

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Фізичний факультет  
Кафедра прикладної фізики

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
до лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни  
**«Сучасні методи перетворення сигналів»**

Ужгород 2023 рік

## Зміст

Лабораторна робота №1. Спектральний аналіз періодичних сигналів .....	3
Лабораторна робота №2.Частотний аналіз сигналів у середовищах EXCEL та MATLAB .....	8
Лабораторна робота №3. Дослідження квантування сигналів .....	17
Лабораторна робота № 4.Дослідження аналого-цифрових перетворювачів .....	23
Лабораторна робота № 5.Дослідження цифро-аналогових перетворювачів .....	28
Література .....	34

# Лабораторна робота 1

## Спектральний аналіз періодичних сигналів

**Мета роботи:** експериментальне дослідження спектрів періодичних сигналів.

### Короткі теоретичні відомості.

Будь-який періодичний сигнал можна представити у вигляді комбінації синусоїдальних (гармонійних) коливань з різними амплітудами, частотами і фазами. Або, іншими словами, періодичний сигнал будь-якої форми можна апроксимувати набором синусоїд різної частоти й амплітуди. Процес розкладання періодичного сигналу на гармонійні складові (або просто гармоніки) має назву гармонійного аналізу. Сукупність амплітуд і частот гармонік, що складають сигнал, називають спектром сигналу. Синусоїда, частота якої збігається з частотою сигналу, називається основною гармонікою. Синусоїди, частота яких відрізняється від частоти сигналу, називаються обертонами. Спектральний аналіз ґрунтується на перетворенні Фур'є.

Періодичні сигнали, описувані періодичними функціями  $s(t)$ , можуть бути розкладені на певному інтервалі у ряд Фур'є, якщо вони на цьому інтервалі задовольняють умови Діріхле: 1) відсутність розривів другого роду (з вітками, що сягають у нескінченність); 2) кількість стрибків (розривів першого роду) скінченна; 3) кількість екстремумів скінченна (приклад функції, що має нескінченну кількість екстремумів -  $\sin \frac{1}{x}$  в околі нуля).

Відомо [1] кілька форм запису ряду Фур'є.

Синусно - косинусна форма ряду Фур'є описується співвідношенням

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)) \quad (1.1)$$

Тут  $\omega_1$  – кругова частота, що відповідає періоду  $T$  повторення сигналу  $\omega_1 = 2\pi/T$ .

Кратні їй частоти  $k\omega_1$  називають гармоніками; гармоніки нумеруються згідно з індексом  $k$ . Частоту  $\omega_k = k\omega_1$  називають  $k$ -ю гармонікою сигналу.

Коефіцієнти  $a_k$  і  $b_k$  цього ряду визначаються за формулами:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(k\omega_1 t) dt \quad (1.2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(k\omega_1 t) dt \quad (1.3)$$

Доданок  $\frac{a_0}{2}$  у (1.1) являє собою середнє значення сигналу на періоді:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) dt \quad (1.4)$$

Якщо  $s(t)$  – функція парна, то всі коефіцієнти  $b_k$  дорівнюють нулю, а отже, відповідна формула ряду Фур'є містить лише косинусні доданки. А якщо  $s(t)$  – функція непарна, то нульовими будуть, навпаки, косинусні коефіцієнти  $a_k$  і у формулу ряду Фур'є входять лише синусні доданки. Залежність коефіцієнтів  $\{a_0, a_k, b_k\}$  від частоти називають гармонійним спектром періодичного сигналу у квадратурній формі. Ця залежність зображується у вигляді дискретної функції частоти для значень  $f = kf_1, k = 1, 2, \dots \infty$ . Коефіцієнт  $a_0$  визначено при  $f = 0$ . Якщо функція сигналу  $s(t)$  парна, то коефіцієнти  $b_k = 0$ , якщо непарна, то  $a_k = 0$ .

Отже, у загальному випадку періодичний сигнал містить не залежну від часу постійну складову й нескінченний набір гармонійних коливань, так званих гармонік із частотами  $F_k = kf_1$  ( $k=1,2,3,\dots$ ) кратними основній частоті послідовності.

