти лінійної схеми (R, C, L). Як правило, процес компонування або параметри не бралися до уваги як помилки, і, отже, кількість помилок було відносно невеликим.

Для сучасних складних аналогових систем пропонується мінімізувати час діагностування за допомогою застосування експертних оцінок параметрів послідовності тестових сигналів в контрольних точках модуля. Контрольні точки аналогових модулів інформаційних систем визначаються виходячи з експертних оцінок пріоритетності.

При такому підході виникає проблема створення оптимальної системи для прийняття двох типів рішень:

- про несправності того чи іншого електронного елемента;
- про вибір типу наступного тестового сигналу для подачі в якості тестового впливу.

Під такою системою розуміється система, яка мінімізує заданий критерій якості для даного динамічного процесу при заданих обмеженнях.

У разі описаного нижче методу перевірки аналогових модулів інформаційних систем, як критерій якості виступає ризик прийняття неправильного рішення при заданому входному просторі станів, а обмеження полягають у фіксованій структурі базової мережі.

В основі запропонованого методу лежить метод зростаючих пірамідальних мереж. Послідовна подача певних входних тестових комбінацій сигналів призводить до появи неузгодженості осцилограм або сигнатур в певних контрольних точках при різних видах тестових імпульсів

Якщо припустити, що є певний несправний елемент в аналоговому модулі.

Потрібно на основі побудови модифікованої зростаючої мережі (МЗМ) виділити позитивний контрольний елемент для кожного електронного елемента (якщо він активний, то даний елемент несправний). І, відповідно, негативний

контрольний елемент для кожного електронного елемента (якщо він активний, то даний елемент справний).

Для цього необхідно сформулювати поняття аналізу елемента і реєстратора.

Аналізуючий елемент – гіпотетичний елемент, у якого немає реального фізичного аналога. Він являє собою сукупність деяких логічних висновків (проміжних або кінцевих в разі позитивного або негативного контрольного елемента).

Реєстратор – реальне фізичне коло досліджуваного модуля. Реєстратор збуджується, якщо на певний цифровий вхід подається певний вид тестового сигналу.

Якщо є деякий аналізує елемент, то субмножина цього елемента утворюють всі ті елементи, від яких є шляхи, що ведуть до входів даного елемента.

Субмножина визначається цілком коректно, якщо врахувати, що в МРС заборонені зв'язки, які можуть привести до виникнення петель і циклів, іншими словами, жоден аналізує елемент не може бути з'єднаний своїм виходом зі входом самого себе або входами будь-яких елементів, що входять в його субмножину

Нульовий шар субмножини деякого елемента утворюють ті елементи, виходи від яких безпосередньо надходять на входи даного елемента.

Аналогічно можна визначити і супермножину даного аналізує елемента, як безліч тих елементів, до яких є шлях, що веде від виходу даного елемента. Ті елементи, для яких цей вихід безпосередньо є входом, утворюють нульовий шар супермножини.

Перш за все, необхідно виробити правила побудови початкової (базової) МРС для кожного дискретного елемента (ДЕ) аналогового модуля. Формування реєстраторів відбувається наступним чином: кожен вхід модуля РЕЗ має фіксований набір реєстраторів.

Кожен реєстратор збуджується, якщо на вхід подається відповідний вид тестового імпульсу.

І при m -значному моделюванні кількість реєстраторів визначається, як:

$$N = M (K + D),$$

де M – значність логіки;

K – кількість входів цифрової системи;

D – кількість контрольних точок.

Знаючи динамічні стану реєстраторів і контрольних точок певний момент часу, необхідно побудувати МРС і виділити для кожного елемента позитивний контрольний (у разі відмови цього елемента) і негативний контрольний (при нормальному функціонуванні цього елемента) елемент. Потім провести необхідний аналіз можливості побудови МРС і виділення негативних контрольних елементів поняття при всіх справних елементах.

Крім того, можлива побудова МРС прирізних видах відмов логічних елементів. Відповідно, кількість МРС в цих випадках прямо пропорційно кількості можливих несправностей в кожному ДЕ.

Таким чином, можливе виділення позитивних контрольних елементів не тільки по несправним ДЕ, але і за типами несправностей.

Процедура зміни МРС здається за допомогою спеціальних правил:

1) Нехай при порушенні деякої комбінації реєстраторів, існувала до цього МРС, були проаналізовані елементи, у яких кількість порушених елементів в нульовому шарі субмножина задовольняла таким умовам:

$$\begin{cases} N \geq 2 \\ N \neq K \end{cases}$$

де N – кількість порушених елементів субмножини;

K – загальна кількість елементів субмножини.

Для всіх таких елементів відбувається наступне.

Виходи всіх порушених в нульовому шарі субмножин елементів стають входами нового аналізує елемента, який перебуває в МРС, вихід нового елемента стає входом вихідного аналізує елемента; всі безпосередні зв'язки, що існували у нього до цього з порушеними елементами з нульового шару субмножини ліквідуються.

