

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Імітаційне моделювання аналогових сигналів для тестування  
радіоелектронних систем

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РРм-61  
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

	<hr/> (підпис)	<hr/> Поліщук І.В. (прізвище та ініціали)
Керівник	<hr/> (підпис)	<hr/> Дедів І.Ю. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<hr/> (підпис)	<hr/> Хвостівська Л.В. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<hr/> (підпис)	<hr/> Дунець В.Л. (прізвище та ініціали)
Рецензент	<hr/> (підпис)	<hr/> Стрембіцький М.О. (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«    »

2021 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Поліщуку Ігорю Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Імітаційне моделювання аналогових сигналів для тестування радіоелектронних систем

Керівник роботи Дедів Ірина Юріївна, к.т.н., доц.

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

Затверджені наказом ректора від «30» листопада 2021 року № 4/7-1019

2. Термін подання студентом завершеної роботи 6 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання, імітаційне моделювання аналогових сигналів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Задача тестування радіотехнічних систем. Поняття сигналу. Аналогові та дискретні

сигнали. Формування вибірок. Цифрове представлення сигналів.

Поняття імітаційного моделювання. Види імітаційних моделей. Оцінка якості імітаційної моделі. загальна інформація про MATLAB. SIMULINK.

Охорона праці. Безпека в надзвичайних ситуаціях.

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання на кваліфікаційну роботу		
2	Написання розділу 1		
3	Написання розділу 2		
4	Написання розділу 3		
5	Написання розділу 4		
6	Попередній захист		
7	Захист		

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Поліщук Ігор Володимирович  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Дедів Ірина Юріївна  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Імітаційне моделювання аналогових сигналів для тестування радіоелектронних систем // Кваліфікаційна робота магістра // Поліщук Ігор Володимирович // ТНТУ, ФПТ, група РРМ-61 // Тернопіль, 2021.

Ключові слова: СИГНАЛ, ІМІТАЦІЯ, ПРОГРАМА, ТЕСТУВАННЯ.

В кваліфікаційній роботі магістра розглянуто питання імітаційного моделювання аналогових сигналів для тестування радіоелектронних систем. Розглянуто етапи та типи тестування радіоелектронної техніки, зокрема функціональне тестування. Встановлено необхідність розроблення тестових сигналів із заданими параметрами та характеристиками. Проаналізовано особливості імітаційного моделювання, вимоги та характеристики. Проведено імітацію амплітудномодульованих, фазо-модульованих сигналів та голосових сигналів для тестування систем прийому-передачі даних і контролю доступу чи ідентифікації користувачів.

## ANNOTATION

Simulation modeling of analog signals for testing of electronic systems //  
Master's qualification work // Polishchuk I.V. // TNTU, FPT, group RRm-61 //  
Ternopil, 2021.

Key words: SIGNAL, SIMULATION, PROGRAM, TESTING.

In the qualification work of the master the question of simulation modeling of analog signals for testing of electronic systems is considered. Stages and types of testing of electronic equipment, in particular functional testing, are considered. The necessity of development of test signals with the set parameters and characteristics is established. Features of simulation modeling, requirements and characteristics are analyzed. Simulation of amplitude-modulated, phase-modulated signals and voice signals for testing of data-reception systems and control of access or identification of users is carried out.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	9
1.1. Задача тестування радіотехнічних систем.....	9
1.2. Поняття сигналу.....	20
1.3. Аналогові та дискретні сигнали.....	24
1.4. Формування вибірок.....	26
1.5. Цифрове представлення сигналів.....	34
1.6 Висновки до розділу 1.....	40
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	42
2.1 Поняття імітаційного моделювання.....	42
2.2. Види імітаційних моделей.....	43
2.3. Оцінка якості імітаційної моделі.....	46
2.4 Висновки до розділу 2.....	49
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	50
3.1. Загальна інформація про MATLAB.....	50
3.2. SIMULINK.....	52
3.3. Результати імітаційного моделювання.....	52
3.4. Висновки до розділу 3.....	65
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	67
4.1 Охорона праці.....	67
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	69
4.3 Висновки до розділу 3.....	75
ВИСНОВКИ.....	76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78
ДОДАТКИ	

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Завершальним етапом створення електронного продукту є масове виробництво, яке в кінцевому підсумку визначає якість пристрою. При цьому контроль функціональності та тестування складання є обов'язковими етапами масового виробництва.

Функціональне тестування полягає в перевірці зібраних або частково зібраних пристроїв на працездатність зазначеної функціональності та на відповідність параметрам, які закладені в специфікації на пристрій. Всі методики тестування дозволяють оцінити якість електроніки в процесі виробництва, проте в деяких випадках тестування пристрою проводиться тільки на завершальному етапі. Це називається тестуванням після фінального складання - перевірка функціональності та відповідності специфікації. Оцінюється не тільки якість, але і стабільність і надійність пристрою. Такий аналіз електроніки проводиться за допомогою складного стендового обладнання, що моделює систему, в якій працює випробовуваний пристрій.

Таким чином особливо важливим є етап функціонального тестування з використанням окремих типів сигналів, які визначаються типом тестованої техніки. При цьому важливим є питання створення тестових сигналів – їхньої імітації, за наперед заданими параметрами.

В роботі розглядається проблема імітаційного моделювання аналогових сигналів для тестування радіоелектронних систем.

**Мета і завдання дослідження.** Розроблення імітаційного моделювання аналогових сигналів для тестування радіоелектронних систем. Задачі:

- аналіз стану проблеми;
- аналіз методів тестування радіоелектронної апаратури;
- аналіз особливостей імітаційного моделювання;

- проведення імітаційного моделювання окремих сигналів.

*Об'єкт дослідження:* процес імітаційного моделювання аналогових сигналів.

*Предмет дослідження:* методи імітаційного моделювання аналогових сигналів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Використання при проектуванні систем тестування радіоелектронного обладнання.

**Наукова новизна.** Запропоновано спосіб імітаційного моделювання детермінованих та стохастичних сигналів для тестування систем передачі даних та ідентифікації користувачів.

**Апробація результатів дослідження.** Участь в ІХ науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (м. Тернопіль, 2021 р.).



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

#### 1.1 Задача тестування радіотехнічних систем

Завершальним етапом створення електронного продукту є масове виробництво, яке в кінцевому підсумку визначає якість пристрою. Користувач не зможе оцінити ідеальну програмно-апаратну платформу для нової електроніки, якщо складальна лінія вийде з ладу, тому контроль функціональності та тестування складання є обов'язковими етапами масового виробництва.

Загалом процес підготовки та тестування електронного продукту на виробництві виглядає так:

- Проектування та створення стенду для прошивки та тестування з використанням JTAG / ІСТ тестування
- Розробка системи випробувань і параметрів для контролю якості та приймання у виробництво
- Автоматизована або ручна перевірка функціональності

Випробування приладу та окремих його частин у процесі виробництва може здійснюватися на основі наступних методів і технологій:

1. Автоматизований візуальний контроль - це попередній контроль якості, який використовується в будь-якому контрактному виробництві, він відбувається на різних етапах складання друкованої плати, включаючи використання рентгенівських променів для перевірки місць, невидимих оку, або стандартним оптичним системам.

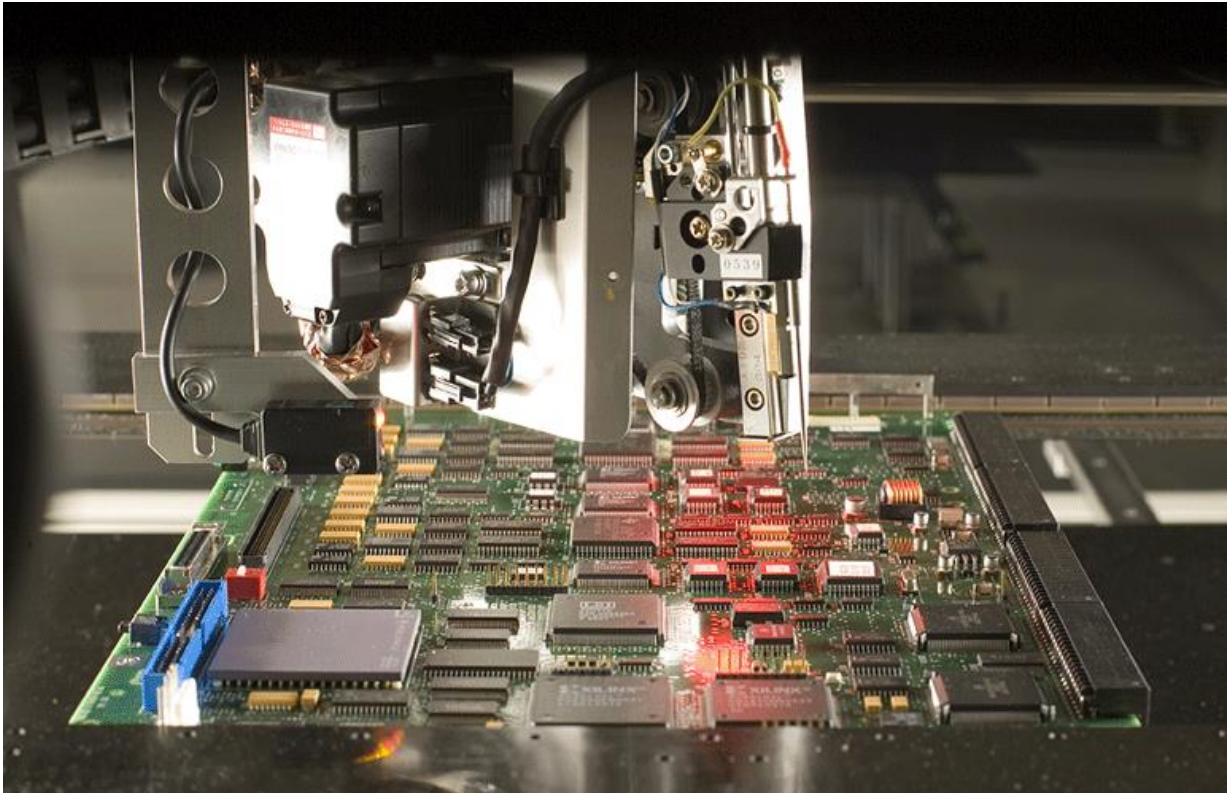


Рис. 1.1. Друкована плата проходить автоматизований візуальний огляд. За результатами перевірки тестер отримає дані про виявлені дефекти.

2. Внутрішньосхемне тестування - перевірка з'єднань і компонентів на друкованій платі, аналіз електричних параметрів всієї схеми або окремих її ділянок.

У цьому методі використовується контакт щупів з вузлами зібраної плати: це може бути або нерухоме поле контактів, або «літаючі зонди» або «літаючі матриці». Часто це вимагає використання складного і дорогого обладнання, технологічної підготовки, виготовлення спеціального обладнання.

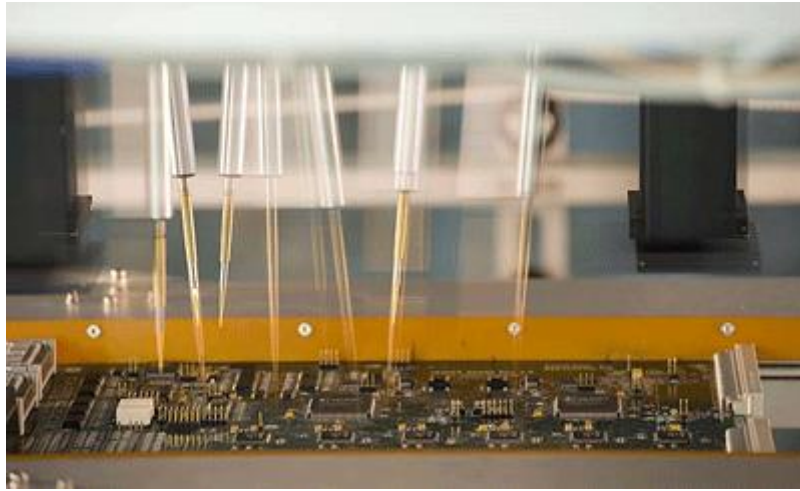


Рис. 1.2. Тестування друкованої плати за допомогою літаючих зондів.

3. Граничне сканування - тестування за допомогою JTAG. Засноване на використанні підтримки стандарту IEEE 1149 в мікросхемах.

4. Функціональне тестування (FCT) - перевірка зібраних або частково зібраних пристроїв на працездатність зазначеної функціональності та на відповідність параметрам, які закладені в специфікації на пристрій.

Всі перераховані вище методики дозволяють оцінити якість електроніки в процесі виробництва, проте в деяких випадках тестування пристрою проводиться тільки на завершальному етапі. Це називається тестуванням після фінального складання - перевірка функціональності та відповідності специфікації. Оцінюється не тільки якість, але і стабільність і надійність пристрою. Такий аналіз електроніки проводиться за допомогою складного стендового обладнання, що моделює систему, в якій працює випробовуваний пристрій. Якщо за результатами такої перевірки відсоток відбракування перевищує попередню оцінку, то коригується технологія виробництва і запускається наступна пробна партія приладів. І так у кількох ітераціях.

На практиці найкращі результати показують ті методики, які використовуються в процесі виробництва, тобто функціональне та внутрішньосхемне тестування, оскільки вони дозволяють швидко отримати

інформацію та визначити конкретні етапи, на яких виникають проблеми. Це дозволяє вносити корективи в виробничий процес ще до остаточного складання пристрою.

Розглянемо ці методи тестування більш детально, від загального до конкретного, починаючи з аналізу функціональності зібраних або частково зібраних пристроїв і закінчуючи особливостями внутрішньосхемного тестування друкованих плат.

Функціональне тестування може проводитися як вручну, так і автоматично. Природно, що при складанні планів випробувань намагаються мінімізувати ручну працю, залишаючи оператору лише підключення / відключення пристрою, а також перевірку придатності.

При грамотному підході ця методика здатна охопити практично весь функціонал пристрою в рекордні терміни. Однак без розробки тестового програмного забезпечення та виготовлення спеціального обладнання не обійтись.

Тестування можна розділити на перевірку основних частин пристрою (процесор, пам'ять, інші модулі) і перевірку периферійних інтерфейсів. Для перевірки процесорної частини створюється спеціальна програма, яка автоматично встановлює спеціальні параметри роботи, ініціалізує всі мікросхеми пристрою, опитує їх і за отриманими результатами робить висновок про їх працездатність. Після перевірки основних деталей послідовно включається режим роботи для кожного компонента пристрою та перевіряється його працездатність. Наприклад, для тестування інтерфейсів Ethernet програма ініціалізує кожен порт по черзі, а якщо їх декілька, встановлює тимчасові MAC та IP-адреси, пересилає пакети та аналізує результат.

Ступінь охоплення продукту тестами визначається індивідуально для кожного типу пристрою на основі аналізу електричної схеми, доступної для тестування модулів та інтерфейсів.

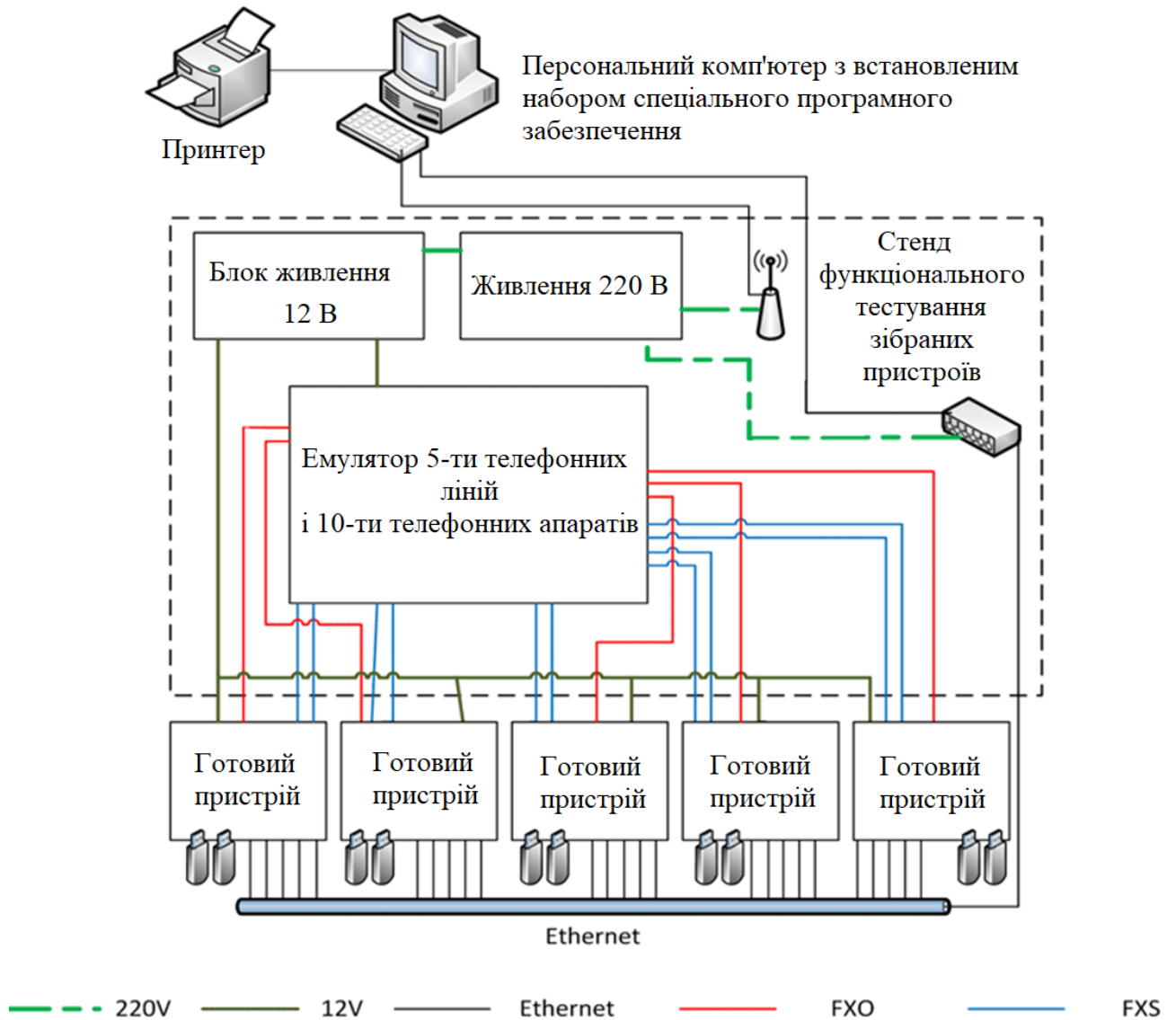


Рис. 1.3. Стенд для функціонального тестування зібраних пристроїв

Вище наведена схема функціонального випробувального стенду для зібраних пристроїв. Він дозволяє тестувати п'ять пристроїв одночасно, послідовно перевіряючи всю функціональність кожного. У процесі перевіряються версії мікропрограм окремих модулів, і, при необхідності, перепрошивається остання версія. Після успішного проходження тестів програма видає пристрою MAC-адресу, серійний номер і попередньо встановлені паролі.

Функціональні випробувальні стенди можуть включати допоміжне програмне та апаратне забезпечення для персоналізації пристрою, віддаленого збору інформації про перевірені пристрої та формування звітів про дефекти.



Рис. 1.4. Функціональне тестування зібраних пристроїв

Результати тестування виводяться на монітор комп'ютера, до стенду одночасно підключаються сім пристроїв.