Кожну гармоніку можна описати її амплітудою  $A_k$  і початковою фазою  $\varphi_k$ . Для цього коефіцієнти ряду Фур'є слід записати у вигляді

$$a_k = A_k \cos \varphi_k, \quad b_k = B_k \sin \varphi_k \quad (1.5)$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{b_k}{a_k} = \begin{cases} a_k = 0, & \varphi_k = k\pi + \frac{\pi}{2} \\ b_k = 0, & \varphi_k = k\pi \end{cases} \quad (1.6)$$

Періодичний сигнал  $s(t)$  також можна представити в амплітудно-фазовій формі ряду Фур'є:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos 2\pi k F_1 t - \varphi_k \quad (1.7)$$

де  $\varphi_k$  – початкова фаза  $k$ -ї гармоніки періодичного сигналу,  $kf_1$  – частота  $k$ -ї гармоніки періодичного сигналу.

Залежність амплітуд гармонік періодичного сигналу від частоти називається однобічним амплітудним спектром, а залежність початкової фази гармонік від частоти називається однобічним фазовим спектром сигналу.

Обидві залежності визначені для значень частоти  $f = kF_1, k = 1, 2, \dots \infty$ . Загальний вид цих залежностей наведений на рис. 1.1.

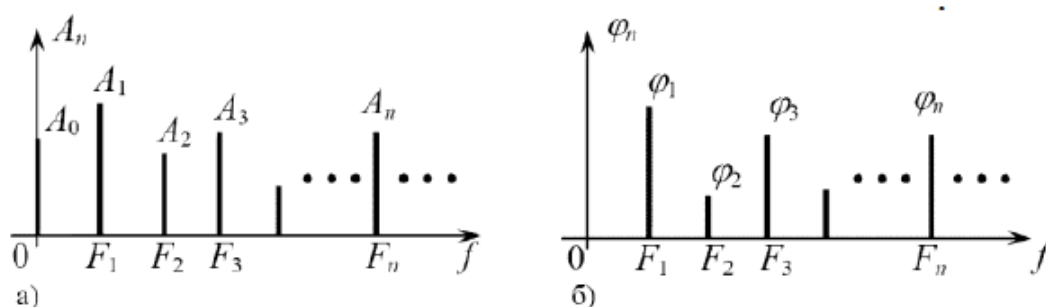
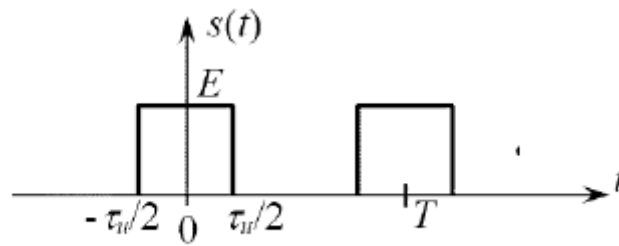
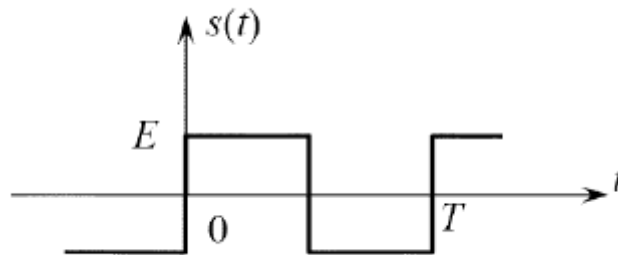


Рис. 1.1. Однобічний спектр періодичного сигналу:  
а) амплітудний спектр, б) фазовий спектр



а)



б)