Після того, як відповідно до правила 1, введені всі нові елементи, перевіряються умови для застосування правила 2 і якщо вони задовольняються, то це правило реалізується.

2) Нехай при порушенні деякої комбінації реєстраторів відбулося порушення певної частини елементів в МРС. Якщо безліч порушених елементів, в якому залишилися непорушені всі елементи, що сходять з нульовою шар їх супермножини, складається більш ніж з одного елемента, то вводиться новий елемент, входами якого служать виходи всіх згаданих порушених елементів.

Перейдемо тепер до процедури визначення приналежності досліджуваного елемента (цифровий мікросхеми) до класу несправних елементів за допомогою МРС.

У навчальній вибірці з двійковий-кодованими значеннями ознак тестових сигналів реєстратор МРС, який відповідає цьому значенню деякою ознаками, збуджується, якщо це значення актуалізується, і не порушується в іншому випадку. На вхід МРС послідовно подаються всі значення ознак об'єктів з навчальної вибірки як з групи позитивних прикладів, так і з групи негативних прикладів. При подачі кожного значення відбувається перетворення МРС відповідно до описаних правилами.

Кожному аналізує елемента можна приписувати два параметри m і n , значення яких можуть змінюватися в процесі роботи МРС. Параметр m є сумарне число збуджень аналізує елемента при подачі на реєстратори послідовності прикладів. Параметр n характеризує число реєстраторів, що входять в субмножину даного аналізує елемента. В процесі перетворення МРС в безлічі її аналізує елементів виділяються спеціальні елементи, що носять

назву позитивних і негативних контрольних елементів для досліджуваної цифрової мікросхеми.

Формування понять відбувається за рахунок виконання трьох спеціальних процедур:

1) Якщо на реєстратори подається опис об'єкта навчальної вибірки, який є позитивним прикладом, і в модифікованій зростаючій мережі не виділено позитивний контрольний елемент, то знаходиться аналізує елемент, у якого максимальні m і n . Такий елемент стає позитивним контрольним елементом. (Активізація цього елемента свідчить про несправності досліджуваної мікросхеми). Якщо в групі елементів з однаковим максимальним значенням m є кілька елементів з однаковим максимальним значенням n , то в якості позитивного контрольного елемента береться будь-який з них.

2) Якщо на реєстратори подається опис об'єкта навчальної вибірки, який є негативним прикладом, і в модифікованій зростаючій мережі є позитивні контрольні елементи, що не містять в своїх супермножинах інших порушених контрольних елементів, то в кожному з цих супермножин в якості негативних контрольних елементів вибираються Радіоелектронні системи 67 елементи, які мають мінімальне значення n . (Активізація цього контрольного елемента свідчить про справність досліджуваної мікросхеми). Якщо таких елементів декілька, то вибирається будь-який з них.

3) Якщо на реєстратори подається опис об'єкта навчальної вибірки, який є позитивним прикладом, і в модифікованій зростаючій мережі є негативні контрольні елементи, що не містять в своїх супермножинах інших порушених контрольних елементів, то в кожному з цих супермножин як позитивних контрольних елементів вибираються елементи, мають мінімальне значення n . Якщо таких елементів декілька, то вибирається будь-який з них.

Контрольні елементи грають важливу роль в процесі прийняття рішень про несправності тієї чи іншої мікросхеми. За допомогою позитивних контрольних елементів виділяються ті поєднання реєстраторів (значень ознак), які з частотою m зустрічалися в навчальній вибірці на позитивних прикладах. За допомогою

негативних контрольних елементів виділяються поєднання значень ознак об'єктів, що входять в групу негативних прикладів навчальної вибірки. Але не для всіх таких об'єктів, а тільки для тих, у яких поєднання значень ознак збуджує позитивні контрольні елементи, що відповідає наявності у негативного прикладу такого поєднання значень ознак, яке до цього було виділено в якості важливого (контрольованого) для формування правила віднесення об'єктів до сформованому класу.

При формуванні модифікованої зростаючої мережі навчальна вибірка використовується багаторазово. Як тільки в модифікованої зростаючої мережі відповідно до однієї з описаних вище процедур відбувається поява нового контрольного елемента, починається новий перегляд прикладів з навчальної вибірки, починаючи з першого.

Навчання вважається завершеним, якщо опису всіх об'єктів, що входять в навчальну вибірку, при подачі їх на реєстратори МРС не викликають появи нових контрольних елементів.

Коли поняття сформовано, то МРС дає можливість користуватися таким правилом віднесення досліджуваного об'єкта до класу несправних елементів.

Об'єкт a_i входить в безліч несправних елементів, якщо при введенні станів контрольних точок досліджуваної модуля в реєстратори МРС в ній немає порушених негативних контрольних елементів, в супермножинах яких не був би хоча б один збуджений позитивний контрольний елемент.

Можна показати, що три процедури перебудови МРС, які використовуються про процес роботи з навчальною вибіркою, завжди за кінцеве число кроків призводять до завершення формування класу.

При цьому всі позитивні і негативні приклади з навчальної вибірки розпізнаються МРС правильно.

