

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

М. І. Романюк, Г. Г. Власюк

ОСНОВИ ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА КОДУВАННЯ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка»,
спеціалізацією «Електронні та інформаційні технології кінематографії та
аудіовізуальних систем»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Основи теорії інформації та кодування: лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації «Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем» / М. І. Романюк, Г. Г. Власюк; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,09 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 81 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 9 від 24.05.2018 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 04/2018 від 23.04.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ОСНОВИ ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА КОДУВАННЯ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Романюк Маргарита Ігорівна, канд. техн. наук.
Власюк Ганна Григорівна, проф., д-р техн. наук, проф.*

Відповідальний редактор *Лазебний В. С., доцент, канд., техн. наук., доцент*

Рецензент: *Петрищев О.М. головн. н. с, д-р техн. наук, проф.*

Навчальний посібник містить методичні вказівки до виконання комплексу лабораторних робіт з дисципліни «Основи теорії інформації та кодування» для студентів спеціалізації «Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіо візуальних систем». До кожної лабораторної роботи надані основні теоретичні положення, завдання та порядок виконання, а також контрольні питання, що сприяють закріпленню теоретичного матеріалу. В роботах передбачено вивчення методів перетворення сигналів, статистичних та ентропійних характеристик дискретних джерел інформації, оптимального і завадостійкого кодування інформації з метою стиснення. Матеріали посібника будуть корисними викладачам, студентам, інших напрямів підготовки, спеціальності яких передбачають вивчення радіоелектронних інформаційних систем, а також усім бажаючим.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 4 |
| Організація та проведення лабораторних робіт | 5 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. Сигнали. Дослідження амплітудної модуляції..... | 6 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. Дослідження амплітудно-імпульсних модуляторів. Амплітудна та частотна маніпуляції..... | 16 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. Дослідження основних інформаційних характеристик джерел повідомлень | 24 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. Спектральне представлення сигналів. Дослідження спектру сигналу при різній частоті його дискретизації. | 31 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. Дослідження квантування сигналу за рівнем. | 42 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. Перетворювачі інформації. Дослідження перетворювача коду в напругу | 50 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. Дослідження цифро-аналогових перетворювачів сходового типу | 57 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8. Ефективне кодування з втратою інформації | 64 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9. Дослідження та вивчення критеріїв оцінки завадостійкого кодування..... | 70 |
| Перелік джерел..... | 80 |

ВСТУП

Метою кредитного модуля «Основи теорії інформації та кодування» є формування у студентів комплексу знань, умінь, навичок, необхідних для розуміння основних положень теорії інформації, а також понять, структур, принципів дії систем кодування інформації основних аудіо-, відео-, кіно технологій, що ґрунтується на засадах аналогової та цифрової техніки, техніки обробки та передачі інформації.

Метою лабораторних занять є закріплення та розширення знань по основних розділах кредитного модуля «Основи теорії інформації та кодування».

В лабораторних роботах передбачено вивчення методів перетворення сигналів, статистичних та ентропійних характеристик дискретних джерел інформації, методи ефективного та завадостійкого кодування за допомогою рівномірних та нерівномірних кодів.

При підготовці до виконання роботи студент повинен вивчити відповідні теоретичні відомості, передбачені навчальною програмою, ознайомитись з описом лабораторної роботи. Під час захисту лабораторних робіт студент повинен показати знання по відповідним розділам курсу, методам розрахунків та досліджень.

Лабораторні заняття передбачають набуття навичок роботи з програмними засобами Multisim, при дослідженні модуляції, спектрального представлення сигналів та дослідження аналого-цифрових перетворювачів; роботи з програмними пакетами MathCad, MATLAB для числових і символічних обчислень.

Навчальний посібник має на меті забезпечити якісне виконання лабораторних робіт студентами, а також допомогти їм закріпити теоретичні знання по основних розділах дисципліни та виробити навички практичного виконання розрахунків та експериментальних досліджень, використовуючи сучасні обчислювальні засоби.

Організація та проведення лабораторних занять

Лабораторні роботи виконують у два етапи. Перший етап – підготовчий, який потребує попередньої проробки методичних вказівок та навчальних посібників, які вказано у переліку джерел. Вказаний етап вимагає з'ясування завдання лабораторної роботи, повторення теоретичних знань з її тематики. На першому етапі необхідно виконати попередні розрахунки, скласти перелік необхідних розрахункових формул, підготувати бланки звіту для наступного заповнення, ознайомитись з необхідним програмним забезпеченням для виконання конкретних лабораторних робіт.

Другий етап – виконання лабораторної роботи, що потребує здійснення експериментальних досліджень та перевірки отриманих результатів, що потрібно обов'язково порівнювати якісно чи кількісно з теоретичними положеннями. Якщо коригування результатів не потрібне, складають звіт про виконану роботу.

Звіт має обов'язково містити: назву лабораторної роботи; дату виконання роботи; прізвище та ініціали студента; шифр групи; мету лабораторної роботи; структурну схему дослідження; таблиці результатів вимірювань та обчислень; розрахунки, графіки, осцилограми; висновки за результатами роботи; список використаних інформаційних джерел.

Звіт складають згідно з вимогами стандартів на технічну документацію, охайно та грамотно. Виконавець підписує звіт.

Оформлений звіт здають викладачеві після завершення лабораторного заняття. Студентам, які не відзвітували за попередню роботу, виконувати наступні лабораторні роботи не дозволяється. З метою забезпечення завчасної підготовки студентів до лабораторних занять до їх відома доводиться графік виконання робіт на семестр (для кожної бригади).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Сигнали. Дослідження амплітудної модуляції.

Мета роботи – набути знань та розуміння різних типів сигналу, будови та роботи амплітудного модулятора у різних режимах його роботи. Дослідити фізичні процеси при амплітудній модуляції. Демонстрація різних характеристик амплітудної модуляції та способів її вимірювання.

Теоретичні відомості

Сигнал – фізичний процес, що поширюється у просторі та часі, параметри якого здатні відображати повідомлення. Теорія сигналів та передачі інформації вивчає процеси формування, накоплення, збирання, вимірювання, перетворення, зберігання, передавання та приймання інформації, тобто усі процеси, які мають місце при передаванні інформації на відстань по певним фізичним середовищам (лініям зв'язку) за допомогою електричних сигналів.

Схема класифікації сигналів представлена на рис. 1.1.

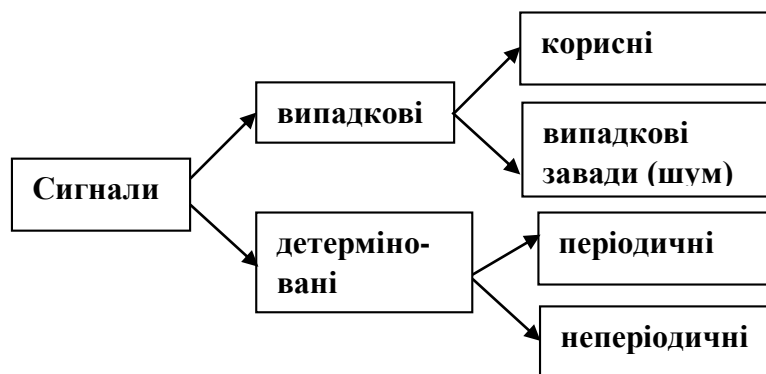


Рисунок 1.1 – Схема класифікації сигналів

Через значні згасання сигналу у каналах передачі на відстані необхідно використовувати досить потужні спеціальні сигнали («переносники»). Для ефективної передачі сигналів за допомогою радіохвиль необхідно перенести спектр цих сигналів з низькочастотної області в діапазон високих частот. Перед тим як передати сигнал його необхідно у достатній мірі підсилити,

провести деякі перетворення, щоб отримувач зміг виділити корисний сигнал з загального фону електромагнітних коливань. Дана процедура в радіоелектроніці називається модуляцією.

Основними сигналами переносниками є гармонійні сигнали, які представляють у загальному вигляді

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega_0 t + \theta_0),$$

де U_0 – амплітуда, θ_0 – фаза, ω_0 – частота.

Змінюючи певним чином вказані параметри сигналу можна отримати різні типи модуляції. Розрізняють наступні види модуляції: амплітудна, частотна, фазова, фазорізницева, кодоімпульсна. Механізм модуляції сигналів представлений на рис. 1.2.

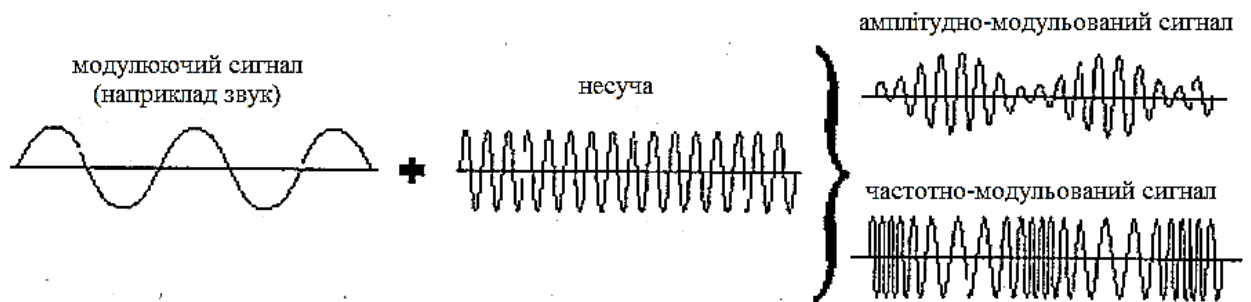


Рисунок 1.2 – схема механізму модуляції сигналів (амплітудної та частотної)

Несуча – гармонійний сигнал певної частоти з низьким коефіцієнтом загасання для даного середовища передачі, що модулюється корисним сигналом. При *амплітудній модуляції* (АМ) обвідна амплітуди носійного коливання змінюється за законом зміни повідомлення, яке передається. Частота і початкова фаза коливання у цьому випадку – постійні величини.

Коли модулююча функція є гармонічним коливанням, миттєве значення модульованого коливання можна записати у вигляді:

$$U(t) = U_0 \cdot (1 + M \cdot \cos(\Omega t + \gamma)) \cdot \cos(\omega t + \theta_0), \quad (1.1)$$

де ω – несуче коливання. Обвідна (огинаюча) модульованого коливання при цьому може бути представлена у вигляді:

$$U_{oc}(t) = U_0 + \Delta U_m \cdot \cos(\Omega t + \gamma), \quad (1.2)$$

де Ω – частота модулюючої функції; γ – початкова фаза огинаючої; ΔU_m – амплітуда зміни огинаючої (рис. 1.1).

Графік модульованого коливання наведено на рис. 1.2.

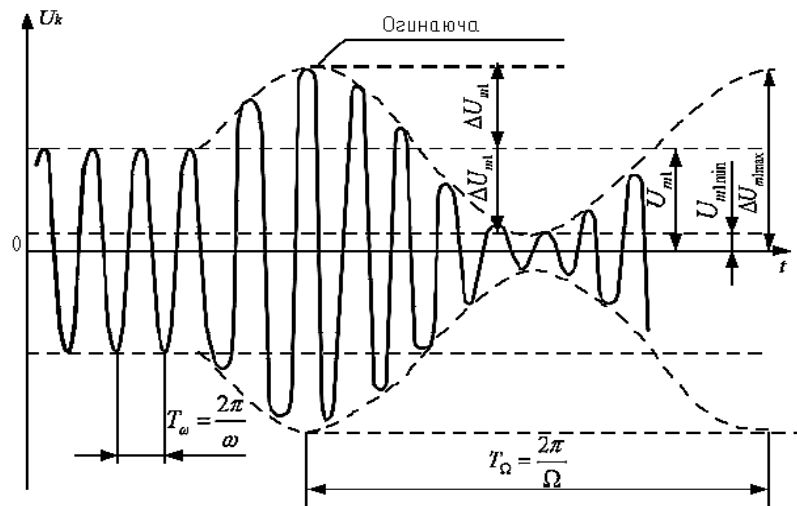


Рисунок 1.3 – Графік модульованого коливання

Важливою частиною процесу модуляції є його *показник модуляції* або процентне співвідношення модуляції. Відношення

$$M = \frac{\Delta U_m}{U_0}, \quad (1.3)$$

називається коефіцієнтом (або глибиною) модуляції. Якщо $M \leq 1$, то амплітуда коливання змінюється в межах від мінімальної

$$U_{\min} = U_0 \cdot (1 - M), \quad (1.4)$$

до максимальної

$$U_{\max} = U_0 \cdot (1 + M). \quad (1.5)$$

Звідси випливає:

$$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \quad (1.6)$$

АМ сигнал не є ефективним способом передачі інформації, внаслідок, втрати потужності. При показнику модуляції, що дорівнює одиниці, верхня і нижня бічні смуги мають амплітуди рівні половині несучої амплітуди, при цьому АМ-модулятори дають тільки 33% ефективності. Це пов'язано з тим, що бічні смуги містять тільки 1/3 загальної потужності. Решта 2/3 використовуються несучою, що не несе корисної інформації. Іноді використовують інший, більш ефективний метод, такий як використання двох бічних смуг, що пригнічують несучу, а також може використовуватися метод однієї бокової смуги, яка пригнічує несучу і одну бічну смугу. Невід'ємною проблемою цих двох методів є складність приймачів, необхідних для демодуляції сигналів.

При перемодуляції коефіцієнт модуляції стає більше 1 ($M \geq 1$) і огинаюча сильно спотворюється відносно модулюючої функції. Причинами перемодуляції є перешкоди, що виникають на приймачі, внаслідок, втручання небажаних частот бічних смуг інших станцій. В ідеалі бажаний показник модуляції – 1. На практиці огинаюча повинна модулюватися незначно, щоб можна було знехтувати втратами при падінні напруги на діоді в процесі демодуляції. Показник модуляції може бути визначений своєї обвідною, яка буде відображена на дисплеї осцилографа. У міру збільшення амплітуди сигналу, що передається, на обвідній з'являться додаткові напівхвилі. Ці напівхвилі вказують на перемодуляцію.

Амплітудна модуляція залишається популярним методом модуляції, через простоту приймачів, їх дешевизну і маленькими розмірами.

Завдання та послідовність виконання роботи

Частина 1

1. У програмному середовищі Multisim зібрати схему амплітудного модулятора на основі біполярного транзистору, включеного за схемою з спільним емітером. Схема представлена на рис. 1.4.

Призначення елементів схеми:

Q1 – транзистор, служить у якості нелінійного елемента, з його допомогою відбувається складанням коливаний від двох генераторів змінної напруги;

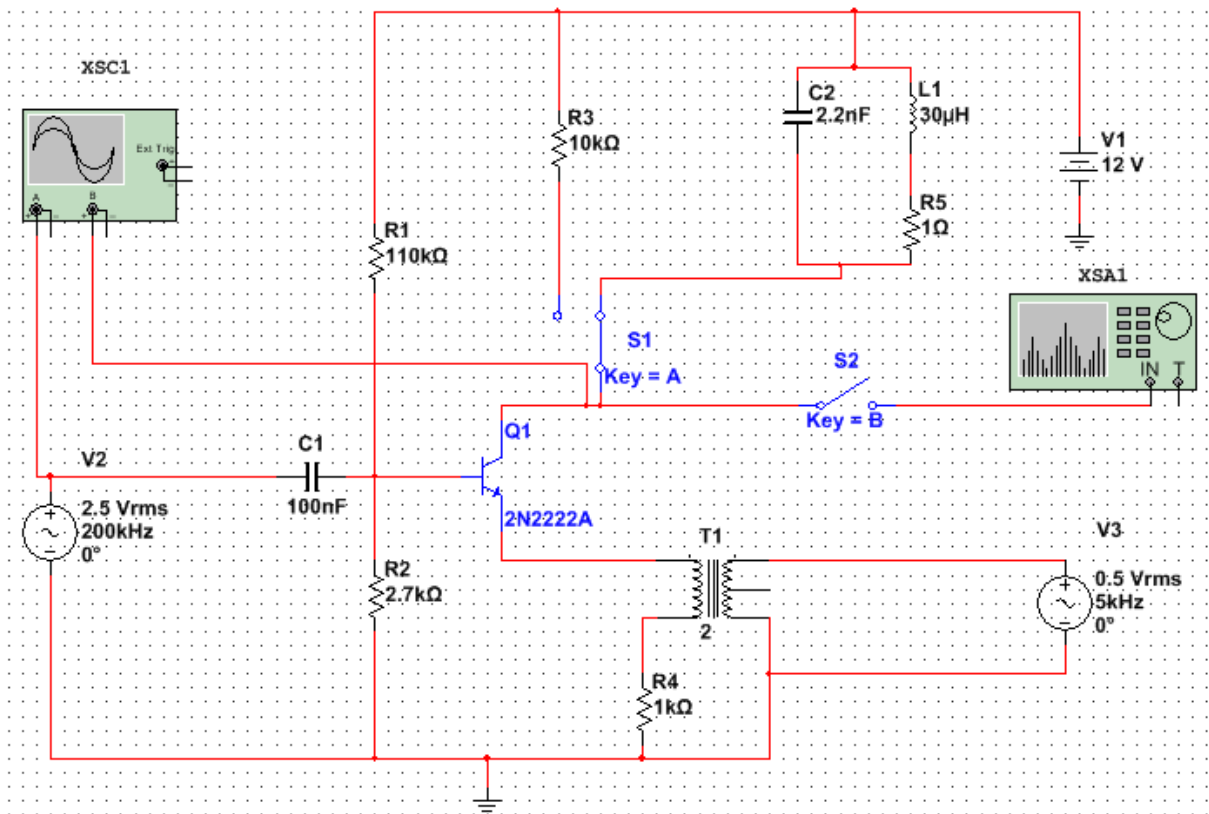


Рисунок 1.4 – Схема експерименту для дослідження амплітудного модулятора на біполярному транзисторі

C1 – розділовий конденсатор, розв’язує по постійному струму вхід каскаду і вихід джерела сигналу (вихід попереднього каскаду) і пов’язує їх по змінному току; викликає завал амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) в області нижніх частот;

C2 – конденсатор, що входить до складу коливального контуру L1C2 в колі колектора;

R1, R2 – резистивний дільник постійної напруги від джерела V1; задає постійну напругу на базу транзистора, забезпечуючи заданий робочою точкою струм колектора I; від величини опорів R1 і R2 залежить вхідний опір каскаду, низькочастотна постійна часу вхідного кола, а також стабільність робочої точки (режиму по постійному струму) каскаду на біполярному транзисторі;

R3 – резистор в колі колектора транзистора; перетворює змінний струм колектора, викликаний дією вхідного сигналу, в вихідну напругу сигналу; є навантаженням каскаду, від величини опору якої залежить коефіцієнт посилення каскаду; визначає (при заданому струмі I) постійну напругу між колектором і емітером;

R4 – резистор в колі емітера; служить для стабілізації робочої точки (режиму по постійному струму), багато в чому визначаючи її положення на сімействі вихідних (стокових) вольт-амперних характеристик транзистора.

V1 – джерело постійної напруги для живлення транзистора;

V2 – джерело змінного високочастотної напруги, що використовується в якості модульованого коливання;

V3 – джерело змінної низькочастотної напруги, яка використовується в якості модулюючого коливання.

XSC1 – осцилограф; використовується для контролю форми вхідного і вихідного сигналів;

XSA1 – аналізатор спектру; використовується для визначення спектра вихідного сигналу.

2. Встановити параметри джерел сигналів V2, V3 і значення елементів L1, C2, R5 відповідно до варіанта завдання і табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – варіанти завдань

| № варіанту | Амплітуда джерела сигналу V2, В | Частота джерела сигналу V2, кГц | Амплітуда джерела сигналу V3, В | Частота джерела сигналу V3, кГц | L1, мкГн | C2, нФ | R5, Ом |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|--------|--------|
| 1 | 0,5 | 155 | 0,1 | 3 | 300 | 3,6 | 12 |
| 2 | 0,5 | 200 | 0,1 | 5 | 620 | 1,0 | 51 |
| 3 | 0,5 | 450 | 0,1 | 7 | 62 | 2,0 | 3 |
| 4 | 0,5 | 610 | 0,1 | 3 | 30 | 2,2 | 1 |
| 5 | 0,5 | 255 | 0,1 | 7 | 300 | 1,3 | 27 |

3. Ввімкніть моделювання та спостерігайте АМ-сигнал на вході В осцилографа (в режимі АС), встановивши необхідні значення тривалості розгортки (Timebase) і подільників напруги (Scale).

4. Вимкнути модель незадовго до моменту повного ходу променю осцилографа. Включити відображення осцилограми на плотері (View-Grapher) та скопіювати отриманий графік у відповідний розділ звіту.

5. Повторити вимірювання за пп. 1-4, збільшуючи амплітуду джерела V3. Вимірювання виконати для наступних значень: V3 = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 і 5 В.

6. Провести розрахунок коефіцієнтів модуляції за отриманими даними (див. формулу 1.6). Результати занести в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – дані експерименту

| | | | | | | | | |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| V3, В | | | | | | | | |
| U _{max} | | | | | | | | |
| U _{min} | | | | | | | | |
| M | | | | | | | | |

7. Побудувати графік залежності коефіцієнта модуляції від амплітуди модулюючої напруги $M = f(V3)$ (графік занести у звіт).