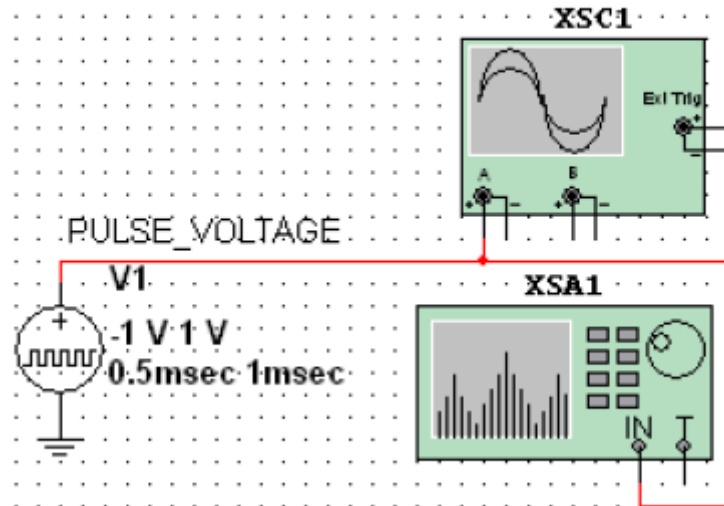
Рис. 1.2. Приклади періодичних сигналів:  
а) – прямокутні імпульси, б) – непарний меандр.

Для розрахунків однобічних спектрів необхідно знати аналітичне вираження сигналу  $s(t)$ . Тоді по формулі (1.2) обчислюється постійна складова сигналу  $A_0$ , по формулі (1.3) – частота першої гармоніки  $F_1$ , по формулах (1.4) – коефіцієнти  $a_k$  і  $b_k$ , по формулах (1.5) і (1.6) – амплітуди й початкові фази гармонік сигналу.

Для заданого викладачем варіанта завдання (табл. 1.1.) за допомогою формул (1.4) – (1.6), наведених у коротких теоретичних відомостях до роботи, розрахувати параметри перших (3-5) гармонік однобічного спектра періодичного сигналу й побудувати амплітудний і фазовий спектри заданого сигналу.

### Завдання до лабораторної роботи.

1.1. Зібрати схему підключення приладів для спостереження гармоній сигналу і його спектра відповідно до рис. 1.3 .



У якості джерела сигналу використовується джерело імпульсів V1 (PULSE\_VOLTAGE). Для його знаходження зробіть наступне: виберіть пункт головного меню *Вставити* → *Компонент...*; у вікні, що з'явилося, «Вибір компонентів» виберіть розділ: Sources; сімей-ство: SIGNAL\_VOLTAGE\_SOURCES; компонент: PULSE\_VOLTAGE.

1.2. Установити на генераторі V1 період повторення сигналу  $T$ , тривалість сигналу  $\tau$  згідно з номером варіанта (табл. 1.).

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Період Повторення,мс	0.1	0.2	0.25	0.3	0.5	0.75	0.8	0.9	1	5
Тривалість,мкс	5	5	2	3	5	5	1	1	5	5

1.3. Одержати осцилограму й спектрограму сигналу, занести отримані залежності у звіт.

1.4. Установити на генераторі V1 тривалість із  $2\tau$ . Занести отриману осцилограму й спектрограму у звіт.

1.5. Установити на генераторі V1 період повторення сигналу  $0,5T$ , тривалість сигналу  $0,5\tau$ . Занести отриману осцилограму й спектрограму у з

1.6. Для всіх експериментів виміряти по осцилограмі амплітуду сигналу  $A$ , період повторення  $T$  і тривалість  $\tau$ .

### Вимоги до оформлення звіту

Звіт повинен бути представлений в електронному вигляді. Вихідний файл звіту повинен бути збережений у форматі «\*.docx» та «\*.pdf».

*Структура звіту повинна містити наступні елементи:*

титульний аркуш; мету роботи; покроковий опис виконаних дій з рисунками, таблицями тощо; висновки по роботі. Усі рисунки, таблиці, схеми та розділи у звіті повинні бути підписані .

### **Контрольні запитання**

1. Як виглядає спектр періодичних прямокутних імпульсів?
2. Скільки гармонік у спектрі періодичних прямокутних імпульсів?
3. Як частота першої гармоніки в спектрі сигналу пов'язана із частотою повторення імпульсів?
4. Як тривалість прямокутного імпульсу пов'язана із шириною головної пелюстки, що обгинає спектра періодичних прямокутних імпульсів?
5. Чим визначається число гармонік у межах ширини головної пелюстки, що обгинає, спектра періодичних прямокутних імпульсів?
6. Як визначити постійну складову в часовій і частотній області?

## Лабораторна робота №2.

### Частотний аналіз сигналів у середовищах EXCEL та MATLAB

**Мета роботи.** Ознайомитись з методами та принципами визначення часових характеристик сигналу з використанням інструментів середовищ Microsoft Excel та MATLAB.