При діагностиці мікропроцесорних систем (МПС) вельми часто зустрічається ситуація, при якій від неповноти знань про об'єкт і алгоритми функціонування навчальна вибірка може бути суперечливою. В цьому випадку одні і ті ж описи в ній можуть входити і в групу позитивних прикладів і в групу

негативних прикладів. Цей важливий випадок може бути реалізований в методі MPC за допомогою певної модифікації процедур її побудови.

В силу суперечливості навчальної вибірки рішення про включення або невключення об'єкта a_i в сформований клас має бути недетермінованим (не точно визначеним).

Ця недетермінованість повинна відображати ті частоти, з якими в навчальній вибірці об'єкт a_i відноситься до безлічі позитивних і безлічі негативних прикладів.

Для формалізації процесу побудови MPC необхідно сформуванати спочатку масив базової модифікованої зростаючої мережі.

Базова MPC формується як текстовий файл і має наступну структуру:

```

N1 [R1, R2, ....., RN1]
N2
P1, L1, M1, K1, Q1, P1(1), ....., P1(L1)
P2, L2, M2, K2, Q2, P2(1), ....., P2(L2)
.....
PN2, LN2, MN2, KN2, QN2, PN2(1), ....., PN2(LN2),

```

де $N1$ – кількість реєстраторів;

$[R1, R2,, RN1]$ – список назв реєстраторів;

$N2$ – кількість аналізують елементів РПС;

$PN2$ – назва аналізує елемента;

$LN2$ – кількість елементів, що входять в нульовій шар субмножеини даного аналізує елемента;

$MN2$ – кількість порушених елементів, що входять в нульовій шар субмножеини даного аналізує елемента;

$KN2$ – кількість порушень на попередніх етапах;

$QN2$ – кількість реєстраторів, що входять в субмножество даного аналізує елемента;

$P1(1) - PN2(LN2)$ – назви вершин, що входять в субмножество даної вершини.

Навчальні вибірки представляють одновимірний вектор значень ознак.

Значення 1 присвоюється даному значенню ознаки, якщо він збуджений і 0 в іншому випадку.

Загальна форма представлення навчальних і експертних вибірок наступна:

$$V1, V2, \dots, VN1 \\ EXP,$$

де $V1 - VN1$ – поточні значення ознак;

EXP – змінна, яка визначає тип вибірки:

N – негативний приклад,

P – позитивний приклад,

E – експертна вибірка.

Після завершення введення позитивних і негативних навчальних вибірок формується експертна МРС.

При подачі експертної вибірки на експертну модифіковану зростаючу мережу відбувається визначення приналежності несправності того чи іншого класу відмов.

2.3.2 Опис процесу діагностування аналогових модулів радіоелектронних систем

При діагностиці складних аналогових електронних модулів РЕЗ в умовах часткової невизначеності виникають значні труднощі. Ці труднощі також обумовлені тим, що при моделюванні складних об'єктів діє фундаментальне положення кібернетики: при складності об'єкта вище деякого рівня його адекватна (повна модель) не може бути простішою. Тому фактично жодна електронна система, що містить модулі, які виконують перетворення аналогових сигналів, не має вичерпного математичного опису. Такі пристрої, як приймачі і передавачі телевізійних і аудіосигналів, блоки живлення, стабілізатори,

генератори і т.ін., можуть бути аналого-цифровими (АЦП), але основна функціональна частина схеми реалізована в аналоговій області. Тому завдання діагностування аналогових пристроїв, як і раніше актуальна.

Для ефективного вирішення завдання виявлення виникли в процесі експлуатації дефектів необхідно вже при проектуванні забезпечити діагностування РЕМ.

Опишемо наувні методи і технології.

DFT (Design for Test), або технологія проектування контролепригодних схем – технологія, яка спрощує розробку і проведення виробничих випробувань, а також забезпечує діагностування електронного обладнання. Більшість варіантів DFT, що застосовуються сьогодні, засновані на принципі структурного випробування.

Структурне випробування не створює прямого впливу для визначення, чи всі вихідні функції схеми відповідають нормі. Замість цього здійснюється перевірка, що схема правильно зібрана з деяких низькорівневих складових частин відповідно до структурної таблицю з'єднань.

При цьому необхідно дотримуватись такої умови: якщо таблиця з'єднань коректна, і структурна перевірка підтверджує правильність складання елементів схеми, тоді схема повинна працювати коректно. Ця технологія застосовується для діагностики РЕЗ при виробництві JTAG (Joint Test Automation Group), або Boundary Scan – периферійне сканування, що використовується для внутрішньосхемною перевірки працездатності плат. Ця технологія передбачає відсутність зондів, але при її використанні переваги традиційної внутрішньосхемною перевірки зберігаються, тобто діагностується працездатність елементів схеми.

Периферійне сканування передбачає перетворення зовнішніх зондів за допомогою багатозондового адаптера у внутрішні, так звані електронні зонди. Вони передбачені на краю кристала, звідки ця технологія і отримала своє назва. Одним з основних недоліків є включення в схему надлишкової логіки, а також зв'язків, які не є необхідними для функціонування. Також треба відзначити, що

ця технологія в основному застосовується для перевірки цифрових схем. Можливість перевірки схем змішаного або аналогового сигналів наразі тільки обговорюється.