8. Визначити спектральний склад вихідного сигналу при нелінійному режимі роботи підсилювача, для цього:

8.1 Встановити амплітуду джерела гармонійного сигналу V2 = 0,5 В.

8.2 Підключити резистор R3 в колекторний ланцюг транзистора за допомогою ключа В.

8.3 Включити модель і спостерігати АМ-сигнал на вході В осцилографа (в режимі АС), встановивши необхідні значення тривалості розгортки (Timebase) і подільників напруги (Scale).

8.4 Вимкнути модель незадовго до моменту повного ходу променя осцилографа.

8.5 Включити відображення осцилограми на плотері (View-Grapher).
Копіювати графік у відповідний розділ звіту.

8.6 Підключити до колектора транзистора аналізатор спектру за допомогою ключа А.

8.7 Включити модель і визначити спектр вихідного сигналу (за допомогою спектроаналізатору XSA1).

8.8 Виключити модель.

8.9 Включити відображення осцилограми на плотері (View-Grapher).
Скопіювати графік у звіт.

9. Визначити спектральний склад вихідного сигналу модулятора, для цього:

9.1 Підключити контур L1C2 у колекторний ланцюг транзистора за допомогою ключа А.

9.2 Включити моделювання і визначити спектр вихідного сигналу.

9.3 Вимкнути модель.

9.4 Включити відображення осцилограми на плотері (View-Grapher).
Скопіювати графік відповідний розділ звіту.

Частина 2

1. У програмному середовищі Multisim зібрати схему за рис.1.5.

Використовувані прилади у схемі на рис. 1.5:

V4 – амплітудний модулятор;

XSC1 – осцилограф;

XSA1 – аналізатор спектра.

2. Виконати налаштування амплітудного модулятора. Встановіть значення несучої амплітуди (Carrier Amplitude) 10 В, значення несучої частоти (Carrier Frequency) 100 кГц, частоту модуляції (Modulating Frequency) 800 Гц і коефіцієнт модуляції (Modulation Index) 0.6.

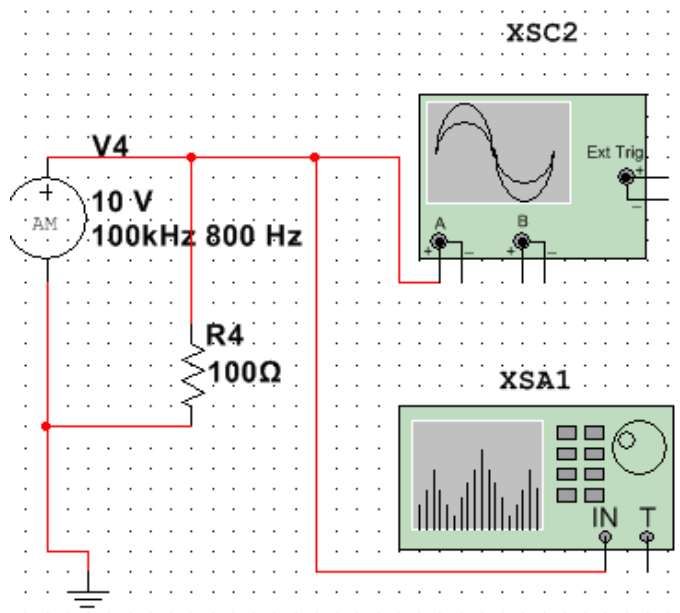


Рисунок 1.5 – Схема оцінювання показника модуляції

3. Виконати налаштування осцилографу: масштаб по осі часу 1 мс/ діл, а каналу А (Channel A) – 10 В/діл. Вибрати автоматичний пуск і зв'язок по постійному струму.

4. Виконати налаштування спектрального аналізатора. Встановіть параметри масштабу: діапазон частот (Span) 10 кГц, центральна частота 100 кГц і амплітуду (Amplitude) = LIN.

5. Запустити процес моделювання.

6. Натисніть на піктограмі осцилографа. Увімкнуті відображення осцилограми на плотері (View-Grapher). Виміряйте частоти несучої і модульованого сигналу, порівняйте отримані результати з частотами амплітудного модулятора.

7. Натисніть на піктограмі спектрального аналізатора. Увімкніть відображення спектру на плотері (View-Grapher). Скопіюйте спектр амплітудно модульованого коливання у звіт. У вікні-екрані, використовуючи вертикальний маркер досліджуйте амплітудний спектр, виміряйте частоти нижньої і верхньої бічної смуги, а також частоту несучої. Порівняйте з теоретичними значеннями, запишіть отримані результати (табл. 1.3).

Робочі формули

Нижня бокова частота

$$f_{ниж} = f_{ц} - f_{мод}$$

Верхня бокова частота

$$f_{верх} = f_{ц} + f_{мод}$$

Таблиця 1.3

| | Результати дослідження | Теоретичні значення |
|------------------------------|------------------------|---------------------|
| Нижня частота бокової смуги | | |
| Верхня частота бокової смуги | | |

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості
- 2) Хід роботи, де представити
 - схему амплітудного модулятора, зібраного на основі біполярного транзистора, включеного за схемою з спільним емітером;
 - осцилограми та спектрограми сигналів з назвами досліду, отриманих згідно завдання;
 - таблиці виміряних і розрахованих значень вказаних у завданні;
 - графік залежності коефіцієнта модуляції від величини напруги, що модулює: $m = f(V_3)$;
- 3) висновки за результатами експериментального дослідження та роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. Які види сигналів вам відомі?
2. Дайте визначення модуляції, для чого вона застосовується?
3. Поясніть фізичні процеси при модуляції. Які види модуляції вам відомі?
4. Наведіть переваги та недоліки застосування амплітудної модуляції.
5. Як визначити коефіцієнт модуляції?
6. Що таке перемодуляція?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дослідження амплітудно-імпульсних модуляторів. Амплітудна та частотна маніпуляції.

Мета роботи – дослідити і вивчити амплітудно-імпульсну модуляцію та ознайомитись з принципом побудови функціональних схем модуляторів. Вивчення характеристик амплітудних та частотних маніпуляцій.

Теоретичні відомості

Основними елементами модемів, тобто пристроїв, що дозволяють обмінюватися інформацією між персональним комп'ютером через аналогові канали, є модулятор і демодулятор.

Крім розглянутої у попередній лабораторній роботі амплітудної модуляції з *гармонійною несучою*, в системах управління та багатоканальних пристроях зв'язку широко використовуються різноманітні види імпульсної модуляції.

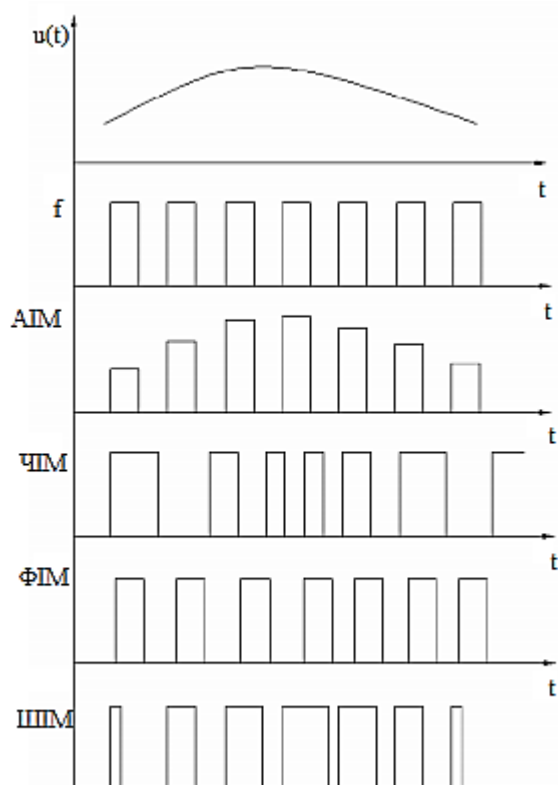


Рисунок 2.1 – вигляд сигналу в залежності від виду імпульсної модуляції

модуляції.

Для дискретних сигналів найбільш поширеними є амплітудноімпульсна, широтноімпульсна, фазоімпульсна, частотноімпульсна, та дельта-модуляції.

Часові діаграми сигналів для основних методів модуляції наведені на рис. 2.1.

Теоретичною основою побудови всіх методів імпульсної модуляції є теорема Котельникова, відповідно до якої безперервний первинний сигнал $e(t)$ з обмеженою шириною спектра F_B може бути переданий своїми відліками

(послідовністю коротких імпульсів), слідуючих із інтервалом $\Delta t = 1/2F_B$.

Коли за законом переданого повідомлення змінюється амплітуда імпульсів вихідної послідовності, то мова йде про амплітудно-імпульсну модуляцію (АІМ). АІМ є найбільш простою з перелічених та найчастіше використовується при реалізації більш складних видів імпульсної модуляції (часо-імпульсної, фазоімпульсної, частото-імпульсної і т.ін.).

З аналітичної точки зору процедуру отримання АІМ-сигналу $u_{AIM}(t)$ зручно розглядати як безпосереднє множення безперервного сигналу, що передається $u(t)$ на допоміжну послідовність $y(t)$ прямокутних імпульсів одиничної амплітуди.

Недоліки каналу з амплітудно-імпульсною модуляцією на довгих лініях зв'язку, пов'язані з недостатньою завадозахищеністю, вимагають використання більш ефективних методів модуляції.

Якщо в якості несучого коливання використовується імпульсна послідовність, то аналогом частотної модуляції є широтна імпульсна модуляція, де керованим параметром виступає тривалість імпульсу, а аналогом фазової модуляції – часова імпульсна модуляція, де керованим параметром виступає положення імпульсу на часовій осі.

Існують *дискретні види модуляції*, або їх інша назва – маніпуляції. У цьому випадку модулюючим сигналом є послідовність прямокутних імпульсів, зазвичай це двійковий код, а несуча – високочастотне гармонійне коливання. Розглянемо деякі види маніпуляції.

Амплітудна маніпуляція (АМн; англ. Amplitude shift keying (ASK)) – зміна сигналу, при якому стрибкоподібно змінюється амплітуда несучого коливання (рис. 2.2). При амплітудній маніпуляції один елементарний сигнал коду відповідає випромінюванню повної потужності передавача (посилка), а інший – відсутності випромінювання (пауза). Цей вид роботи позначається А1. Іноді виконують амплітудну маніпуляцію тонального сигналу з подальшою амплітудною модуляцією коливання несучої частоти. Такий вид роботи позначається А2, він вигідний при слуховому прийомі телеграфних сигналів.

Частотна маніпуляція (ЧМн, англ. Frequency Shift Keying (FSK)) – це передача цифрових даних за допомогою дискретної зміни частоти несучої. Частотна маніпуляція, здійснюється за рахунок невеликих змін несучої частоти (рис. 2.2). При частотній маніпуляції значенням «0» і «1» інформаційної послідовності відповідають певні частоти синусоїдального сигналу при незмінній амплітуді.

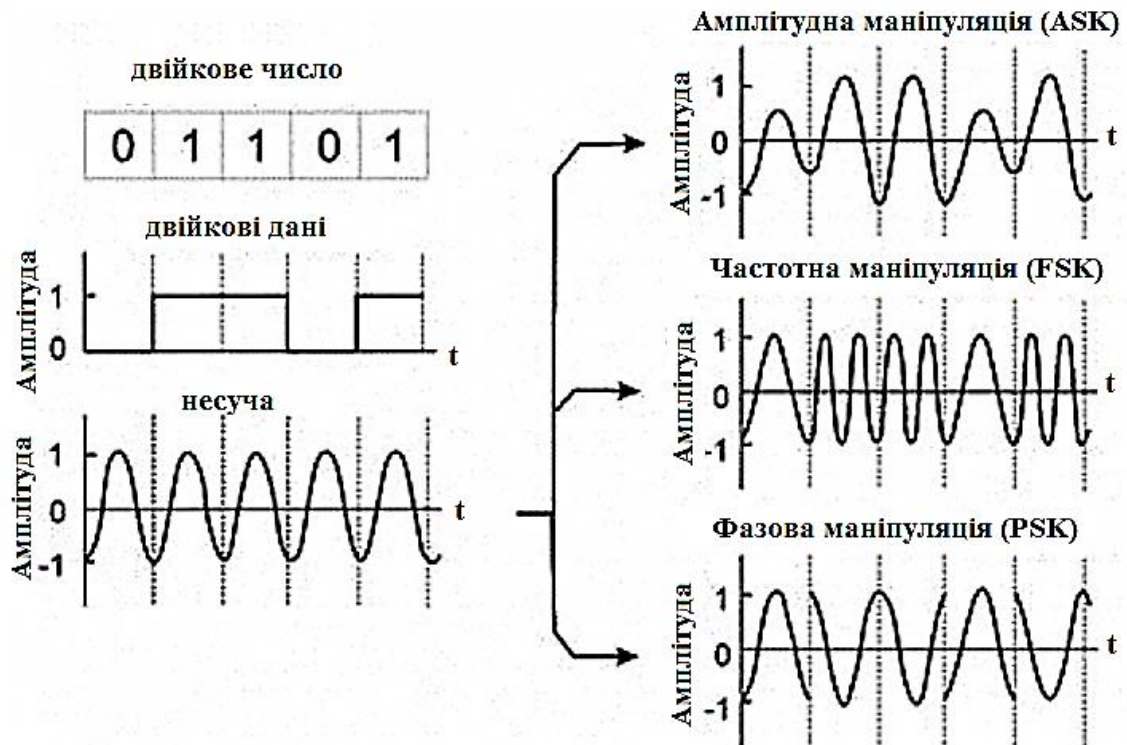


Рисунок 2.2 – Амплітудна, частотна і фазова маніпуляції

При частотній маніпуляції використовується тільки два значення частоти. Одиниця, як правило, передається низькою, а нуль – високою частотою. Значення бітів інформаційного сигналу, що дорівнюють 1 або 0, представляються у вигляді додатного або від’ємного зсуву частоти несучого сигналу. Під від’ємним зсувом частоти розуміється її зменшення, під додатним – збільшення на певну невелику величину. Приймач визначає цей зсув, здійснюючи тим самим демодуляцію сигналу.

Частотна маніпуляція з мінімальним зсувом є спосіб модуляції, при якому не відбувається стрибків фази, а зміна частоти відбувається в моменти перетину несучої нульового рівня.

Частотна маніпуляція з мінімальним зсувом унікальна тому, що значення частот відповідних логічним «0» і «1» відрізняються на величину рівну половині швидкості передачі даних. Іншими словами, індекс модуляції дорівнює 0,5.

Завдання та послідовність виконання роботи

Частина 1

1. У програмному середовищі Multisim зібрати схему амплітудно-імпульсного модулятора (рис. 2.3).

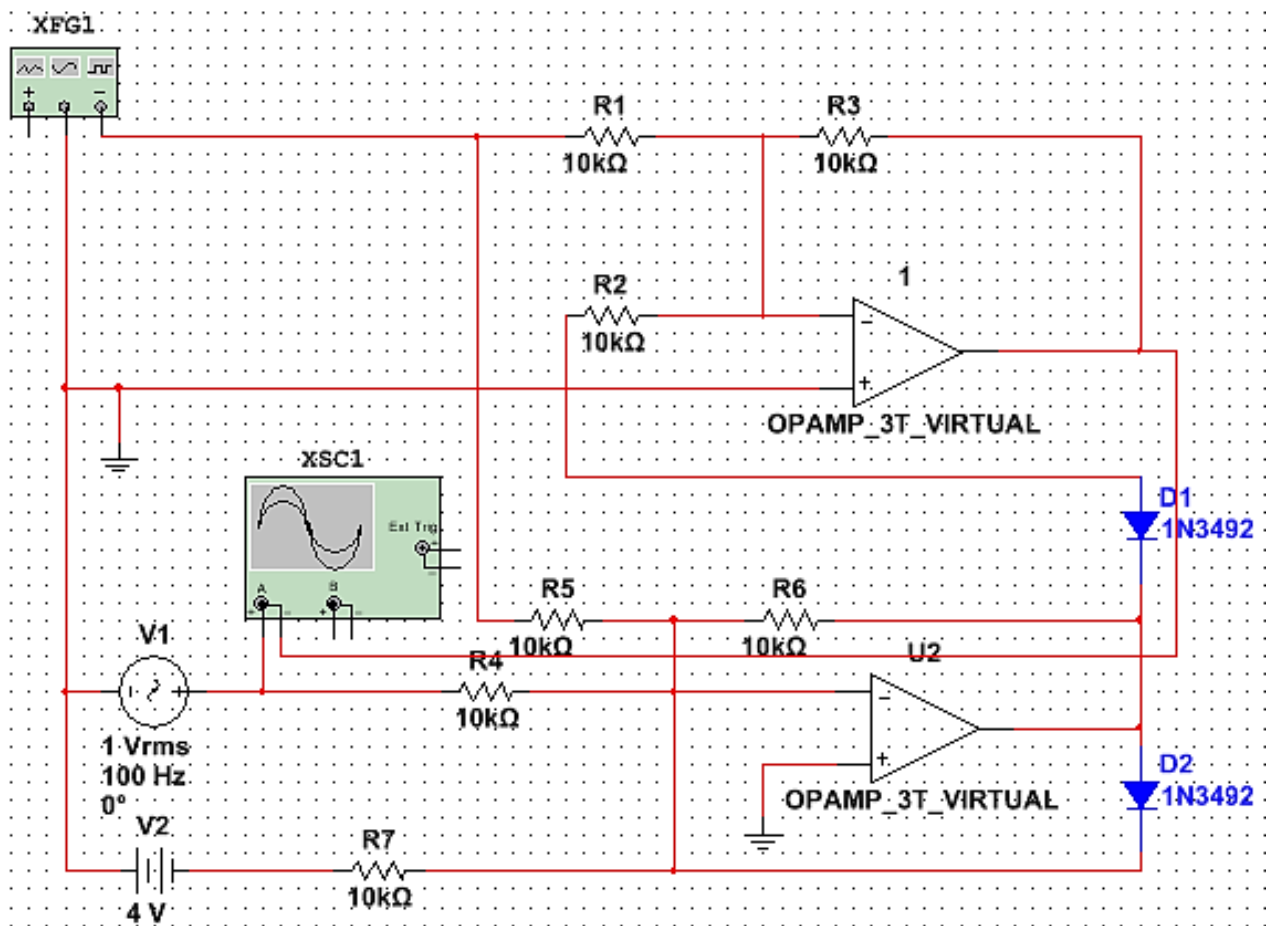


Рисунок 2.3 – Схема амплітудно-імпульсного модулятора

Використані елементи і прилади у схемі на рис. 2.3:

XSC1 – осцилограф (Oscilloscope);

XFG1 – функціональний генератор (Function generator);

U1, U2 – операційні підсилювачі;

D1, D2 – діоди;

R1 - R6 – резистори;

V1 – джерело змінної напруги та V2 – джерело постійної напруги.

2. Встановити параметри джерела напруги, що модулює (низькочастотний сигнал (НЧ)) та параметри несучої відповідно до варіанта завдання (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – дані по варіантам завдань до схеми на рис. 2.3

| № варіанту | Значення шпаруватості XFG1, % | Амплітуда джерела несучої, XFG1, В | Частота джерела несучої XFG1, кГц | Амплітуда джерела НЧ сигналу V1, В | Частота джерела НЧ сигналу V1, Гц |
|------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 80 | 4 | 5 | 0,5 | 100 |
| 2 | 40 | 2 | 4 | 1 | 150 |
| 3 | 40 | 3 | 4 | 2 | 200 |
| 4 | 80 | 2 | 5 | 1 | 100 |
| 5 | 40 | 3 | 4 | 0,5 | 250 |

3. Ввімкнути моделювання та спостерігати АІМ-сигнал на вході А осцилографа (в режимі DC), встановивши необхідні значення тривалості розгортки (Timebase) і подільників напруги (Scale).

4. Вимкнути модель незадовго до моменту повного ходу променю осцилографа. Включити відображення осцилограми на плотері (View-Grapher) та скопіювати отриманий графік у відповідний розділ звіту.

5. Повторити випробування АІМ за пп. 2-4, для частоти модулюючого (НЧ) сигналу $0,5F$ та $2F$, де F – початкове значення частоти у табл. 2.1.

6. Проаналізувати результати випробувань амплітудно-імпульсного модулятора у пп. 1-5.

Частина 2

1. У програмному середовищі Multisim зібрати схему дослідження амплітудної маніпуляції (рис. 2.4).