До незаперечних переваг функціонального тестування можна віднести можливість остаточної прошивки, перевірки та оновлення програмних версій системних модулів, видачу персональних даних на пристрій за допомогою високорівневих протоколів та високошвидкісних інтерфейсів.

Функціональні випробувальні стенди можуть бути вбудовані в автоматизовані системи підприємства (виробництва) та забезпечувати облік та збір статистичної інформації з виробничих дільниць та відділу контролю якості.

Основними недоліками цього методу перевірки пристроїв є необхідність виготовлення спеціалізованого обладнання та написання програмного забезпечення, а функціональне тестування, на відміну від граничного сканування, не дає точної індикації несправності ланцюгів і проводів компонентів. Але в більшості випадків ці роботи виправдані за рахунок максимального охоплення та короткого часу тестування.

Тестування електронних пристроїв на виробництві прикордонного сканування

Тести граничного сканування можуть підвищити якість пристрою, що розробляється, і заощадити витрати на етапі серійного виробництва. Основною перевагою цієї технології є можливість тестування пристроїв з обмеженим доступом до контактів мікросхем в корпусах BGA, COB і QFP.

Останнім часом у зв'язку з широким використанням стандарту JTAG і, відповідно, мікросхем з його підтримкою, все доступнішим стає метод межового сканування.

Виробники мікросхем надають файли BSDL для своїх продуктів, які надають інформацію про архітектуру регістрів граничного сканування. Сучасні програмні засоби для тестування JTAG дозволяють автоматизувати процес за допомогою схематичних даних з САПР. Все це спрощує підготовку та використання тестування JTAG.

При проектуванні електронних пристроїв необхідна попередня підготовка схеми виробу. Як мінімум, це використання компонентів, які підтримують стандарт IEEE 1149.1, правильне підключення цих компонентів, вихід портів JTAG на зовнішні контакти або роз'єми.

Тестування JTAG дозволяє виявити «непаяність» у выводах цифрових мікросхем з різними типами корпусів, включаючи BGA, короткі замикання, обриви, а також непрацюючі мікросхеми з цифровими інтерфейсами. Дуже важливо виявити всі ці дефекти, оскільки якщо неперевірена плата переходить на етап програмування, можуть виникнути проблеми з запуском пам'яті та периферійними пристроями. В цьому випадку буде важко встановити причину несправності: неправильні налаштування програмного забезпечення або дефект установки. Тестування JTAG може допомогти запобігти цій проблемі.

Однак тестування JTAG має свої недоліки. По-перше, це низька продуктивність порівняно з функціональним тестуванням. По-друге, метод призначений для тестування цифрової електроніки; тому аналогові частини пристрою виключені. По-третє, важливо враховувати, що тестування JTAG перевіряє лише цілісність посилянь, але не їх якість. Опір, паразитна ємність і т. д. - всі ці параметри якості можуть істотно вплинути на роботу високошвидкісних ланцюгів.

Також тестування JTAG має ряд інших обмежень:

- Неможливо виявити дефекти електропроводки, пов'язані з цифровими або аналоговими елементами, які не підтримують JTAG, а також недоступна діагностика дефектів з'єднання між ними.
- Неможливо виконувати функціональні тести або тести на усунення несправностей, які є функцією часу.
- Неможливо виконати тести, спрямовані на виявлення дефектів шин даних, таких як тремтіння, перехресні перешкоди.

Але в той же час тестування JTAG має серйозні переваги. Це поглиблений аналіз працездатності мікросхем і модулів для вибіркової перевірки електронних пристроїв промислової партії. Це важливе доповнення і, в деяких випадках, заміна внутрішньосхемного тестування з використанням «нігтьового ложа» або «літаючих зондів». JTAG дозволяє оптимізувати обладнання для



повного тестування або скоротити час тестування за допомогою комплексного підходу, коли воно використовується в поєднанні з іншими методами.

Крім того, у міру зростання вимог до мініатюризації електронних пристроїв тестування JTAG дає змогу зменшити розміри друкованої плати, уникаючи необхідності розміщення на ній груп контактних площадок для внутрішньосхемного тестування.

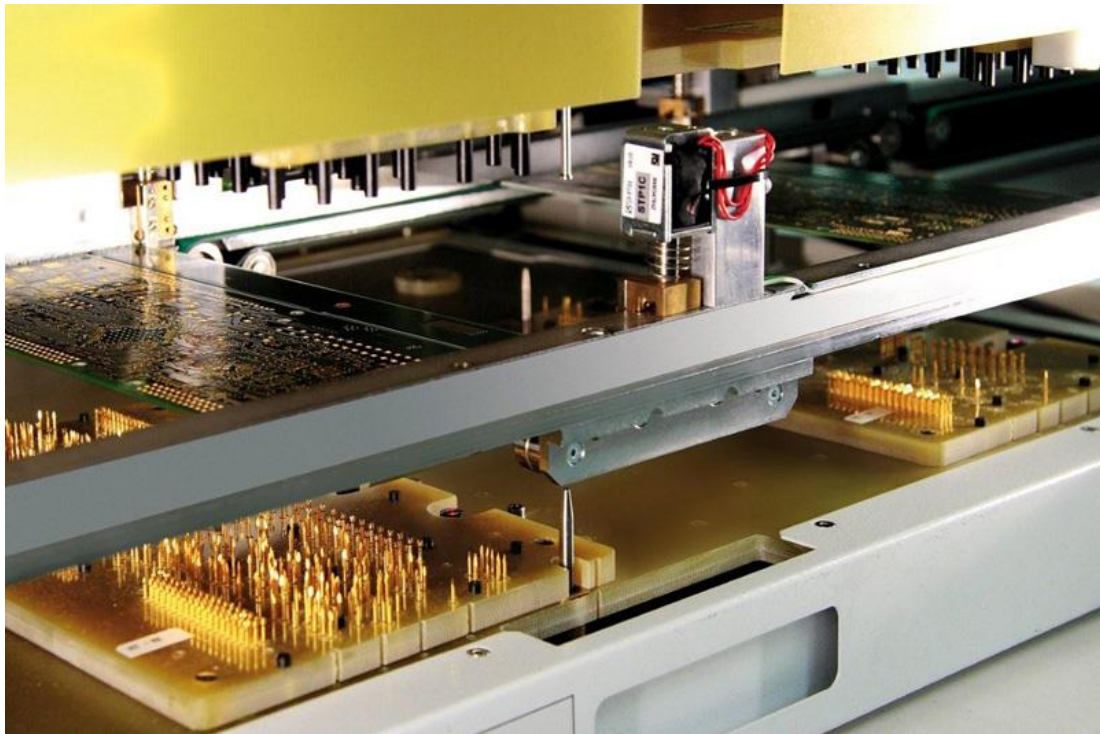


Рис. 1.5. Внутрішньосхемне тестування

### Внутрішньосхемне тестування

Хоча технологія граничного сканування JTAG набирає популярності, класичний метод внутрішньосхемного тестування, який почав розвиватися в 70-80-х роках 20 століття, успішно використовується і сьогодні.

Внутрішньосхемне тестування — це технологія перевірки окремих компонентів на платі або фрагментів схем за допомогою спеціального обладнання (ІКТ-станції) та аксесуарів (перехідника голки). За допомогою цієї

методики тестування ви можете аналізувати окремі компоненти та аналогові частини схем. А також успішно використовується у великосерійному виробництві, у випадках, коли інші сучасні технології виходять з ладу.

Умовно внутрішньосхемне тестування можна розділити на аналогове і цифрове. Аналогове внутрішньосхемне тестування зазвичай перевіряє наступне:

- наявність коротких замикань і обривів;
- номінали дискретних компонентів (резистори, конденсатори, котушки індуктивності, дискретні напівпровідникові прилади);
- наявність і правильний монтаж мікросхем.

Цей метод тестування виявляє велику кількість дефектів збірки, тому аналогове внутрішньосхемне тестування часто називають аналізом виробничих дефектів.

При цифровому внутрішньосхемному тестуванні цифрові мікросхеми перевіряються на таблицю істинності.

Оскільки ця технологія заснована на фізичному контакті голок з контактами досліджуваних компонентів, при реалізації цього підходу в тестуванні виникає ряд труднощів.

Постійна мініатюризація компонентів призводить, серед іншого, до зменшення фізичних розмірів контактних площадок і їх переміщення під корпусом. Також у багатошарових друкованих платах значна кількість з'єднань реалізована у внутрішніх шарах. Все це призводить до необхідності підведення контактних площадок для ІКТ-адаптера до однієї зі сторін плати, що в свою чергу спричиняє збільшення її габаритів та ускладнює їх маршрутизацію, а часто, у випадку з високочастотними шинами, це неможливо в принципі.

Іншим і, мабуть, основним способом оптимізації технології внутрішньосхемного тестування без шкоди для щільності покриття тестами друкованих плат і на момент тестування є комплексний підхід, який полягає в поєднанні класичного тестування ІКТ з тестуванням JTAG. Такий підхід з

попереднім розрахунком охоплення друкованої плати тестами та їх розподілом між JTAG та ICT дозволяє мінімізувати кількість ділянок для голок ІКТ і, відповідно, спростити та здешевити тестову плату. Використання таких методів вимагає відповідного підходу при проектуванні електронного пристрою, аналізі придатності електричних схем та їх корекції.

Таким чином, можна сформулювати основні критерії, що визначають вибір методології тестування:

1. Масштаби виробництва.
2. Складність виробу.
3. Наявність спеціальних вимог до якості (приклад: електроніка для відповідального використання).

Так, наприклад, для відносно простих пристроїв невеликими партіями достатньо використовувати функціональне тестування, а для простоїв електроніки великими партіями - внутрішньосхемне тестування, оскільки воно забезпечує максимальну швидкість. Для тестування цифрової електроніки за технологією JTAG найкращим вибором є сканування кордонів, яке дозволяє налагодити виробничий процес і налаштувати його на ранній стадії.

Плануючи серійне виробництво, необхідно враховувати продуктивність усіх методів випробувань, а відповідно, і таку їх комбінацію, щоб отримати мінімальний час на випробування одного пристрою з максимальним охопленням тестуванням.

Відповідно, саме комплексне випробування електроніки на виробництві, тобто поєднання різних технологій у грамотному співвідношенні сьогодні є найкращим варіантом перевірки та аналізу якості. З цієї причини на перший план виходить тестова здатність до проектування та аналіз покриття тестуванням. Він дозволяє спочатку спланувати та обґрунтувати застосовність та ступінь використання вищезазначених підходів у кожному конкретному проекті.

Таким чином особливо важливим є етап функціонального тестування з використанням окремих типів сигналів, які визначаються типом тестованої техніки. При цьому важливим є питання створення тестових сигналів – їхньої імітації, за наперед заданими параметрами. Оскільки такі сигнали зазвичай є цифровими, розглянемо особливості подання сигналів в дискретній та цифровій формі.

## 1.2 Поняття сигналу

В загальному, сигнал — це деяка функція часу, що походить із фізичного світу. Однак у науково-технічних дисциплінах прийнято давати формальні математичні визначення для основних понять. Розрізняють аналогові та цифрові сигнали.

Аналоговим сигналом  $s$  є кінцева функція  $s(t)$  з дійсним значенням неперервної змінної  $t$  (часом), визначена для всіх часів на інтервалі  $-\infty < t < +\infty$ . Цифровий сигнал  $s$  є обмеженою дискретною послідовністю  $s_n$  з єдиним індексом  $n$  (званим дискретним часом), визначеним для всіх часів  $n = -\infty \dots +\infty$ .

Вимога, щоб аналогові сигнали були дійсними, а не цілочисельними чи складними, походить від уявлення про те, що реальні сигнали, такі як швидкість, напруга та акустичний тиск, є простими безперервними змінними. Комплексні числа зазвичай вважаються чисто математичними винаходами, які ніколи не можуть з'явитися в природі. Цифрові сигнали більше обмежені вимогою репрезентативності в цифровому комп'ютері, ніж фізичною реалізованістю. Під «дискретним» мається на увазі, що можливі значення квантуються до дискретних значень, таких як цілі числа або всі кратні  $2^{-b}$ . «Обмежений» означає, що існує лише кінцева кількість можливих значень сигналу. Обмежені дискретні значення — це саме ті числа, які представлені комп'ютерними словами з деякою кінцевою кількістю бітів.

Скінченність – це ще одна фізична вимога, яка має три різновиди, а саме кінцеве значення сигналу, кінцеву енергію та скінченну пропускну здатність. Скінченнозначність просто означає, що функція, яка бажає бути сигналом, ніколи не повинна розходитися або ставати математично сингулярною. Реальні фізичні величини ніколи не стають нескінченними, оскільки така поведінка потребувала б нескінченної енергії, сили чи витрат того чи іншого типу. Цифрові сигнали обов’язково обмежені, щоб бути представленими, і тому завжди мають кінцеве значення. Діапазон, у якому змінюється сигнал, називається його динамічним діапазоном. Обмеження на скінченну енергію та пропускну здатність обґрунтовані так само, але поняття енергії та пропускну здатності вимагають трохи більше пояснень.

Енергія — це міра розміру сигналу, введена для того, щоб аналітик порівнював нескінченну кількість можливих сигналів. Одним із способів визначення такої міри може бути використання найвищого значення, якого досягає сигнал (і, отже, кінцева енергія означатиме кінцеве значення сигналу). Це було б незадовільним, оскільки загалом невеликий сигнал, який досягає високого значення в один ізольований момент часу, буде розглядатися як більший, ніж другий сигнал, який майже завжди вищий за перший. Ми б, безумовно, віддали перевагу мірі, яка враховує всі часи. Якби сигнали мали лише позитивні значення, ми могли б використовувати середнє значення сигналу, але оскільки вони не є середніми, це неефективно, оскільки багато, здавалося б, великі сигнали (наприклад,  $A \sin$  з великим  $A$ ) мають нульове середнє значення через скасування позитивних і негативних внесків. Найпростіша задовільна міра дається наступним визначенням.

Енергія аналогового або цифрового сигналу  $s$  визначається як

$$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt \quad \text{A} \quad \text{D} \quad E_s = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_n^2 \quad (1.1)$$

сума (або інтеграл для аналогового випадку) значень сигналу на певній ділянці. Ця міра аналогічна квадрату довжини багатовимірних векторів і пропорційна фізичній величині, відомій як енергія, коли сигнал є швидкістю, напругою або струмом. Енергія, яку ми щойно визначили, також безпосередньо пов'язана з витратами, пов'язаними з виробленням сигналу; це є основою для фізичної потреби кінцевої енергії. Квадратний корінь енергії визначає різновид середнього значення сигналу, яке називається середньоквадратичним значенням (RMS).

Пропускна здатність є мірою не розміру, а швидкості. Сигнал, який швидко коливається, має вищу пропускну здатність, ніж той, який змінюється лише повільно. Вимагання обмеженої пропускну здатності накладає обмеження на плавність, не допускаючи раптових розривів стрибків і гострих кутів. Фізичні тіла не зникають з одного місця і з'являються в іншому, не проходячи через усі точки між ними. Швидкість транспортного засобу не змінюється від нуля до якогось великого значення без плавного прискорення на проміжних швидкостях.

Нарешті, положення для всіх часів дійсно означає для всіх часів інтерес, і вводить для того, щоб заборонити різні порушені випадки.

Означення сигналу дає чіткі критерії для визначення, які функції або послідовності є сигналами, а які ні, причому всі ці критерії є простими фізичними вимогами. На жаль, це визначення більше шанується в порушенні, ніж у дотриманні.

Хоча визначення вимагає, щоб сигнали були функціями з дійсними значеннями, ми часто використовуємо комплексні значення, щоб спростити алгебру. Насправді ми маємо на увазі, що «реальний» сигнал є справжньою частиною цього складного сигналу.

Наше визначення спирається на існування змінної часу. Іноді наведене вище визначення поширюється на функції інших незалежних змінних, подібних

до часу, і навіть на функції більш ніж однієї змінної. Зокрема, обробка зображень, яка має справу з функціями двох просторових координат, викликає багато концепцій обробки сигналів.

Звичайно, сигнали визначаються в нескінченному діапазоні значень, і, отже, для того, щоб енергія сигналу була кінцевою, сигнал повинен дорівнювати нулю протягом більшості разів або, принаймні, спадати до нуля досить швидко. Суворі вимоги кінцевої енергії виключає такі корисні сигнали, як константи та періодичні функції. Відповідно, ця вимога також зазвичай пом'якшується, розуміючи, що поза інтервалом часу, який ми спостерігаємо за сигналом, його цілком можна встановити на нуль. Крім того, ми можемо дозволити сигналам бути відмінними від нуля протягом нескінченного часу, але мати кінцеву потужність. Потужність - це енергія за час

$$P_s(\tau) = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_{\tau - \frac{T}{2}}^{\tau + \frac{T}{2}} s^2(t) dt \quad \mathbf{A} \quad \mathbf{D} \quad P_{s_v} = \lim_{N \rightarrow 0} \frac{1}{N} \sum_{n=\nu - \frac{N}{2}}^{\nu + \frac{N}{2}} s_n^2 \quad (1.2)$$

який загалом залежить від часу.

На практиці об'єкти частіше вважаються сигналами через їх корисність, а не на основі того, що вони підкоряються вимогам цього визначення (або будь-якого іншого).

Виявилось, що цифровий сигнал можна отримати з аналогового сигналу за допомогою аналого-цифрового перетворення ("А/Ц" на рис. 1.6), також відомого як дискретизація та оцифрування. Коли вибірка виконана належним чином, цифровий сигнал в певній мірі еквівалентний аналоговому. Аналоговий сигнал може бути отриманий з цифрового сигналу за допомогою цифрового в аналогове перетворення (блок 'D/A'). Розглянемо таке перетворення детальніше.

### 1.3 Аналогові та дискретні сигнали

Пристрій, який перетворює аналоговий сигнал в цифровий, називається аналого-цифровим перетворювачем або скорочено А/D. Зворотним пристроєм, очевидно, є цифро-аналоговий перетворювач або ЦАП. Існує багато інших назв, таких як семплер, дигітайзер і кодек, але вони не є цілком взаємозамінними.

При поясненні функції АЦП необхідно розглянути дві проблеми, що відповідають двом осям на графіку аналогового сигналу на рис. 1.6. Можна зауважити, що АЦП складається з двох квантувальників, семплера і дигітайзера. Семплер відбирає сигнали в дискретний час, тоді як дигітайзер перетворює значення сигналу в ці моменти в цифрове представлення.

Перетворення безперервно змінної функції в дискретну часову послідовність вимагає формування вибірки в певні моменти часу. Це може призвести до втрати інформації, оскільки багато різних безперервних функцій можуть відповідати одній вибірковій послідовності, але за певних умов такої втрати немає. Ключем до розуміння цього дивовижного результату є теорема вибірки. Ця теорема пояснює, що відбувається, коли створюється сигнал дискретного часу шляхом вибірки аналогового сигналу з однаковою швидкістю.