ATPG (Automated Template Generation), або технологія автоматичної генерації зразків, використовувана для електричної перевірки напівпровідників, де тестовий набір автоматично генерується програмою. Вектор послідовно застосовується до перевіряється пристроїв, і відгук пристрої на кожен вхідний сигнал порівнюється із зразковою відгуком від справного пристрою.

Помилка у відгуку пристрою означає, що воно несправне. Ефективність ATPG оцінюється повнотою перевірки, тобто чи всі несправності вдалося виявити за допомогою набору тестів, а також ціною виконання перевірки. Основна сфера застосування цієї технології – перевірка працездатності напівпровідникових пристроїв в цифровий схемою.

BIST або вбудоване самотестування – технологія проектування додаткового обладнання та програмного забезпечення, що містяться в інтегральних схемах і дозволяють проводити перевірку їх роботи з використанням їх власних схем. BIST зменшує залежність від зовнішнього автоматичного тестового обладнання (ATE), проте їй властиві недоліки (ті ж, що і у JTAG-технології).

Перераховані технології реалізовані в програмних засобах створення контролепригодного РЕЗ та перевірки їх працездатності на етапі проектування і виробництва, наприклад, таких як:

- onTAP Boundary Scan Software (Flynn Systems). Застосовується для розробки і проведення діагностики друкованих плат за допомогою JTAG технології.

- ProntoTEST; FIXTURE software (UniSoft). Застосовується для діагностики друкованих плат за допомогою ATE.

- Galaxy Design Platform (Synopsys). Пакет програм для проектування, налагодження і діагностування цифрових інтегральних мікросхем.

– Design for Test (Mentor Graphics). Пакет програм для розробки, вдосконалення тестів і діагностування друкованих плат з використанням технологій ATPG, BIST і JTAG.

Перераховані вище методи і програмні продукти орієнтовані на застосування для діагностики цифрових електронних засобів, друкованих плат і інтегральних мікросхем.

Для діагностування аналогових схем, як правило, використовуються наступні методи: метод довідників, параметрична ідентифікація, методи контролю несправностей, наближені методи і т.ін.

Багато з цих методів мають наступні недоліки: великий обсяг обчислень, необхідність доступу до всіх вузлів схеми, чутливість до похибок обчислень і, як наслідок, труднощі практичної реалізації.

2.3.3 Теоретичні дослідження

Для виходу з ситуації, що створилася при формуванні діагностичних моделей аналогових систем, як правило, використовують три рівні опису: алгоритмічний; функціональний; вузловий.

У цьому випадку повне математичний опис будується за лінійним принципом (2.1):

$$L = L_{yy} + L_{fy} + L_{ay} , \quad (2.1)$$

де L_{yy} – мова вузлового рівня;

L_{fy} – мова функціонального рівня;

L_{ay} – мова алгоритмічного рівня.

Багаторівнева модель (2.2) виглядає наступним чином:

$$L = L_{ay} (L_{fy} (L_{yy})). \quad (2.2)$$

Така послідовність створення багаторівневих діагностичних моделей, як показала практика, є оптимальною з точки зору зниження трудомісткості і зменшення тимчасових характеристик процесу діагностування аналогових пристроїв. Це пов'язано з тим, що на кожному етапі створення тестових наборів тестові алгоритми здійснюють пошук несправності з заданим рівнем деталізації

Таким чином, відбувається поетапне поглиблення деталізації. На рисунку 2.15 зображено процес пошуку кратних несправностей одного структурного модуля.

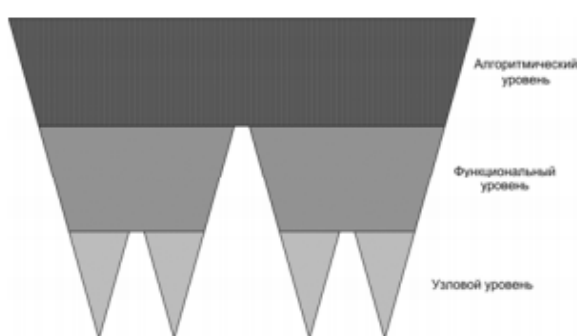


Рисунок 2.15 – Процес пошуку одиночних і кратних відмов в аналогових модулях РЕМ

Відповідно до даного підходу в міру реалізації процесу діагностування відбувається поступове зняття невизначеності. При цьому, чим більше інформації отримано, тим менше ступінь невизначеності стану об'єкта діагностування.

Розвиток теорії інформаційних систем з часом виявило ряд невідповідностей між класичним визначенням і одержуваним результатом, які в деяких випадках виявляються значно краще, ніж передбачає існуюча теорія.

Так, Шеннонський підхід абсолютно не враховує ступеня корисності та осмисленості інформації, наявності апріорних знань про предмет і т.ін., він спрямований не на збільшення знання, а на зменшення незнання, тобто в якомусь сенсі є пасивним.