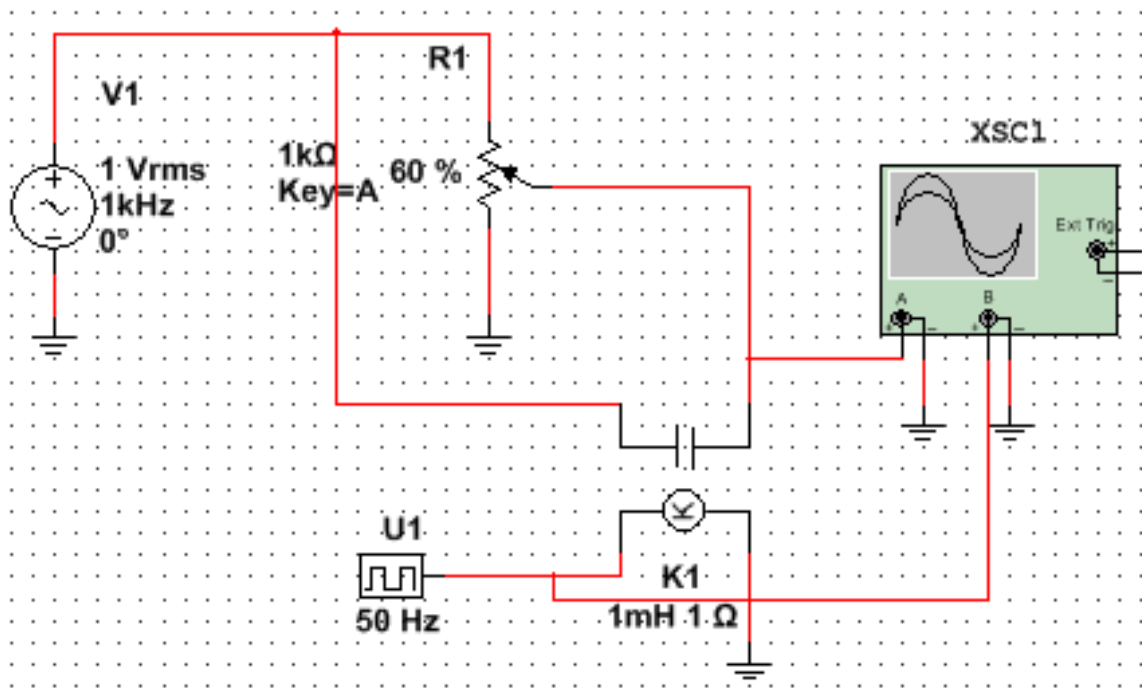


Рис. 2.4 – Схема вивчення амплітудної маніпуляції (АМн)

Використані елементи і прилади у схемі на рис. 2.4:


XSC1 – осцилограф (Oscilloscope);

V1 – джерело змінної напруги;

K1 – реле;

R1 – змінний резистор.

U1 – джерело цифрового сигналу (розташування група *source*, підгрупа – *digital sources*).

2. Згідно з варіантом завдання (див. табл. 2.2) встановіть напругу «1» чисельно рівною вихідній напрузі джерела змінної напруги V1. Напруга «0» встановлюється через змінний резистор R1, з використанням пробника . Значення V_{rms} пробника повинно дорівнювати значенню даному у табл. 2.2.

3. Ввімкнути моделювання та спостерігайте процес амплітудної маніпуляції, встановивши необхідні значення тривалості розгортки (Timebase) і подільників напруги (Scale).

Таблиця 2.2 – дані по варіантам завдань до схеми на рис. 2.4

| № варіанту | Напруга «0», В | Напруга «1», В |
|------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,5 | 1,2 |
| 2 | 0,9 | 1,6 |
| 3 | 1 | 2 |
| 4 | 1,3 | 2 |
| 5 | 1,5 | 3 |

4. Вимкнути модель незадовго до моменту повного ходу променю осцилографа. По показникам осцилографа на каналі А визначити амплітуду «0» та «1» гармонійного колювання, порівняти результати з вказаними у завданні. Включити відображення осцилограми на плотері (View-Grapher) та скопіювати отриманий графік у відповідний розділ звіту.

5. Згідно з варіантом завдання (табл. 2.3) зібрати робочу схему для вивчення частотної маніпуляції (рис. 2.5)

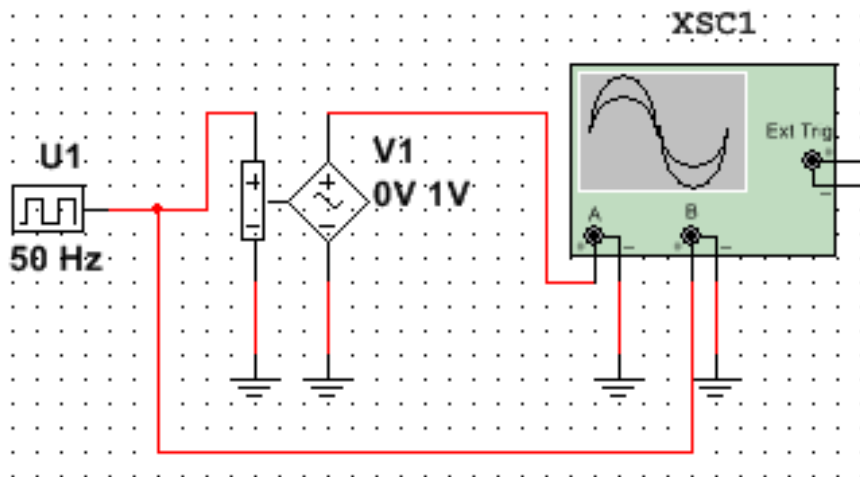


Рис. 2.5 – Схема вивчення частотної маніпуляції (ЧМн)

Використані елементи і прилади у схемі на рис. 2.5:

XSC1 – осцилограф;

U1 – джерело цифрового сигналу;

V1 – генератор контрольованого напругою синусоїдального сигналу (розташування група *source* підгрупа *controlled voltage sources*).

Таблиця 2.3 – дані по варіантам завдань до схеми на рис. 2.5

| № варіанту | Частота «0», Гц | Частота «1», Гц |
|------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 400 | 900 |
| 2 | 500 | 1100 |
| 3 | 400 | 700 |
| 4 | 700 | 1300 |
| 5 | 600 | 800 |

6. Згідно з варіантом завдання (див. табл 2.3), у властивостях генератору V1 (вкладка Value) встановити частоти «0» та «1».

7. Ввімкнути моделювання та спостерігайте процес частотної маніпуляції, встановивши необхідні значення тривалості розгортки (Timebase) і подільників напруги (Scale). Включити відображення осцилограми на плотері (View-Grapher) та скопіювати отриманий графік у відповідний розділ звіту.

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості
- 2) Хід роботи, де представити:
 - скрін-шоти зібраної робочої схеми амплітудно-імпульсного модулятора; схеми вивчення амплітудної та частотної маніпуляції;
 - осцилограми сигналів з назвами дослідів, отриманих згідно завдання;
- 3) висновки за результатами експериментального дослідження та роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. Які основні відмінності сигналів дискретної амплітудної модуляції від амплітудної модуляції неперервного АМ сигналу?
2. Які дискретні види модуляції вам відомі?
3. Як реалізується амплітудна та частотна маніпуляція?
4. Які переваги має частотна маніпуляція та для чого вона застосовується?
5. Як ви поясните отримані у роботі осцилограми?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження основних інформаційних характеристик джерел повідомлень

Мета роботи – виробити вміння та набути практичні навички дослідження оцінок основних інформаційних характеристик дискретних джерел повідомлень за допомогою розрахунків виконаних у програмному середовищі Matcad.

Теоретичні відомості

Представлення інформації потребує набору символів, які утворюють алфавіт. В залежності від ситуації алфавіт може бути як множиною числових значень, отриманих при вимірюванні фізичної величини, так і множиною цифр десяткової чи іншої системи числення, а також буквами, наприклад, українського алфавіту, тощо. Для того щоб абстрагуватися від конкретного змісту інформації та отримати саме загальне визначення кількості інформації, кількісну міру інформації визначають без урахування її смислового змісту, а також цінності та корисності для одержувача.

Теорія інформації вивчає основні закономірності отримання, передавання, зберігання та оброблення інформації. Виділяють три основні напрямки: структурний, статистичний та семантичний.

Структурний – розглядає дискретну побудову масивів інформації та їх вимірювання простим підрахунком інформаційних елементів або комбінаторним методом, що передбачає просте кодування масивів.

Статистичний напрямок оперує поняттям ентропії як міри невизначеності, що враховує ймовірність появи тих чи інших повідомлень.

Семантичний напрямок враховує доцільність, цінність, корисність або суттєвість інформації.

Структурний напрямок розглядає дискретне повідомлення як слово, яке складається з n елементів з алфавіту, який складається у свою чергу з m

елементів. У 1929 р. американський вчений Р. Хартлі запропонував у якості міри кількості інформації використовувати логарифм числа можливих послідовностей символів:

$$I = \log N = \log m^n = n \log m, \quad (3.1)$$

де N – число повідомлень, яке можна отримати, комбінуючи m символів алфавіту за n елементами у повідомленні.

В теорії інформації мірою невизначеності є ентропія – кількість інформації, що припадає на один елемент повідомлення. Чим вища ентропія повідомлення, тим більша кількість інформації в ньому закладено, тим важче її запам'ятати (записати) або передати каналом зв'язку. Для повідомлення з n елементів величина ентропії H може бути знайдена як

$$H = \frac{I}{n} = -\sum_{i=1}^m p_i \log p_i = \sum_{i=1}^m p_i \log \frac{1}{p_i}. \quad (3.2)$$

Ентропія джерела має такі властивості:

- 1) дорівнює нулю, якщо хоча б одне з повідомлень достовірне;
- 2) завжди більша або дорівнює нулю, є величиною дійсною і обмеженою;
- 3) ентропія джерела з двома альтернативними подіями може змінюватися від 0 до 1;
- 4) ентропія – величина адитивна: ентропія джерела, повідомлення якого складаються з повідомлень декількох статистично незалежних джерел, дорівнює сумі ентропій цих джерел;
- 5) ентропія максимальна, якщо всі повідомлення мають однакову імовірність, тобто

$$H_{max} = -\sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \log \frac{1}{m} = \log m \quad (3.3)$$

Кількість інформації та ентропія є логарифмічними мірами та вимірюються у одних і тих самих одиницях. Основа логарифму визначає одиницю величини. Двійкова одиниця, яка відповідає основі, що дорівнює двом носить назву біт.

Основі, яка дорівнює $e = 2,718$, відповідає натуральна одиниця – нат:

1 нат=1,44269 біт.

Основі, яка дорівнює 10, відповідає десяткова одиниця – діт:

1 діт=3,32193 біт.

Ентропія статистично залежних повідомлень

Розв'язуючи різні задачі, часто необхідно мати справу з джерелами інформації, що виробляють залежні повідомлення. Являє інтерес оцінка кількості інформації, що створюється деякою сукупністю джерел.

Якщо позначити: $p(x_i)$ – ймовірність появи символу x_i ; $p(y_j)$ – ймовірність появи символу y_j ; тоді можна записати

$$p(x_i) = \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j); \quad (3.4)$$

$$p(y_j) = \sum_{i=1}^n p(x_i, y_j); \quad (3.5)$$

умовна ентропія повідомлень Y відносно повідомлень X

$$H(Y/X) = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(x_i) p(y_j/x_i) \log p(y_j/x_i) = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(x_i, y_j) \log p(y_j/x_i) \quad (3.6)$$

умовна ентропія повідомлень X відносно повідомлень Y

$$H(X/Y) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j) \log p(x_i/y_j) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p(y_j) p(x_i/y_j) \log p(x_i/y_j) \quad (3.7)$$

ентропія об'єднання повідомлень X та Y

$$H(X, Y) = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(x_i, y_j) \log p(x_i, y_j). \quad (3.8)$$

Ентропію об'єднання можна визначити також як суму двох ентропій: безумовної ентропії повідомлень $H(X)$ та умовної ентропії $H(Y/X)$:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y/X) \quad (3.9)$$

або
$$H(X, Y) = H(Y) + H(X/Y). \quad (3.10)$$

Умовна ентропія $H(Y/X)$ характеризує ту додаткову інформацію, яку дають

повідомлення Y за умови, що відома ентропія повідомлень X . Коли повідомлення X та Y незалежні, $H(Y / X) = H(Y)$, $H(X / Y) = H(X)$, тоді

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y). \quad (3.11)$$

У випадку жорсткого статистичного зв'язку

$$H(X, Y) = H(X) \quad (3.12)$$

або
$$H(X, Y) = H(Y). \quad (3.13)$$

Взаємна ентропія $H(X \cdot Y)$ визначає повну взаємну інформацію $I(X, Y)$.

Важлива характеристика джерела повідомлень – його надмірність, під якою розуміють відношення:

$$R = \frac{H_{max} - H(X)}{H_{max}}, \quad (3.14)$$

де H_{max} – максимально можливе значення ентропії; $H(X)$ – ентропія реального повідомлення, що розглядається.

Завдання та послідовність виконання роботи

За допомогою програмних засобів розв'язати наступні завдання

Завдання 3.1 Дискретна випадкова величина X , задана розподілом $P(x_i)$ (значення $P(x_i)$ взяти з таблиці 3.1 згідно варіанту). Знайти максимальну і реальну ентропію величини X . Обчислити максимальну та реальну середню кількість інформації.

Таблиця 3.1 – дані по варіантам завдання 3.1

| № варіанту | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|----------|-------|-------|----------|----------|----------|-------|-------|----------|----------|
| $p(x_1)$ | 0,069 | 0,017 | 0,013 | 0,026 | 6,00E-03 | 8,00E-03 | 0,054 | 0,06 | 0,093 | 0,02 |
| $p(x_2)$ | 2,00E-03 | 0,093 | 0,066 | 3,00E-03 | 0,084 | 0,095 | 0,044 | 0,067 | 3,00E-03 | 4,00E-03 |
| $p(x_3)$ | 0,098 | 0,086 | 0,031 | 4,00E-03 | 0,092 | 0,027 | 0,061 | 0,071 | 0,055 | 0,036 |

Продовження таблиці 3.1

| | | | | | | | | | | |
|-------------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
| $p(x_4)$ | 0,077 | 0,055 | 0,03 | 0,032 | 0,081 | 0,051 | 0,05 | 0,077 | 0,039 | 0,042 |
| $p(x_5)$ | 4,00E-03 | 0,02 | 0,023 | 0,048 | 0,09 | 0,045 | 0,069 | 0,081 | 4,00E-03 | 0,089 |
| $p(x_6)$ | 0,064 | 0,086 | 0,018 | 0,069 | 0,031 | 0,043 | 0,077 | 0,048 | 0,046 | 0,053 |
| $p(x_7)$ | 0,034 | 0,046 | 0,093 | 4,00E-03 | 0,1 | 0,076 | 0,098 | 0,076 | 0,086 | 0,02 |
| $p(x_8)$ | 0,03 | 0,089 | 0,091 | 0,017 | 0,011 | 0,061 | 0,081 | 0,07 | 0,066 | 0,056 |
| $p(x_9)$ | 0,098 | 0,027 | 0,02 | 0,038 | 0,059 | 0,08 | 0,093 | 0,039 | 0,054 | 0,066 |
| $p(x_{10})$ | 0,074 | 0,054 | 0,087 | 0,098 | 0,044 | 0,014 | 0,051 | 0,015 | 0,052 | 0,045 |
| $p(x_{11})$ | 0,02 | 0,054 | 0,054 | 0,05 | 0,072 | 0,094 | 0,073 | 0,044 | 0,071 | 0,065 |
| $p(x_{12})$ | 0,171 | 0,227 | 0,288 | 0,479 | 0,16 | 0,188 | 0,035 | 0,101 | 0,194 | 0,414 |

Етапи виконання завдання 3.1:

1. Створити файл з розширенням txt, у який скопіювати дані до завдання у формі таблиці. Завантажити створений файл у середовище Matcad (меню Insert/Component/File Read or Write/Read from a file, формат – Text Files)

2. У завантаженому векторі стовпчику упорядкувати значення ймовірностей дискретної випадкової величини у порядку зростання використовуючи функцію *sort* (x). Розрахувати максимальну ентропію (за формулою (3.3)).

3. Розрахувати реальну ентропію (за формулою (3.2)) та надлишковість за формулою (3.14).

4. Розрахувати максимальну та реальну середню кількість інформації (виходячи з визначення (3.2)).

5. Створити таблицю зі значеннями часткової реальної ентропії в залежності від значень ймовірності та побудувати графік залежності реальної ентропії від ймовірності. H – вісь ординат, p – вісь абсцис.

6. Занести результати у відповідні розділи звіту. Окремо зберегти файл з розрахунками у середовищі Matcad (файл з розширенням mcd).

Завдання 3.2 Є дві взаємно залежні системи подій X та Y , сумісні ймовірності яких задано матрицею (у табл. 3.2 згідно варіанту), визначити ентропії $H(X, Y)$; $H(X)$; $H(Y)$; $H(X/Y)$; $H(Y/X)$.

Таблиця 3.2 - дані по варіантам завдання 3.2

| варіант | матриця |
|---------|---|
| 1 | $P(X,Y) = \begin{pmatrix} 0,12 & 0,1 & 0,08 & 0,05 & 0,03 \\ 0,02 & 0,04 & 0,12 & 0,04 & 0,02 \\ 0,03 & 0,05 & 0,08 & 0,1 & 0,12 \end{pmatrix}$ |
| 2 | $P(X,Y) = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,05 & 0,06 & 0,07 \\ 0,02 & 0,05 & 0,15 & 0,03 \\ 0,03 & 0,09 & 0,08 & 0,1 \\ 0,03 & 0,02 & 0,11 & 0,01 \end{pmatrix}$ |
| 3 | $P(X,Y) = \begin{pmatrix} 0,14 & 0,1 & 0,06 & 0,05 & 0,03 \\ 0,01 & 0,05 & 0,11 & 0,03 & 0,02 \\ 0,03 & 0,09 & 0,08 & 0,1 & 0,1 \end{pmatrix}$ |
| 4 | $P(X,Y) = \begin{pmatrix} 0,07 & 0,02 & 0,09 \\ 0,08 & 0,04 & 0,11 \\ 0,02 & 0,05 & 0,09 \\ 0,03 & 0,02 & 0,14 \\ 0,08 & 0,04 & 0,12 \end{pmatrix}$ |
| 5 | $P(X,Y) = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,01 & 0,05 & 0,08 & 0,12 \\ 0,09 & 0,02 & 0,1 & 0,01 & 0,04 \\ 0,02 & 0,08 & 0,06 & 0,09 & 0,13 \end{pmatrix}$ |

Етапи виконання завдання 3.2:

1. Занести значення матриці згідно варіанту у середовище Matcad та задати значення початкових індексів $ORIGIN \equiv 1$.

2. Розрахувати значення безумовних ймовірностей $p(x_i)$ та $p(y_j)$ за формулами (3.4), (3.5). Приклад запису розрахункових виразів у середовищі Matcad:

$$P_{x_i} := \sum_{j=1}^5 P_{xy_{i,j}} = \dots \qquad P_{y_j} := \sum_{i=1}^3 P_{xy_{i,j}} = \dots$$

3. Розрахувати ентропії подій X та Y $H(X)$, $H(Y)$ за формулою (3.2)

4. Розрахувати значення ентропії об'єднання $H(X, Y)$. Приклад запису розрахункового виразу у середовищі Matcad:

$$H_{xy} := - \sum_i \left[\sum_j (P_{xy_{i,j}} \cdot \log(P_{xy_{i,j}}, 2)) \right]$$

5. Розрахувати значення умовних ентропій $H(X/Y)$, $H(Y/X)$ скористувавшись виразом (3.10).

6. Занести результати у відповідні розділи звіту. Окремо зберегти файл з розрахунками у середовищі Matcad (файл з розширенням mcd).

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості
- 2) Хід роботи, де представити:
 - поетапне виконання завдань 3.1 та 3.2 у середовищі Matcad з описом та поясненнями дій та розрахунковими результатами;
 - таблиця з розрахунковими значеннями і графік залежності ентропії від ймовірності згідно варіанту;
- 3) Висновки до отриманих розв'язків та за результатами роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. Які міри кількості інформації вам відомі? Яка головна властивість логарифмічної міри інформації?
2. Назвіть одиниці вимірювання кількості інформації.
3. В чому відмінність підходів Шеннона та Хартлі до проблеми оцінювання кількості інформації?
4. Розкрийте зміст поняття ентропія. Яку властивість джерела інформації характеризує параметр «ентропія джерела»?
5. Що таке умовна ентропія? У яких межах змінюється ентропія об'єднання двох повідомлень?
6. Яку практичну цінність має параметр «надмірність джерела»?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Спектральне представлення сигналів. Дослідження спектру сигналу при різній частоті його дискретизації

Мета роботи – дослідити характеристики гармонік періодичного сигналу. Дослідити спектр неперіодичного сигналу при різній частоті його дискретизації. Набути навичок використання основних засобів спектрального аналізу сигналів за Фур'є у середовищі MATLAB.

Теоретичні відомості

Крім звичного динамічного подання сигналів і функцій у вигляді залежності їх значень від певних аргументів (часу, лінійної або просторової координати) при аналізі та обробці даних широко використовується математичний опис сигналів по аргументам, зворотним до аргументів динамічного подання. Так для часу зворотним аргументом є частота.

Можливість такого опису визначається тим, що будь-який як завгодно складний за своєю формою сигнал, який не має розривів другого роду, можна представити у вигляді суми більш простих сигналів, і, зокрема, у вигляді суми найпростіших гармонійних коливань, що виконується за допомогою перетворення Фур'є.