#### Короткі теоретичні відомості.

Частотний спектр сигналу - це розподіл енергії сигналу за частотами. Спектр буває амплітудний і фазовий.

Доведено, що якщо деяка періодична функція з періодом  $2T$  на інтервалі  $[-T, T]$  задовольняє умовам Діріхле (безперервна та має кінцеве число екстремумів і точок розриву I роду), то її можна подати як суму ряду Фур'є (розкладено в ряд Фур'є):

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{T} + b_n \sin \frac{n\pi x}{T} \right) \quad (2.1)$$

Для визначення коефіцієнтів ряду Фур'є справедливі такі формули:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \cos \frac{n\pi x}{T} dx \\ b_n &= \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \sin \frac{n\pi x}{T} dx \end{aligned} \quad (2.2)$$

Якщо функція, що розкладається, є парною ( $f(-x) = f(x)$ ), то ряд Фур'є складається тільки з косинусів, тобто всі коефіцієнти при синусах дорівнюють 0. Якщо функція, що розкладається, є непарною ( $f(-x) = -f(x)$ ), то ряд Фур'є складається тільки із синусів, тобто всі коефіцієнти при косинусах дорівнюють 0. У загальному випадку, коефіцієнти при синусах і косинусах не дорівнюють 0. Таким чином, будь-яку періодичну функцію, що задовольняє умовам Діріхле, можна розкласти в ряд Фур'є, тим самим представляючи її у вигляді суми синусів і косинусів. Спектр дискретного періодичного сигналу може бути розрахований за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Дискретне перетворення Фур'є має вигляд:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_n e^{-j \frac{2\pi k i}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_n \left[ \cos \frac{2\pi k i}{N} - j \sin \frac{2\pi k i}{N} \right] \quad (2.3)$$

Після цього перетворення звуковий сигнал буде представлено у вигляді коефіцієнтів, які відповідають амплітудам і фазам частот, що складають цей сигнал

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} X_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \cos \frac{2\pi k i}{N} \\ \operatorname{Im} X_k &= -\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sin \frac{2\pi k i}{N} \\ \operatorname{Abs}[X_k] &= \sqrt{\operatorname{Re} X_k^2 + \operatorname{Im} X_k^2} \\ \varphi[X_k] &= \operatorname{tg}^{-1} \frac{\operatorname{Im} X_k}{\operatorname{Re} X_k} \end{aligned} \quad (2.4)$$

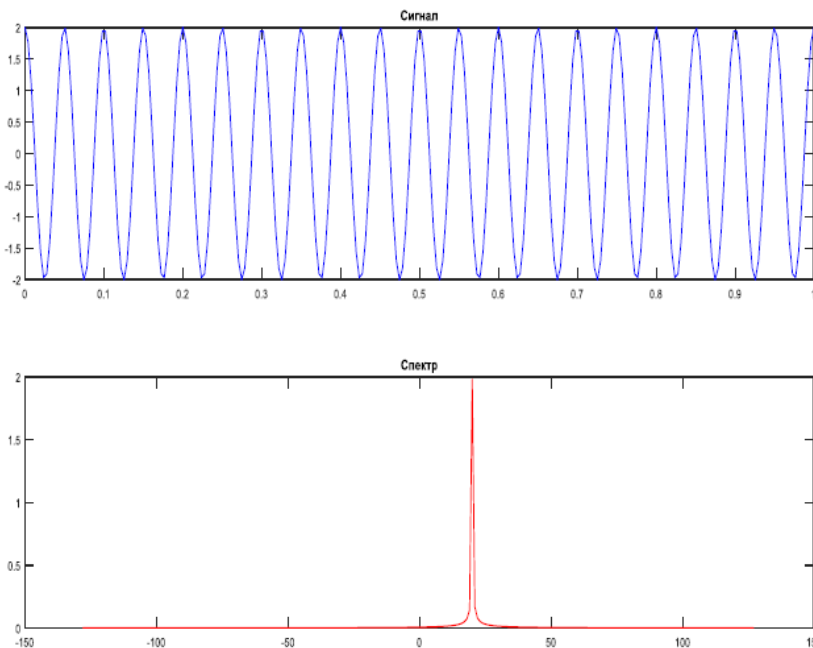
Фактично, дискретне перетворення Фур'є дає змогу представити дискретну періодичну функцію у вигляді скінченної кількості частот із певними значеннями амплітуди та фази (розкладає функцію в її спектр). Для визначення амплітуд і фаз частотних складових сигналу в дискретному перетворенні Фур'є використовуються базисні функції синуса і косинуса. Спектр частот у дискретному перетворенні Фур'є визначається з амплітуд синусів і косинусів, з частотами повторення в досліджуваній вибірці від 0 до  $N/2$  разів, де  $N$  - кількість елементів вибірки. Перетворення Фур'є розкладає дискретизований сигнал з  $N$  відліків на  $N/2 + 1$  синусних і  $N/2 + 1$  косинусних складових. Ці формули описують пряме перетворення Фур'є.  $\operatorname{Re} X[x]$  - масив, що містить значення косинусоїдальних складових.  $\operatorname{Im} X[x]$  - масив, що містить значення синусоїдальних складових. Такі позначення введено через комплексне подання безперервного перетворення Фур'є (див. вище). При цьому дійсній частині відповідають косинуси, а уявній - синуси. Це не повинно вводити Вас в оману - елементи цих масивів є дійсними числами і коефіцієнти при синусах і косинусах є дійсними числами. Також, досліджувана функція є функцією дійсної змінної. Комплексна форма перетворення Фур'є може вводитися для зручності запису