Можна використовувати рішення задачі мінімізації часу діагностики аналогових модулів за допомогою застосування методу примусової діагностики. Суть методу примусової діагностики полягає в подачі зовнішніх тестових

впливів на певний досліджуваний елемент об'єкта діагностики за допомогою спеціального зонда і аналізі отриманого з виходів елемента відгуків (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Діагностика досліджуваного об'єкту

При такому підході працездатність РЕЗ визначають, порівнюючи її динамічні характеристики з аналітичною моделлю діагностується вузла. Технічні засоби визначення працездатності при цьому будуються за різними принципами в залежності від формулювання умов працездатності. Якщо умови працездатності формулюються як обмеження на зміну показників форми тимчасової характеристики, то, як правило, здійснюють тестове діагностування, використовуючи в якості тестового впливу одиничне імпульсна або ступеневу напругу.

Відомо, що динамічні властивості будь радіотехнічної системи можна описати її відгуком $h(t)$, тобто функцією ваги. Якщо функцію $h(t)$ розкласти в ряд Фур'є і встановити аналітичну залежність між коефіцієнтами ряду для відгуку $h(t)$ і параметрами діагностується апаратури, то на цій основі можна проводити діагностування.

Відомо, що передавальна функція системи є перетворення по Лапласу її відгуку. Виробляючи з функцією передачі аналогічні перетворення, можна визначити коефіцієнти a_n і b_n ряду Фур'є.

Вагова функція $h(t)$ в загальному випадку залежить від всіх параметрів, які діагностуються (2.3):

$$h(t) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.3)$$

Припустимо, що $h(t) = 0$ при $t = t_0$. Продовжимо її парним чином.

Тоді парну періодичну функцію $h(t)$ можна розкласти в ряд Фур'є по косинусам (2.4):

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\omega t \quad (2.4)$$

Де

$$a_n = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} h(t) \cos n\omega t dt$$

Між відгуком, що діагностується і дійсною частиною передавальної функції $Re(\omega)$ існує наступна залежність (2.5.):

$$Re(\omega) = \int_0^{\infty} h(t) \cos \omega t dt \quad (2.5)$$

З огляду на функцію (2.3.), можна обчислити наступну функцію (2.6.):

$$Re(\omega, \{x\}) = \int_0^{\infty} h(t) \cos \omega t dt \quad (2.6)$$

Порівнюючи (2.5) та (2.6), бачимо, що для фіксованих частот вони відрізняються тільки множником $2/t_0$.

Звідси отримуємо формули, що виражають коефіцієнти Фур'є через фіксовані значення речовій частотної передавальної функції діагностуваної системи (2.7):

$$a_n = \frac{2}{t_0} \operatorname{Re}[\omega_n \cdot \{x\}] \quad (2.7)$$

Тоді матимемо функцію (2.8):

$$h(t) = \frac{2}{t_0} \sum \frac{\operatorname{Re} \left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\} \right) \cos n\pi}{t_0} t \quad (2.8)$$

Відомо, що для будь-якої обмеженою кусочно-неперервної функції, якими є часові характеристики діагностується апаратури, ряд Фур'є сходиться в середньому до функції $h(t)$ (2.9):

$$\int \left[[h(t) - S_n](t) \right]^2 dt = 0 \text{ при } n \rightarrow \infty \quad (2.9)$$

де $S_n(t)$ – сума членів ряду.

В даному випадку слід показати, що можна визначити відгук системи, користуючись дискретними значеннями дійсної частини частотної передавальної функції H зі збільшенням числа членів ряду точність апроксимації $h(t)$ поруч (2.5) збільшується, але при цьому збільшується і обсяг обчислень, так як зростає число гармонік, які потрібно враховувати.

Для отримання перехідної характеристики досить проінтегрувати ряд (2.5) від 0 до t_0 . Тоді отримаємо (2.10):

$$H(t) = \frac{2}{t_0} \sum_{n=0}^{\infty} \operatorname{Re} \left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{t_0} t \right) \quad (2.10)$$

Або, враховуючи рівність (2.4), отримаємо (2.11):

$$H(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t\right) \quad (2.11)$$

На підставі виразу складають систему рівнянь, яка використовується для знаходження доглядів відповідних параметрів об'єкта, який діагностується (2.12):

$$\begin{aligned} H(t_1) &= \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t_1\right), \\ H(t_2) &= \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t_2\right), \\ H(t_k) &= \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t_k\right), \end{aligned} \quad (2.12)$$

де $H(t_1), \dots, H(t_k)$ – значення перехідної характеристики для системи з номінальними параметрами, вимірними через інтервали $t = /0; 0 = 2/t_0$.

Так як коефіцієнти Фур'є є функціями всіх параметрів апаратури для діагностування, можна отримати повний перелік контрольованих параметрів x рішенням системи алгебраїчних рівнянь (2.13):

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{t_0} Re(0, \{x\}), \\ a_n &= \frac{2}{t_0} Re\left(\frac{\pi}{t_0}, \{x\}\right), \\ a_n &= \frac{2}{t_0} Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

де a_0, a_1, \dots, a_n – поточні значення коефіцієнтів Фур'є, що знімаються з аналізатора, на вхід якого подано напругу, відповідне відгуку об'єкта, який діагностується; $Re(n/t_0, x)$ – речова частина частотної передавальної функції.