Математично розкладання сигналу на гармонійні складові описується функціями значень амплітуд і початкових фаз коливань по безперервному або дискретному аргументу – частоті зміни функцій на певних інтервалах аргументів їх динамічного подання. Сукупність амплітуд гармонійних коливань розкладання називають амплітудним спектром сигналу, а сукупність початкових фаз – фазовим спектром. Обидва спектра разом утворюють повний частотний спектр сигналу, який за точністю математичного уявлення тотожний динамічній формі опису сигналу.

Теоретично *синусоїдальні сигнали* представляються однією спектральною лінією на графіку залежності амплітуди від частоти. При

спотворенні вихідного сигналу з'являються додаткові гармоніки, відмінні від основної. Математично, складаючи потужність кожної гармоніки з потужністю основної гармоніки, можна відновити весь вихідний сигнал.

Форми сигналу, такі як, прямокутна і пилкоподібна містять в собі нескінченну кількість гармонік, додавання яких, дає форму сигналу, його амплітуду і частоту.

Сигнал *пилкоподібної форми* може бути представлений суперпозицією нескінченної кількості синусоїдальних сигналів, частоти яких кратні основній частоті. Амплітуда і потужність цих синусоїд зменшуються зі збільшенням їх частоти. Ряд Фур'є такого сигналу виглядає наступним чином:

$$E_n = \frac{2A}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \frac{1}{4} \sin 4\omega t + \dots \right) \quad (4.1)$$

Обчислення середньоквадратичного значення напруги гармоніки проводиться за наступною формулою:

$$E_n = \frac{2A}{n\pi\sqrt{3}} \quad (4.2)$$

Ряд Фур'є *прямокутного сигналу* виглядає як:

$$E_n = \frac{4A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right) \quad (4.3)$$

Середньоквадратичне значення напруги гармоніки прямокутного сигналу:

$$E_n = \frac{4A}{n\pi\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

де A – амплітудне значення, n – номер гармоніки.

Величина $f_0 = \frac{1}{\text{period } \tau}$ – називається основною частотою, частота другої гармоніки дорівнює $3f_0$, третьої – $5f_0$, і т. п.. У міру додавання кожної гармоніки, форма сигналу стає більш схожою на прямокутну.

Ідеальний сигнал прямокутної форми включає в себе нескінченну кількість непарних гармонік. Наприклад, якщо несуча частота прямокутного сигналу 1 кГц, тоді $3f_0 = 3\text{кГц}$, $5f_0 = 5\text{кГц}$, $7f_0 = 7\text{кГц}$. Так як амплітуда гармонік високих порядків у багато разів менше амплітуди несучої частоти, то обчислення гармонік, як правило, відбувається до 5-го порядку

Скільки б не було параметрів у сигналу, спектральний аналіз є основним засобом для вивчення окремих його компонентів.

Дискретизація. Для перетворення аналогових сигналів, неперервних за аргументом у функції миттєвих значень сигналів по дискретному аргументу використовується дискретизація.

Дискретизація зазвичай виконується з постійним кроком за аргументом (рівномірна дискретизація), при цьому $s(t) \Rightarrow s(n\Delta t)$, де значення $s(n\Delta t)$ являють собою відліки функцій $s(t)$ у моменти часу $t = n\Delta t$, $n = 0, 1, 2, \dots, N$. Частота дискретизації (модуляції, або семплювання) – частота взяття відліків безперервного в часі сигналу при його дискретизації (зокрема, аналого-цифровим перетворювачем). Вимірюється в Герцах.

Термін застосовується і при зворотному, цифро-аналоговому перетворенні, особливо якщо частота дискретизації прямого та зворотного перетворення обрана різною. У загальному випадку сітка відліків по аргументу може бути довільною чи задаватись за певним законом. У результаті дискретизації неперервний (аналоговий) сигнал переводиться у послідовність чисел. Чим вище частота дискретизації, тим більш широкий спектр сигналу може бути представлений у дискретному сигналі.

Представлення повідомлення в вигляді дискретної послідовності символів має наступні переваги:

спрощує збереження й обробку інформації;

робить можливим уніфікацію модуляторів і демодуляторів (модемів) і каналів незалежно від характеру повідомлення, що передається (мовлення, зображення, дані тощо);

дозволяє легко використовувати коди, які дозволяють виправляти похибки, засекречувати та ущільнювати інформацію;

дозволяє відтворювати форму сигналів при великій кількості послідовних операцій, причому без накопичування похибок та шумів.

Операція *відновлення* аналогового сигналу за його дискретного представлення обернена до операції дискретизації та являє собою інтерполяцію даних. Якщо сигнал має обмежений частотою f_{max} спектр, то для того щоб без втрат відновити сигнал за його дискретними відліками потрібно щоб виконувалась теорема Віттакера - Найквіста - Котельникова – Шеннона: якщо безперервний сигнал $x(t)$ має спектр, обмежений частотою, то він може бути однозначно і без втрат відновлений за своїми дискретними відліками, узятими з частотою $f_d = 2f_{max}$, або, за відліками, узятими з періодом $T_d = \frac{1}{2f_d}$.

Наведена теорема справедлива для сигналів, визначених на всій часовій осі, які не мають точок розриву. Оскільки реальні сигнали розглядаються на скінченному інтервалі часу та мають розриви, то їх спектр є нескінченним і тому повне відновлення їх є неможливим. Мають місце два наслідки:

- будь-який аналоговий сигнал може бути відновлений з якою завгодно точністю за своїми дискретними відліками, взятими з частотою $f \geq 2\Omega$, де Ω – максимальна частота, якою обмежений спектр реального сигналу.

- якщо максимальна частота в сигналі перевищує половину частоти дискретизації, то способу відновити сигнал з дискретного в аналоговий без спотворень не існує.

Найбільш часто використовується спосіб дискретизації, що використовує теорему Котельникова: Якщо найвища частота в спектрі функції $f(t)$ менша ніж f_{max} , то функція $f(t)$ повністю визначається послідовністю своїх значень в моменти, віддалені один від одного не більше як на $\frac{1}{2f_{max}}$ секунд і може бути представлена рядом

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{n}{2f_{max}}\right) \frac{\sin\left[2\pi f_{max}\left(t - \frac{n}{2f_{max}}\right)\right]}{2\pi f_{max}\left(t - \frac{n}{2f_{max}}\right)}. \quad (4.5)$$

У (4.5) величина $\frac{1}{2\pi f_{max}} = T$ визначає інтервал між відліками на осі часу,

а $\frac{n}{2f_{max}} = nT$ – час вибірки, $s\left(\frac{n}{2f_m}\right) = s(nT)$ – значення сигналу в момент відліку. Ряд (4.5) називають рядом Котельникова, а вибірки (відліки) сигналу $\{s(nT)\}$ інколи називають часовим спектром сигналу.

Функція

$$u_n(t) = \frac{\sin[2\pi f_m(t - nT)]}{2\pi f_m(t - nT)} = \frac{\sin[\omega_m(t - nT)]}{2\pi\omega_m(t - nT)} \quad (4.6)$$

має такі властивості: а) в точці $t = nT$ вона рівна 1, так як в цій точці аргумент

функції $\frac{\sin(x)}{x}$ дорівнює 0, а значення її рівне 1; б) в точках $t = kT, k \neq n$

функція $u_n(kT) = 0$, оскільки аргумент синуса в цих точках рівний

$2\pi f_{max}(kT - nT) = 2\pi f_{max}(k - n)T = (k - n)\frac{1}{2f_{max}}2\pi f_{max} = (k - n)\pi$, а сам синус рівний

нулю; в) спектральна щільність функції $u_n(nT)$ рівномірна у полосі частот

$|f| \leq f_{max}$ та дорівнює $\frac{1}{2f_{max}}$. Такий висновок можна зробити із теореми про

взаємність частоти і часу пари перетворень Фур'є. ФЧХ спектральної густини

лінійна та дорівнює $\varphi_n(\omega) = -jnT\omega$. Таким чином

$$u_n(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{2f_{max}} e^{-jnT\omega} & \text{при } |\omega| \leq \omega_m \\ 0 & \text{при } |\omega| > \omega_m. \end{cases} \quad (4.7)$$

Ряд Котельникова (4.5) має усі властивості узагальненого ряду Фур'є з базисними функціями $u_n(nT)$, і тому визначає функцію $f(t)$ не лише для окремих відліків, але і у будь-який момент часу t існування сигналу.

Якщо умова $|f| \leq f_{max}$ не виконується, то виникне завада, зумовлена накладанням гармонік (аліасинг). Позбутись такої завади цифровою обробкою дискретизованого сигналу практично неможливо. Тому, для гарантовано правильної дискретизації, потрібно штучно, шляхом фільтрації, позбутись складових, вищих f_{max} .

При обробці звукових сигналів радіосигналів і зображень широко застосовують алгоритми *передискретизації* (resampling), тобто зміну частоти дискретизації дискретного (найчастіше цифрового) сигналу.

При передискретизації відліки сигналу, відповідні одній частоті дискретизації, обчислюються за наявними відліками цього ж сигналу, відповідним іншій частоті дискретизації (при цьому передбачається, що обидві частоти дискретизації відповідають умовам теореми Котельникова). Ідеальна передискретизація еквівалентна відновленню безперервного сигналу по його відліках з подальшою дискретизацією його на новій частоті.

Широко застосовується як апаратна так і програмна реалізація алгоритмів передискретизації. У програмі MATLAB для мети передискретизації передбачена спеціальна функція resample: $y = \text{resample}(x, p, q)$; де x – вихідний сигнал, p і q – чисельник і знаменник дрібного коефіцієнта зміни частоти дискретизації, y – передискретизований сигнал.

Також для передискретизації може бути використаний будь-який фільтр нижніх частот з необхідною частотою зрізу. Вибір конкретної реалізації алгоритму передискретизації є результатом компромісу між якістю перетворення і його обчислювальною складністю.

На практиці передискретизація в більшості випадків веде до втрати інформації про сигнал. При збільшенні частоти дискретизації з подальшим зменшенням її до вихідного значення якість сигналу буде втрачено.

Завдання та послідовність виконання роботи

Частина 1

1. Зібрати схему дослідження, зображену на рис 4. 1.

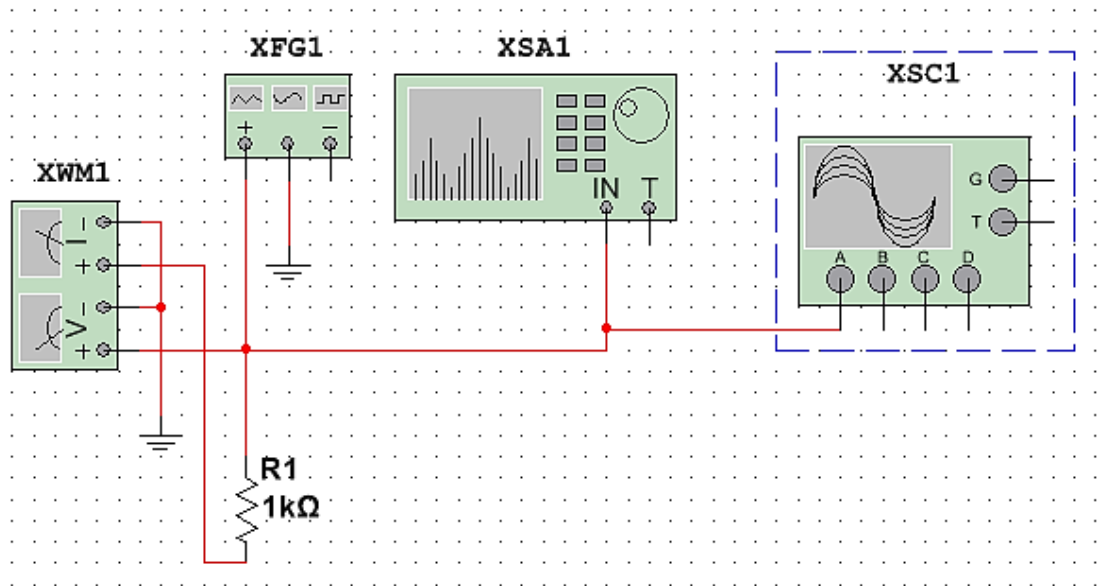


Рис. 4. 1 – Схема експериментального дослідження спектру прямокутного/пилкоподібного сигналу

Використані елементи і прилади у схемі на рис. 4.1:

XFG1 – генератор функцій – використовується для генерації сигналу певної форми та амплітуди,

XSC1 – осцилограф, використовується для контролю форми вхідного і вихідного сигналів;

XWM1 – ватметр, використовується для вимірювання потужності сигналу;

XSA1 – аналізатор спектру; використовується для визначення спектра вихідного сигналу.

При підключенні ватметра пам'ятайте, що клеми, позначені V, підключається паралельно з навантаженням, а клеми, позначені I – послідовно з навантаженням.

2. Виконати налаштування осцилографу: масштаб Time Base (часова вісь) – $50 \mu\text{s}/\text{Div}$, значення Channel A – $10 \text{ V}/\text{Div}$. Вибрати режим автоматичного запуску (Auto Trigger) і режим пропускання постійної складової сигналу (DC).

3. Виконати налаштування генератора функцій згідно варіанту завдання (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – дані по варіантам завдання по схемі 4.1

| № варіанту | Форма сигналу | Частота, Гц | Амплітуда, В |
|------------|---------------|-------------|--------------|
| 1 | Прямокутна | 9000 | 10 |
| 2 | Пилкоподібна | 11000 | 8 |
| 3 | Прямокутна | 7000 | 10 |
| 4 | Пилкоподібна | 13000 | 5 |
| 5 | Прямокутна | 8000 | 8 |

4. Виконати налаштування аналізатору спектру. Виділіть Set Span. Встановіть Start (початкову частоту) та End (кінець частоту). Для зручності дослідження параметри Start та End слід обирати так, щоб вказане у завданні значення досліджуваної частоти потрапляло у середину цього інтервалу. Встановіть Amplitude (Амплітуда) = Lin. Натисніть Enter.

5. Почати моделювання. Двічі натисніть на аналізаторі спектра, якщо необхідно змініть масштаб (Span).

6. Включити відображення осцилограми та частотного спектру сигналу на плотері (View-Grapher) та скопіювати отримані графіки у відповідний розділ звіту.

7. Посуньте вертикальний маркер в ліву частину вікна і виміряйте частоту і амплітуду несучого сигналу. Ці значення будуть відображатися в лівому нижньому кутку вікна. Запишіть значення вимірної напруги і розрахуйте вимірну потужність за формулою:

$$P = \frac{E^2}{R}, \quad (4.8)$$

де E – значення вимірної, чи розрахованої середньквдратичної напруги, $R = 1000$ Ом – опір навантаження. Результати занесіть у табл. 4.2.

8. Виконати аналогічні виміри й обчислення для 2 і 3 та 3 і 5 (в залежності від варіанту) гармонік пилкоподібного та прямокутного сигналу відповідно.

9. Обчислити сумарну потужність. Звірити отримані результати з показником ватметра, натиснувши два рази на Wattmeter.

10. Обчислити очікувану середньоквадратичну напругу за формулою (4.2) або (4.4) для пилкоподібної та прямокутної форми сигналу відповідно. Очікувана потужність розраховується за формулою (4.8). Виконати розрахунки для інших гармонік, результати занесіть у табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Результати для сигналу пилкоподібної / прямокутної форми.

| | Виміряна частота (Гц) | Виміряна середньоквадратична напруга (В) | Виміряна потужність (мВт) | Очікувана середньоквадратична напруга (В) | Очікувана потужність (мВт) |
|-----------|-----------------------|--|---------------------------|---|----------------------------|
| f_0/f_0 | | | | | |
| f_2/f_3 | | | | | |
| f_3/f_5 | | | | | |

Загальна потужність в мВт (виміряна) _____

Показання загальної потужності в мВт з ватметра _____

Частина 2

1. Використовуючи апаратні засоби ПК та програмний пакет MATLAB записати п'ятисекундну реалізацію власного голосу (Прізвище, ім'я, по батькові) та зберегти файл у форматі wav (бітрейт 44100).

2. Завантажити файл у систему MATLAB. У пакеті Signal Processing Toolbox передбачено графічний інтерфейс користувача. Для запуску SpTool використовується команда sptool. Головне вікно розділене на 3 частини: сигнали (Signals), фільтри (Filters), спектри (Spectra). Для завантаження сигналу використовується пункт меню File / Import .

3. Обрати джерело сигналу (Source) з робочої області у полі Workspace Contents буде відображено поточний вміст робочої області. У полі Import As ... вказати, що змінна буде імпортована як сигнал (Signal).

4. Вказати, яка змінна буде імпортована, та вказати частоту дискретизації (Sampling Frequency) $f_s = 44100$ Гц. Вказати ім'я імпортованого сигналу у поле Name. Побудувати його графік (сигналограму) та занести до відповідного розділу звіту.

5. Здійснити перетворення Фур'є сигналу та привести графіки його спектру у відповідному розділі звіту, для цього

- виділити дослідний сигнал у блоці Signals,
- у блоці Spectra натиснути кнопку Create
- у блоці Parameters у полі Method обрати FFT (ШПФ),
- у полі NFFT вказати число точок FFT 1024, натиснути кнопку Apply.
- повторити попередню дію, вказавши число точок FFT 512 та 256.

У меню Options можна вказати додаткові налаштування відображення спектру

6. Побудувати фільтр низьких частот, застосувати його до сигналу та отримати спектр відфільтрованого сигналу, для цього:

- у блоці Filters натиснути New;
- у полі Response type обрати фільтр низьких частот з кінцевою імпульсною характеристикою;
- у полі Frequency Specification задати частоту дискретизації та граничні значення частот які потрібно зрізати, згідно з аналізу отриманого у попередньому пункті спектру сигналу. Натиснути Design Filter.
- застосувати створений фільтр до сигналу та повторити дії, описані у п.5.
- навести спектри вхідного та відфільтрованого сигналу на одній координатній площині

7. Здійснити зміну частоти дискретизації (передискретизацію) відфільтрованого сигналу обрати наступні значення $0,38f_s$, $1,09f_s$, $2f_s$, для цього:

- у блоці Signals обрати сигнал до якого необхідно здійснити передискретизацію;
- виберіть пункт Sampling frequency в меню «Edit»;
- введіть потрібну частоту дискретизації та натисніть клавішу ОК.

8. Навести спектри передискретизованих сигналів. Відтворити передискретизовані сигнали з врахуванням передискретизації та зробити висновок щодо отриманих результатів.

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості.
- 2) Хід роботи, де представити:
 - скрін-шоти зібраної робочої схеми експериментального дослідження спектру прямокутного (пилкоподібного) сигналу;
 - осцилограми та спектрограми сигналів, отриманих згідно завдання частини 1 лабораторної роботи, з назвами дослідів;
 - таблиця з відповідними вимірюваннями та розрахунками;
 - скрін-шоти сигналів та спектрів сигналів отриманих згідно завдання частини 2 лабораторної роботи з назвами дослідів та поясненнями.
- 3) Висновки за результатами досліджень та роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. В чому полягає спектральний аналіз сигналів та навіщо він виконується?
2. Для чого потрібний і що являє собою процес дискретизації аналогового сигналу? Які функціональні пристрої для цього потрібні?
3. Сформулюйте теорему відліків. Запишіть і поясніть формулу ряду Котельникова-Шеннона. Поясніть доцільність вибору базисної системи функцій ряду?
4. Що відбувається із спектром сигналу при дискретизації?
5. Який алгоритм відновлення дискретизованого сигналу? Як визначити необхідну частоту зрізу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Дослідження процесу квантування сигналу

Мета роботи – вивчити принципи квантування сигналу за рівнем. Дослідити вплив кроку квантування на зміну потужності шумів квантування та на відношення сигнал/завада. Набути практичних навичок дослідження сигналів у програмному середовищі MathCAD.

Теоретичні відомості

Повідомлення, які підлягають передачі, можуть складатися або з послідовності дискретних символів, що вибираються з кінцевого алфавіту (наприклад, письмовий текст, цифрові дані тощо), або з неперервних (аналогових) сигналів (наприклад, повідомлення, що являє собою мовлення, музику, зображення, тощо). При передачі таких повідомлень виникають труднощі, пов'язані з появою апаратних похибок, похибок від нестабільності ліній зв'язку тощо. З метою усунення цих похибок (до певного рівня), у випадках, коли повідомлення представлені неперервними сигналами (як за множиною значень так і за часом), застосовують дискретизацію за часом і *квантування за рівнем*. Еквівалентність частотно-часових перетворень сигналу однозначно визначається через перетворення Фур'є. Для подання сигналів в частотній області використовуються цифрові аналізатори спектру. Деякі можливості таких аналізаторів розглянуто у минулій лабораторній роботі. Для вивчення математичних аспектів обробки сигналів використовуються пакети розширення (найчастіше з назвою Signal Processing) систем комп'ютерної математики MATLAB, MathCAD, Mathematica, Maple та ін.

Квантування (англ. quantization) за рівнем – це процес переходу від нескінченної кількості допустимих значень сигналу до кінцевої, що робить можливим передачу номера рівня цифровим двійковим числом бітів (рис. 5.1).