двох інтегралів - для косинуса і синуса. Масиви  $\text{Re}[x]$  та  $\text{Im}[x]$  складають так званий частотний домен (frequency domain), тоді як вихідна вибірка називається часовим доменом (time domain).

```

N=256;% Число точок
T=1;% Інтервал часу,c
dt=T/(N);
Nyq=N/(2*T)%Частота Найквіста, Гц
df=1/T;% Крок частоти
f=20;% Частота сигналу
w=2*pi*f;
t=linspace(0,T,N);% Завдання вектора часу
s=2*(cos(w*t./T)+i*sin(w*t./T));% Обчислення дискретної функції
F=fft(s)/N;% Обчислення перетворення Фур'є
subplot(211);
plot(t,real(s),'b-');% Відображення вихідної функції
F1=F(1:N/2+1);% Виділення перших N/2+1 (позитивні частоти)
F2=F(N/2+1:N);% Виділення спектра негативних частот
F=[F2,F1];% Об'єднання спектру
% Обчислення вектора частот
nu=-Nyq+df*(0:N);
subplot(212);
plot(nu(1:N),abs(F(1:N)),'r-')

```



Зворотнє дискретне перетворення Фур'є має вигляд:

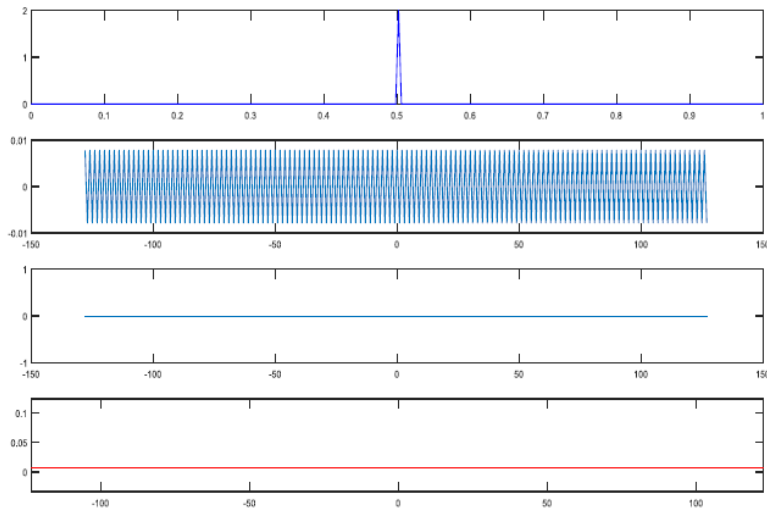
$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi k n}{N}} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \left[ \cos \frac{2\pi k n}{N} + j \sin \frac{2\pi k n}{N} \right] \quad (2.5)$$