Основною проблемою до останнього часу був значний обсяг обчислень, що виконується при аналізі відгуків. Але з появою цифрових сигнальних процесорів основне навантаження звісно лягає на такі пристрої. При цьому

такий процесор дозволяє досить просто реалізувати процес формування різних тестових сигналів.

Таким чином, система примусової діагностики функціонує в три етапи:

- 1 – формування тестового впливу;
- 2 – зчитування і аналіз відгуку діагностованого вузла;
- 3 – порівняння результатів розрахунку з аналітичною моделлю, що зберігається в базі даних.

Структура апаратного забезпечення представлена на рис. 2.17

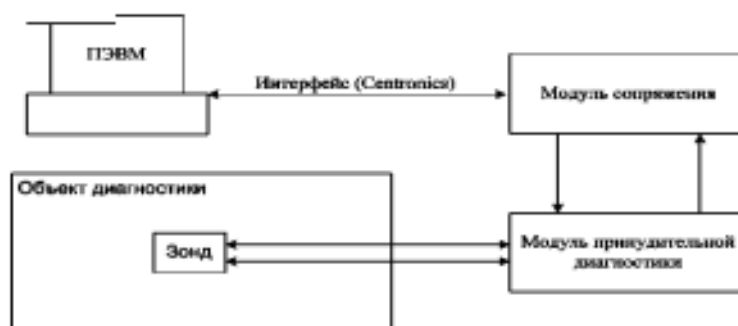


Рисунок 2.17 – Схема підключення апаратних вузлів

Основним елементом модуля примусової діагностики є цифровий сигнальний процесор ADSP2181.

Зв'язок процесора з керуючою ЕОМ виконується за допомогою модуля сполучення, забезпечує узгодження рівнів сигналу і гальванічну розв'язку системи.

Розроблена на основі описаного методу система примусової діагностики (СПД) дозволяє виробляти діагностику аналогових мікросхем, не випаюючи їх з плати.

Загальна методика функціонування СПД полягає в наступній послідовності дій:

- 1) У досліджуваному об'єкті діагностики (ОД) апаратно блокуються всі внутрішні генератори.

2) На досліджуваній елемент (наприклад, аналогову мікросхему) встановлюється зонд.

3) На ОД подається напруга живлення.

4) Активізується програма динамічної ініціалізації, яка виробляє формування керуючих впливів певної тривалості і форми.

5) Перевіряється динамічний функціонал шляхом порівняння з прототипом з бази знань.

6) Якщо динамічні функціонали збігаються, то елемент вважається справним, і переходять до дослідженню наступного елемента, якщо немає – то проводиться аналогічний контроль пов'язаних з вихідними колами елементів.

Таким чином, перевіряється функціональна справність всіх елементів, прототипи (функціональні моделі) яких містяться в базі знань. Час перевірки одного елемента в середньому становить 3 хвилини.

Подача зовнішніх імпульсів на вихідні виводи мікросхем не призводить до виходу з ладу вихідних каскадів в зв'язку з малим часом впливу і обмеженням максимального імпульсного струму ($I_{\max} = 50$ мА). Обмеження по струму необхідно також і для перевірки аналогових мікросхем (наприклад, компараторів), вхідні кола яких з'єднані або з вихідними каскадами з відкритим колектором, або з колами живлення.

3 НАДІЙНІСТЬ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ

Характерною особливістю сучасного розвитку техніки є широке впровадження елементів та пристроїв автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки у виробничі та технологічні процеси для їх автоматизації.

В умовах сучасної економіки, автоматизація є одним з основних напрямів розвитку науково-технічного прогресу. І, звичайно, покращення ефективності та якості роботи проєктуємих технічних засобів неможливе без оцінювання надійності їх функціонування.

Таким чином, вище викладене є першою причиною необхідності нормування показників надійності технічних засобів при проєктуванні технічних засобів (ТЗ) різного призначення.

Другою причиною, яка потребує оцінювання надійності, є підвищення складності ТЗ, апаратури їх обслуговування, умов їх експлуатації і відповідальності задач, які на них покладають.

Недостатня надійність ТЗ приводить до збільшення долі експлуатаційних витрат в порівнянні з загальними витратами на проєктування, виробництво і використання цих засобів. При цьому вартість експлуатації ТЗ може в багато разів перевищити вартість їх розробки і виготовлення. Крім того, відмови ТЗ призводять до різного роду наслідкам: втратам важливої інформації, простоям спряжених з ТЗ інших приладів і систем, до аварій, тощо. Таким чином, третьою причиною підвищення ролі надійності в сучасних умовах є економічний фактор.

Якість процесів являє сукупність властивостей, що визначають їх придатність для експлуатації.