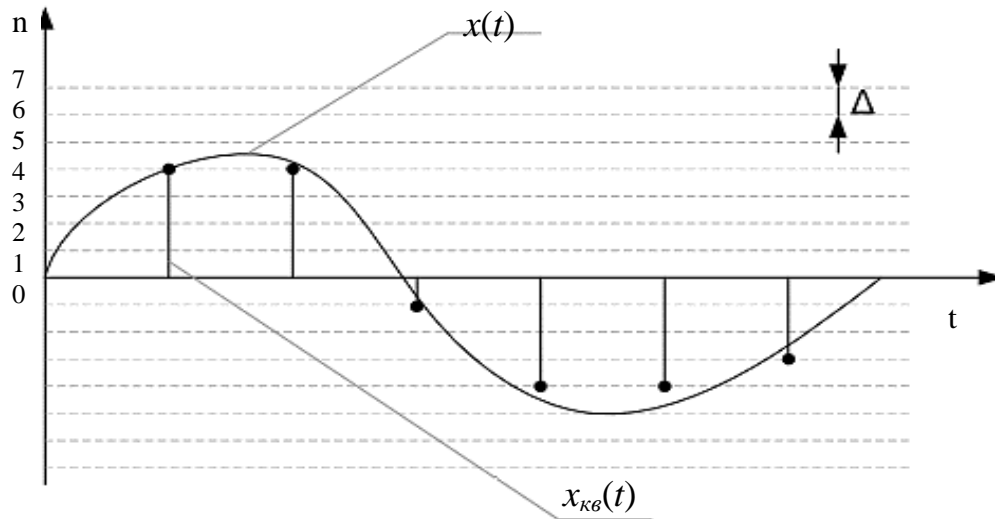


Рисунок 5.1 – Квантування сигналу за рівнем

Для квантування в двійковому коді діапазон зміни сигналу від x_{min} до x_{max} ділиться на 2^n інтервалів. Величина отриманого інтервалу – це крок квантування, що визначають як:

$$\Delta = \frac{x_{max} - x_{min}}{2^n} \quad (5.1)$$

Кожному інтервалу присвоюється n -розрядний двійковий код – номер інтервалу, записаний двійковим числом. Кожному відліку сигналу присвоюється код того інтервалу, в який потрапляє значення напруги цього відліку. Таким чином, аналоговий сигнал представляється послідовністю двійкових чисел, які відповідають величині сигналу в певні моменти часу, тобто цифровим сигналом. Кожне двійкове число представляється послідовністю імпульсів високого (1) і низького (0) рівня. При цьому інтервал квантування сигналів за рівнем визначається значущістю молодшого розряду двійкового цифрового коду ЕОМ.

При квантуванні вся область допустимих значень сигналу ділиться на n дозволених рівні квантування, а сигнал при передачі кожного разу округлюють до найближчого дозволеного рівня квантування. При цьому неминуче виникає помилка квантування (шум квантування):

$$\delta x_i = x(t) - x_{кв}(t) \quad (5.2)$$

Для оцінки завадозахищеності сигналу від шуму квантування використовують наступну формулу:

$$K_{з.кв} = 10 \lg \left(\frac{P_c}{P_{кв}} \right) \quad (5.3)$$

де P_c – середня потужність сигналу; $P_{кв}$ – середня потужність шуму квантування.

Середня потужність сигналу – потужність змінної складової (постійна складова не враховується, тому що не несе інформації) збігається з дисперсією D випадкового процесу, мірою його розкиду біля середнього значення:

$$P_c = D = \int_{-\infty}^{\infty} \left(x(t) - \overline{x(t)} \right)^2 p(x,t) dx \quad (5.4)$$

де $\overline{x(t)^2}$ – середнє значення квадрату випадкового процесу, $p(x,t)dx$ – щільність ймовірності.

При рівномірному квантуванні, коли всі кроки Δ_i однакові, сума всіх ймовірностей p_i дорівнює 1. Тоді середню потужність сигналу $x(t)$ по інтервалу спостереження T визначають за виразом:

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt \quad (5.5)$$

Середня потужність шуму квантування $P_{кв}$ визначається з наступних міркувань. Повідомлення $x(t)$ у момент часу t_k може приймати одне з можливих значень у інтервалі від x_{min} до x_{max} з деякою ймовірністю, що визначається законом розподілу випадкової величини $x(t)$. Ймовірність появи рівня x_i визначиться як імовірність попадання випадкової величини $x(t)$ до інтервалу від x_a до x_b в околі рівня x_i . У цьому разі помилка δx_i може змінюватись у межах від $x_i - x_a$ до $x_i - x_b$, змінюючи знак (рис.5.2).

Ймовірність появи помилки δx_i також буде визначена ймовірністю появи відповідного значення повідомлення $x(t)$ у момент часу t_k . Математичне очікування помилки на рівні x_i :

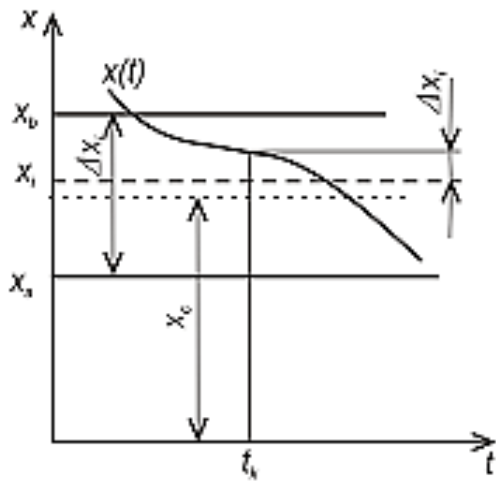


Рисунок 5.2 – оцінка похибки квантування

$$M(\delta x_i) = \int_{x_a}^{x_b} (x - x_i) p(x) dx, \quad (5.6)$$

а середнє квадратичне значення

$$M(\delta x_i^2) = \int_{x_a}^{x_b} (x - x_i)^2 p(x) dx. \quad (5.7)$$

Вважаючи динамічний діапазон зміни повідомлення набагато більшим за величину кроку квантування, прийемо функцію щільності ймовірності $p(x)$ на інтервалі інтегрування постійною та

рівною своєму значенню для деякого середнього рівня $p(x_i)$. Тоді

$$M(\delta x_i) = p(x_c) \int_{x_a}^{x_b} (x - x_i) dx = \frac{1}{2} p(x_c) [(x_b - x_i)^2 - (x_a - x_i)^2] \quad (5.8)$$

а

$$M(\delta x_i^2) = p(x_c) \int_{x_a}^{x_b} (x - x_i)^2 dx = \frac{1}{3} p(x_c) [(x_b - x_i)^3 - (x_a - x_i)^3], \quad (5.9)$$

де $x_c = \frac{x_b - x_a}{2}$. Для забезпечення мінімальної дисперсії рівень квантування x_i

слід розташовувати посередині кроку квантування. У цьому випадку

$x_a = x_i - \frac{\Delta x_i}{2}$, $x_b = x_i + \frac{\Delta x_i}{2}$, а дисперсія знаходиться з (5.9) та дорівнює

$$M(\delta x_i^2) = \frac{1}{12} (x_i) \Delta x_i^3 \quad (5.10)$$

Дисперсію шуму квантування D отримаємо шляхом підсумовування значень $M(\delta x_i^2)$ за всіма рівнями

$$P_{\text{кв}} = D = \sum_{i=1}^m M(\delta x_i^2) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m p(x_i) \Delta x_i^3 \quad (5.11)$$

У випадку рівномірного квантування, коли $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots = \Delta x_m = \Delta x$:

$$D = \frac{\Delta x^2}{12} \sum_{i=1}^m p(x_i) \Delta x_i^3 \quad (5.11)$$

Вважаючи, що значення повідомлення обмежується динамічним діапазоном, можна записати $\sum_{i=1}^m p(x_i) \Delta x = 1$. Остаточно для рівномірного квантування

$$D = \frac{\Delta x^2}{12} \quad (5.12)$$

Таким чином, при рівномірному квантуванні потужність шуму квантування $P_{\text{кв}} = D$ залежить тільки від величини кроку квантування Δx і ніяк не залежить від рівня сигналу. Можна сказати, що в кінцевому рахунку потужність шумів квантування визначається числом рівнів квантування.

Завдання та послідовність виконання роботи

1. Запустити програмне середовище Mathsoft MathCAD.
2. Відкрити звуковий файл формату wav., обрати файл з записом власного голосу, що використовувався у лабораторній роботі №4.

Для зчитування звукового файлу формату wav. в масив використовується функція READWAV.

`Signal := READWAV("D:\Users\Рита\Desktop\VoiceLR5.wav")`

Для отримання атрибутів файлу використовується інша функція – GETWAVINFO. Вона дозволяє отримати такі характеристики звукового файлу, як число каналів, частота дискретизації, кількість біт на один відлік і швидкість цифрового потоку. Приклад застосування функції в середовищі Matcad

$$\text{GETWAVINFO}(\text{"D:\Users\Рита\Desktop\VoiceLR5.wav"}) = \begin{pmatrix} 2 \\ 4.41 \times 10^4 \\ 16 \\ 1.764 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

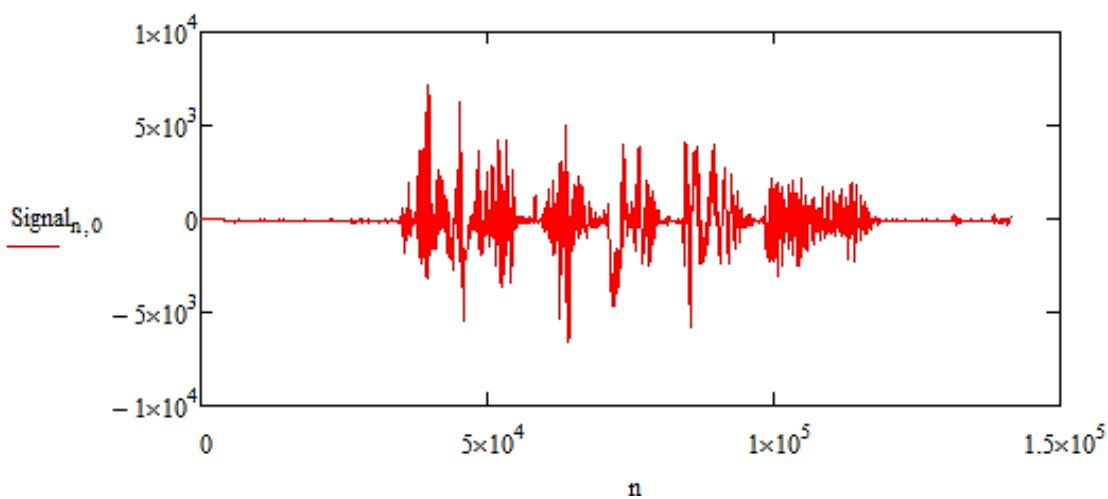
Обчислений за допомогою функції READWAV файл розміщується у одновимірному або двовірному масиві (в разі стерео), кожен елемент якого являє собою відлік мовного сигналу.

У загальному випадку мовний сигнал являє собою послідовність відліків дискретизованого аналогового сигналу, взятих з частотою дискретизації f_d . Такий спосіб представлення мовної інформації називають імпульсно-кодовою модуляцією (ІКМ) або РСМ (pulse code modulation). В такому форматі мовна інформація зберігається в файлах формату WAV і на аудіо компакт-дисках (Audio-CD).

Відліки мовного сигналу приймають значення від 0 до 255 для 8-бітних значень і від -32768 до 32767 для 16-бітних значень. Відсутності сигналу (тиші) відповідає рівень квантування 128 в першому випадку і 0 у другому.

Оскільки абсолютне значення кроку квантування в даному випадку невідомо, всі наведені далі рекомендації справедливі для відносного значення кроку квантування.

3. Побудувати графік мовного сигналу (сигналограму), результат скопіювати у звіт (приклад рис.5.4) .



$$n := 0, 100 : \text{length}(\text{Signal}^{(0)}) - 1$$

Рисунок 5.4 – Графік мовного сигналу

4. Здійснити зміну величини кроку квантування відповідно до вихідних даних для різних варіантів, що наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – дані по варіантам завдання 4

| Варіант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Δ1 | 10 | 20 | 5 | 40 | 100 | 10 |
| Δ2 | 100 | 200 | 50 | 800 | 500 | 100 |
| Δ3 | 500 | 2000 | 500 | 1600 | 1000 | 1000 |
| Δ4 | 1000 | 10000 | 1000 | 3200 | 2000 | 10000 |
| Δ5 | 5000 | 20000 | 5000 | 10000 | 5000 | 30000 |

Для виконання завдання 4 використовувати функцію Round (x, y), яка здійснює округлення x до найближчого значення, кратного y:

$\Delta := 1000$ – крок квантування

$$\text{Quantized} := \left\{ \begin{array}{l} C \leftarrow \text{Signal} \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\text{Signal}^{(0)}) - 1 \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} C_{i,0} \leftarrow \text{Round}(\text{Signal}_{i,0}, \Delta) \\ C_{i,1} \leftarrow \text{Round}(\text{Signal}_{i,1}, \Delta) \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$$

5. Виконати оцінку потужності шумів квантування при різних значеннях кроку квантування (Δ_i , $i=1..5$, див. дані табл. 5.1). Для зручності створити таблицю куди поступово вносити отримані значення.

5.1 Розрахувати середню потужність мовного сигналу згідно з формулою (5.5). Приклад запису розрахункового виразу в середовищі Matcad (інтеграл записаний через суму):

$$\text{SignalMean} := \frac{1}{2(\text{length}(\text{Signal}^{(0)}) - 1)} \left[\sum_{i=0}^{\text{length}(\text{Signal}^{(0)})-1} (\text{Signal}_{i,0})^2 + \sum_{i=0}^{\text{length}(\text{Signal}^{(0)})-1} (\text{Signal}_{i,1})^2 \right]$$

Занести значення потужності до звіту.

5.2 Розрахувати потужність шуму квантування:

$$\text{Noise} := \frac{1}{2(\text{length}(\text{Signal}^{(0)}) - 1)} \left[\sum_{i=0}^{\text{length}(\text{Signal}^{(0)})-1} (\text{Quantized}_{i,0} - \text{Signal}_{i,0})^2 + \sum_{i=0}^{\text{length}(\text{Signal}^{(0)})-1} (\text{Quantized}_{i,1} - \text{Signal}_{i,1})^2 \right]$$

Результати занести у звіт

5.3 Розрахувати відношення сигнал/завада по потужності та оцінити завадозахищенність (формула 5.3):

$$\text{SNR} := \frac{\text{SignalMean}}{\text{Noise}} \quad \text{Kn} := 10 \cdot \log(\text{SNR}, 10)$$

За результатами розрахунків побудувати графік залежності потужності шумів квантування і відношення сигнал/завада від величини кроку квантування.

1. Зберегти отримані спотворені мовні сигнали в файли формату WAV за допомогою функції WRITEWAV.
2. Проаналізувати отримані результати та зробити висновки.

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості
- 2) Хід роботи, де представити:
 - поетапне виконання завдань 1-5 у середовищі MatCAD з описом та поясненнями дій та розрахунковими результатами;
 - таблиця з розрахунковими значеннями і графікі залежності шумів квантування і відношення сигнал/завада від величини кроку квантування;
 - скрін-шоти сигналоскопів отриманих згідно завдання 3;
- 3) Висновки за результатами досліджень та роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. Дайте визначення квантування за рівнем.
2. Для чого здійснюється квантування аналогового сигналу?
3. Що таке шум квантування? Потужність шумів квантування?
4. Яке оптимальне значення кроку квантування для мовного сигналу?

Перетворювачі інформації. Дослідження перетворювача коду в напругу

Мета роботи – вивчити принцип дії перетворювача коду в напругу (ПКН), побудованого на резисторах двох номіналів (з матрицею опорів R-2R), реалізованого у середовищі Multisim.

Теоретичні відомості

Перетворювачі коду в напругу використовують у аналогово-цифрових перетворювачах для формування еталонної напруги, яка компенсує вхідну. У ряді випадків вони застосовуються як самостійні пристрої, що перетворюють цифрові команди управління в аналогові керуючі сигнали. Будь-яке n-розрядне

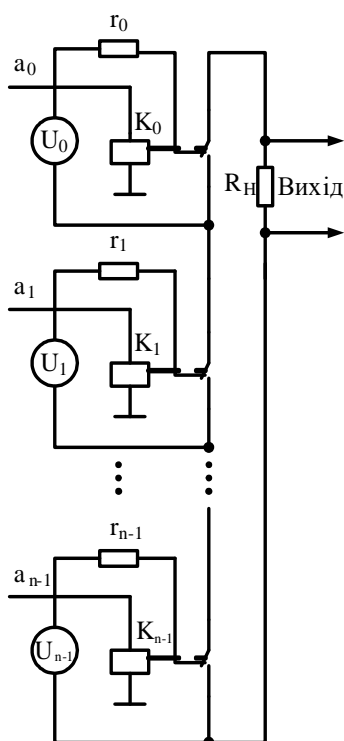


Рисунок 6.1 – ПКН з еталонними джерелами напруги

двійкове число N може бути представлене у вигляді суми ступенів двійки

$$N = 2^{n-1} \cdot a_{n-1} + \dots + 2^i \cdot a_i + \dots + 2^0 \cdot a_0 = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i \cdot a_i \quad (6.1)$$

де a_i – цифра відповідного розряду коду (1 або 0), перетворення коду в напругу зводиться до створення набору еталонних величин (напруги, струмів, опорів) з вагами, що визначаються цілими ступенями числа 2, і подальшого їх підсумовування.

Включення в суму даного еталона визначиться значенням цифри в даному розряді коду. За наявності одиниці в даному розряді еталон включається в суму.

Таким чином, можна представити схеми перетворювачів коду в напругу з еталонними джерелами напруги або

струму та з еталонними опорами. В ПКН з еталонними джерелами напруги (рис. 6.1) значення напруги розрядів визначаються таким чином:

$$U_0 = 2^0 \cdot \Delta U; U_1 = 2^1 \cdot \Delta U; \dots; U_i = 2^i \cdot \Delta U; \dots; U_{n-1} = 2^{n-1} \cdot \Delta U. \quad (6.2)$$

Кожне з джерел характеризується внутрішнім опором r_i . Включення еталонних джерел проводиться за допомогою ключів K_i , що керуються кодом. Якщо перетворюється деякий код $a_n - 1, \dots, a_i, \dots, a_0$, напруга на виході перетворювача визначиться з урахуванням співвідношення

$$\sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot U_i - i \cdot \left(\sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot r_i + R_n \right) = 0, \quad (6.3)$$

звідки струм в колі навантаження i буде знайдений у вигляді

$$i = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot U_i}{\sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot r_i + R_n}, \quad (6.4)$$

а вихідна напруга

$$U_{\text{вих}} = i \cdot R_n = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot U_i \cdot \frac{R_n}{\sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot r_i + R_n} = k_m \cdot \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot U_i, \quad (6.5)$$

де k_m — масштабний коефіцієнт, що дорівнює

$$k_m = \frac{R_n}{\sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot r_i + R_n}. \quad (6.6)$$

Вихідна напруга буде пропорційна вхідному двійковому числу

$$U_{\text{вих}} = k_m \cdot \Delta U \cdot \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i. \quad (6.7)$$

Точність перетворення залежить від сталості масштабного коефіцієнта і стабільності еталонних напруг. В даній схемі k_m залежить від коду, що перетворюється, тому похибка перетворення також буде функцією коду і досягне максимального значення при перетворенні найбільшого числа, коли будуть включені всі еталонні джерела напруги.

Для зниження похибки необхідно забезпечити виконання нерівності $\sum_{i=0}^{n-1} r_i \ll R_n$. В опір r_i слід підключати перехідний опір комутуючого елемента.

Перетворювачі на резисторах двох номіналів (рис. 6.2) є найбільш поширеними. В них використовується лише одне джерело еталонної напруги. Перетворювач є дільником напруги з коефіцієнтом передачі напруги, що змінюється в два рази при переході від розряду до розряду. У кожному розряді встановлено два ключа, що керуються кодами відповідних розрядів. Якщо значення цифри в даному розряді дорівнює 0, плече дільника підключається до спільної шини, якщо в даному розряді 1, до дільника підключається джерело еталонної напруги $U_{ет}$.