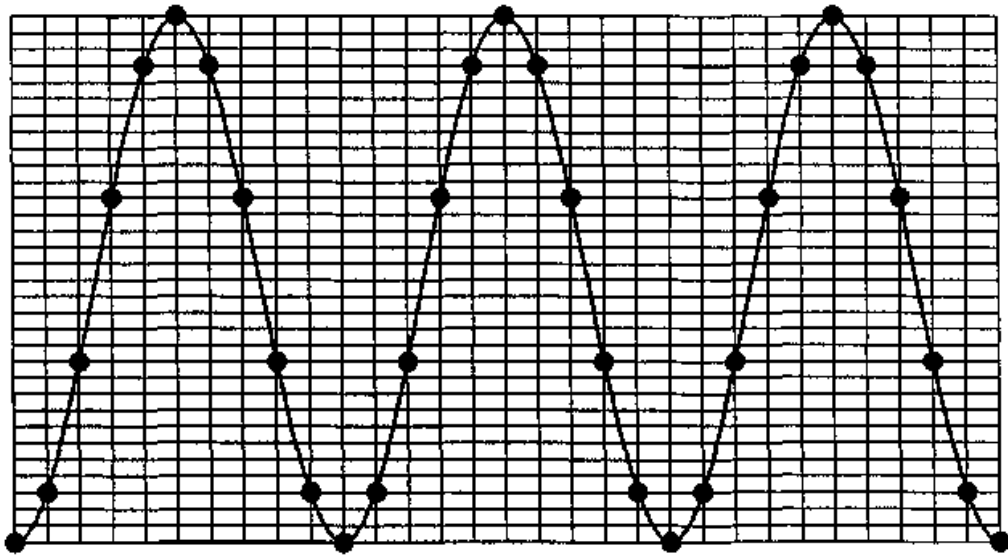


Рис. 1.6. Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий включає квантування обох осей, час дискретизації та оцифрування значення сигналу. На малюнку ми бачимо вихідний аналоговий сигнал, накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Отриманий цифровий сигнал зображується точками.

Перетворення безперервних дійсних значень аналогового сигналу в обмежені цифрові вимагає округлення їх до найближчого дозволеного рівня. Це неминуче призведе до втрати точності, що можна інтерпретувати як додавання (реальнозначного) шуму до кожного значення  $a_n = d_n + u_n$ , де  $u_n$  ніколи не може перевищувати половину відстані до найближчих рівнів квантування. Наслідком цього шуму є погіршення співвідношення сигнал/шум (SNR) сигналу, погіршення, величина якого зменшується при збільшенні кількості доступних рівнів.

Цифрові сигнали, отримані від аналогових, іноді називають РСМ потоками. Припустиво, що весь час витираємо (обнуляємо) аналоговий сигнал, який не підлягає вибірці. Це означає заміну вихідного безперервно змінного сигналу послідовністю імпульсів різної амплітуди. Ми могли б досягти цього самого результату дещо іншим шляхом. Починаємо з черги імпульсів постійної

амплітуди. Потім ми змінюємо амплітуду кожного вхідного імпульсу, щоб відобразити амплітуду аналогового сигналу, який потрібно оцифрувати. Зміни амплітуди вихідного сигналу тепер відображаються на змінній висоті імпульсів. Процес зміни деяких аспектів сигналу з метою передачі інформації називається модуляцією. У цьому випадку ми модулювали амплітуди імпульсного потоку і таким чином створили імпульсну амплітудну модуляцію (PAM). Інші аспекти імпульсного потоку також могли бути змінені, що призвело до широтно-імпульсної модуляції (PWM) і модуляції позиції імпульсу (PPM). Тепер ми хочемо записати в цифровому вигляді амплітуду кожного імпульсу, що ми робимо, надаючи кожному код, напр. двійкове представлення найближчого рівня квантування. З цього коду ми можемо точно відновити амплітуду імпульсу  $i$ , зрештою, вихідного сигналу. Отримана послідовність чисел називається потоком імпульсно-кодової модуляції (PCM).

#### 1.4 Формування вибірок

Зазвичай дискретизація аналогового сигналу проводиться з однорідною швидкістю, що відповідає частоті дискретизації  $f_s$ . Це означає, що вибираються значення сигналу через кожні  $t_s = \frac{1}{f_s}$  секунд. Яким чином  $t_s$  впливає на результуючий цифровий сигнал? Основні ефекти можна спостерігати на рис. 1.7-1.10.

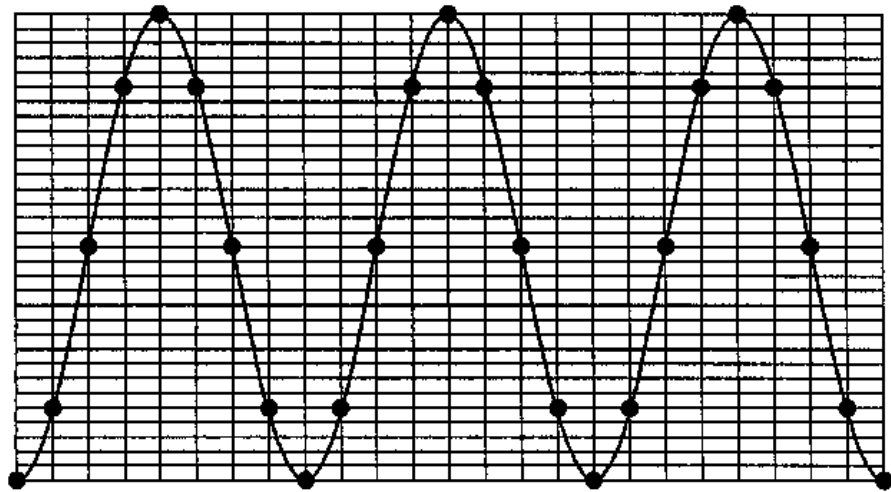


Рис. 1.7. Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий з меншою частотою дискретизації. Як і на попередньому малюнку, вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Однак інтервал часу між зразками  $t$  довший.

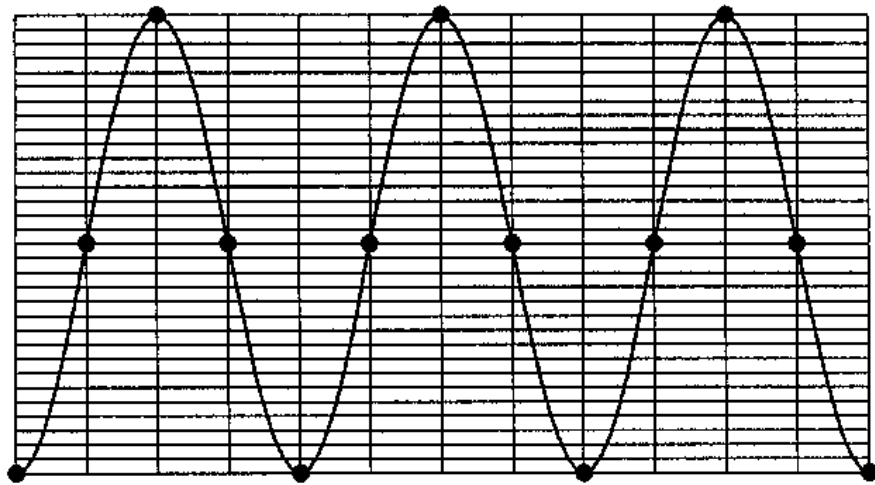


Рис. 1.8. Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий з ще меншою частотою дискретизації. Знову вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Хоча в циклі є лише чотири вибірки, оригінальний сигнал все ще дещо впізнаваний.

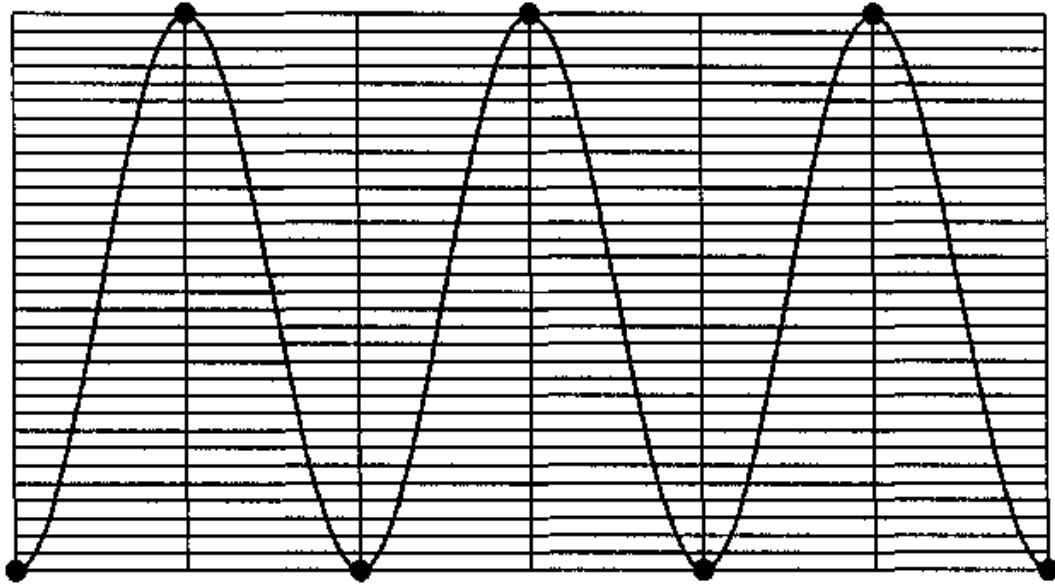


Рис. 1.9. Перетворення аналогового сигналу в цифровий з мінімальною частотою дискретизації. Знову вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Хоча є лише дві вибірки за цикл, частоту вихідної синусоїди все ще можна знайти.

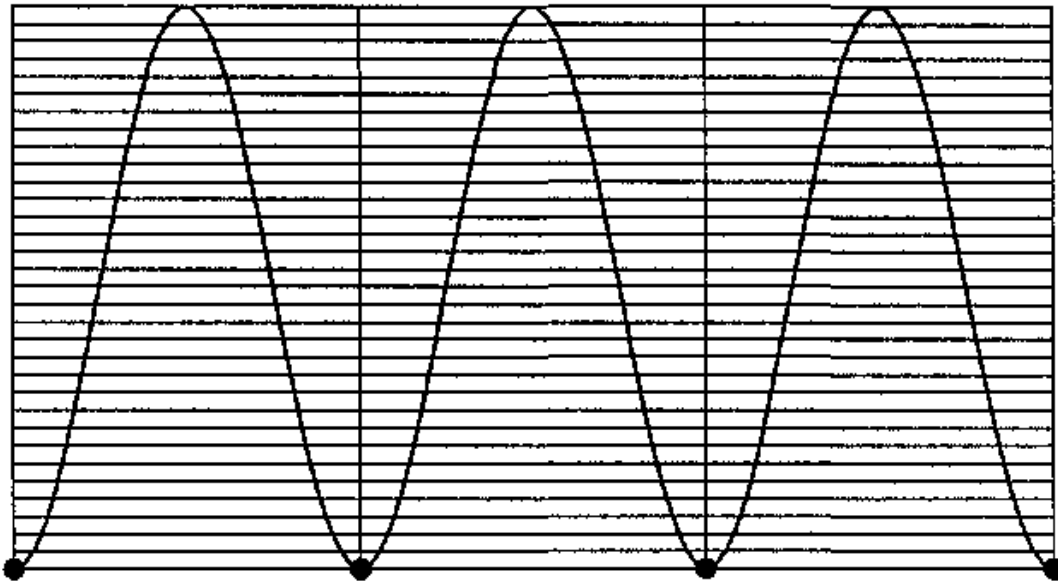


Рис.1.10. Перетворення аналогового сигналу в цифровий із занадто низькою частотою дискретизації. Знову вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. При наявності лише одного зразка за цикл вся інформація втрачається.

На рис. 1.7 і 1.8 частота дискретизації становить вісім і чотири вибірки за цикл відповідно, що достатньо для того, щоб можна було чітко побачити детальну форму сигналу (це проста синусоїда). При таких частотах дискретизації навіть проста лінійна інтерполяція (з'єднання точок вибірки прямими лініями) не є поганим наближенням, хоча піки зазвичай будуть дещо обрізаними. На рис. 1.9, лише з двома вибірками за цикл, ми більше не можемо розрізнити детальну форму сигналу, але базова частота помітна. При наявності лише однієї вибірки за цикл, як на рис. 1.10, навіть ця основна частота втрачається, і сигнал маскується як постійний струм.

Явище, коли вибірка змушує одну частоту виглядати як іншу, називається псевдонімом. Зразки зображень узгоджуються з різними інтерпретаціями безперервного світу, реальний тепер іменується псевдонімом видимого. Отже, в цьому випадку вибірка спричинила втрату інформації, незворотно спотворюючи сигнал. Це загальне явище. Вибірка призводить до того, що багато аналогових сигналів відображаються в один і той же цифровий сигнал. Це пояснюється тим, що оцифрований сигнал записує лише значення безперервного сигналу в певні моменти часу  $t = nt$ , всі аналогові сигнали, які узгоджуються в ці моменти часу, але відрізняються між ними, поєднуються разом з одним цифровим сигналом.

Оскільки вибірка завжди відображає багато аналогових сигналів в один і той же цифровий сигнал, виникає питання — чи існують умови, за яких АЦП не завдає непоправної шкоди? Тобто, чи є спосіб гарантувати, що ми зможемо відновити значення аналогового сигналу в будь-який час на основі лише вибіркового сигналу? Звичайно, аналоговий сигнал може приймати довільні значення в моменти, що не відповідають періодам вибірки, і тому багато різних аналогових сигналів відповідають одному і тому ж цифровому. Ствердна відповідь передбачала б відповідність один до одного між аналоговими

сигналами, що підкоряються цим умовам, і цифровими сигналами, отриманими шляхом їх вибірки.

### Теорема вибірки

Припустимо, що аналоговий сигнал  $s(t)$  дискретизується з частотою дискретизації  $f_s = 1/t$ , виробляючи цифровий сигнал  $s_n = s(nt)$ .

А. Якщо частота дискретизації вдвічі перевищує найвищу частотну складову сигналу  $f_s > f_{max}$ ., тоді аналоговий сигнал можна відновити для будь-якого бажаного часу.

В. Відновлене значення аналогового сигналу в момент часу  $t$

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_n \operatorname{sinc}(\pi f_s(t - nt_s)) \quad (1.3)$$

є лінійною комбінацією значень цифрового сигналу з зважуванням  $\operatorname{sinc}(t) = \sin(t)/t$ .

На перший погляд теорема вибірки здається нерозумною. Ми вказуємо значення сигналу в певні дискретні моменти і стверджуємо, що можемо точно передбачити його значення в інші моменти. Безперечно, сигнал повинен мати можливість довільно коливатися між моментами дискретизації і, таким чином, бути непередбачуваним. Пояснення цього парадоксу стає зрозумілим з умов теореми вибірки. Обмеження пропускної здатності обмежує можливі коливання аналогового сигналу між моментами вибірки. Сигнал не може робити більше, ніж плавно інтерполювати між цими часами, оскільки для цього потрібні більш високі частотні компоненти, ніж він має.

Мінімальна частота дискретизації (трохи більше ніж вдвічі перевищує найвищу частотну складову) називається частотою Найквіста  $f = 2f_{max}$  на честь Гаррі Найквіста, інженера, який вперше опублікував вимогу в 1928 році. Лише в 1949 році математик Клод Шеннон опублікував формальний доказ теореми

вибірки та формули відновлення. Неточною, але легкою для запам'ятовування формулюванням внеску цих двох людей є те, що Найквіст вказав, коли може працювати A/D, а Шеннон диктував, як повинен працювати D/A.

Щоб краще зрозуміти критерій Найквіста, розглянемо простий випадок однієї синусоїди. Тут мінімальна частота дискретизації становить двічі за цикл. Один з цих моментів вибірки зазвичай перебуває в позитивному півперіоді, а другий – у негативному. Саме це спостереження позитивних і негативних півперіодів змушує теорему вибірки працювати. Інтуїтивно очевидно, що вибірка з меншою швидкістю не може бути достатньою, оскільки цілі півперіоди будуть втрачені. Насправді навіть вибірки точно двічі за цикл недостатньо, оскільки вибірка точно на нулі або піках приховує півперіоди, що і сталося на рис. 1.10. Ось чому теорема вибірки вимагає від нас вибірки із суворо вищою швидкістю.

Помилка на рис. 1.10 є окремим випадком більш загального явища використання. Теорема вибірки говорить нам про те, що сигнали дискретного часу з частотою дискретизації  $f_s$  однозначно відповідають сигналам безперервного часу з частотними компонентами менше  $f_s$ . Вибірка будь-якого безперервного сигналу часу з високочастотними компонентами все ще дає дискретний сигнал часу, але такий, який однозначно відповідає рис. 1.11 показано, як високочастотний синусоїдальний сигнал накладається на нижчу частоту шляхом дискретизації. Обидва сигнали узгоджуються в точках вибірки, але простіша інтерпретація цих точок - це низькочастотний сигнал.

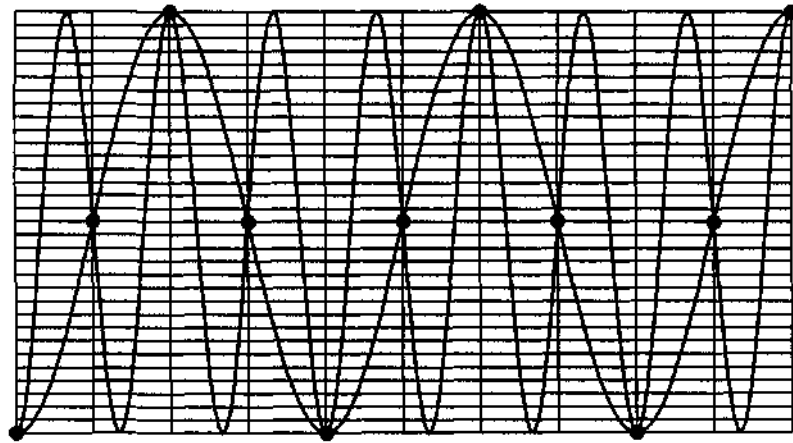


Рис. 1.11. Зміщення високочастотного аналогового сигналу в сторону низькочастотного. Високочастотний сигнал має лише вибірку через кожні півтора циклу, тобто відповідає цифровій частоті  $f_s$ . Синусоїда нижньої частоти відбирається по чотири вибірки за цикл.

Цифрову частоту прийнято визначати таким чином

$$\varphi \equiv \frac{f}{f_s}$$

і теорема вибірки говорить нам, що ми повинні мати  $\varphi < \frac{1}{2}$ . Послідовне використання цієї цифрової частоти звільняє нас від необхідності думати про реальні (аналогові) частоти та накладання. Усі DSP будуть абсолютно однаковими, якщо сигнал 2 Гц дискретизується на 10 Гц або сигнал 2 МГц відбирається на 10 МГц.

Теорема вибірки технічно є лише «теорема вибірки низьких частот для однакових інтервалів часу». Якщо сигнали, що цікавлять, мають малу смугу пропускання, але зосереджені на деякій високій частоті, безумовно, достатньо взяти вибірку на більш ніж вдвічі вищій частотній складовій, але необхідно лише приблизно вдвічі більшої пропускну здатності. Це зміст теореми про смугову вибірку. У деяких випадках також можливо зробити вибірку



нерівномірно в часі. Для таких випадків існують «теореми про неоднорідну вибірку».

Рівняння (1.3) можна переписати як

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_n h(t - nt_s) \quad (1.4)$$

де  $h(t) \equiv \text{sinc}(\pi f_s t)$  називається ядром вибірки. Як наслідок, операція реконструкції складається з розміщення ядра вибірки в кожний час вибірки  $nt_s$ , зважування його за значенням вибірки при  $s_n$  і додавання всіх внесків (рис. 1.12). Синус у чисельнику синуса дорівнює нулю для всіх часів вибірки  $nt_s$ , і, отже, ядро вибірки підкоряється  $h(nt_s) = \delta_{n,0}$ . З цього ми відразу робимо висновок  $s(nt_s) = s$ , як і потрібно. Отже, формула реконструкції гарантує узгодженість у часі вибірки, дозволяючи внести туди лише правильне значення цифрового сигналу. Ніколи в інший час ядра дискретизації не є дійсно нульовими, а значення аналогового сигналу складається з нескінченної кількості внесків.