Надійність є найважливішим техніко-економічним показником якості будь-якого ТЗ, що визначає здатність безвідмовно працювати з незмінними

технічними характеристиками на протязі заданого проміжку часу при певних умовах експлуатації.

Проблема забезпечення надійності пов'язана зі всіма етапами створення виробів і усім періодом їх практичного використання. Надійність засобу закладається в процесі його конструювання і розрахунку, та забезпечується в процесі його виготовлення шляхом вірного вибору технології виготовлення, контролю якості початкових матеріалів, контролю режимів і умов виготовлення.

Надійність зберігається шляхом правильного зберігання і підтримується правильною експлуатацією ТЗ, профілактичним контролем і ремонтом.

В кінцевому рахунку, надійність ТЗ визначається надійністю комплектуючих елементів. Тому знання основних питань нормування показників надійності є в теперішній час необхідною умовою для успішної роботи в галузі автоматизації технологічних процесів і особливо це відноситься до майбутніх спеціалістів, які будуть займатися розробкою засобів вимірювальної техніки та комп'ютеризованих систем управління і автоматики.

3.1 Методи розрахунку надійності

Поділяються на 2 групи:

1. орієнтовні методи;
2. уточнений або повний розрахунок надійності.

Розрізняються методи один від одного наявністю вихідних даних і проводяться на різних стадіях конструкторського проектування.

Орієнтовні – на ранніх стадіях проектування (ескізний проект);

Уточнений – на етапі технічного проектування або на стадії відпрацювання дослідних взірців.

Всі методи передбачають лише послідовне з'єднання елементів в систему і, в основному, застосовуються для періоду нормальної експлуатації, коли дані постійні const.

Орієнтовні методи розрахунку надійності

- 1) Розрахунок надійності по середньо груповим інтенсивностям відмов.
- 2) Коефіцієнтний метод розрахунку надійності.

Розрахунок надійності по середньо груповим інтенсивностями відмов.

Припущення:

- 1) розрахунок проводиться для систем, які складаються з послідовно з'єднаних елементів;
- 2) інтенсивність відмов елементів і систем постійні в часі;
- 3) середня інтенсивність відмов однотипних елементів однакова;
- 4) відмови елементів наступають незалежно одна від одної, тобто являються незалежними випадковими подіями.

Вхідні дані:

- 1) загальна кількість елементів в системі;
- 2) приблизний розподіл елементів по типах.

Порядок розрахунку:

- 1) Визначається кількість елементів кожного типу;
- 2) За таблицями визначається середнє значення інтенсивності відмов елементів кожного типу;
- 3) Визначається добуток, як доля відмов, яка вноситься кожним типом елементів в загальну інтенсивність відмов системи;
- 4) Визначається інтенсивність відмов системи;
- 5) Визначаються параметри надійності:
- б) напрацювання на відмову:

3.2 Ефективність розробленого методу відносно поняття АСК ТП

Автоматизована система керування технологічним процесом (АСК ТП) (process control system або industrial control system; ICS) – автоматизована система у вигляді комплексу програмних і технічних засобів, призначена для вироблення та реалізації керувальної дії на технологічний об'єкт керування згідно з прийнятими критеріями керування.

Під АСК ТП зазвичай розуміється комплексне рішення, що забезпечує автоматизацію основних технологічних операцій на виробництві в цілому або якійсь його ділянці, що випускає відносно завершений продукт.

– автоматизована система, яка призначена для вироблення та реалізації керувальної дії на технологічний об'єкт керування згідно з прийнятими критеріями керування.

Автоматизована система, призначена для оптимізації керування технологічними процесами виробництва.

АСК ТП – це людино-машинна система, що забезпечує автоматизований збір інформації з вимірювальних перетворювачів сигналів і її первинну обробку (фільтрування сигналів, лінеаризація характеристик перетворювачів, «офізичення» сигналів, тобто перетворення та візуалізації сигналів у значеннях параметрів у фізичних одиницях вимірювання: °С, Па, В та ін.) для розрахунку, видачі та реалізації керувальних впливів на технологічне обладнання відповідно до прийнятих критеріїв керування, діагностування аналогових та цифрових систем в електронних модулях.

АСК ТП здійснює реалізацію впливів на об'єкт керування в темпі перебігу технологічного процесу, тобто в реальному часі, при цьому забезпечує керування об'єктом в цілому, а її технічні засоби беруть участь у виробленні рішень з керування. Важливо зробити акцент на слові «автоматизована». Під цим мається на увазі, що система керування аж ніяк не повністю автономна (самостійна), і потрібна участь людини (оператора) для реалізації певних завдань. Зазначеними обставинами АСК ТП якісно відрізняється від

традиційних систем автоматичного керування (САК), які представляють технічні засоби для автоматизації дій людини на окремих ділянках технологічного процесу і призначені для роботи без будь-якого контролю з боку людини та повністю автономні. На відміну від цього в АСК ТП реалізується автоматизований процес прийняття рішень з керування технологічним процесом як єдиним цілим, для чого в ній застосовують різне «інтелектуальне» автоматичне обладнання обробки інформації, в першу чергу сучасні багатофункціональні, високопродуктивні промислові комп'ютери.