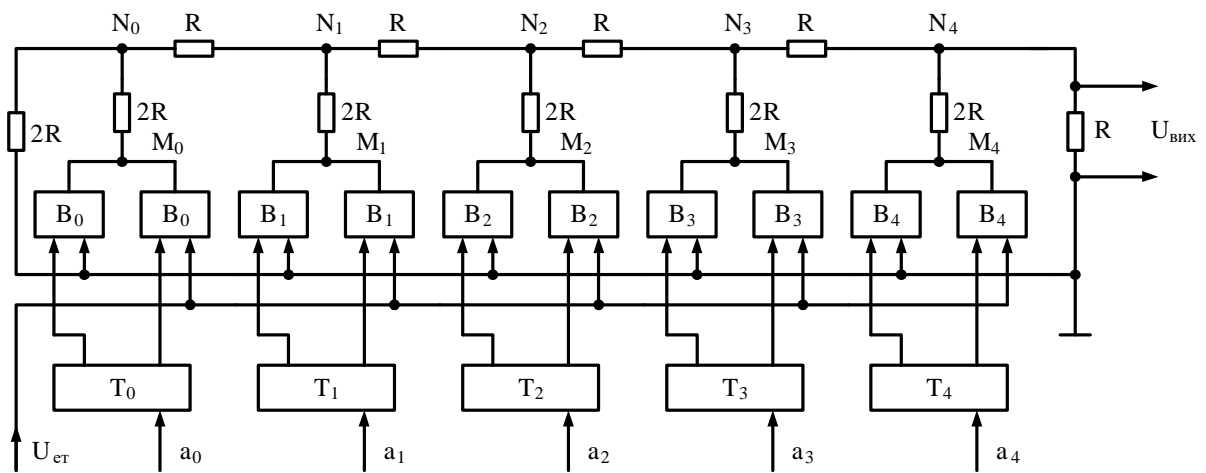


Рисунок 6.2 – ПКН на резисторах двох номіналів

Далі на прикладі п'ятирозрядного ПКН буде показано, що внесок кожного розряду у вихідну напругу пропорційний значенню розряду. При перетворенні коду 10000 (підключений еталон в старшому розряді) еквівалентна схема ПКН матиме вигляд, як показано на рис. 6.3.

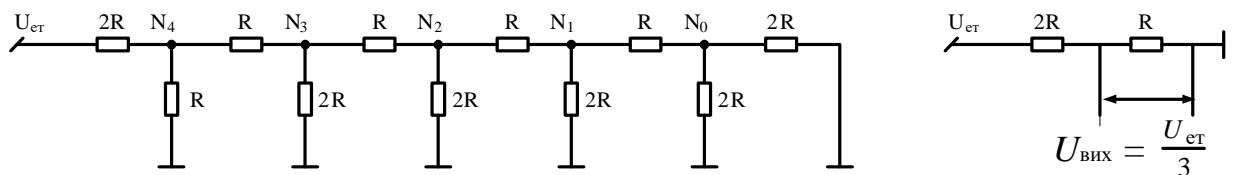


Рисунок 6.3 – Матриця R-2R

Вихідна напруга буде дорівнювати $U_{em}/3$. Для випадку, коли перетворюється код 01000, еквівалентна схема приведена на рис. 6.4.

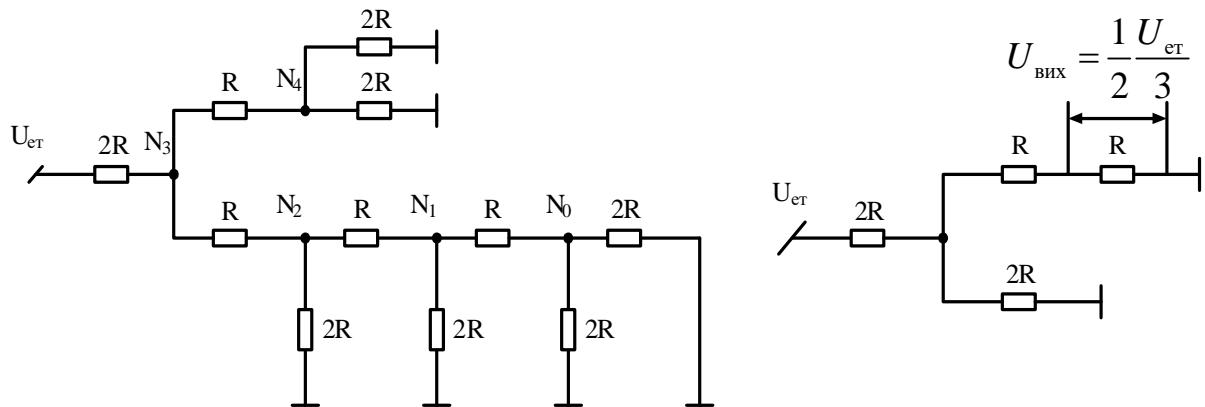


Рисунок 6.4 – Схема після перетворення коду 01000

З рисунка 6.4 видно, що $U_{вих} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{em}}{3}$, тобто коефіцієнт передачі еталонної напруги зменшився в два рази. Якщо скласти еквівалентні схеми для решти випадків, то можна буде записати вираз для одного доданку у вигляді

$$U_{вих_i} = \frac{U_{em}}{3} \cdot \frac{2^i \cdot a_j}{2^{n-1}}. \quad (6.8)$$

При перетворенні довільного коду

$$U_{вих_i} = \frac{U_{em}}{3 \cdot 2^{n-1}} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} 2^i \cdot a_i. \quad (6.9)$$

Максимальне значення вихідної напруги буде при перетворенні коду 11111:

$$U_{вих_{max}} = \frac{U_{em}}{3 \cdot 2^{n-1}} \cdot (2^n - 1). \quad (6.10)$$

Коефіцієнт використання еталонної напруги k_{em} при великій кількості розрядів визначиться виразом

$$k_{em} = \frac{U_{вих_{max}}}{U_{em}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2^n - 1}{2^{n-1}} \approx 0,67. \quad (6.11)$$

Використання еталонної напруги можна покращити, якщо виключити з схеми резистор $2R^*$. В цьому випадку $k_{em} \approx \frac{2^n - 1}{2^{n-1}} \approx 1$.

Точність перетворення в даній схемі не залежить від величини навантаження R_H . Проте із зменшенням R_H зменшується масштаб перетворення. Тому обирають $R_H \gg R$.

Похибка даного ПКН визначається точністю підбору і стабільністю резисторів (особливо в старших розрядах), стабільністю еталонної напруги, стабільністю параметрів ключових схем. Перевагою розглянутої схеми є наявність усього двох номіналів резисторів, простота схеми, висока точність перетворення. Схема на резисторах двох номіналів може використовуватись також у поєднанні з еталонними джерелами струму, причому отримані результати будуть аналогічні. Зараз серійно випускаються мініатюрні збірки резисторів типу R-2R, призначені для використання в схемах перетворювачів коду в напругу, а також інтегральні мікросхеми, у складі яких є регістри і логічні збірки.

Завдання та послідовність виконання роботи

1. У програмному середовищі Multisim зібрати схему, зображену на рис. 6.5.

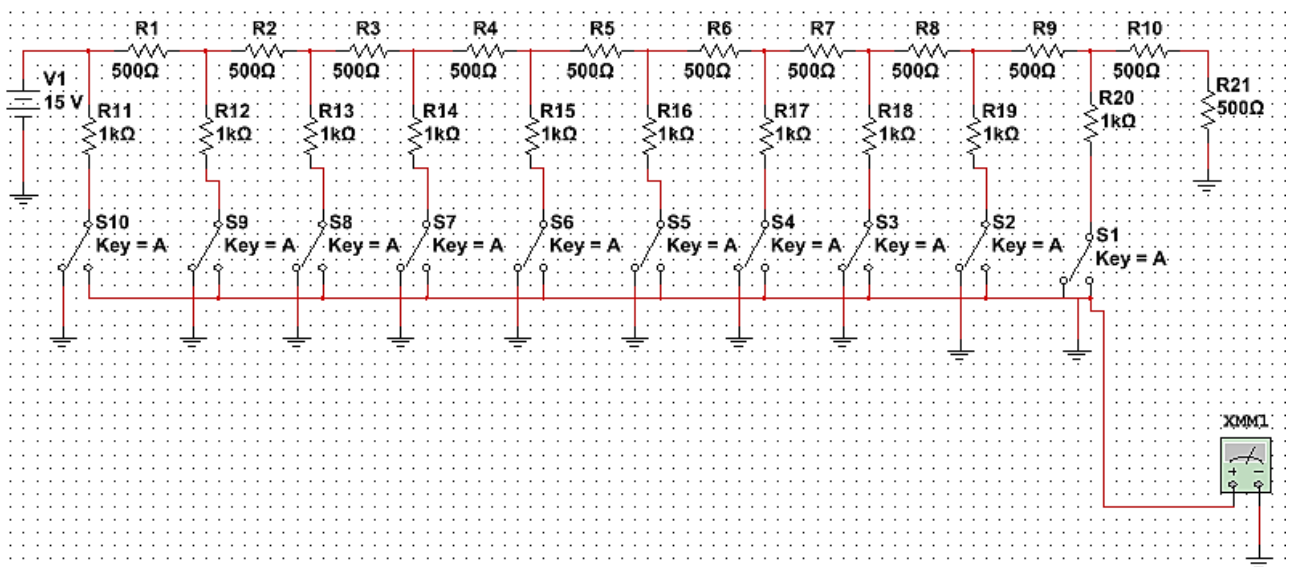


Рис 6.5 – Десятирозрядний перетворювач код-напруга

Використані елементи і прилади у схемі на рис. 6.5:

R1-R10, R21 та R11-R20 – резистори номіналом 500 Ом та 1 кОм відповідно;
S1-S10 – ключові елементи розташовані у групі *Electro_mechanical*, підгрупі

Supplementary_contacts (у реальності використовуються ключі на основі транзисторів);

ХММ1 – мультиметр (Multimetr).

2. Для десяти обраних значень вхідного коду виміряти значення вихідної напруги і побудувати графік залежності між вихідною напругою ПКН і вхідним числом $U_{вих} = f(N)$. Рекомендується обирати рівновіддалені значення N в діапазоні чисел (десяткових) від 0 до 1000 (попередньо, користуючись формулою (6.1), слід заповнити табл. 6.1).

Таблиця 6.1. – вихідні дані до дослідження ПКН

| N =2 ⁿ | | | | | | | | | | | U _{вих} , В |
|----------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------------------------|
| | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
| 100 | | | | | | | | | | | |
| 200 | | | | | | | | | | | |
| 300 | | | | | | | | | | | |
| 400 | | | | | | | | | | | |
| 500 | | | | | | | | | | | |
| 600 | | | | | | | | | | | |
| 700 | | | | | | | | | | | |
| 800 | | | | | | | | | | | |
| 900 | | | | | | | | | | | |
| 1000 | | | | | | | | | | | |

3. Визначити коефіцієнт використання напруги живлення $K_{вих}$ як відношення максимальної вихідної напруги ПКН до напруги джерела живлення ($U_{em} = 15В$) див. формулу 6.11.

4. Послідовно замикаючи ключові елементи S1-S10 (починаючи з молодшого розряду), вимірювати значення вихідної напруги ПКН, що

відповідають всім розрядам коду. Визначити відношення між значеннями отриманої напруги. Результати занести до табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – значення вихідної напруги ПКН відповідно до значення розряду

| Значення розряду | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| $U_{вих}, В$ | | | | | | | | | | |

5. Побудувати графік залежності $U_{вих}$ від значення розряду (згідно заповненої табл. 6.2)

6. Проаналізувати отримані результати та зробити висновки.

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості
- 2) Хід роботи, де представити:
 - скрін-шоти зібраної робочої схеми експериментального дослідження перетворювача код-напруга;
 - таблиці з відповідними вимірюваннями, розрахунками та поясненнями;
 - побудовані за допомогою програмних засобів або від руки графіки залежності згідно завдання;
- 3) Висновки за результатами досліджень та роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. Опишіть принцип роботи простого ПКН.
2. Як працює ПКН на базі резистивної матриці R-2R?
3. Що таке коефіцієнт використання напруги живлення?
4. Чим визначається точність цифро-аналогового перетворення?
5. Поясніть отримані експериментальні результати.

Дослідження цифро-аналогових перетворювачів сходового типу

Мета роботи – дослідження принципу роботи ЦАП сходового типу, реалізованого у середовищі Multisim.

Теоретичні відомості

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП; англ. DAC – Digital-to-Analog Converter) – електронний пристрій для перетворення цифрового (двійкового) сигналу на аналоговий. Як правило ЦАП отримує на вхід цифровий сигнал в імпульсно-кодової модуляції РСМ. Перетворення різних стиснутих форматів в РСМ виконується відповідними кодеками. ЦАП використовується завжди, коли необхідно перетворити сигнал з цифрового формату в аналоговий. Наприклад: в системах керування технологічними процесами, програвачах CD/DVD, звукових картах персонального комп'ютера.

В найбільш простому випадку ЦАП може бути реалізований за схемою токового суматора, наприклад – на основі інверсного диференціального підсилювача, на інверсному вході якого відбувається складання струмів. Зважаючи, що при заземленому неінверсному вході, операційний підсилювач, охоплений від'ємним зворотнім зв'язком, буде підтримувати нульовий потенціал й на інверсному вході. Як наслідок, вхідні струми будуть однозначно визначатись вхідними напругами та опорами вхідних резисторів, а струм у ланцюзі зворотного зв'язку – вихідною напругою та опором резистора зворотного зв'язку, при цьому сума вхідних струмів буде дорівнювати струму зворотного зв'язку, а вихідна напруга буде пропорційною сумі вхідних.

Приклад реалізації ЦАП показано на рис. 7.1 опори вхідних резисторів R_1 - R_n мають співвідноситись як основа системи числення (для двійкової системи кожен наступний в 2 рази більший)

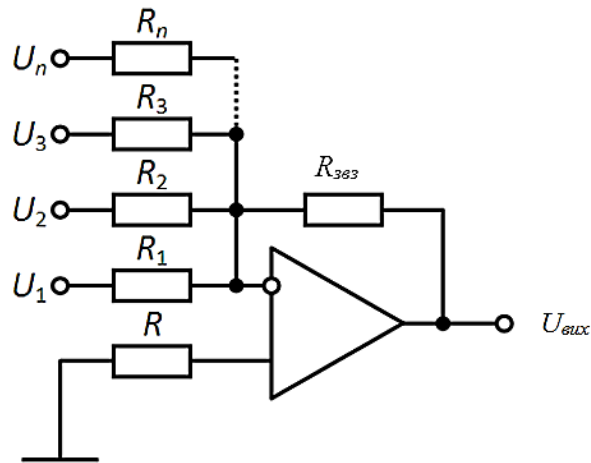


Рис 7.1 – ЦАП на основі аналогового суматора

У відеоадаптерах, звукових картах та інших пристроях ПК найбільш часто застосовують ЦАП зваженого типу (з ваговими резисторами) та ЦАП сходового типу.

В ЦАП *зваженого типу* кожному біту двійкового коду, що перетворюється, відповідає резистор або джерело струму, підключені на загальну точку підсумовування. Сила струму джерела пропорційна вазі біта, якому він відповідає. Таким чином, всі ненульові біти коду підсумовуються з вагою. Ваговий метод один з найшвидших, але йому властива низька точність через необхідність наявності набору безлічі різних прецизійних джерел або резисторів і непостійного імпедансу. З цієї причини ЦАП зваженого типу мають розрядність не більше восьми біт. Приклад ЦАП зваженого типу було розглянуто на минулій лабораторній роботі.

В ЦАП *сходового типу* (ланцюгова $R-2R$ -схема) значення створюються в спеціальній схемі, що складається з резисторів з опорами R і $2R$, званої матрицею постійного імпедансу, яка має два види включення: пряме – матриця струмів і інверсне – матриця напруг. Застосування однакових резисторів дозволяє істотно поліпшити точність у порівнянні з ЦАП зваженого типу, так як порівняно просто виготовити набір прецизійних елементів з однаковими параметрами. З лазерної підгонкою плівкових резисторів, розташованих на одній підкладці гібридної мікросхеми, досягається точність 20-22 біти.

Основний час на перетворення витрачається в операційному підсилювачі, тому він повинен мати максимальну швидкодiю. Швидкодiя ЦАП одиниці мікросекунд і нижче.

Схема ЦАП сходового типу (рис. 7. 2) складається з резистивної матриці R - $2R$ і підсумуючого підсилювача. Перевага використання матриці полягає в тому, що в ній використовуються резистори тільки двох номіналів. Опір кожного з резисторів $R_1...R_5$ на рис. 7.2 дорівнює 20 кОм , а резисторів $R_6...R_8$, R_0 – 10 кОм . Опір горизонтально розташованих резисторів "сходів" рівно в 2 рази більше опорів вертикальних.

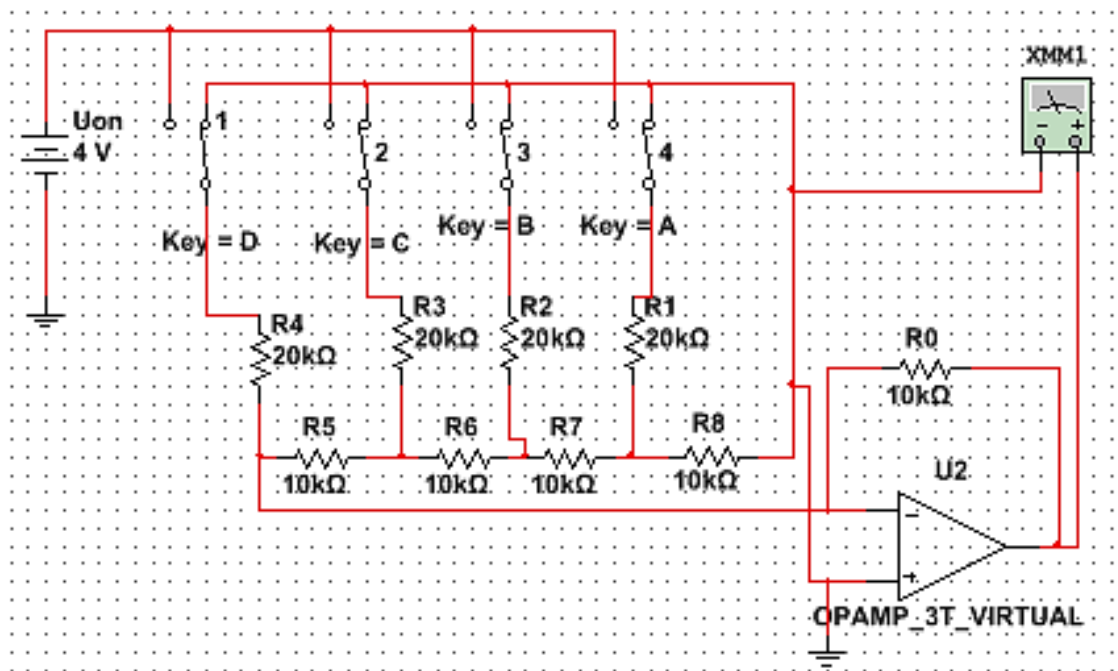


Рисунок 7.2 – Принципова схема ЦАП сходового типу

ЦАП сходового типу аналогічний ЦАП з ваговими резисторами. У розглянутому прикладі схеми використовується опорна напруга $3,75\text{ В}$. Перехід до кожної наступної двійкової послідовності на вході призводить до збільшення аналогового вихідного сигналу на $0,25\text{ В}$. Опорна напруга обрана рівною $3,75\text{ В}$.

Вихідна напруга ЦАП на рис. 7. 2 визначається за формулою:

$$U_o = U_{on} R_o [S_1 2^{n-1} + S_2 2^{n-2} + \dots + S_i 2^{n-i} + S_n] / R^{2n}, \quad (7. 1)$$

де S_i – значення цифрового сигналу (0 чи 1) на i -му вході, n – число розрядів перетворення (у випадку рис 7.2 $n = 4$), R – опір резистора матриці R-2R ($R = 10$ кОм для схеми на рис. 7.2).

Варіант ЦАП з використанням в якості комутуючого пристрою двійкового-десятькового лічильника 74160 (K155IE9) показаний на рис. 7. 3.

З порівняння ЦАП на рис. 7.2 і 7.3 видно, що в другому відсутнє джерело опорної напруги: його роль виконує сам лічильник-комутатор. Еквівалентне значення U_{on} можна отримати на підставі формули (7.1) і результатів подальших осцилографічних вимірювань.