Для того, щоб формула реконструкції була використана на практиці, ми повинні якимось чином обмежити суму в (1.4) кінцевою кількістю внесків. Зауважимо, що ядро  $h(t)$  розпадається як  $\frac{1}{\pi f_s t}$  ми можемо наблизити суму, обмеживши тривалість у часі внеску кожного зразка. Зокрема, якщо ми хочемо брати до уваги лише члени, більші за деяку частку  $p$ , ми повинні обмежити внесок кожної вибірки до  $\pm \frac{1}{\pi p}$  зразків з його центру. І навпаки, це обмеження означає, що кожен момент часу, який підлягає інтерполяції, отримає лише кінцеву кількість внесків (з цих моментів вибірки не далі ніж  $\frac{1}{\pi p}$ ).

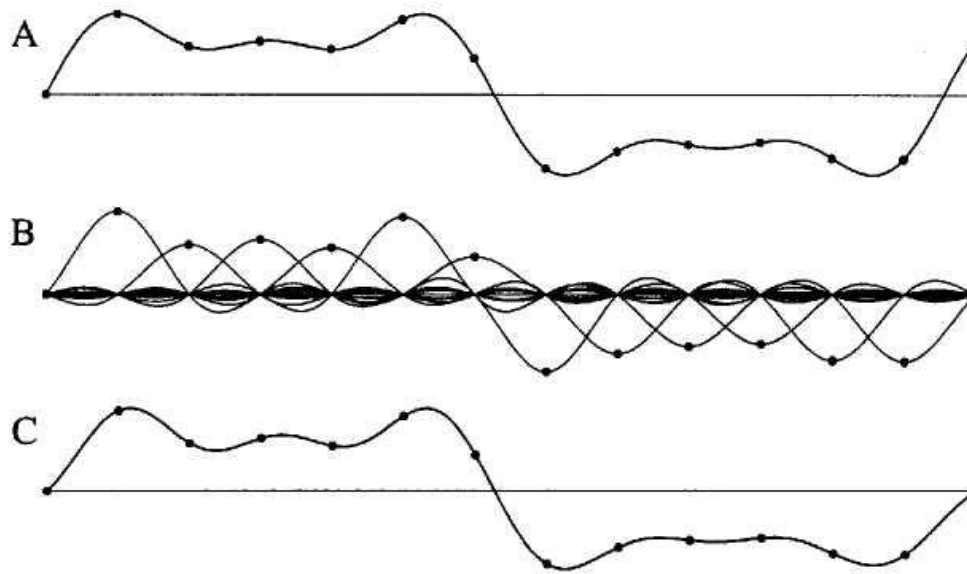


Рис. 1.12. Зображена графічно формула реконструкції

На рис. 1.12 (А) ми бачимо аналоговий сигнал, і вибірки, оцифровані трохи вище, ніж вдвічі найвищий частотний компонент. Рис. 1.12 (В) показує ядра синуса, зважені за значенням вибірки, розміщеним під час кожного зразка; зауважте, що в моменти вибірки всі інші синуси вносять нуль. На рис. 1.12 (С) ми підсумовуємо внески від усіх ядер в області та відновлюємо вихідний аналоговий сигнал.

### 1.5 Цифрове представлення сигналів

Розглянемо квантування значення сигналу. Чим більше бітів ми виділяємо на вибірку, тим менше шуму ми додаємо до сигналу. Зменшення кількості бітів монотонно зменшує SNR.

Ще більш важливим є відповідність інтервалів рівнів квантування динамічному діапазону сигналу. Якби інтервал був встановлений таким, що сигнал повністю перебував між двома рівнями, сигнал фактично зникав би після оцифрування. Якщо припустити, що існує лише кінцева кількість рівнів

квантування, якби сигнал змінювався в набагато більшому діапазоні, ніж той, який займають рівні квантування, цифрове представлення знову було б невідповідним. Вважатимемо, що діапазон дигітайзера налаштований на відповідність динамічному діапазону сигналу (на практиці сигнал зазвичай підсилюють, щоб відповідати діапазону дигітайзера).

Припустимо, що аналоговий сигнал лінійно оцифрований, що відповідає  $b$  бітам. Це означає, що ми вибираємо рівень сигналу  $l = -(2^{b-1} - 1) \dots + 2^{b-1}$ , що є найближчим до  $s(t_n)$ . Як  $b$  впливає на результуючий цифровий сигнал? Основні ефекти можна спостерігати на рис. 1.13-1.17.

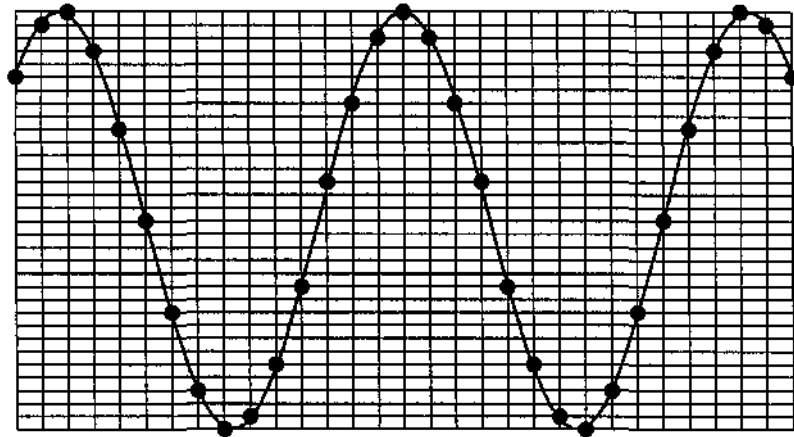


Рис. 1.13. Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий сигнал, що включає квантування обох осей, час дискретизації та оцифрування значення сигналу.

На рис. 1.13 ми бачимо вихідний аналоговий сигнал, накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Отриманий цифровий сигнал зображується точками.

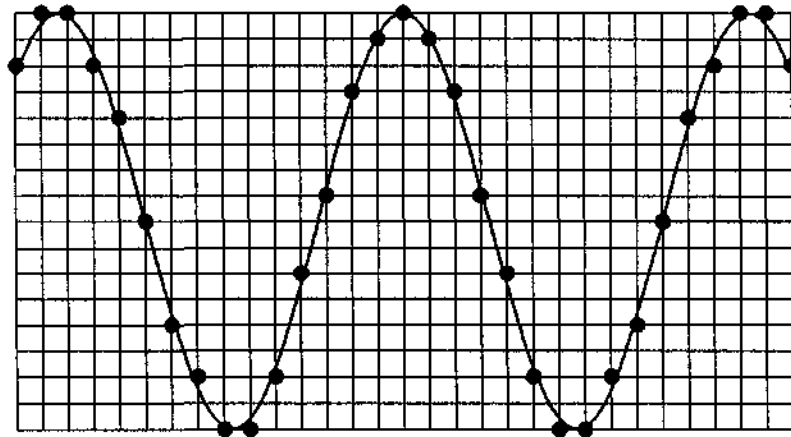


Рис. 1.14: Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий з меншою кількістю рівнів оцифрування.

Як і на попередньому рисунку, вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Однак тут лише 17 рівнів (близько чотирьох бітів), що використовуються для представлення сигналу.

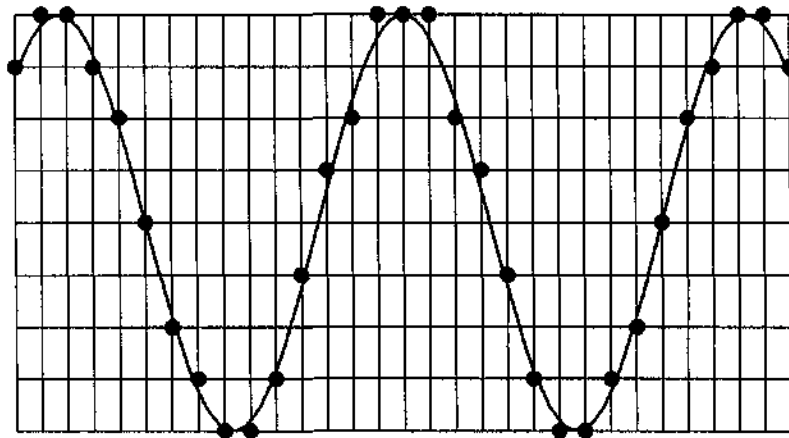


Рис. 1.15. Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий з меншою кількістю рівнів оцифрування.

Знову вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Тут лише дев'ять рівнів (трохи більше трьох бітів) використовуються для представлення сигналу.

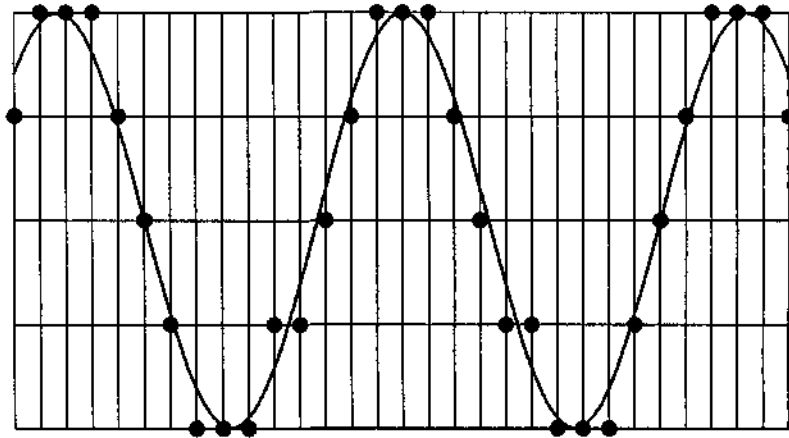


Рис. 1.16. Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий з меншою кількістю рівнів оцифрування.

Знову вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Тут лише п'ять рівнів (близько двох бітів) використовуються для представлення сигналу.

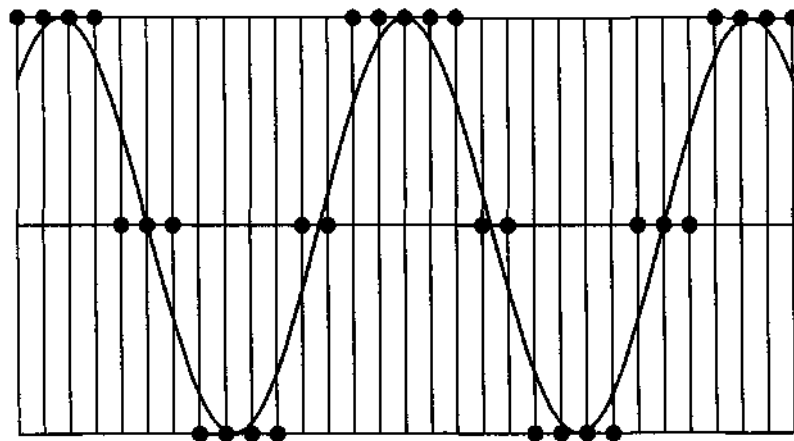


Рис. 1.17. Перетворення аналогового сигналу у відповідний цифровий з мінімальною кількістю рівнів оцифрування.

Знову вихідний аналоговий сигнал був накладений на сітку часу вибірки та оцифрованого значення сигналу. Тут для представлення сигналу використовуються лише три рівні (півтора біта).

Розглянемо сигнал дискретного часу перед квантуванням його значень (імпульси перед кодуванням). Цю послідовність дійсних чисел можна розглядати як суму двох частин

$$a_n = d_n + \nu_n \quad \text{where} \quad d_n \equiv \text{Round}(a_n)$$

у і так  $d$ , є цілими числами і  $|\nu_n| \leq \frac{1}{2}$ . Припускаючи, що  $a_n$  знаходиться в межах діапазону нашого дигітайзера, результатом кодування є заміна  $a$  на  $d_n$ , вводячи таким чином помилку  $\nu$  (див. рисунок 2.6). Якби ми негайно переконвертували цифровий сигнал в аналоговий за допомогою Ц/А перетворювача, ми б отримали сигнал, подібний до вихідного, але з цим шумом, доданим до сигналу.

Правильний спосіб кількісної оцінки кількості шуму квантування полягає в тому, щоб порівняти енергію сигналу з енергією шуму та обчислити SNR. Для заданої потужності аналогового сигналу, оскільки рівні квантування стають ближчими один до одного, відносна кількість шуму зменшується. Як альтернатива, з цифрової точки зору шум квантування завжди є постійним  $\pm \frac{1}{2}$  рівнів, при цьому збільшення кількості бітів у цифровому представленні збільшує значення цифрового сигналу. Оскільки кожен новий біт подвоює кількість рівнів і, отже, значення цифрового сигналу

$$\text{SNR(dB)} \approx 10 \left( \log_{10}(2^b)^2 - \log_{10} 1^2 \right) = 20b \log_{10} 2 \approx 6b \quad (1.5)$$

тобто кожен біт вносить близько 6 дБ до SNR.

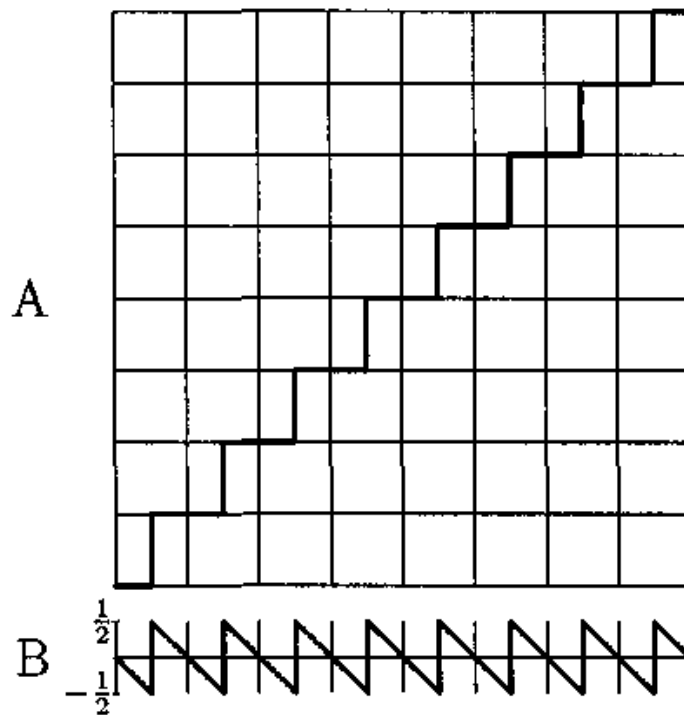


Рис. 1.18. Шум, створюваний шляхом оцифровки аналогового сигналу.

На рис. 1.18. (А) ми бачимо вихід цифрового перетворювача в залежності від його входу. На рис. 1.18. (В), шум округлення помилки, тобто, вихід мінус вхід.

На практиці всі дигітайзери мають максимальну кількість бітів  $i$ , отже, мінімальний і максимальний рівень. Інтервал аналогових значень сигналу, які перетворюються в допустимі цифрові значення називаються динамічним діапазоном цифрового перетворювача значення аналогового сигналу за межами допустимого діапазону, обрізаються до максимуму або мінімуму допустимі рівні. Більшість дигітайзерів мають фіксоване число бітів, і фіксований динамічний діапазон; для того, щоб звести до мінімуму шуми квантування аналоговий сигнал повинен бути посилений (або ослаблений) до тих пір, поки оптимально використовує динамічний діапазон цифрового перетворювача. Перевищення динамічного діапазону цифрового перетворювача слід уникати, наскільки це можливо. Хоча помірна кількість насичення зазвичай не є

шкідливою для апаратного цифрового перетворювача, вводиться сигнал відсікання.

Відношення сигнал-шум має значення тільки тоді, коли «шум» дійсно випадковий і корельований з сигналом. Проаналізуємо, який характер шуму квантування?

Вихід дигітайзера буде приймати тільки квантовані значення, по суті, округлення кожного входу до найближчого рівня вихідного сигналу. Отже, вихідний сигнал як функція від вхідного буде мати форму, як сходи, як показано на рис. 1.18, А. Відповідно, помилка округлення, вихід мінус вхід, буде виглядати як пилкоподібна, як показано на рис. 1.18, В. Таким чином, шум квантування є передбачуваним і сильно корелює з сигналом.

## 1.6 Висновки до розділу 1

Завершальним етапом створення електронного продукту є масове виробництво, яке в кінцевому підсумку визначає якість пристрою.

Функціональне тестування полягає в перевірці зібраних або частково зібраних пристроїв на працездатність зазначеної функціональності та на відповідність параметрам, які закладені в специфікації на пристрій.

Всі методики тестування дозволяють оцінити якість електроніки в процесі виробництва, проте в деяких випадках тестування пристрою проводиться тільки на завершальному етапі. Це називається тестуванням після фінального складання - перевірка функціональності та відповідності специфікації. Оцінюється не тільки якість, але і стабільність і надійність пристрою. Такий аналіз електроніки проводиться за допомогою складного стендового обладнання, що моделює систему, в якій працює випробовуваний пристрій.

Таким чином особливо важливим є етап функціонального тестування з використанням окремих типів сигналів, які визначаються типом тестованої



техніки. При цьому важливим є питання створення тестових сигналів – їхньої імітації, за наперед заданими параметрами. Оскільки такі сигнали зазвичай є цифровими, розглянуто особливості подання сигналів в дискретній та цифровій формі, типи шумів і завад, що можуть створюватись при цьому.

## РОЗДІЛ 2

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Поняття імітаційного моделювання

Моделювання є найбільш потужним і універсальним методом аналізу систем, чия робота корелює з дією впливу випадкових факторів.

Моделювання базується на статистичному експерименті, реалізація якого практично неможлива без використання комп'ютерних технологій. Тому довільна ІМ в кінцевому підсумку є більш-менш складним програмним продуктом.

Звичайно, як і будь-яку іншу програму, імітаційну модель можна розробити на будь-якій мові програмування загального призначення, навіть на мові асемблера. Однак у цьому випадку на шляху розробника виникають такі проблеми:

- необхідні знання мови програмування на достатньо високому рівні.
- розробка конкретних процедур забезпечення статистичного експерименту (генерування стохастичних дій, планування експерименту тощо) може зайняти не менше часу та зусиль, ніж розробка самої моделі системи.

На сьогодні можна знайти та скористатися технічними засобами для зазначених завдань, як на приклад програмою MATLAB, яка включає додаткові засоби симуляції, такі як SIMULINK.

SIMULINK — інструмент для людей, які вміють цінувати свій час і порівнювати очікуваний ефект із зусиллями, витраченими на його досягнення.

Наявні публікації, присвячені опису MATLAB, орієнтовані на його застосування для розв'язування обчислювальних задач та аналітичного

моделювання. Знання цих особливостей, звичайно, може бути корисним і навіть необхідним у багатьох випадках.

## 2.2. Види імітаційних моделей

Моделювання можна вважати основним інструментом прийняття своєчасних та обґрунтованих рішень.

Імітаційна модель (ІМ) — це формальний (тобто виконаний певною формальною мовою) опис логіки функціонування досліджуваної системи та взаємодії окремих її елементів у часі з урахуванням найважливіших причин-і-ефектні зв'язки, властиві системі, і забезпечення статистичних експериментів.

Як наслідок цього твердження, слід зазначити дві важливі обставини:

1) співвідношення між окремими елементами системи, описаної в моделі, а також між деякими значеннями (параметрами) можна представити у вигляді аналітичних залежностей;

2) модель можна вважати реалізованою і такою, що має практичну цінність лише в тому випадку, якщо вона відображає лише ті параметри модельованого об'єкта, котрі впливають на значення обраного показника ефективності.