АСК ТП характеризується єдністю і взаємодією трьох основних складових, до яких відносяться:

- об'єкт керування – це технологічні процеси з агрегатами, апаратами, установками та ін. із засобами забезпечення матеріальних потоків, що з'єднують все устаткування;

- технічні засоби – автоматичне обладнання обробки інформації на базі мікропроцесорної техніки;

- оперативний персонал – оператори-технологи, диспетчери, експлуатаційний персонал.

Усі АСК ТП діляться на три глобальні класи:

- SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – диспетчерське управління і збір даних. Основне призначення системи – контроль і моніторинг об'єктів за участю диспетчера. У вузькому сенсі під терміном «SCADA» розуміють програмний пакет візуалізації технологічного процесу. У широкому розумінні – це клас автоматизованих систем керування технологічним процесом.

- DCS (Distributed Control System) – розподілена система керування (РСК). Це система керування технологічним процесом, що характеризується побудовою розподіленої системи вводу/виводу та децентралізацією обробки даних. РСК застосовуються переважно для керування неперервними і гібридними технологічними процесами. У першу чергу це стосується процесів, що тривають місяцями і навіть роками, при цьому зупинка процесу, навіть на короткочасний

період, може привести до псування продукції, що виготовляється, поломки технологічного устаткування чи нещасних випадків.

–□PLC (Programmable Logic Controller) – програмований логічний контролер (ПЛК). У вузькому розумінні це – апаратний модуль для реалізації алгоритмів автоматизованого керування з використанням логічних операцій, таймерів, і (в деяких моделях) неперервне регулювання відповідно до заданого закону. У широкому розумінні під ПЛК розуміється клас систем. Хоча ПЛК може управляти компонентами системи, що використовуються в SCADA і DCS систем, вони часто є основним компонентом у структурах невеликих систем керування у багатьох галузях виробництва.

ВИСНОВКИ

В першому розділі проаналізовано більшість особливостей в електронних модулях промислових систем управління. Було оглянуто існуючі методи технічної діагностики, математичні моделі об'єктів, та існуючі промислові системи управління.

В другому розділі розглянули процес діагностування та класифікацію аналогових елементів. Вибрано об'єкт діагностування цифрово-аналоговий передавач (ЦАП).

Розроблений метод діагностики багатопроцесорних систем підвищеної складності має декількома перевагами.

По-перше, всі виводи, що формуються з його допомогою, допускають змістовну інтерпретацію, тому як задаються через логічну функцію, в яку в явному вигляді входять значення вихідних ознак.

По-друге, метод добре автоматизується при роботі на ЕОМ.

По-третє, після формування остаточної модифікованої зростаючої мережі ту її частину, яка не містить контрольних елементів і не впливає на їх порушення, можна видалити. При цьому знижуються вимоги до обсягу пам'яті ЕОМ.

Проведено теоретичні дослідження застосування методу примусової діагностики для реалізації процесу діагностування аналогових модулів РЕЗ в умовах часткової невизначеності.

Результати дослідження показують, що застосування методу примусової діагностики дозволяє проводити діагностику аналогових елементів, без випаювання їх з плати.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення [Текст]. – Введ. 2015-06-22. – К.: Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2019. – 320 с.

3. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.

4. Невлюдов І.Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, Б.О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. – 244 с.

5. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник. – Кривий Ріг: КК НАУ, 2017. – 444 с.

6. Невлюдов І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева. – Київ: НАУ, 2018. – 200 с.

7. Невлюдов И.Ш. Функциональные задачи мониторинга жизненного цикла радиоэлектронных средств: Монографія / И. Ш. Невлюдов, А.А. Андрусевич. – К. : НАУ, 2012. – 186 с.

8. Barua A. A method to diagnose faults in analog integrated circuits using artificial neural networks with pseudorandom noise as stimulus / A. Barua, P. Kabisatpathy, S. Sinha // Proc. 10th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS 2003), University of Sharjah, UAE. – 2003. – P. 356-359.

9. Малышенко Ю.В. Автоматизация диагностирования электронных устройств / Ю.В. Малышенко, В.П. Чипулис, С.Г. Шаршунов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.

10. Тоценко В.Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств / В.Г. Тоценко. – М.: Радио и связь, 1985. – 240 с.

11. Неруйнівний контроль і технічна діагностика: довідник, т.5 / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: ФМІ НАН України, 2001. – 1138 с.

12. П. М. Сопрунюк, В. М. Юзевич. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, вид-во «СПОЛОМ». – 2005. – 292 с. з іл.

13. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довід. посіб. : у 8 т. / за заг. ред. акад. НАН України З. Т. Назарчука ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. – Львів: Простір-М, 2016-2017 . – ISBN 978-617-7501-02-1.

14. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець та ін. ; за ред. Є. С. Поліщука ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. — 584 с.

15. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Пер. с нем. – Москва: Мир, 1982. – 512 с. – ISBN 5-222-00417-1.