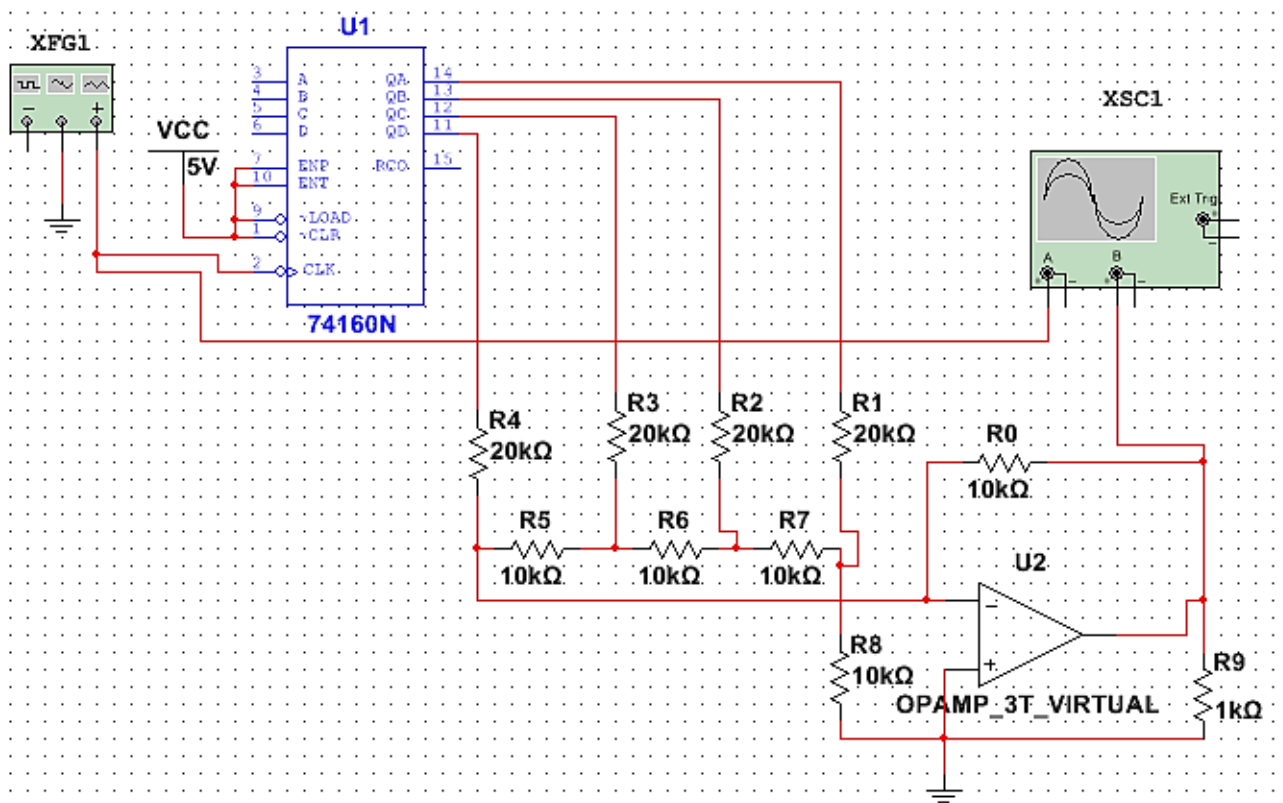


Рисунок 7.3 – Принципова схема чотирирозрядного ЦАП сходового типу на базі лічильника 74160

Призначення входів лічильника 74160:

A, B, C, D – входи попередньої установки, на які подаються 0 або 1 для завдання відповідного входу;

ENT, ENP – використовується для дозволу рахунку;

LOAD – використовується для установки на Q_i значень входів А, В, С, D (LOAD = 0). При LOAD = 1 відбувається рахунок від встановленого коду;
 CLK – вхід для подачі імпульсу (перемикання лічильника відбувається по передньому фронту перепаду 0-1);
 CLR – використовується для зброшу схеми;
 QA, QB, QC, QD – інформаційні виходи;
 RCO – є зворотним виходом MAX / MIN;

Завдання та послідовність виконання роботи

1. У програмному середовищі Multisim зберіть схему, зображену на рис 7.2. Використані компоненти: резистори: 10 кОм та 20 кОм; ключові елементи Key A-D (розташовані у групі Electro_mechanical, підгрупі Supplementary_contacts); мултимерт; операційний підсилювач.
2. Запишіть у другий стовпчик табл. 7.1 всі можливі комбінації перемикачів А, В, С, D
3. Користуючись формулою (7.1) розрахуйте вихідну напругу ЦАП для всіх 16 комбінацій перемикачів А, В, С, D і порівняйте отримані результати з результатами моделювання. Результати зведіть у таблицю 7.1

Таблиця 7.1 – результати дослідження ЦАП

| № | Код (комбінації А, В, С, D) | Напруга розрахована, В | Напруга виміряна, В | Різниця напруг, В |
|-----|-----------------------------|------------------------|---------------------|-------------------|
| 0 | | | | |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... |

4. Замініть перемикачі А, В, С, D у схемі на рис. 7.2 програмними перемикачами, що імітують послідовний в часі з інтервалом 5 с прояв кодових комбінацій 0001 0010, 0100 і 1000, схему скопіюйте у відповідний розділ звіту.

5. У програмному середовищі Multisim зберіть схему, зображену на рис 7.3. Використані компоненти: резистори: 10 кОм та 20 кОм, двійково-десятковий лічильник 74160 (розташований у групі TTL); функціональний генератор; осцилограф, операційний підсилювач.

6. Ввімкнути моделювання. Налаштувати параметри осцилографа, як вказано на рис. 7.4.

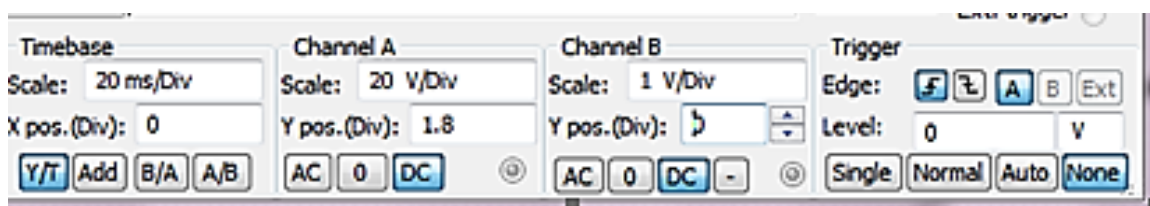


Рисунок 7.4 – Налаштування параметрів осцилографу

7. Зробити скрін-шоти отриманих на кроці №6 осцилограм та занести у звіт у такому порядку: рис. (а) осцилограми сигналів на лічильному вході ЦАП, рис. (б) – осцилограми сигналів на лічильному виході ЦАП. Проаналізувати отримані осцилограми.

8. За допомогою осцилографічних вимірювань обчислити значення максимальної вихідної напруги ЦАП.

9. Використовуючи формулу (7.1) і результати моделювання, розрахуйте еквівалентну напругу U_{on} для схеми на рис.7.3.

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості
- 2) Хід роботи, де представити:
 - скрін-шоти зібраної робочої схеми експериментального дослідження ЦАП сходового типу;

- таблиця з відповідними вимірюваннями, розрахунками та поясненнями;

- побудовані за допомогою програмних засобів осцилограми згідно завдання;

3) Висновки за результатами досліджень та роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. Для чого використовуються ЦАП? Які типи ЦАП ви досліджували?
2. Чим відрізняється ЦАП сходового типу від ЦАП з ваговими резисторами?
3. Що собою являє та на яких елементах може бути побудований ЦАП сходового типу?
4. Яке призначення мають входи лічильника 74160?
5. Поясніть отримані експериментальні результати.

Ефективне кодування з втратою інформації

Мета роботи – отримати навички ефективного кодування з втратою інформації у середовищі MATLAB. Навчитись оцінювати втрати інформації.

Теоретичні відомості

Завдання кодування при відсутності перешкод і при їх наявності істотно різні. Тому розрізняють ефективне (статистичне) або оптимальне кодування та коригуюче завадостійке кодування. При *ефективному кодуванні* ставиться завдання домогтися представлення символів алфавіту джерела повідомлень мінімальним числом елементів кодових символів в середньому на один символ алфавіту джерела повідомлень за рахунок зменшення надмірності коду, що веде до підвищення швидкості передачі повідомлення.

Є три концептуальних способи (економного кодування) стиснення даних. Перший спосіб полягає в зміні вмісту даних, другий – у зміні структури даних, а третій – в одночасній зміні як структури, так і вмісту даних.

Якщо при стисненні даних відбувається зміна їх вмісту, то метод стиснення є незворотнім, тобто при відновленні (розархівуванні) даних з архіву не відбувається повне відновлення інформації. Такі методи часто називаються методами стиснення з регульованими втратами інформації. Ці методи можна застосовувати тільки для таких типів даних, для яких втрата частини вмісту не приводить до суттєвого спотворення інформації. До таких типів даних відносять відео- та аудіодані, а також графічні дані. Методи стиснення з регульованими втратами інформації забезпечують значно більший ступінь стиснення, але їх не можна застосовувати до текстових даних. Прикладами форматів стиснення з втратами інформації можуть бути: JPEG (Joint Photographic Experts Group) для графічних даних, MPG – для відео даних, MP3 – для аудіоданих.

Приклади форматів стиснення без втрати інформації: GIF (Graphics Interchange Format), TIFF (Tagged Image File Format) – для графічних даних; AVI – для відеоданих; ZIP, ARJ, RAR, CAB, LH – для довільних типів даних.

Для того щоб втрати інформації були малопомітні видаляються її високочастотні складові, тобто спершу видаляються ті символи алфавіту, які найчастіше поодинокі трапляються в повідомленні. Ця процедура еквівалентна фільтрації.

Для прикладу розглянемо стиснення з втратою даних двохмірних масивів (зображень). Розглянемо 8-ми бітні монохромні bmp зображення, кожен піксель $x(n) \in X$ яких приймає одне з проміжних значень з діапазону 0 (білий) до 255 (чорний). Зображення представляється у вигляді таблиці, тобто індексу n можна поставити у відповідність двійку індексів $n \in (i, j)$. Тут i – номер стовпця двохмірної матриці, а j – номер рядка. Зменшити розмір матриці A можна використовуючи фільтрацію. Хороші результати фільтрації забезпечують нелінійні білатеральні фільтри.

Для даного зображення X , тобто множини пікселів x_n , неспадної функції $U(x)$ та околу пікселя N_r задавшись параметром регуляризації λ білатеральний фільтр мінімізуючи функціонал $E(y)$ дає змогу отримати відфільтроване зображення (3.1).

$$E(y) = \sum_n (x_n - a_n)^2 + \lambda \sum_{k \in N_r} U(a_k - a_n)^2 \quad (3.1)$$

Формула білатерального фільтра запишеться у вигляді:

$$y(n) = \frac{x_n + \sum_{N_r} w_{nk} a_k}{1 + \sum_{N_r} w_{nk}}, \quad (3.2)$$

$$\text{де } w_{nk} = \frac{\lambda}{1 + (a_n - a_k)^2} \frac{1}{1 + \text{dist}(a_n - a_k)}.$$

Чим ближче a_k до a_n як за яскравістю так і за відстанню, тим w_k більше.

Використовуючи піраміду Лапласа можна відкинути частину інформації з зображення. При цьому отримаємо нову матрицю A за схемою:

$$\left| \begin{array}{cccc} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{array} \right| \Rightarrow \left| \begin{array}{l} a_{11} = \frac{(x_{11} + x_{12} + x_{21} + x_{22})}{4} \quad a_{21} = \frac{(x_{13} + x_{14} + x_{23} + x_{24})}{4} \\ a_{21} = \frac{(x_{31} + x_{32} + x_{41} + x_{42})}{4} \quad a_{22} = \frac{(x_{33} + x_{34} + x_{43} + x_{44})}{4} \end{array} \right| \quad (3.3)$$

Обчислити ступінь подібності вхідного X та вихідного A зображень можна з використанням кількісних критеріїв.

На даний час не існує універсального кількісного критерію оцінювання якості зображень, на який можна спиратись при рішенні конкретних прикладних задач. Це пов'язано з тим, що остаточна реакція спостерігача дуже складна, часто неоднозначна і залежить багато в чому від чисто суб'єктивних причин. Тому, при оцінці якості зображення користуються окремими, частковими критеріями, кожен з яких відображає якусь певну особливість зображення. В залежності від того, яку інформацію бажано виявити, для спостережуваного зображення, використовують той чи інший частковий критерій.

В першу чергу під якістю отриманого зображення A розуміють міру відповідності його зображенню оригіналу X . Через втрату частини інформації зображення A та X не будуть тотожними.

Часто розглядають три критерії якості реконструйованого зображення:

- відношення сигнал-завада;
- середньоквадратичне відхилення;
- роздільна здатність.

Відношення сигнал-завада $q_{ш}$ визначають як відношення середнього значення до середнього відхилення, що рівне кореню квадратному із δ_B^2 .

$$q_{ш} = \frac{\bar{A}}{\sigma_B(A)}. \quad (3.4)$$

Середньоквадратичне відхилення $\Delta^2(A)$ і проінтегроване середньоквадратичне відхилення Δ^2 визначаються виразами

$$\Delta^2(n) = \frac{[X_n - A_n]^2}{X_n^2} \quad (3.5)$$

та

$$\Delta^2 = \frac{\sum_{n=1}^{i*j} [A_n - X_n]^2}{\sum_{n=1}^{i*j} [X_n]^2} \quad (3.6)$$

відповідно. Перша величина є функцією, друга – інтегральним показником.

Ще одним критерієм якості зображення є роздільна здатність, яка визначає мінімальну відстань між двома сусідніми елементами зображення при якій вони ще розрізняються.

Завдання та послідовність виконання роботи

1. Підготувати засобами растрового графічного редактора (Paint, Photoshop) зображення (у кожного своє власне) з параметрами: формат bmp, розмір 512x512 пікселів, кількість градацій сірого – 256.

2. Завантажити зображення у середовище MATLAB, сформувавши масив X .

Для цього використати команду $I = \text{imread}(\text{'шлях до файлу/file1.jpg'})$ (див. приклад рис. 8.1 (1)). При цьому I присвоюється вміст файлу file1.jpg. Для зображення file1.jpg розмірністю $N \times M$ пікселів I – двомірний масив, кожен елемент якого містить значення інтенсивності свічення відповідного пікселя. Для звернення до елементів масиву використовується індексування. Наприклад $M = I(i, j)$ – змінній M присвоюється значення елемента масиву M .

3. Вивести зображення за допомогою функції $\text{imshow}(I)$ ((2) на рис. 8.1. Результат скопіювати у звіт

4. Розрахувати значення ентропії для вихідного зображення використовуючи спеціальну функцію $E = \text{entropy}(I)$, що повертає значення ентропії для зображення у відтінках сірого

5. Використовуючи вираз (3.3), здійснити фільтрацію вихідного зображення (фільтроване зображення – масив A). Вивести зображення на екран, та скопіювати результат у звіт.

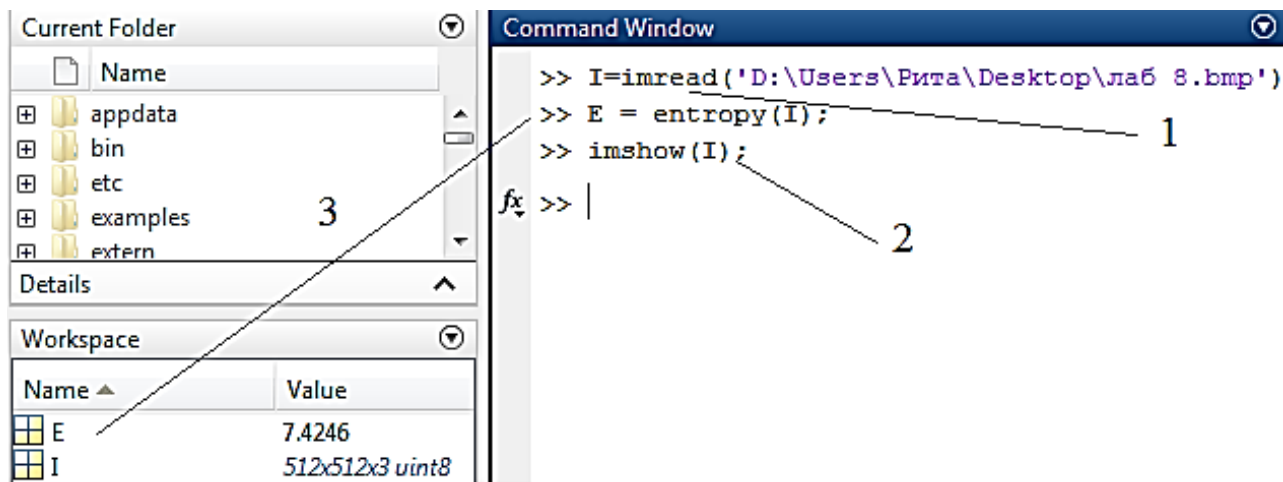


Рисунок 8.1 – приклад застосування спеціальних функцій середовища Matlab для завантаження зображення (1), виведення на екран (2) та розрахунку його ентропії (3)

6. Обчислити значення ентропії для зображень A .
7. Використовуючи формулу (3.6) обчислити інтегральне середньоквадратичне відхилення для зображень X та A . Оскільки розмірність масивів, що відповідають зображенням різна, то перед цим проведіть перетворення фільтрованого зображення за схемою:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} a_{11} & a_{11} & a_{21} & a_{21} \\ a_{11} & a_{11} & a_{21} & a_{21} \\ a_{21} & a_{21} & a_{22} & a_{22} \\ a_{21} & a_{21} & a_{22} & a_{22} \end{vmatrix}$$

5. Вивести одержані результати.
6. Оформити звіт.

Зміст звіту:

- 1) підготоване згідно вимог пункту 1 завдання своє фото;

- 2) код програми з коментарями для проведення фільтрації зображень;
- 3) зображення – результат фільтрації;
- 4) код програми та обчислені значення ентропій зображень;
- 5) висновки до роботи з аналізом отриманих результатів.

Питання для самоперевірки

1. Сформууйте основні цілі ефективного кодування.
2. За рахунок чого відбувається стиснення інформації при застосуванні ефективного кодування.
3. Що називається надмірністю коду? Які причини появи надмірності?
4. Призначення основних форматів графічних зображень.
5. Як відбувається стиснення інформації з втратами?
6. Як змінюється ентропія в результаті ефективного кодування?
7. Проаналізуйте отримані Вами результати.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

Дослідження та вивчення критеріїв оцінки завадостійкого кодування

Мета роботи – вивчити принципи завадостійкого кодування, отримати навички моделювання завадостійких кодів за допомогою програмного середовища Multisim.

Теоретичні відомості

Високі вимоги до достовірності і надійності передавання, обробки та зберігання інформації в системах передачі даних, в обчислювальних системах і мережах, та різного роду інформаційних системах вимагають такого кодування інформації, яке забезпечувало б безпомилкову її передачу, а в разі появи помилок – їх виявлення та виправлення.

При роботі пристроїв обчислювальної техніки та телекомунікаційної апаратури можлива поява помилок у оброблюваних цифрових даних. Причинами збоїв можуть бути потужні електромагнітні перешкоди, різка зміна напруги живлення, старіння радіоелементів, ненадійний контакт роз'ємів, радіоактивне випромінювання природних і штучних джерел і т. ін. Збої проявляються у вигляді випадкової зміни одного або декількох бітів машинного слова (замість одиниці в окремих розрядах передається нуль або навпаки).

Автоматичне виявлення і виправлення помилок супроводжується введенням надмірності в дані, що передають або зберігають. Для цієї мети розроблені спеціальні коди, в які крім інформаційних бітів i_1, i_2, i_m додатково вводять контрольні (перевірочні) біти $k_1 k_2 \dots k_m$. Контрольні біти дозволяють перевіряти цілісність інформаційних бітів машинного слова, а найбільш складні коди можуть не тільки виявити, але і виправити невірно прийняті біти.

При виборі контрольних символів використовують умови, перевірка яких при декодуванні дає можливість виявляти і виправляти помилки. Коди, що володіють цією властивістю, називають *завадостійкими*.

Розроблені завадостійкі коди дозволяють вирішувати різні завдання: виявити одиночну помилку, виявити і виправити єдину помилку, виявити і виправити кілька помилок. Перші коди називаються виявляючими, а другі – коригуючими кодами.

На передавальній стороні формування завадостійкого коду здійснюють за допомогою спеціального пристрою – кодера. Виявлення і виправлення помилок на приймальній стороні виконують за допомогою пристроїв, які називаються декодерами.

У даній лабораторній роботі кодер і декодер будують за допомогою *комбінаційних цифрових пристроїв* (логічні елементи, які виконують функцію нерівнозначності).

Найпростіший код, призначений для виявлення однієї помилки (точніше – для виявлення непарного числа помилок), заснований на додаванні до інформаційних бітів одного контрольного біта. При цьому контрольний біт повинен бути таким, щоб сумарне число одиниць в утвореному машинному слові було парним. Біт, що додається називається бітом паритету.

Визначення контрольного біту x_k зводиться до підсумовування усіх інформаційних бітів x_i по модулю 2

$$x_k = \sum_{i=1}^{n_0} x_{i \bmod 2} \quad (9.1)$$

Якщо $x_k = 0$, то помилки непарної кратності відсутні. Якщо $x_k = 1$, то у прийнятій комбінації наявні спотворені символи.

При побудові коду з парною кількістю одиниць контрольний символ зазвичай розташовують наприкінці кодової комбінації. Принцип утворення кодових комбінацій такого коду показаний у табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Принцип утворення результуючої кодової комбінації з перевіркою на парність

| Вихідний код | Контрольний біт | Результуючий код |
|--------------|-----------------|------------------|
| 10111 | 0 | 101110 |
| 11111 | 1 | 111111 |
| 10011 | 1 | 100111 |

Аналогічні властивості має код з *непарною кількістю одиниць*, у якому вибір контрольного символу здійснюється з умов забезпечення непарності кількості одиниць у кодовій комбінації.

При використанні коду з парною кількістю одиниць можлива поява кодової комбінації, що складається лише з нулів, що часто представляють в каналі паузами – відсутністю електричного сигналу. Таке явище неможливе, якщо застосовується код з непарною кількістю одиниць, тому що кодова комбінація такого коду завжди містить хоча б одну одиницю, що представляється зазвичай в каналі електричним імпульсом.

Перевагою розглянутих кодів є простота кодуєчих та декодуєчих пристроїв, мала надмірність. До недоліків варто віднести малу здатність виявити помилку.