ОДПФ - із частотних складових дає змогу сформувати вихідний сигнал. Такий процес перетворення називається синтезом або зворотним перетворенням Фур'є. Зауважимо, що формули зворотного перетворення аналогічні формулам прямого перетворення, тільки тепер підінтегральною функцією є коефіцієнти при синусах і косинусах. Ця властивість є дуже важливою і називається подвійністю перетворення Фур'є. Властивість подвійності дає змогу пояснити такий факт: одиничний імпульс у часовому домені (одиничне значення однієї вибірки за нульових значень решти) відповідає синусоїді та косинусоїді в частотному домені й навпаки.

```

%%% Одиничний імпульс
N=256;% Число точок
T=1;% Інтервал часу,с
dt=T/(N);
Nyq=N/(2*T)% Частота Найквіста, Гц
df=1/T;% Крок частоти
f=50;% Частота сигналу
w=-2*pi*f;
t=linspace(0,T,N);% Завдання вектора часу
for x=1:1:N;
s(1,x)=0;
if x > N/2 & x < N/2 + 2;% Обчислення дискретної функції
s(1,x)=2;
end
end;
F=fft(s)/N;% Обчислення перетворення Фур'є
subplot(411);
plot(t,s,'b-');% Відображення вихідної функції
F1=F(1:N/2+1);% Виділення перших N/2+1 (позитивні частоти)
F2=F(N/2+1:N);% Виділення спектра негативних частот
F=[F2,F1];% Об'єднання спектру
% Обчислення вектора частот
nu=-Nyq+df*(0:N);
subplot(412);
plot(nu(1:N),real(F(1:N)))
subplot(413);
plot(nu(1:N),imag(F(1:N)))
subplot(414);
plot(nu(1:N),abs(F(1:N)), 'r-')

```



*Теорема Найквіста встановлює умову, за якої аналоговий гармонічний сигнал можна адекватно подати дискретними відліками.*

Вихідний фізичний сигнал являє собою неперервну функцію часу. Такі сигнали, визначені в усі моменти часу, називають, як уже зазначалося, аналоговими. Послідовність чисел, якою подається сигнал при цифровій обробці, являє собою дискретний ряд і не може повністю відповідати аналоговому сигналу. Числа, з яких складається така послідовність, – це значення сигналу в окремі (дискретні) моменти часу. Їх називають відліками сигналу.

Як правило, відліки беруться через однакові проміжки часу  $T$ , які називають періодом дискретизації.

Величину, обернену до періоду дискретизації, називають частотою дискретизації

$$f_D = \frac{1}{T} \cdot \quad (2.6)$$

Відповідну частоті дискретизації кругову частоту  $\omega_D$  визначають такою рівністю:  $\omega_D = 2\pi/T$ .

Згідно з теоремою Найквіста гармонічний сигнал може бути адекватно поданий дискретними відліками, якщо його частота не перевищує половини частоти дискретизації.

## Завдання до лабораторної роботи.

### Завдання 1. Побудова частотного спектру в пакеті EXCEL

За допомогою пакета EXCEL запишемо в стовпчик A1 128 значень чисел від 0 до 127,  $N=128$ . Для побудови частотного спектра в діапазоні осередків від A1 до A128 беруться числа кратні 16.

Побудуємо модель сигналу у вигляді

$$y[nT] = \sin(\omega_1 nT) + \sin(\omega_2 nT) + \sin(\omega_3 nT)$$

де  $n$ -порядковий номер відліку;  $T$ - період дискретизації.

Для значень частот  $\omega_1 = 20\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 40\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_3 = 62,8$  і періоду дискретизації, який визначається в десять разів меншим, ніж період самої високочастотної складової сигналу.

Побудуємо графік сигналу рис.2. 1.