Як зазначалося вище, для ІМ практично немає обмежень за сферою їх застосування (за типом змодельованої системи), а можна говорити лише про доцільність використання ІМ у тій чи іншій предметній області та розмірі трудовитрат на його розвиток.

Оскільки в основі моделювання лежить метод статистичних тестів, то найбільший ефект від його застосування досягається при вивченні складних систем, на функціонування яких істотно впливають випадкові фактори.

Використання імітаційного моделювання також доцільно в наступних випадках:

- якщо немає повної постановки задачі для дослідження;
- коли природа процесів, що відбуваються в системі, не дозволяє їх описати в аналітичній формі;
- якщо необхідно спостерігати за поведінкою системи (або окремих її компонентів) протягом певного періоду, у тому числі зі зміною швидкості процесів;
- при вивченні нових ситуацій у системі або при оцінці її функціонування в нових умовах;
- якщо досліджувана система є елементом більш складної системи, інші елементи якої мають реальне втілення;
- коли необхідно дослідити поведінку системи при введенні в неї нових компонентів;
- при підготовці спеціалістів та опануванні нової техніки (як тренажери).

Наведений вище перелік можливих сфер застосування імітаційних моделей (що одночасно можна розглядати як перелік їх переваг) мимоволі викликає питання: а навіщо в цьому випадку потрібні інші типи моделей? На жаль, імітаційні моделі мають ряд недоліків. Перше, і дуже важливе, це те, що розробка ІМ, як правило, вимагає багато часу і зусиль. Крім того, будь-яка імітаційна модель складної системи набагато менш "об'єктивна", ніж аналітична модель, оскільки вона в першу чергу відображає суб'єктивні уявлення розробника про систему, що моделюється. Більше того, як спростувати, так і обґрунтувати адекватність створеного ІМ буде досить складно. І, нарешті, ще одна обставина. Результати моделювання, як і в будь-якому чисельному методі, завжди приватні. Для отримання обґрунтованих висновків необхідно провести серію модельних експериментів, а обробка результатів вимагає використання спеціальних статистичних процедур.

Однак, сучасний стан технологій дозволив оснастити «моделістів» потужними інструментальними засобами для моделювання, до яких, зокрема, належить пакет MATLAB.

Також, «об'єктивність» створеної моделі може бути забезпечена в тому випадку, коли розробник має чітке уявлення про те, які характеристики досліджуваної системи його цікавлять; тривалість певних операцій, ймовірність переходу системи в певний стан, можливість конфлікту між окремими підсистемами і т. д. Справа в тому, що для кожного варіанту постановки дослідницької задачі можна знайти відповідну схему побудови моделі.

У зв'язку з цим знання існуючих схем побудови імітаційних моделей є дуже корисними.

Найважливішою ознакою є спосіб представлення динаміки (руху) системи в моделі.

Ще одна важлива особливість – спосіб зміни модельного часу.

Найчастіше шляхом моделювання проводиться оптимізація певних параметрів системи. Однак, як зазначалося вище, потенціал імітаційного моделювання набагато ширший. Залежно від етапу та мети дослідження, що проводиться, використовується один із трьох найпоширеніших видів імітаційних експериментів:

- вивчення відносного впливу різних факторів на значення вихідних характеристик системи;
- знаходження аналітичної залежності між вихідними характеристиками, що цікавлять дослідника, і факторами;
- знаходження оптимальних значень параметрів системи.

Тип експерименту впливає не тільки на вибір схеми його формалізації, а й на побудову плану експерименту та вибір методу обробки його результатів.

З точки зору організації взаємодії дослідника з моделлю під час експерименту ІМ поділяються на автоматичні та інтерактивні.

Автоматичними моделями називають ІМ, взаємодія користувача з якими зводиться лише до введення вихідної інформації та контролю початку та закінчення роботи моделей.

Діалоговими називають МІ, які дозволяють досліднику активно контролювати хід моделювання.

### 2.3 Оцінка якості імітаційної моделі

Рішення, прийняті на основі проведенного імітаційного моделювання будуть конструктивними лише при дотриманні наступних застережень:

- отримані результати є достатньо точними і достовірними;
- дослідник знає як пояснити результат та як його можна використовувати.

При аналітичному моделюванні надійність результатів залежить від наступного:

- правильний вибір математичного апарату, який використовується для опису досліджуваної системи;
- методична помилка, властива даному математичному методу.

Придатність ІМ характеризується тим, наскільки вона відповідає наступному:

- адекватність;
- стабільність;
- чутливість.

Застосування статистичних методів є можливим лише за умови оцінки адекватності моделі існуючій системі. Природно, провести вимірювання на спроектованій системі неможливо. Однак можливо прийняти концептуальну модель проектованої системи як еталонний об'єкт. Потім перевірка адекватності моделі ґрунтується на встановленні та оцінюванні, наскільки правильно вона відображає концептуальну модель. Ця задача схожа на перевірку коректності

будь-якої комп'ютерної програми, і її можна вирішити відповідними методами, наприклад, за допомогою тестування.

Немає універсальної процедури перевірки стабільності моделі. Потрібно проектувати методи «від випадку до випадку», часткові тести тощо. Постійна перевірка часто корисна.

Загалом можна стверджувати, що чим ближча структура моделі до структури системи і чим вищий ступінь деталізації, тим стабільніша модель.

Стабільність результатів моделювання можна також оцінити методами математичної статистики. Тут доречно згадати головне завдання математичної статистики. Він полягає в перевірці гіпотези про властивості певного набору елементів, який називається генеральною сукупністю, шляхом оцінки властивостей підмножини генеральної сукупності (тобто вибірки). У загальній сукупності дослідника зазвичай цікавить якась ознака, яка обумовлена випадковістю.

У цьому випадку саме стабільність отриманих модельних результатів стає можливим прийняти за ознаку, яку необхідно оцінити. Для перевірки гіпотези стабільності результатів можна використовувати критерій Вілкоксона.

Тест Вілкоксона використовується, щоб перевірити приналежність до єдиної сукупності окремих вибірок (тобто чи мають вони однакові статистичні ознаки). Наприклад, у двох партіях якогось товару вимірюється певна характеристика, і потрібно перевірити гіпотезу, що ця характеристика має однаковий розподіл в обох лотах; іншими словами, вам потрібно переконатися, що робочий процес не змінюється суттєво від партії до пакету.

Оцінка чутливості ІМ. Очевидно, стабільність є конструктивною ознакою. Але у випадку невпливання варіювання вхідних дій або параметрів моделі (у певному заданому діапазоні) на значення вихідних параметрів, то це не є добре. Тому потрібно провести оцінювання чутливості моделі до зміни параметрів навантаження та внутрішніх параметрів самої системи.

Калібрування моделі. Іноді необхідно провести калібрування ІМ, тобто відкоригувати, щоб привести у відповідність до вимоги.

Як правило, процес калібрування є повторюваним та включає такі кроки:

- глобальні зміни моделі;
- локальні зміни (зокрема, зміни деяких законів розподілу змодельованих випадкових величин);
- проведення калібрування.

Загалом оцінку цільових властивостей ІМ та її калібрування доцільно об'єднати в єдиний процес. Це стратегія, прийнята в методі статистичного калібрування.

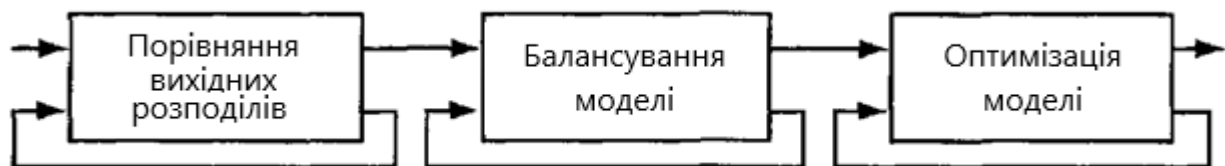


Рис. 2.1. Схема процесу калібрування МІ

Крок 1. Оцінка адекватності ІМ. Критерії порівняння можуть відрізнятися. Зокрема, можна використовувати різницю середніх значень моделі та системними реакціями.

Усунення відмінностей на цьому етапі базується на внесенні глобальних змін.

Крок 2. Оцінювання стабільності і чутливості моделі.

Крок 3. Покращення моделі.

Метою цього етапу є:

- додаткова перевірка якості датчиків середнього діапазону;
- зниження дії перехідних процесів;
- зменшення дисперсії результатів.



## 2.4 Висновки до розділу 2

Розглянуто поняття імітаційного моделювання. Встановлено, що моделювання базується на статистичному експерименті, реалізація якого практично неможлива без використання комп'ютерних технологій. Тому довільна імітаційна модель в кінцевому підсумку є більш-менш складним програмним продуктом.

Проаналізовано види імітаційних моделей та параметри якості імітаційної моделі, такі, як адекватність, стабільність та чутливість.

## РОЗДІЛ 3

### НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Загальна інформація про MATLAB

Розвиток MATLAB «йшов у ногу» з розвитком комп'ютерних технологій: від «великих» комп'ютерів з малими інтерактивними можливостями до настільних комп'ютерів, які дозволяють використовувати всі п'ять (а іноді й шість) способів сприйняття інформації. І, незважаючи на досить високі темпи зміни поколінь обчислювальної техніки, MATLAB вдалося поглинути все найцінніше з кожного з

Однією з головних переваг пакету є те, що для роботи користувачеві необхідно знати про нього рівно стільки, скільки вимагає поставлене завдання. Отже, в найпростішому випадку MATLAB може грати роль звичайного калькулятора, для використання якого достатньо запам'ятати ознаки математичних операцій. Якщо проблема, що вирішується, вимагає створення якихось спеціальних засобів, MATLAB надає користувачеві майже універсальну об'єктно-орієнтовану мову програмування.

І все ж, перш за все, MATLAB – це інструмент математичного моделювання, який забезпечує дослідження практично в усіх відомих галузях науки і техніки. У той же час структура пакету дозволяє ефективно поєднати обидва основних підходи до створення моделі: аналітичний і імітаційний ...

Саме в галузі математичного моделювання MATLAB дозволяє ефективно застосовувати можливі засоби комп'ютерної техніки, включаючи візуалізацію та аудит даних, а також можливість обміну даними через Інтернет. Можливим стає створити власний графічний інтерфейс за допомогою MATLAB, який задовільнив би розробника.

Як випливає з назви пакета, він оперує з матрицями та векторами. Це дозволило його розробникам значно підвищити ефективність роботи процедур із зазначеними даними.

MATLAB є найбагатшою бібліотекою функцій, єдиною проблемою з якою є можливість швидкого пошуку тих функцій, які необхідні для вирішення даної задачі.

Бібліотека функцій розділена на розділи, щоб її було легше знайти. Більш загальні та часто використовувані з них включені в ядро MATLAB. Ті самі функції, що характерні для певної області, включені у відповідні спеціалізовані розділи. Ці розділи названі в панелях інструментів MATLAB. Повний пакет MATLAB містить близько 30 інструментальних додатків. Сюди входять як досить стандартні інструменти для математичних пакетів, так і нетрадиційні, здатні по-своєму претендувати на певну унікальність: означає цифрову обробку зображень, пошук рішення на основі нечіткої логіки та ряд інших.

SIMULINK вважається незалежним продуктом Math Works (який навіть у деяких випадках продається в «персоналізованому» пакеті), але він працює лише з ядром MATLAB і використовує багато його функцій.

Слід зазначити, що MATLAB використовує технологію асоціативної обробки файлів, яку підтримує операційна система Windows. Він полягає в тому, що кожен тип файлу пов'язаний (асоційований з ним) з певною програмою, яка забезпечує обробку даних, що зберігаються в ньому. Наприклад, файли з розширенням .doc пов'язані з текстовим редактором MS Word.

MATLAB використовує кілька типів файлів, кожен з яких має свій власний дійсний набір операцій і засобів, що їх реалізують. Робота в SIMULINK проходить через застосування М-файлів. Це файли програм на мові MATLAB; всі функції бібліотеки MATLAB реалізовані у вигляді М-файлів; за замовчуванням, М-файли відкриваються за допомогою рідного редактора / налагоджувача MATLAB;

Також можуть застосовуватись Mdl файли та файли MAT.

### 3.2. SIMULINK

Розробка моделей за допомогою SIMULINK базується на використанні технології Drag-and-Drop. Модулі бібліотеки використовуються як «цеглинки» для побудови 5-модельного SIMULINK.

SIMULINK дає можливість працювати спільно з MATLAB та є досить самостійним його компонентом, оскільки не обов'язково мати навички користування іншими інструментами, що входять до комплекту.

Блоки, що входять до створеної моделі, поєднуються як інформаційно, так і контрольно. Даними є скаляри, вектори або матриці довільних розмірів.

Під час моделювання можна спостерігати усі проміжні процеси з допомогою спеціальних «вікон перегляду», які є частиною бібліотеки SIMULINK. Інформативні параметри подаються або у числовому або у графічному вигляді. Крім того, є можливість включення інструментів анімації в модель.

Іншою важливою перевагою SIMULINK є те, що це відкрита система; бібліотека може бути поповнена користувачем шляхом розробки власних блоків.

SIMULINK можна запустити, натиснувши відповідну кнопку на панелі меню командного вікна, або вибравши команду Нова модель у розділі «Файл» головного меню.

### 3.3 Результати імітаційного моделювання

Проаналізуємо можливості побудови ІМ в середовищі Matlab. Розглянемо спочатку моделювання сигналу амплітудної модуляції (АМ) для тестування трактів прийому та передачі АМ сигналів.

При використанні амплітудної модуляції з придушеною несучою передача спектру переданого сигналу здійснюється шляхом множення цього сигналу на синусоїдальне коливання, частота якого дорівнює тій, на яку має бути перенесений спектр. Сформуємо спочатку сигнал повідомлення. Ми розглянемо сигнали повідомлення та несучий сигнал у вигляді гармонійних функцій синуса – детерміновані сигнали. Таку функцію можна записати у вигляді  $y = A \sin(2\pi ft + \varphi)$ , де  $A$  — амплітуда функції,  $f$  — частота функції,  $\varphi$  — фаза.

Нехай для складності сигнал повідомлення буде сумою двох синусоїд:  $s = s_1 + s_2$ , де  $s_1 = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi)$ ,  $s_2 = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi)$

У Matlab текст програми для генерації такого повідомлення буде виглядати так:

```
A1=5; f1=100; f2=20; Fi=pi/2; % задаються значення амплітуд, частот і фаз
двох синусоїд
Fs=10000; % встановлюється значення частоти дискретизації сигналу
t=0:1/Fs:0.2; % встановлюється час обчислення значень сигналу s
s1=sin(2*pi*f1*t+Fi0); % генерація першої синусоїди
s2=A1*sin(2*pi*f2*t); % генерація другої синусоїди
s=s1+s2; % формування сигналу повідомлення
figure (1);
plot(t,s); % графік сигналу повідомлення (рис. 3.1)
grid on;
```

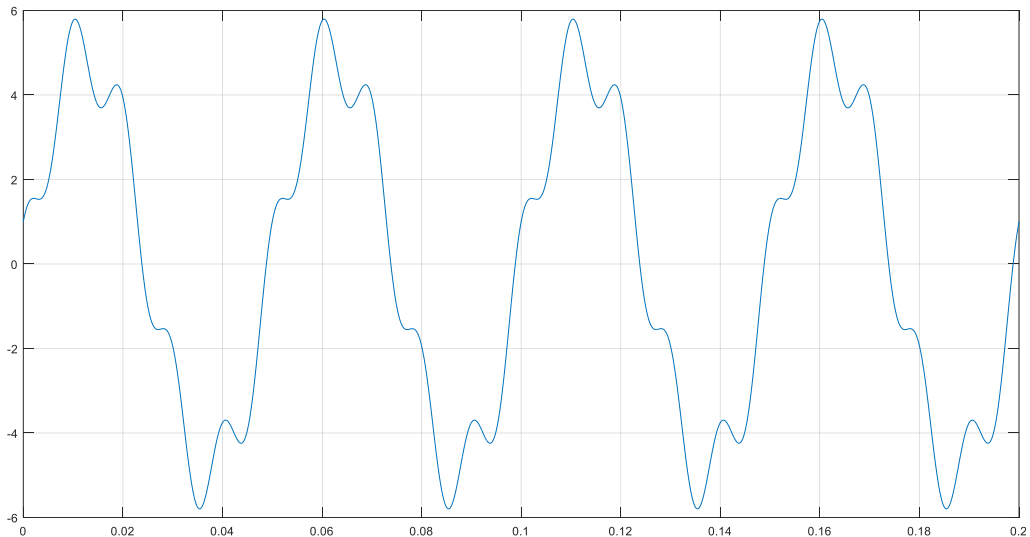


Рис. 3.1. Графік сигналу  $s=s_1+s_2$

Сформуємо тепер амплітудно модульований сигнал. Для цього помножимо сигнал повідомлення на синусоїду з набагато більшою частотою.

Текст програми буде виглядати так:

```
f3=1000; % сигнал несучої частоти
s3=sin(2*pi*f3*t); % сигнал несучого сигналу
p=s.*s3; % амплітудно модульований сигнал
figure (2);
plot (t, p); % графік амплітудно модульованого сигналу з придушеною
несучою (рис. 3.2)
grid on;
```

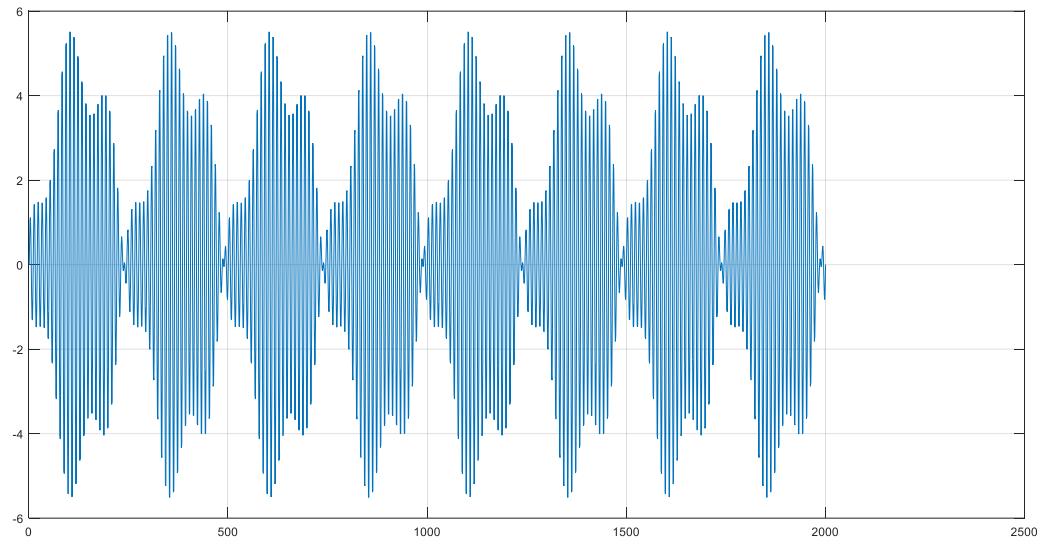


Рис. 3.2. Вигляд зімітованого сигналу АМ

Зімітуємо тепер сигнал кутової модуляції. У сигналах АМ амплітуда коливання несучої модулюється повідомленням  $f(t)$  і, отже, інформація, що міститься в  $f(t)$ , передається змінами амплітуди несучої. Оскільки синусоїдальне коливання залежить від трьох змінних – амплітуди, частоти та фази, можна передавати ту саму інформацію шляхом зміни частоти або фази несучої.