Коригувальний код Хемінга, призначений для виявлення і виправлення одиничної помилки. При побудові такого коду кожний з k перевірючих символів визначається як результат підсумовування по модулю 2 визначеного сполучення інформаційних символів. У результаті сума інформаційних і контрольних символів, що перевіряються, завжди буде парною. При прийманні комбінацій такого коду останні піддаються аналогічним перевіркам, що охоплюють інформаційні і контрольний символи. При наявності однократної помилки в символах, що входять у перевірку, контрольна сума на приймальному боці виявляється непарною. Оскільки інформаційні символи входять у перевірючі суми в різних сполученнях, то кількість непарних контрольних сум може бути, різною (від 0 до k). У кодї Хемінга перевірки на парність організовані таким чином, що виходить число,

яке вказує номер позиції, на якій відбулося спотворення. Приклад для самокорегуючого коду Хемінга [7,4], де 7 – загальна кількість бітів, 4 – інформаційні біти, перевірні символи k формуються за наступним правилом:

$$\begin{aligned} k_0 &= a_1 = a_3 \oplus a_5 \oplus a_7, \\ k_1 &= a_2 = a_3 \oplus a_6 \oplus a_7, \\ k_2 &= a_4 = a_5 \oplus a_6 \oplus a_7, \end{aligned} \quad (9.2)$$

Індекси біля контрольних символів ($k_0 = a_1$) вказують на номер позиції перевірного біту у кодовій комбінації. Тільки в одну перевірку входять символи, двійкові номери позицій яких є цілими степенями двійки і ці номери для двійкового коду визначають за наступним правилом $N = 2^i$ ($i=0,1,2,..n+1$ - кількість перевірних бітів визначається як різниця між загальною кількістю та кількістю інформаційних бітів). Для зручності знаходження позиції перевірного біту коду Хемінга можна користуватись таблицею виду 9.2

Таблиця 9.2 – Знаходження позиції перевірного символу коду Хемінга

| № перевірки | № контроль-ного біту | № перевірної позиції | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | ... |
| 1 | 1 | | | x | | x | | x | | x | | x | | x | | x | .. |
| 2 | 2 | | | x | | | x | x | | | x | x | | | x | x | .. |
| 3 | 4 | | | | | x | x | x | | | | | x | x | x | x | .. |
| 4 | 8 | | | | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | .. |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | | ... |

У табл. 9.2 хрестиками відзначені номери позицій, що включаються у послідовні перевірки. На приймальному кінці для перевірних символів будується аналогічна до (9.2) комбінація:

$$\begin{aligned} k'_0 &= a_3 \oplus a_5 \oplus a_7, \\ k'_1 &= a_3 \oplus a_6 \oplus a_7, \\ k'_2 &= a_5 \oplus a_6 \oplus a_7, \end{aligned} \quad (9.3)$$

Якщо $k_m \neq k'_m$, при будь-якому натуральному m , то при передаванні кодової комбінації виникла помилка, її місце знаходять переводячи двійковий код у десятковий і відраховуючи зліва на право знаходять помилковий розряд та інвертують його. При цьому правило знаходження місця помилки M :

$$M = 2^0 \cdot (k_0 \oplus k'_0) + 2^1 \cdot (k_1 \oplus k'_1) \oplus 2^2 \cdot (k_2 \oplus k'_2), \quad (9.4)$$

Відзначимо, що коди, що виправляють одиничну помилку, можуть використовуватися для виправлення групових помилок. Для цього кодові комбінації записуються у вигляді матриці з такою кількістю елементів у рядку, що перевищує довжину можливої групової помилки. Кодуванням елементів, розташованих у стовпцях матриці, за допомогою коригувального коду вдається виправити групові помилки визначеної довжини.

Завдання та порядок виконання роботи

1. Сформувати біт парності (біт паритету) для заданого байта переданих даних. При виконанні завдання потрібно в порожню колонку таблиці 9.3 записати одиницю або нуль.

Таблиця 9.3 – Знаходження біту парності для заданого байту даних

| № | Байт | Біт парності | № | Байт | Біт парності |
|---|----------|--------------|----|----------|--------------|
| 1 | 10101011 | | 9 | 10110100 | |
| 2 | 10101100 | | 10 | 10110101 | |
| 3 | 10101101 | | 11 | 10110110 | |
| 4 | 10101110 | | 12 | 10110111 | |
| 5 | 10101111 | | 13 | 10111000 | |
| 6 | 10110001 | | 14 | 10111001 | |
| 7 | 10110010 | | 15 | 10111010 | |
| 8 | 10110011 | | 16 | 10111011 | |

2. У програмному середовищі Multisim зібрати схему досліджень коду з формуванням біта паритету, що показана на рис. 9.1.

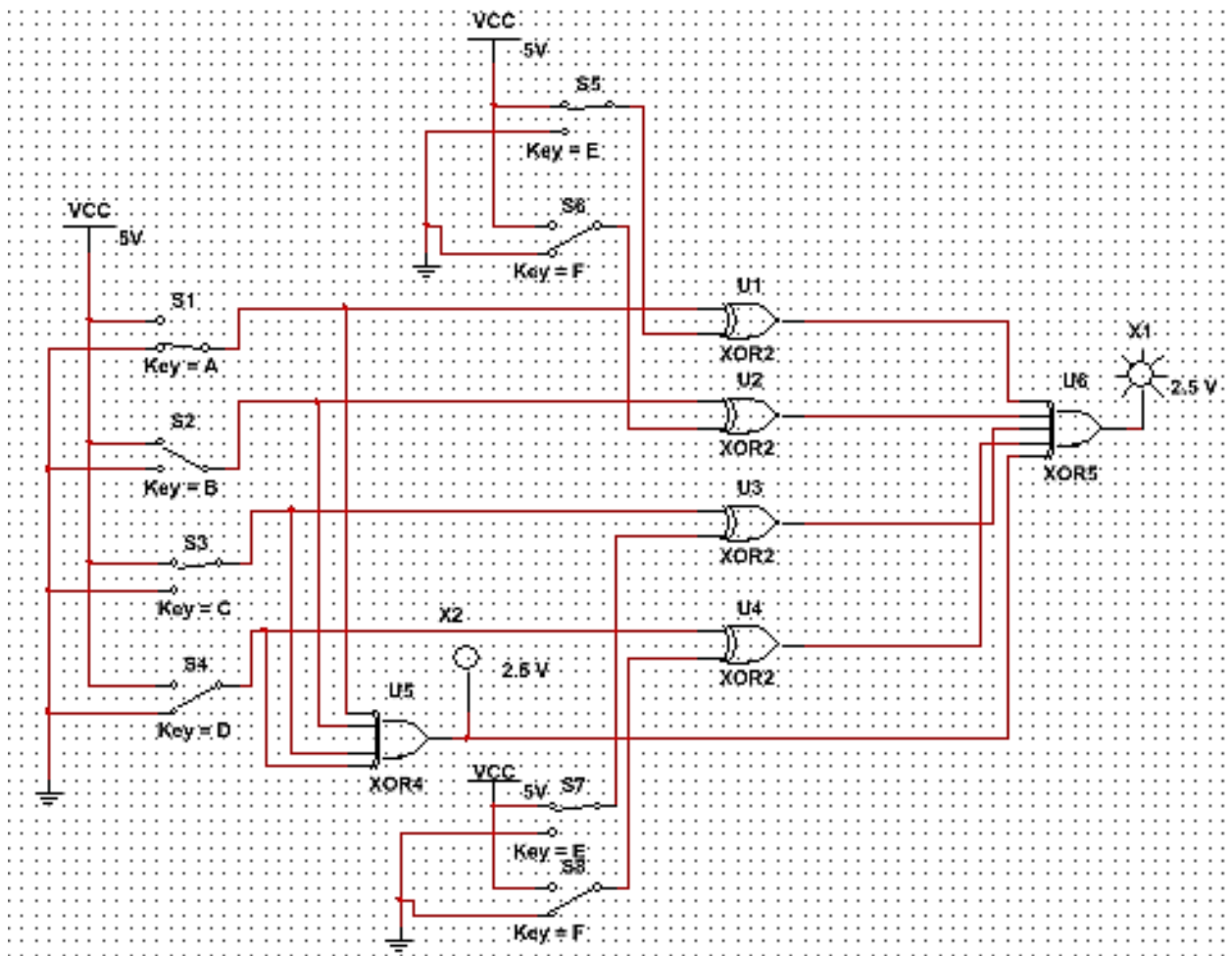


Рисунок 9.1 – Схема експерименту дослідження коду на парність

Використані елементи схеми 9.1:

S1-S8 – ключові елементи розташовані у групі *Electro_mechanical*, підгрупі *Supplementary_contacts*;

U1-U4 – двоххідні елементи «виключне або» (XOR2);

U5 – 4-ри вхідний елемент «виключне або» (XOR4);

U6 – 5-ти вхідний елемент «виключне або» (XOR5), розташовані у групі елементів *Misc Digital*, сімейство *TIL*

VCC- джерело постійної напруги, розташування група *Sources*, підгрупа – *Power_Sources*;

X1-X2 – світлодіод-індикатор, розташування: група – *Indicators*, підгрупа – *Probe*.

Перемикачі S1 ... S4 імітують передану тетраду (чотири інформаційних біта). Перемикачі S5 ... S8 симулюють перешкоди, що виникають при передачі або зберіганні цифрових даних. Нижнє положення перемикачів S5 ... S8 відповідає відсутності спотворень в відповідному розряді. U5 формує біт парності (якщо на вхід подається парне число одиниць, то вихідний сигнал дорівнює нулю).

При цьому світлодіод Х2 не горить. Логічна схема «виключне або» U6 на прийомі здійснює контроль спотворень. Якщо світлодіод Х1 не горить, то вважається, що спотворень немає. Фактично це не так. Поява парного числа спотворень в машинному слові не фіксується (не виявляється) цим пристроєм. Істотним недоліком даного методу контролю спотворень, є те, що такий код здатний лише сигналізувати про наявність рідко виникаючих одиночних збоїв (точніше, непарного числа збоїв).

3. Виконати моделювання процесу передачі інформації (однієї тетради – половини байта). Вихідні дані наведені в таблиці 9.4. Моделювання слід виконати чотири рази при заданих значеннях перешкод (пронумеровані колонки у табл. 9.4). Результати моделювання у вигляді таблиці помістіть у звіт. Прокоментуйте отримані результати.

Таблиця 9.4 – Вихідні дані до завдання 2

| № варіанту | Тетрада | 1 | 2 | 3 | 4 | розрахунок | | | | експеримент | | | | | |
|------------|---------|---|---|---|---|------------|--|--|--|-------------|--|--|--|--|--|
| | | S ₈ S ₇ S ₆ S ₅ | S ₈ S ₇ S ₆ S ₅ | S ₈ S ₇ S ₆ S ₅ | S ₈ S ₇ S ₆ S ₅ | | | | | | | | | | |
| 1 | 1001 | 0000 | 1000 | 0011 | 1110 | | | | | | | | | | |
| 2 | 1010 | 0000 | 0100 | 0110 | 0111 | | | | | | | | | | |
| 3 | 1011 | 0000 | 0010 | 1100 | 1011 | | | | | | | | | | |
| 4 | 1100 | 0000 | 0001 | 1001 | 1101 | | | | | | | | | | |
| 5 | 0000 | 0000 | 0010 | 1100 | 1011 | | | | | | | | | | |

4. За допомогою програмного середовища Multisim зібрати схему представлену на рис.9.2 для моделювання процесу передачі інформації з використанням завадостійкого коду Хемінга.

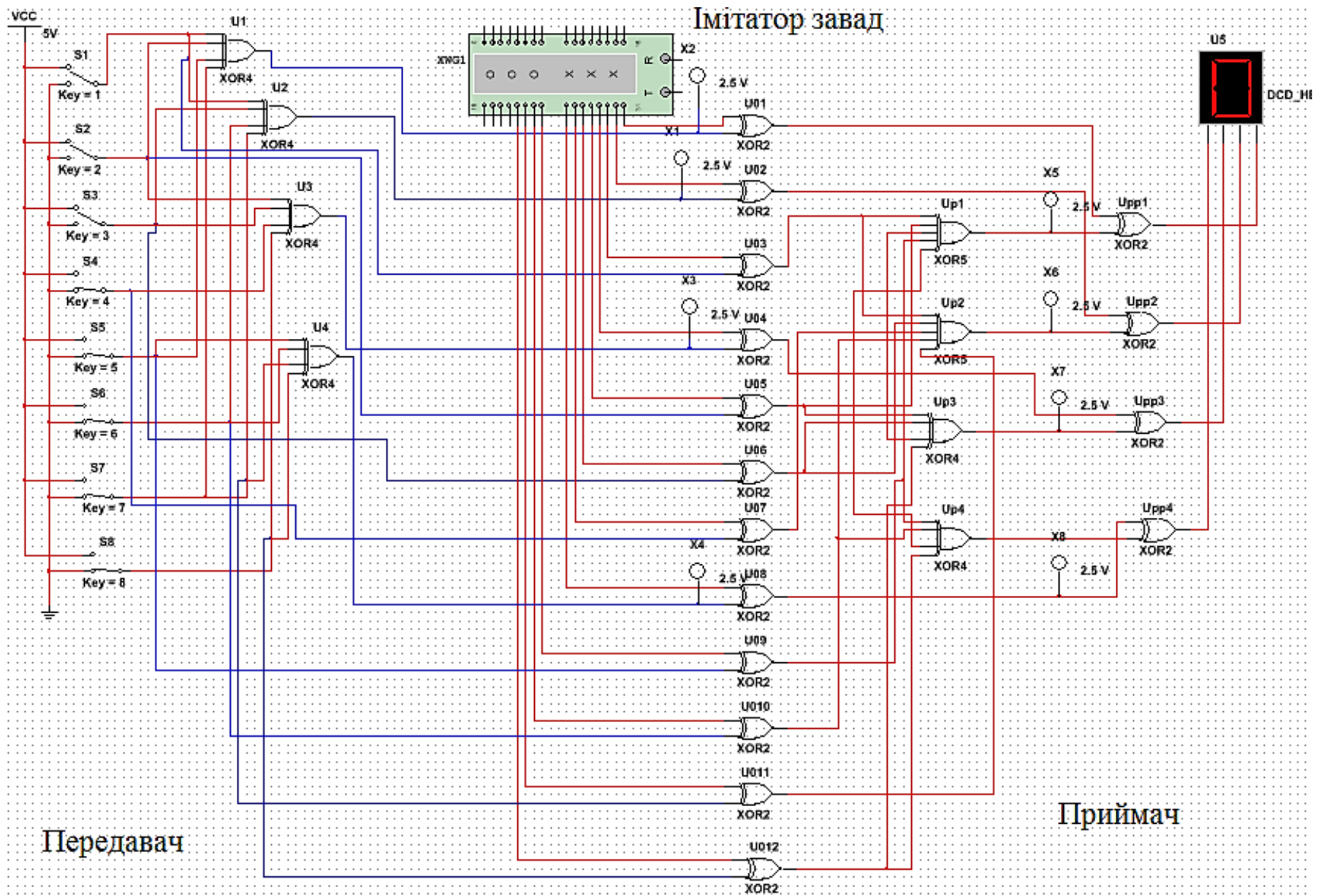


Рисунок 9.2 – Схема дослідження завадостійкого коду Хемінга

Використані елементи схеми 9.2 більшість повторюють елементи схеми на рис. 9.1, крім того у схемі 9.2 використані прилади:

XWG1 – генератор слів;

DCD_HEX – шістнадцятковий індикатор.

На рис. 9.2 виділено окремі блоки, що відповідають за передачу, імітацію завад та приймання двійкових символів.

У блоці позначеному як «Передавач» перемикачі 1 ... 8 імітують інформаційні біти даних, що передаються. За допомогою чотирьох логічних елементів «виключне або» формуються контрольні біти $k_0...k_3$. У канал зв'язку передається 12 біт (вісім інформаційних і чотири контрольних біта).

Імітатор завад дозволяє моделювати виникнення збоїв в будь-якому розряді переданих даних. Цей блок побудовано за допомогою генератора слів. Якщо генератор слів (Word Generator) формує у всіх розрядах логічні нулі, то спотворень не відбувається. Логічна одиниця в будь-якому розряді керуючого слова призводить до спотворення відповідного біта.

На приймальній стороні дані, що надійшли повинні бути оброблені так, щоб можна було автоматично виправити спотворений біт. До блоку «Приймач» (декодер) відносяться: чотири логічних елемента $U_{p1} ... U_{p4}$, що виконують розрахунок контрольних бітів на прийомі.

Наступні чотири логічні схеми «виключне або» $U_{pp1} ... U_{pp4}$ обчислюють місце спотвореного при передачі біту. Місце помилки в шістнадцятковій системі числення відображається на індикаторі DCD_HEX. Якщо індикатор показує нуль, то це означає, що передача даних пройшла без спотворень.

Вісім світлодіодів дозволяють аналізувати роботу пристрою в місцях формування контрольних бітів.

5. На приймачі отримані зазначені в таблиці 9.5 дані. Потрібно знайти і виправити спотворений інформаційний біт. Провести моделювання процесу передачі даних, наведених в табл. 9.5 (для свого варіанту).

Таблиця 9.5 – Вихідні дані до завдання 5, для різних варіантів

| № В-ту | $a_1 = k_0$ | $a_2 = k_1$ | a_3 | $a_4 = k_3$ | a_5 | a_6 | a_7 | $a_8 = k_4$ | a_9 | a_{10} | a_{11} | a_{12} |
|----------|-------------|-------------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------------|-------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Зміст звіту:

- 1) Назва, мета роботи, короткі теоретичні відомості
- 2) Хід роботи, де представити:
 - скрін-шоти зібраної робочої схеми експериментального дослідження коду на парність;
 - заповнена згідно варіанту таблиця 9.4 з відповідними вимірюваннями, розрахунками та поясненнями;
 - скрін-шоти зібраної робочої схеми експериментального дослідження, завадостійкого коду Хемінга із зазначенням положення ключів і вмісту генератора слів, відповідно варіанту;
- 3) Висновки за результатами досліджень та роботи у цілому.

Питання для самоперевірки

1. Які коди називають завадостійкими? Поясніть принцип будови завадостійких кодів.
2. Які кодові комбінації визначають як дозволені, а які вважають забороненими?
3. Назвіть головні параметри завадостійких кодів та поясніть що вони визначають?
4. Яке правило побудови коду з парною кількістю одиниць. За допомогою яких пристроїв здійснюється контроль парності?
5. Поясніть алгоритм побудови коригуючого коду Хемінгу. Яке правило визначення місця помилки у прийнятій послідовності?

Перелік джерел

1. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. ДСТУ-3008-95-К: Держстандарт України, 1995. – 37с.
2. . Абакумов В. Г. Теорія інформації та кодування. Ч.1.: Підручник. Київ: НТУУ «КПІ». Каф. ЗТ та РІ, 2009. – 90 с. .
3. Жураківський Ю.П., Полторак В.П. Теорія інформації та кодування: Підручник. – К.; Вища школа, 2001. – 255 с.
4. Подлевський Б. М., Рикалюк Р. Є. Теорія інформації: Підручник. – Львів: ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2016. – 339 с.
5. Тулякова Н.О. Теорія інформації: Навчальний посібник / Н.О. Тулякова. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 212 с.
6. Лидовский В. В. Теория информации: Учебное пособие. – М.: Компания С путник+, 2004. – 111 с.
7. Дмитриев, В. И. Прикладная теория информации: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1989 . – 320 с.
8. Липкин И. А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования. – М.: Вузовская книга, 2002. – 216 с.
9. Кузьмин И. В., Кедрус В. А. Основы теории информации и кодирования. – К.: Вища школа, 1986. – 238 с.
10. Игнатов В.А. Теория информации и передачи сигналов. Учебник для ВУЗов. – М.: Советское радио, 1979. – 280 с.
11. Шеннон К. Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике / Пер. С. Карпова. — М.: ИИЛ, 1963. — 830 с.
12. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды исправляющие ошибки. – М.: Мир, 1976. – 593 с.
13. Березкин Е.Ф. Основы теории информации и кодирования: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 312 с

14. Вінницький В. П., Поліщук В. Г. Підручник "Термінальне устаткування та передавання інформації в телекомунікаційних системах. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. – 436 с.
15. Кловский Д. Д., Шилкин В. А. Теория передачи сигналов в задачах. – М.: Связь, 1978. – 252 с.
16. Цымбал В. П. Теория информации и кодирования. – К.: Вища школа, 1992. – 263 с.
17. Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. И. Теоретические основы информационной техники. – М.: Энергия, 1979. – 512 с.
18. Абакумов В. Г., Гордієнко О. Я., Попович П. В. Теорія електричного зв'язку. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. К. КП, Політехніка. 2008. – 72 с.
19. Золотухин, В.В. Методические указания к выполнению лабораторной работы №2 «Исследование процесса квантования речевого сигнала» по дисциплине «Общая теория связи, часть 1 » / В.В. Золотухин. – Красноярск, 2012. – 16 с.
20. Алексеев, А. П. Сборник задач по дисциплине "Информатика" [Текст] : методические указания к практическим работам / А. П. Алексеев ; ПГУТИ. - Самара : ИУНЛ ПГУТИ, 2015. – 91 с.