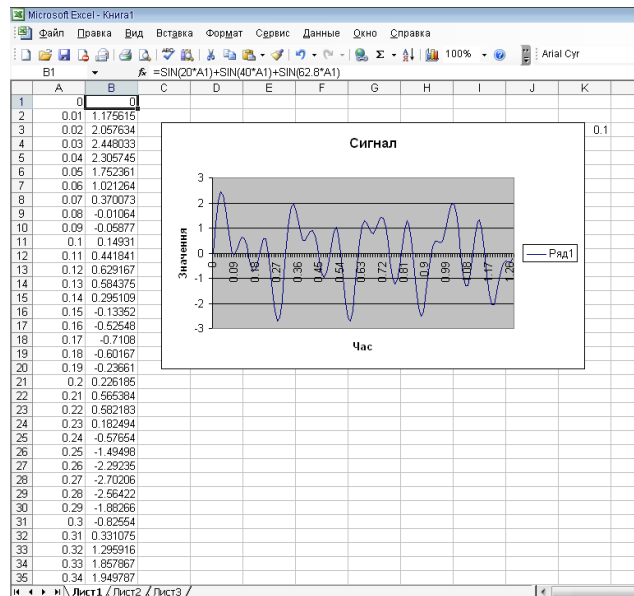


Рис.2. 1.Графік сигналу.

Для побудови частотного спектра наведеного сигналу скористаємося вбудованими функціями EXCEL. У меню "Сервіс" вибираємо вкладку "Аналіз даних" (якщо її немає, то ставимо її. Заходимо в меню "Сервіс" – "Надстройки" ставимо галочку біля вкладки "Пакет аналізу" і натискаємо "Ок"). В меню "Аналізу даних" вибираємо "Аналіз Фур'є". Меню виглядає так (рис.2.2).

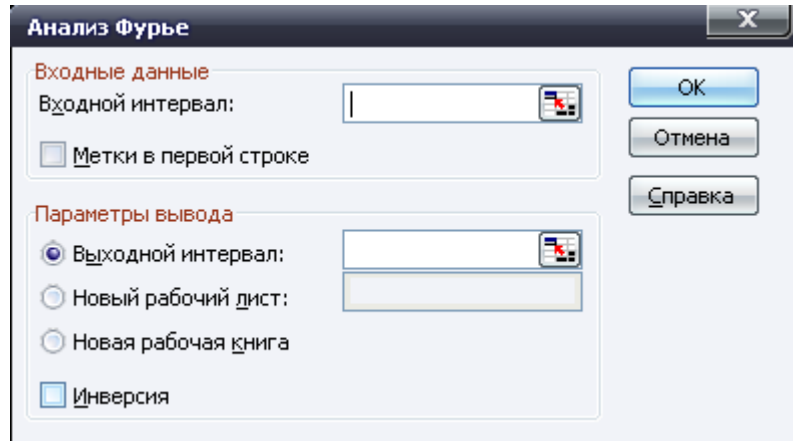


Рис.2 2.– Аналіз Фур'є

У вхідному інтервалі вказуємо діапазон осередків з моделлю сигналу. У вихідному вказуємо порожній діапазон осередків від 1 до 128.

Результатом дискретного перетворення Фур'є є функція комплексної змінної. За допомогою функції МНІМ.ABS отримуємо модуль комплексних чисел. Будуємо частотний спектр (графік частотного спектра рис. 3).



Рис. 3 – Частотний спектр сигналу

Для перерахунку номера гармоніки( $k=2$ ) в частоту складової сигналу використаємо таке співвідношення

$$\omega = \frac{2\pi k}{NT} = \frac{2\pi 2}{1,28} \approx 10c^{-1}$$

Для того, щоб отримати  $C_k$  коефіцієнти амплітуд гармонік результат дискретного перетворення Фур'є необхідно розділити на  $N/2$ .

**Завдання 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.

#### **Вимоги до оформлення звіту**

Звіт повинен бути представлений в електронному вигляді. Вихідний файл звіту повинен бути збережений у форматі «**\*.docx**» та «**\*.pdf**».

*Структура звіту повинна містити наступні елементи:*

титульний аркуш; мету роботи; покроковий опис виконаних дій з рисунками, таблицями тощо; висновки по роботі. Усі рисунки, таблиці, схеми та розділи у звіті повинні бути підписані .