Якщо сигнали ФМ і ЧМ позначені відповідно  $\varphi_{PM}(t)$  і  $\varphi_{FM}(t)$ , тоді

$$\varphi_{PM}(t) = A \sin[\omega_0 t + k_p f(t)]$$

$$\varphi_{FM}(t) = A \sin[\omega_0 t + k_f \int f(t) dt]$$

де  $f(t)$  - модулююче повідомлення,  $k_p$  - деяка константа.

Сформуємо сигнал повідомлення. Ми розглянемо сигнали повідомлення та несучий сигнал у вигляді гармонічної функції синуса. Таку функцію можна записати у вигляді  $y(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi)$ , де  $A$  — амплітуда функції,  $f$  — частота функції,  $\varphi$  — фаза.

Сигнал повідомлення буде синусоїда  $x = A_1 \sin(2\pi f_1 t)$

У Matlab текст програми для генерації такого повідомлення буде виглядати так:

```
A1=1; f1=2; % задаються значення амплітуди та частоти синусоїди
Fs=10000; % встановлюється значення частоти дискретизації сигналу
t=0:1/Fs:1; % встановлюється час обчислення значень сигналу s
x=A1*sin(2*pi*f1*t); % генерації синусоїди повідомлення
figure (1);
plot (t,x); % графік сигналу повідомлення (рис. 3.3)
grid on;
xlabel('Time, sek') % назва осі
ylabel('Amplitude') % назва осі
```

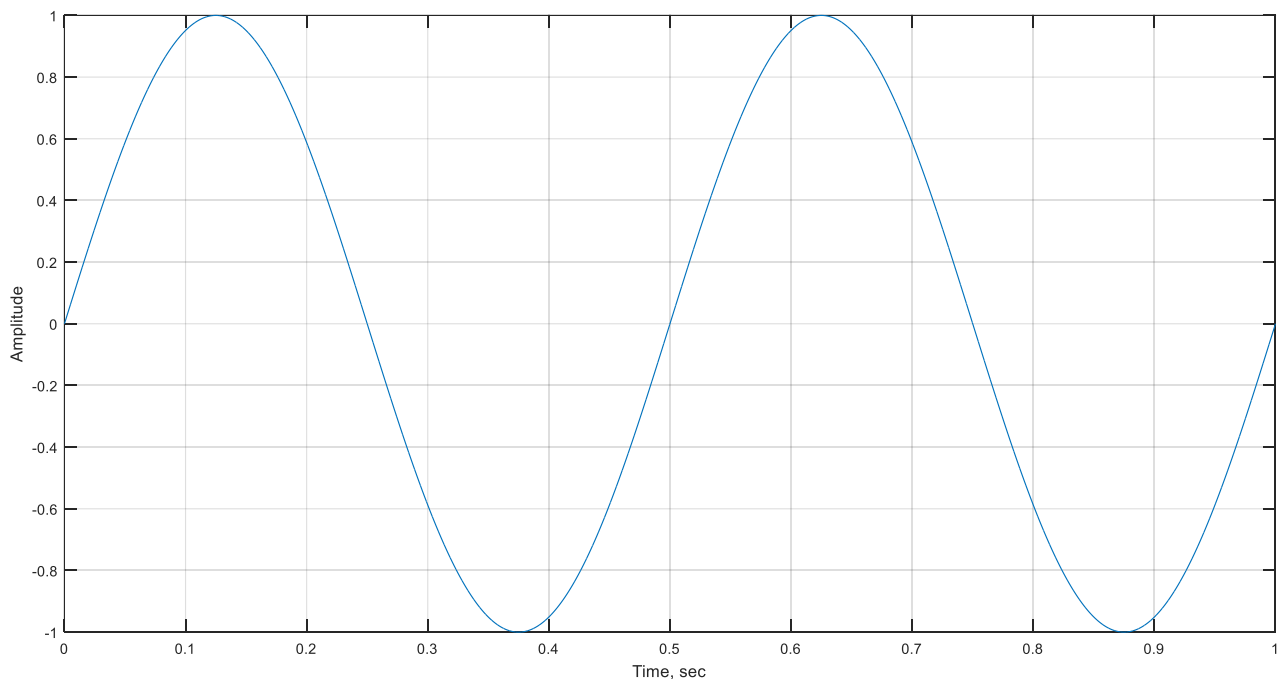


Рис. 3.3. Графік сигналу повідомлення  $x$

Сигнал несучої буде синусоїда  $y = A_2 \sin(2\pi f_2 t)$

У Matlab текст програми для генерації такого сигналу буде виглядати так:



```

A2=1; f2=80; % задаються значення амплітуди та частоти синусоїди
Fs=10000; % встановлюється значення частоти дискретизації сигналу
t=0:1/Fs:1; % встановлюється час обчислення значень сигналу s
y=A2*sin(2*pi*f2*t); % генерації несучої синусоїди
figure (2);
plot (t,y); % графік несучого сигналу (рис. 3.4)
grid on;
xlabel('Time, sek') % назва осі
ylabel('Amplitude') % назва осі

```

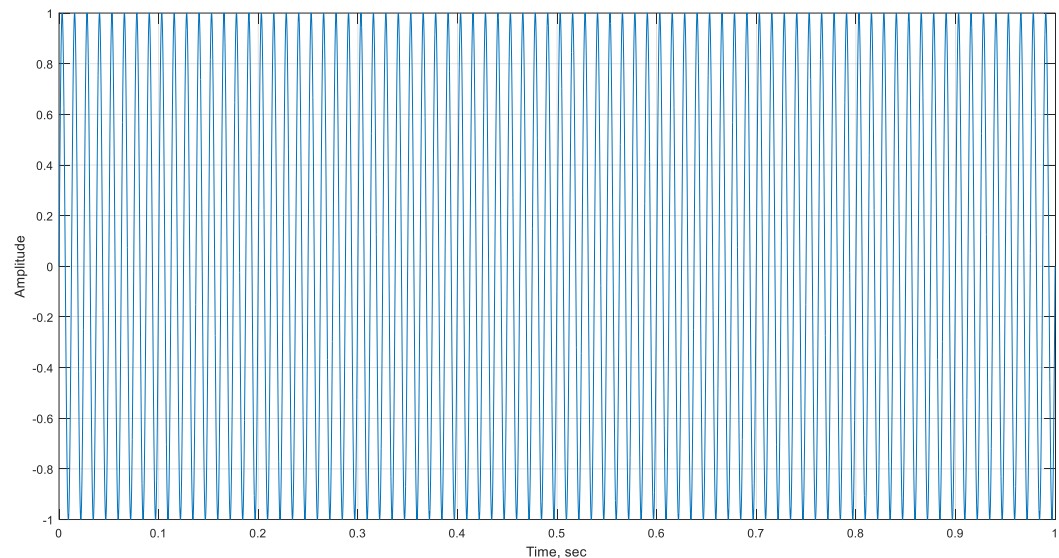


Рис. 3.4. Графік несучого сигналу  $y$

Створимо тепер фазо-модульований сигнал  $y_{PM}$

Текст програми буде виглядати так:

```

k=30; % значення коефіцієнта
yPM=sin(2*pi*f2*t+k*x); % генерування фазово-модульованого сигналу
plot(t,yPM) % графік сигналу повідомлення (рис. 3.5)
grid on

```

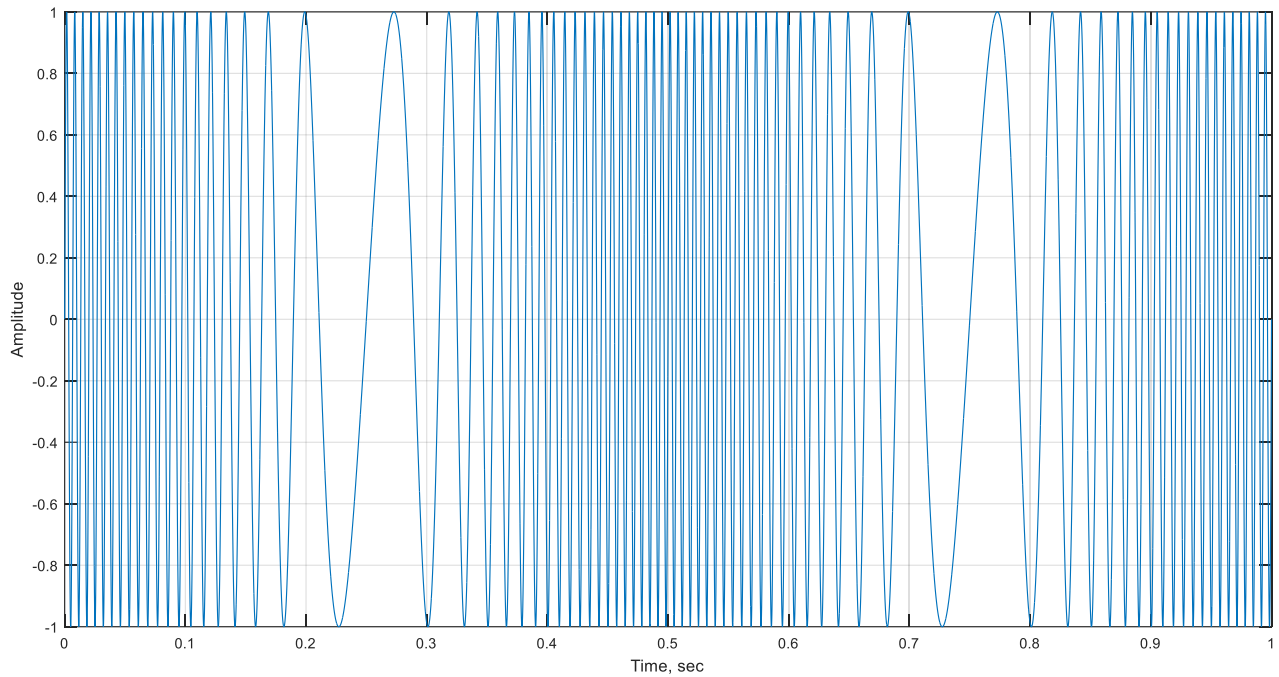


Рис. 3.5. Графік фазово-модульованого сигналу

Повна програма для отримання сигналу фазової модуляції має такий ВИГЛЯД:

```

A1=1; A2=1; f1=2; f2=80;
k=35;
Fs=10000;
t=0:1/Fs:1;
x=sin(2*pi*f1*t);
yPM=sin(2*pi*f2*t+k*x);
plot(t,x)
grid on
xlabel('Time, sec')
ylabel('Amplitude')
figure(2);
plot(t,yPM)
grid on

```

Описані програми придатні для імітації сигналів АМ та ФМ (ЧМ) і є детермінованими. За потреби до них можна додати адитивну чи мультиплікативну шумову складові із відомим співвідношенням сигнал-шум та наперед заданими параметрами. З допомогою таких сигналів можливим стає тестування входних кіл фільтрації сигналів, виявлення корисних сигналів, їхнього детектування тощо і оцінювання характеристик та параметрів таких каналів, зокрема їхньої ефективності, оскільки наперед відомими є параметри вихідних тестових сигналів а за оцінками отриманих після обробки сигналів можна оцінити роботу цих вузлів.

Розглянемо ще один приклад імітації голосових сигналів для тестування систем обробки голосових сигналів чи систем ідентифікації або контролю доступу.

На рис. 3.6-3.9 наведено вибірки з окремих, зареєстрованих з допомогою комп'ютерного мікрофона, голосових сигналів.

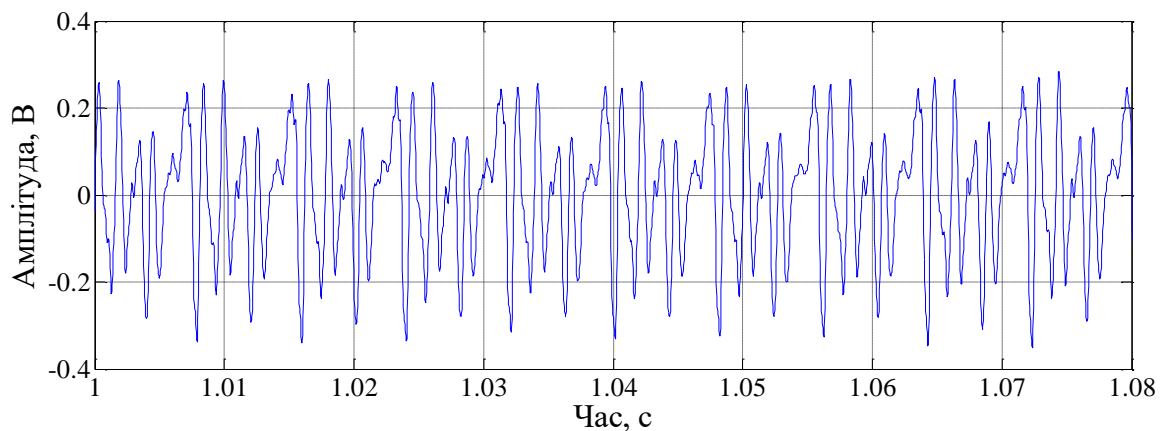
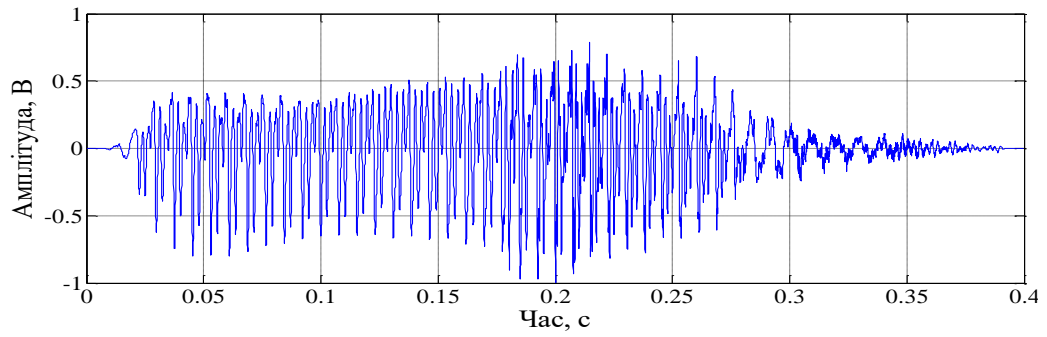
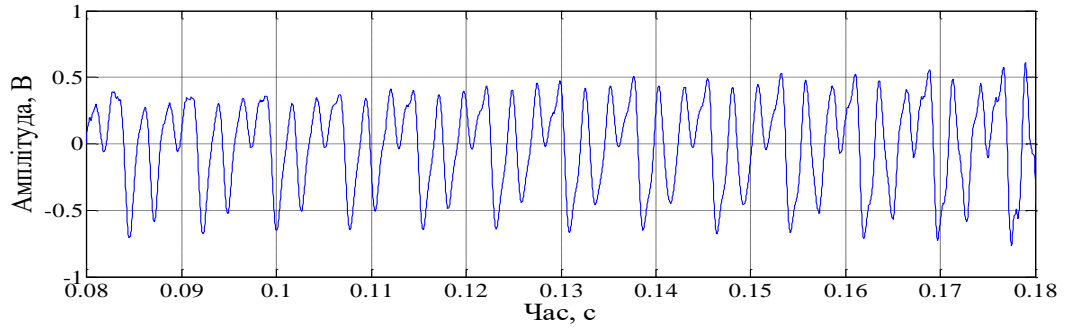


Рис. 3.6. Вибірка з звуку [а]

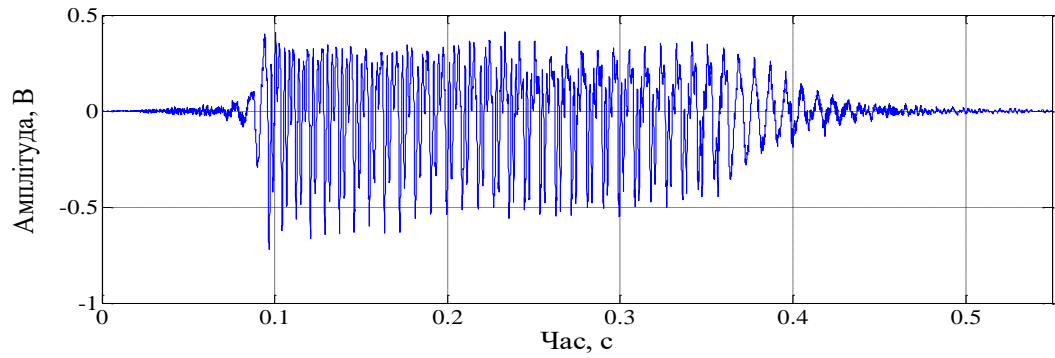


а

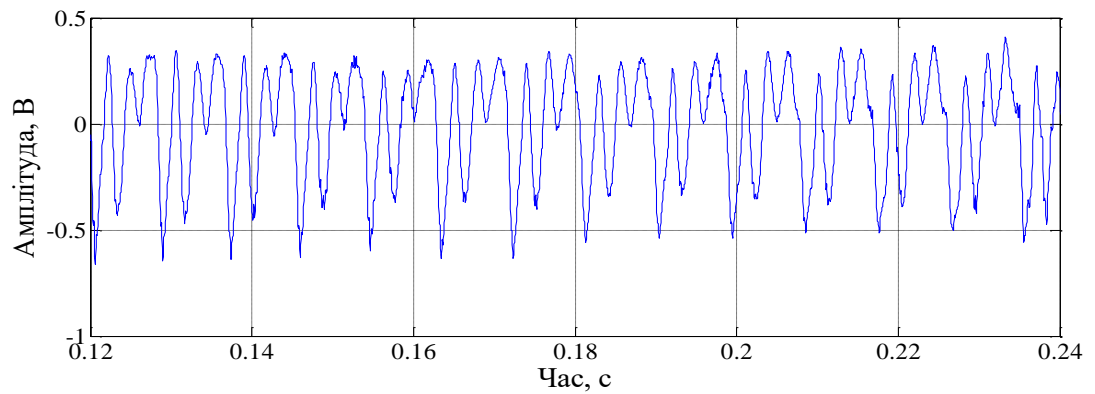


б

Рис. 3.7 Звук [л] (а) та вибірка з неї (б)

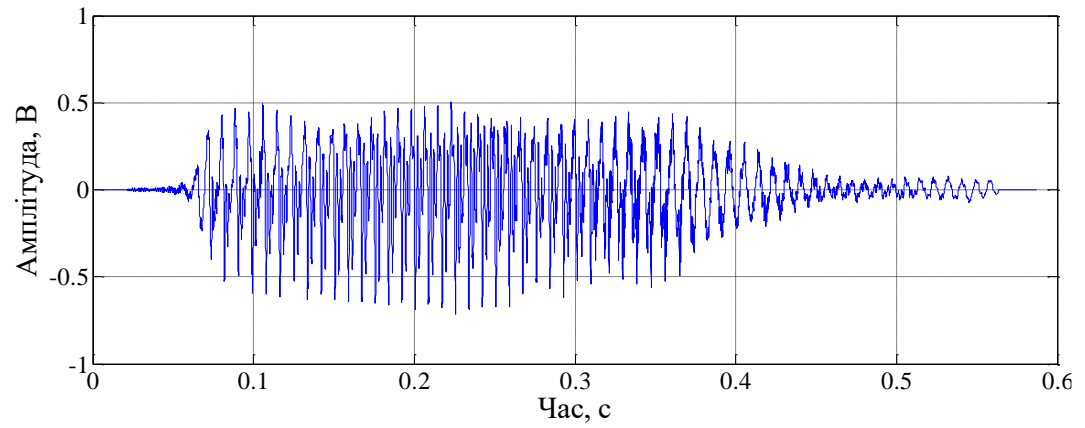


а

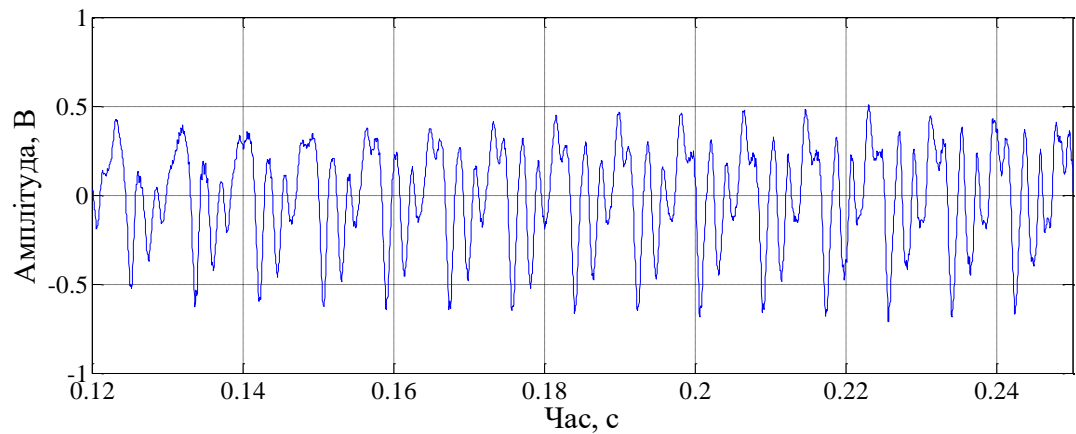


б

Рис. 3.8. Звук [н] (а) та вибірка з неї (б)



а

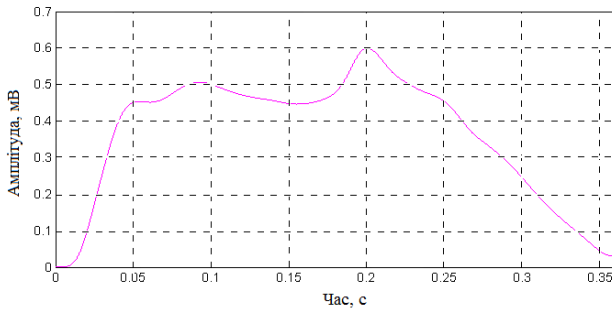


б

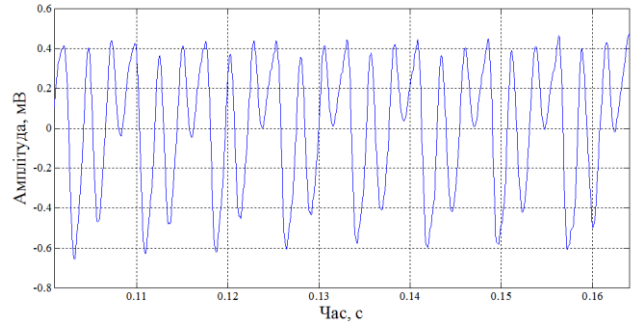
Рис. 3.9. Звук [п] (а) та вибірка з неї (б)

Проведено детектування огибаючої та параметрів несучої звуку [п] в Matlab. Текст програми виділення огибаючої голосового сигналу наведено в Додатку А.

Вигляд огибаючої та вибірки із несучої окремого звуку наведено на рис. 3.10.



а)



б)

Рис. 3.10. Огибающая (а) та вибірка з несучої (б) звуку [н]

Параметри несучої звуку [н] наведено на рис. 3.11.

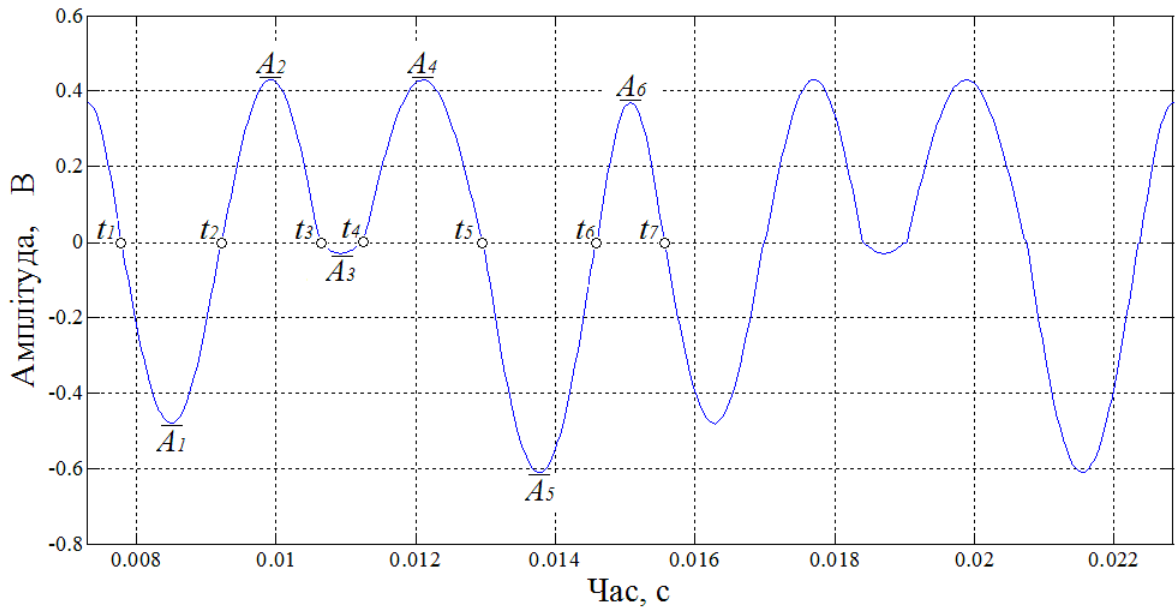


Рис. 3.11. Параметри несучої звуку [н]

Будуємо модель несучої голосового сигналу у вигляді:

$$p(t) = \begin{cases} A_1 \sin(2\pi f_1 t) \cdot e^{-t \cdot K_1} \cdot S_1 & t \in [t_1 + nT, t_2 + nT] \\ A_2 \sin(2\pi f_2 t) \cdot e^{t \cdot K_2} \cdot S_2 & t \in [t_2 + nT, t_3 + nT] \\ \dots & \dots \\ A_6 \sin(2\pi f_6 t) \cdot e^{-t \cdot K_6} \cdot S_6 & t \in [t_6 + nT, t_7 + nT] \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (3.1)$$

де:  $A_1, A_2, \dots, A_6$  - амплітуди хвиль;

$f_1, f_2, \dots, f_6$  - частоти гармонічних складових;

$K_1, K_2, \dots, K_6$  - коефіцієнти нахилу;

$S_1, S_2, \dots, S_6$  - масштабні коефіцієнти;

$T$  - основний період звуку.

Імітаційна математична модель голосового сигналу підтверджується експериментальними даними (рис. 3.12).

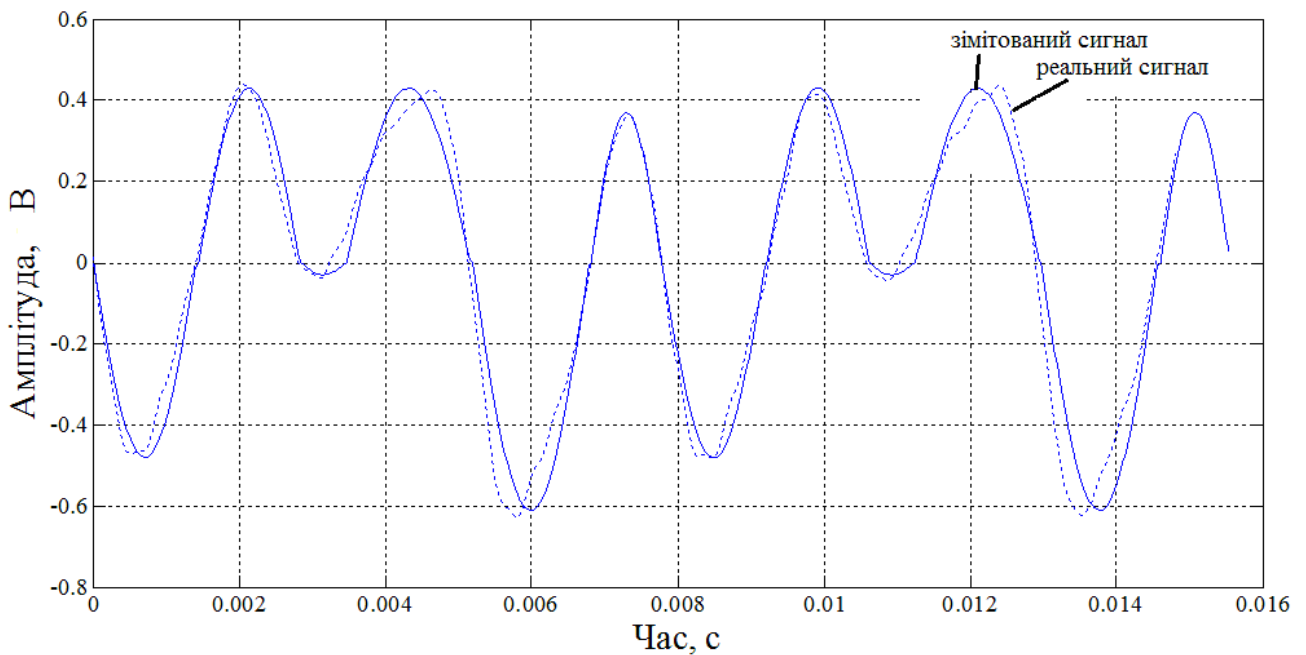
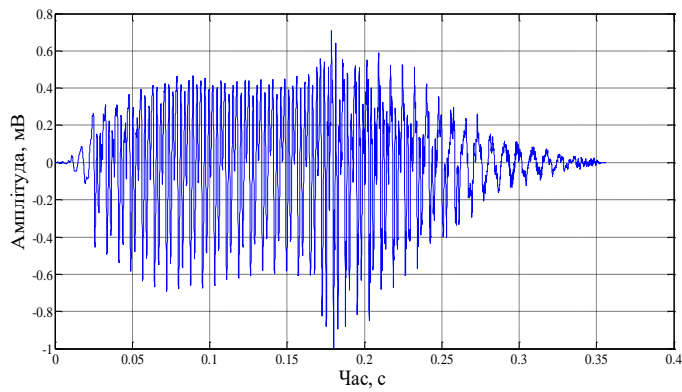
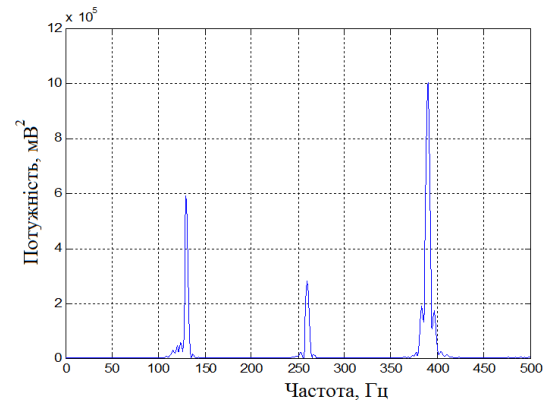


Рис. 3.12. Результати імітації звуку [н]

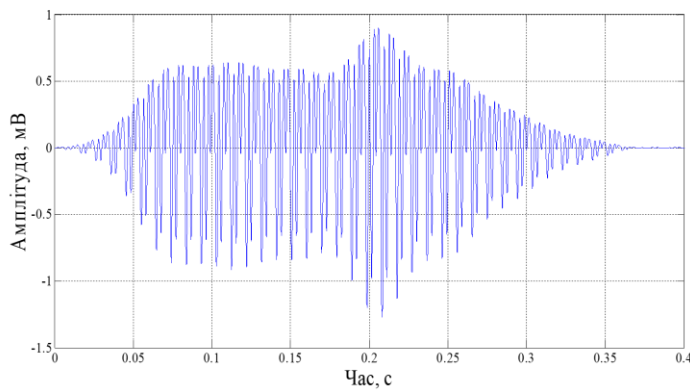
Додамо випадкову заваду до ІМ звуку [н] та зімітуємо цей сигнал ще раз в середовищі Matlab 7.0 (рис.3.13). Тексти програм імітації несучої та обвідної голосового сигналу наведено в Додатках Б та В.



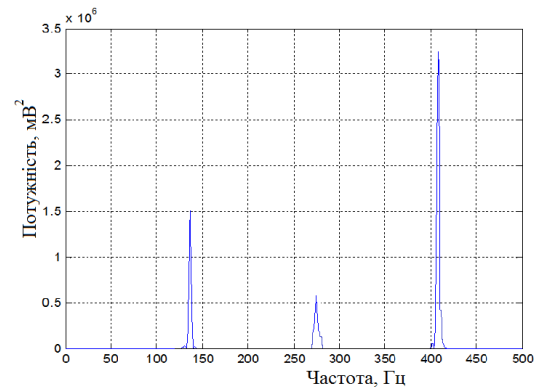
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.13. Характеристики порівняння реального (а, б) та зімітованого звуку [н]  
(в, г)

Можна зробити висновок, що зімітований сигнал практично повністю відповідає реальному. Однак на відміну від використання записів реальних звуків чи фраз в структурі імітованих звуків можна змінювати частку шумової складової, параметри основного тону, частоти повторення звуків, їхнього чергування. Тим самим створювати складні сигнали для тестування систем ідентифікації, оцінювання їх точності, стійкості, чутливості тощо.

Використовуючи команду `wavwrite(...)` середовища Matlab можна згенерувати імітований сигнал в форматі wav із наступним збереженням його. Для тестування систем обміну даними необхідно відтворити записаний сигнал та подати на вхід системи із наступним виведенням результатів опрацювання на



екран монітора, порівнянням результатів з наперез закладеними в сигнал характеристиками сигналів та оцінюванням похибок опрацювання тестових сигналів системами.

### 3.4 Висновки до розділу 3

Встановлено, що в галузі математичного моделювання MATLAB дозволяє ефективно застосовувати можливі засоби комп'ютерної техніки, включаючи візуалізацію та аудит даних, а також можливість обміну даними через Інтернет

Проаналізовано можливості побудови імітаційних моделей в середовищі Matlab. Розглянуто моделювання сигналу амплітудної та кутової модуляції для тестування трактів прийому та передачі АМ сигналів.

Розроблені програми придатні для імітації сигналів АМ та ФМ (ЧМ) і є детермінованими. За потреби до них можна додати адитивну чи мультиплікативну шумову складові із відомим співвідношенням сигнал-шум та наперед заданими параметрами. З допомогою таких сигналів можливим стає тестування вхідних кіл фільтрації сигналів, виявлення корисних сигналів, їхнього детектування тощо і оцінювання характеристик та параметрів таких каналів, зокрема їхньої ефективності, оскільки наперед відомими є параметри вихідних тестових сигналів а за оцінками отриманих після обробки сигналів можна оцінити роботу цих вузлів.

Розглянуто ще один приклад імітації голосових сигналів для тестування систем обробки голосових сигналів чи систем ідентифікації або контролю доступу.

Встановлено, що зімітований сигнал практично повністю відповідає реальному. Однак на відміну від використання записів реальних звуків чи фраз в структурі імітованих звуків можна змінювати частку шумової складової, параметри основного тону, частоти повторення звуків, їхнього чергування. Тим

самим створювати складні сигнали для тестування систем ідентифікації, оцінювання їх точності, стійкості, чутливості тощо.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Охорона праці

Вірно спроектоване та раціонально влаштоване освітлення виробничих приміщень справляє позитивний психофізіологічний вплив на працюючих, підвищує ефективність та безпеку праці, знижує втому та травматизм, забезпечує високу працездатність.

Зір у всій системі органів відчуттів людини посідає чільне місце. Відомо, що на органи зору припадає 90% всієї інформації, котру отримує людина. Відчуття зору відбувається під впливом видимого випромінювання (світла), котре є електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі 0,38...0,76 мкм. Чутливість зору максимальна до електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі 0,555 мкм (жовто-зелений колір) та зменшується до границь видного спектру.

#### Класифікація освітлення

При освітленні виробничих приміщень використовують:

- природне освітлення, котре створюється прямими сонячними променями та розсіяним світлом небосхилу і яке змінюється залежно від географічної широти, пори року, доби, ступеня хмарності та прозорості атмосфери;
- штучне освітлення, створюване електричними джерелами світла;
- сумісне освітлення, при котрому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним.

Природне освітлення поділяється на бічне (одно- або двостороннє), здійснюване через світлові отвори в зовнішніх стінах; верхнє, що здійснюється

через аераційні та захисні ліхтарі, отвори в дахах та перекриттях; комбіноване поєднання верхнього та бічного освітлення.

Штучне освітлення за конструктивним виконанням поділяється на два види - загальне та комбіноване. Система загального освітлення використовується в приміщеннях, де по всій площі виконуються однотипні роботи. Розрізняють загальне рівномірне освітлення, при котрому світловий потік розподіляється рівномірно по всій площі приміщення без урахування розташування робочих місць і загальне локалізоване освітлення (з врахуванням розташування робочих місць).

При виконанні точних зорових робіт (слюсарні, токарні, фрезерні, контрольні тощо) в місцях, де обладнання створює глибокі, різкі тіні або робочі поверхні розташовані вертикально, поряд з загальним освітленням застосовується місцеве освітлення. Сукупність місцевого та загального освітлення називається комбінованим. Застосування лише місцевого освітлення не допускається з огляду на небезпеку виробничого травматизму.

За функціональним призначенням штучне освітлення поділяється на робоче, аварійне і спеціальне, котре в свою чергу класифікується як охоронне, чергове, евакуаційне, бактерицидне, еритемне тощо.

Робоче освітлення призначене для забезпечення виробничого процесу, проходу людей, руху транспорту та є обов'язковим для всіх виробничих приміщень.

Аварійне освітлення влаштовується для продовження роботи у випадках, коли раптове відключення робочого освітлення та пов'язане з цим порушення нормального обслуговування обладнання може викликати вибух, пожежу, отруєння людей, порушення технологічного процесу тощо. Мінімальна освітленість робочих поверхонь при аварійному освітленні повинна складати 5% від нормованої освітленості робочого освітлення, але не менше 2 лк.

Евакуаційне освітлення призначене для забезпечення евакуації людей з виробничого приміщення при аваріях та вимкненні робочого освітлення і влаштовується в місцях, небезпечних для проходу з виробничих приміщень, в котрих працює більше 50 чол. Мінімальна освітленість на підлозі основних проходів та на сходах при евакуаційному освітленні повинна бути не менше 0,5лк, а на відкритих майданчиках - не менше 0,2 лк.

Охоронне освітлення влаштовується вздовж границь території, котра охороняється спеціальним персоналом. Найменша освітленість у нічний час - 0,5лк. Сигнальне освітлення застосовується для фіксації границь небезпечних зон, вказує на наявність небезпеки, або безпечний шлях евакуації.

До виробничого освітлення можна віднести бактерицидне та еритемне освітлення. Бактерицидне освітлення створюється для знезараження повітря, питної води, продуктів харчування. Найбільшу бактерицидну здатність мають ультрафіолетові промені з довжиною хвилі 0,254...0,257мкм. Еритемне опромінювання влаштовується у виробничих приміщеннях, де недостатньо сонячного світла. Максимальний еритемний вплив справляють електромагнітні промені з довжиною хвилі 0,297мкм.

Правильна організація освітлення передбачає не лише дотримання норм освітленості, котрі регламентують мінімальну освітленість для кожного виду робіт, але й дотримання гігієнічних вимог до якості освітлення, таких як рівномірність освітлення робочої поверхні, обмеження надмірної яскравості, блиску, осліплюючої дії, різких тіней та контрасту.

## 4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

### *Дії персоналу підприємства при виникненні надзвичайних ситуацій*

#### 1. Загальні положення

Типова Інструкція розроблена згідно з Кодексом цивільного захисту та інших нормативно-правових документів.

Усі працівники підприємства, не залежно від займаних посад, повинні знати і суворо виконувати вимоги Типової Інструкції щодо дій персоналу при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій природного або техногенного характеру. За невиконання вимог Інструкції персонал підприємства може бути притягнутий до адміністративної відповідальності.

2. Характеристика можливої обстановки в районі підприємства при виникненні надзвичайної ситуації

У розділі перелічуються можливі джерела потенційної небезпеки на території самого підприємства або поблизу від нього, додається характеристика можливої обстановки при виникненні надзвичайних ситуацій, яка пов'язана з руйнуванням або іншим негативним впливом.

Відомості про джерела і характер їх дії на підприємство надають районні державні адміністрації, міські ради.

3. Порядок оповіщення адміністрації та персоналу про загрозу виникнення надзвичайних ситуацій

Оповіщення адміністрації, робітників та службовців підприємства щодо надзвичайних ситуацій проводиться по завчасно розробленій схемі.

Адміністрація у неробочий час оповіщається по телефону (вказується відповідальний виконавець). У залежності від обстановки, оповіщається і решта персоналу.

У робочий час персонал підприємства оповіщається про надзвичайну ситуацію (вказується яким способом).

При отриманні відповідної інформації вмикають сирени, інші звукові та світлові засоби, що буде означати подання попереджувального сигналу "Увага всім", після чого негайно приводяться у готовність гучномовці, радіотрансляційні та телевізійні приймачі для прослуховування початкового повідомлення.

Кожний працівник підприємства повинен знати сигнали оповіщення цивільного захисту та вміти правильно діяти в умовах загрози та виникнення надзвичайних ситуацій.

#### 4. Порядок укриття персоналу у захисних спорудах цивільного захисту

На випадок виникнення надзвичайної ситуації, яка пов'язана із загрозою або початком забруднення повітря хімічно небезпечною, радіоактивною речовиною всі працівники підприємства підлягають укриттю у захисних спорудах цивільного захисту (вказується адреса, кому належить).

Для термінового укриття працівників у разі забруднення хімічно небезпечною речовиною використовуються власні загерметизовані приміщення (вказується адреса), забезпечується перебування у ньому осіб, без подачі повітря протягом години.

При отриманні інформації щодо радіоактивної небезпеки працівники укриваються (вказується приміщення, адреса), яке забезпечує захист осіб, що переходять від ураження іонізуючим випромінюванням при радіоактивному зараженні.

#### 5. Порядок видачі персоналу засобів індивідуального захисту

Засоби індивідуального захисту (вказуються які) видаються після отримання відповідного розпорядження або за рішенням керівника підприємства (вказується місце видачі).

Працівники, які отримали такі засоби, повинні перевірити їх стан, провести підбір та мати постійно при собі або на робочому місці.

Протигази переводяться у бойовий стан за командою або самостійно, при наявності небезпеки забруднення повітря.

#### 6. Порядок виділення автомобільного транспорту для проведення евакуаційних заходів

При проведенні негайної евакуації персоналу з небезпечних зон залучається увесь наявний службовий, а також особистий транспорт працівників підприємства,

які повинні надавати його у розпорядження адміністрації для негайної евакуації із небезпечної зони працівників та відвідувачів підприємства (вказується вид та тип транспортних засобів, місця посадки на транспорт та маршрут руху).

7. Вимоги до персоналу щодо додержання протиепідемічних заходів при загрозі розповсюдження особливо небезпечних інфекційних захворювань

Якщо на території підприємства або поблизу його виникла небезпека розповсюдження особливо небезпечних інфекційних захворювань, усі працівники повинні суворо дотримуватись вимог санітарно-епідеміологічної служби щодо проведення термінової профілактики та імунізації, ізоляції і лікування виявлених хворих, дотримуватися режиму, який запобігає розповсюдженню інфекції. При необхідності працівники, які прибули на роботу, повинні проходити санітарну обробку (проводити дезінфекцію або зміну одягу) (вказується місце її проведення), а водії транспортних засобів - здійснювати спеціальну обробку автотранспорту (вказується місце її проведення), а також виконувати інші вимоги та заходи, які перешкоджають розповсюдженню особливо небезпечних інфекційних захворювань.

8. Заходи щодо зберігання матеріальних цінностей у період загрози та виникнення надзвичайних ситуацій

Усі працівники підприємства повинні вжити необхідних заходів щодо зберігання матеріальних цінностей при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій.

У період виконання заходів захисту від надзвичайних ситуацій або при ліквідації їх наслідків необхідно вживати заходи, які направлені на попередження або зменшення можливих збитків підприємству від надзвичайних ситуацій, на забезпечення охорони майна та обладнання.

Відповідальність за організацію охорони покладається на (вказується посада, прізвище).

9. Особливості дій працівників при деяких надзвичайних ситуаціях



При загрозі ураження хімічно небезпечною речовиною оповіщаються усі працівники та відвідувачі, які знаходяться на території підприємства.

Вентиляційні установки та кондиціонери терміново вимикаються, зачиняються вікна, двері, квартирки, приміщення герметизується. Вихід із будівлі й вхід до неї припиняється до особливого розпорядження адміністрації.

Працівникам видаються засоби індивідуального захисту, одночасно приймаються заходи щодо забезпечення відвідувачів ватно-марлевими пов'язками.

Відповідальними призначаються за:

-забезпечення герметизації приміщень (посада, прізвище);

-забезпечення працівників та відвідувачів засобами індивідуального захисту (посада, прізвище).

При виявленні у приміщенні, де укриваються працівники, хімічно небезпечної речовини, працівники повинні вийти (вказати куди) або з дозволу адміністрації залишити зону забруднення. Виходити з неї необхідно тільки у засобах індивідуального захисту і рухатися в напрямку, перпендикулярному напрямку вітру.

При виникненні пожежі на підприємстві всі працівники зобов'язані суворо виконувати вимоги Інструкції з пожежної безпеки, евакуацію проводити згідно з Планом евакуації (вказується покажчик напрямку руху).

Відповідальність за дотриманням заходів пожежної безпеки та організацію дій персоналу при загрозі або виникненні пожежі покладається на (посада, прізвище).

При радіоактивному забрудненні території підприємства або при загрозі забруднення всі працівники повинні уважно слідкувати за мовним повідомленням управління з питань надзвичайних ситуацій, яке передається за допомогою радіо і телебачення після попереджувального сигналу "Увага всім", за інформацією інших засобів масової інформації про обстановку в місті, і суворо виконувати рекомендації по захисту від радіоактивного зараження.

Працівник (посада, прізвище) організовує на території підприємства контроль за радіаційною обстановкою за допомогою побутового дозиметру (називається тип приладу) і постійно інформує про результати вимірювань адміністрацію підприємства, управління з питань надзвичайних ситуацій.

При перевищенні гранично допустимих норм опромінення організується облік доз опромінювання. Відповідальний за виконання цього заходу (посада, прізвище).

Скорочується до мінімуму вхід у будівлю та вихід із неї. Контроль за дотриманням режиму поведінки й роботи працівників, який дозволяє максимально понизити наслідки радіоактивного опромінення покладається на (посада, прізвище).

При загрозі або виникненні катастрофічних стихійних лих призначений працівник підприємства за розпорядженням адміністрації повинен зупинити виробництво, виконати необхідні протипожежні заходи, відімкнути від електромережі електрообладнання, підготуватися до евакуації або вивезення у безпечні місця найбільш цінних матеріальних засобів.

Контроль за обстановкою на території підприємства при стихійних лихах і за прийнятні заходи захисту персоналу покладається на (посада, прізвище).

Якщо з'явилися постраждалі - надається перша медична допомога.

Залучаються санітарні дружини підприємства або санітарні пости, які створені. Приймаються заходи щодо госпіталізації постраждалих до спеціалізованих медичних закладів.

Працівник (посада, прізвище) постійно слідкує за інформацією, яку надає управління з питань надзвичайних ситуацій, про обстановку у місті та доводить її до адміністрації і персоналу підприємства.

При надходженні анонімної інформації про загрозу на території підприємства або поблизу нього терористичного акту, працівник, який прийняв її, повинен терміново доповісти керівнику підприємства й у правоохоронні органи, і діяти згідно з розпорядженнями і рекомендаціями.

### 4.3 Висновки до розділу

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано освітлення виробничого приміщення та дії персоналу підприємства при виникненні надзвичайних ситуацій.

## ВИСНОВКИ

Особливо важливим є етап функціонального тестування радіоелектронних приладів та етапі виробництва з використанням окремих типів сигналів, які визначаються типом тестованої техніки. При цьому важливим є питання створення тестових сигналів – їхньої імітації, за наперед заданими параметрами. Оскільки такі сигнали зазвичай є цифровими, розглянуто особливості подання сигналів в дискретній та цифровій формі, типи шумів і завад, що можуть створюватись при цьому.

Розглянуто поняття імітаційного моделювання. Встановлено, що моделювання базується на статистичному експерименті, реалізація якого практично неможлива без використання комп'ютерних технологій. Тому довільна імітаційна модель в кінцевому підсумку є більш-менш складним програмним продуктом.

Проаналізовано види імітаційних моделей та параметри якості імітаційної моделі, такі, як адекватність, стабільність та чутливість.

Встановлено, що в галузі математичного моделювання MATLAB дозволяє ефективно застосовувати можливі засоби комп'ютерної техніки, включаючи візуалізацію та аудит даних, а також можливість обміну даними через Інтернет

Проаналізовано можливості побудови імітаційних моделей в середовищі Matlab. Розглянуто моделювання сигналу амплітудної та кутової модуляції для тестування трактів прийому та передачі АМ сигналів.

Розроблені програми придатні для імітації сигналів АМ та ФМ (ЧМ) і є детермінованими. За потреби до них можна додати адитивну чи мультиплікативну шумову складову із відомим співвідношенням сигнал-шум та наперед заданими параметрами. З допомогою таких сигналів можливим стає тестування вхідних кіл фільтрації сигналів, виявлення корисних сигналів, їхнього

детектування тощо і оцінювання характеристик та параметрів таких каналів, зокрема їхньої ефективності, оскільки наперед відомими є параметри вихідних тестових сигналів а за оцінками отриманих після обробки сигналів можна оцінити роботу цих вузлів.

Розглянуто задачу імітації голосових сигналів для тестування систем обробки голосових сигналів чи систем ідентифікації або контролю доступу.

Встановлено, що зімітований сигнал практично повністю відповідає реальному. Однак на відміну від використання записів реальних звуків чи фраз в структурі імітованих звуків можна змінювати частку шумової складової, параметри основного тону, частоти повторення звуків, їхнього чергування. Тим самим створювати складні сигнали для тестування систем ідентифікації, оцінювання їх точності, стійкості, чутливості тощо.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т./Ред. совет: Ав- дуевский В.С. (предс.) и др. — М.: Машиностроение, 1986.
2. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. — М.: Мир, 1984.
3. Лотеишн В.Т. Система MATLAB 5 для студентов. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1998.
4. Советов Б.Я. Моделирование систем. — М.: Высшая школа, 1985.
5. Саркисян С. А. и др. Теория прогнозирования и принятия решений. — М.: Высшая школа, 1977.
6. Эйзен С., Афифи А. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. — М.: Мир, 1982.
7. Продеус А.Н., Родінова М.В. Безпаперова технологія проведення практикумів із статистичної обробки сигналів. – Електроніка і зв'язь, №20, 2003, pp.117-120
8. Гульяев А. Имитационное моделирование в среде Windows. – С-Пб, КОРОНА принт, 1999. – 287 с.
9. Калюжний О.Я. Моделювання систем передачі сигналів в обчислювальному середовищі MATLAB-Simulink. – К., “Політехніка”, 2004. – 135 с.
10. Дозорський, В. Синфазний метод статистичного опрацювання фрикативних звуків для задач діагностики голосового апарату / В. Дозорський // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – Суми : видавництво СумДУ, 2012. – № 3. – С. 16–21.
11. Дозорський В. Обґрунтування математичної моделі фрикативного звуку у вигляді періодично корельованого випадкового процесу / Я. Драган, Є.

Яворська, В. Дозорський // Вісник тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2010. – Т15, № 10. – С. 159-164.

12. Дедів І. Обґрунтування математичної моделі дихальних шумів у вигляді періодично корельованого випадкового процесу / Я. Драган, І. Дедів // Науковий вісник Чернівецького університету. Вип. 426: Фізика. Електроніка. ЧНУ – Чернівці: Рута. – 2008. – Ч. II. – С. 93-97.

13. Джичка Н., Дедів І., Дозорський В., Драган Я. Модель акустичного сигналу для виявлення порушень стану дихальної системи та голосового апарату як частковий випадок стохастичної коливної системи. Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". 2011. № 710. С. 155-158.

14. Бачинський М.В. Обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів для задач медичної діагностики систем дихання та голосотворення / М.В. Бачинський, В.Г. Дозорський, І.Ю. Дедів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – №3. – С.192-195.

15. Дозорська О.Ф., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Яворська Є.Б. Застосування нейрохронаксічної теорії фонації для задачі відновлення комунікативної функції мови людини. Znanstvena misel. Slovenia. 2017. №12. С. 57-61.

16. Дозорський В.Г., Фалендиш В.В., Дедів Л.Є., Паляниця Ю.Б. Метод виявлення проявів ішемічної хвороби серця для медичних систем контролю стану пацієнта // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук КрНУ, 2015. Випуск 1, частина 1 (90). С. 63–68.

17. Никитюк В. В., Дозорський В. Г., Шадріна Г. М. Обґрунтування структури системи відбору фотоелектричних сигналів для визначення ступеня

полімеризації стоматологічного матеріалу. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2014. № 2. С. 189 – 192.

18. Бачинський, М.В. Комп'ютерна імітаційна модель вокалізованих фрикативних звуків / М.В. Бачинський, Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – Суми : видавництво СумДУ, 2012. – № 1. – С. 149–156.

19. Дедів Л.Є., Дозорський В.Г., Бачинський М.В. Математична модель електроенцефалографічного сигналу для задач побудови комп'ютерних діагностичних систем. Вісник Хмельницького національного університету. 2012. №2. С. 186-189.

20. Драган, Я. Метод опрацювання фрикативних звуків для діагностики захворювань органів голосового апарату на ранніх стадіях / Я. Драган, В. Дозорський, М. Хвостівський, І. Дедів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів : НУЛП, 2011. – № 694. – С. 376–382.

21. Dozorsky V. Dediv L., Dozorska O. Mathematical model of vocal signals for the tasks of human vocal apparatus diagnostic. The National Journal of Biomedical Engineering, 2017. №1. 7 p.

22. Palaniza Y.B., Shadrina H.M., Khvostivskiy M.O., Dediv L.Ye., Dozorska O.F. Main theoretical basis of biosignals modeling. Znanstvena misel. Slovenia. 2018. №16. P. 39-44.

23. Vyacheslav Nykytyuk, Vasyl Dozorskyi, Oksana Dozorska. Detection of biomedical signals disruption using a sliding window. Scientific journal of the Ternopil National Technical University. 2018. Vol. 91. № 3. P. 125–133.

24. Oksana Dozorska, Evhenia Yavorska, Vasil Dozorskyi, Iryna Pankiv, Iryna Dediv, Leonid Dediv. The Method of Indirect Restoration of Human Communicative Function. 15th International Conference "The Experience of Designing and



Application of CAD Systems" (CADSM) (Polyana, Svalyava, 26.02.2019-02.03.2019). Zakarpattyа, 2019. P.19-22.

25. Хвостівська Л.В., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О., Шадріна Г.М., Дедів І.Ю. Розвиток методів та алгоритмів обчислення періоду стохастичних біомедичних сигналів для медичних комп'ютерно-діагностичних систем. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (79). 2019. С. 78-84.

26. Дедів І. Комп'ютерне опрацювання дихального шуму синфазним методом для підвищення інформативності аускультативних систем Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Львів : НУЛП, 2011. №744. С. 77-81.

# ДОДАТКИ

УДК 621.391.8

Михайло Мандзій, Ігор Поліщук, Павло Концограда, Ірина Дедів, к.т.н., доцент  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ В СУМІШІ ІЗ ЗАВАДАМИ В ОБЛАСТІ РАДІОТЕХНІКИ

Mykhailo Mandziy, Ihor Polishchuk, Pavlo Kontsograda, Iryna Dediv, PhD, Assoc. Prof.  
THE PROBLEM OF OPTIMAL DETECTION OF SIGNALS IN MIXTURE WITH  
INTERFERENCES IN THE FIELD OF RADIO ENGINEERING

Центральною задачею в області телекомунікацій, як і будь яких систем прийому-передачі даних (систем зв'язку), є задача виявлення корисного сигналу в суміші із завадами, зокрема при прийомі та обробці акустичних, електричних, електромагнітних та інших сигналів. Тому, розроблення методів оптимального виявлення корисного сигналу в суміші із завадами, які можуть бути втілені в роботі технічних телекомунікаційних засобів, є актуальним для покращення якості передавання даних в сучасних системах зв'язку.

Технічна система, яка призначена для виявлення сигналу в суміші із завадами називається виявником, а суть власне методу можна схематично зобразити так, як показано на рис. 1.

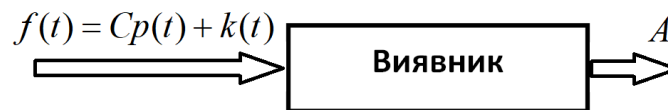


Рис. 1. Принцип роботи виявника корисного сигналу в суміші із завадами

Проаналізуємо принцип роботи виявника, показанного на рис. 1. Тут позначено  $f(t)$  суміш на вході виявника,  $p(t)$  - детерміновану або стохастичну функцію часу, яка описує корисний сигнал,  $C$  - випадкова величина, яка може приймати значення  $a_0=0$  або  $a_1=1$ . При цьому 0 відповідає випадку відсутності корисного сигналу в суміші із завадами, а 1 відповідає випадку присутності такого сигналу. Таким чином. Функція  $k(t)$  описує заваду, яка являє собою стохастичний процес, який накладається на корисний сигнал та приховує його.  $A$  - індикаторна функція наявності корисного сигналу, яка в загальному випадку являє собою стохастичну величину, яка може приймати значення  $a_0=0$  і  $a_1=1$ . При цьому, 0 відповідає стану прийняття рішення виявником про відсутність корисного сигналу, а 1 – відповідає стану прийняття рішення виявником про наявність корисного сигналу. Таким чином  $A = \begin{cases} a_0 = 0, & \text{рішення: сигнал відсутній;} \\ a_1 = 1, & \text{рішення: сигнал присутній.} \end{cases}$

При цьому важливим є розроблення методу оптимального виявлення корисного сигналу, та який давав би можливість мінімізувати похибки такого виявлення та задовольняв критеріям оптимального виявлення (критерій Неймана-Пірсона, мінімального середнього ризику, ідеального спостерігача, максимальної правдоподібності тощо)

### Література

1. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем. М: Радио и связь, 1986. –279с.