## Лабораторна робота №3.

### Дослідження квантування сигналів

**Мета:** Експериментальне визначення кроку квантування та похибки перетворення АЦП

#### Короткі теоретичні відомості.

*Цифро-аналогові перетворювачі.*

ЦАП служать для перетворення інформації з цифрової форми в аналоговий сигнал - підсумовування струму і напруги. ЦАП широко застосовується в різних пристроях автоматики для зв'язку цифрових ЕОМ з аналоговими елементами і системами.

Принцип роботи ЦАП полягає в підсумовуванні аналогових сигналів, пропорційних вагам розрядів вхідного цифрового коду, з коефіцієнтами, рівними нулю або одиниці залежно від значення відповідного розряду коду.

ЦАП перетворить цифровий двійковий код  $Q_4Q_3Q_2Q_1$  у аналогову величину, звичайно напруга  $U_{вих}$ . Кожен розряд двійкового коду має певну вагу  $i$ -го розряду удвічі більше, ніж вага  $(i-1)$ -го. Роботу ЦАП можна описати наступною формулою:

$$U_{вих} = E(Q_{11} + Q_{22} + Q_{34} + Q_{48} + \dots), \quad (3.1)$$

де  $E$  - напруга, відповідна вазі молодшого розряду,  $Q_i$ - значення  $i$ -го розряду двійкового коду (0 або 1).

Наприклад, числу 1010 відповідає:  $U_{вих}=E(0*1+1*2+0*4+1*8)=10E$ , а числу 1111  $U_{вих}=E(1*1+1*2+1*4+1*8)=15*E$ .

На рис. 3.1 приведена схема 4-розрядного цифро - аналогового перетворювача.

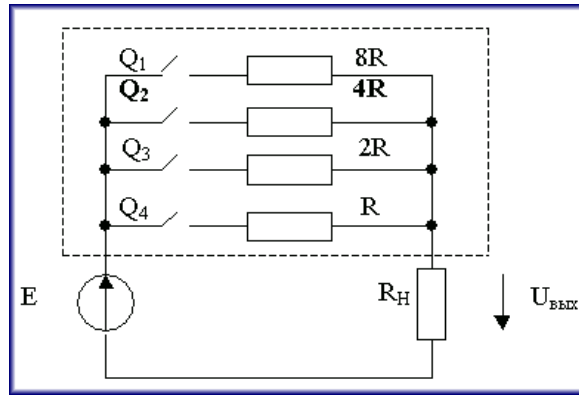


Рис. 3.1. Схема цифро-аналогового перетворювача

Спрощена схема реалізації ЦАП представлена на рис. 3.1. У схемі  $i$ -й ключ замкнений  $Q_i=1$ , при  $Q_i=0$  - розімкнений. Резистори підібрані таким чином, що  $R \gg R_n$ . Еквівалентний опір обведеного пунктиром двополюсника  $R_{ек}$  і опір навантаження  $R_n$  утворюють дільник напруги, тоді

$$U_{вих} = E \cdot R_n / (R_{ек} + R_n) \approx E \cdot R_n / R_{ек} \quad (3.2)$$

Провідність двополюсника  $1/R_{ек}$  рівна сумі провідності гілок (при  $Q_i=1$  і - гілка включена, при  $Q_i=0$  - відключена):

$$1/R_{ек} = Q_1/8R + Q_2/4R + Q_3/2R + Q_4/R \quad (3.3)$$

Підставивши (3.3) в (3.2), одержуємо вираз, ідентичний (3.1)

$$U_{вих} = (8E \cdot R_n / R) \cdot (Q_1 \cdot 1 + Q_2 \cdot 2 + Q_3 \cdot 4 + Q_4 \cdot 8)$$

Очевидно, що  $e = 8E R_n / R$ . Вибором  $e$  можна встановити необхідний масштаб аналогової величини.

#### *Аналогово-цифрові перетворювачі.*

У інформаційних системах, що управляють, частина (або вся) інформація від датчиків представлена в аналоговій формі. Для її введення в цифрові ЕОМ і цифровий пристрій, що управляє, широко застосовуються аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП). В більшості випадків АЦП виконують перетворення вхідної напруги або струму в двійковий цифровий код.

Існують різні типи АЦП. Ми зупинимося лише на тих типах, які набули в даний час найбільшого поширення.

АЦП послідовного наближення .

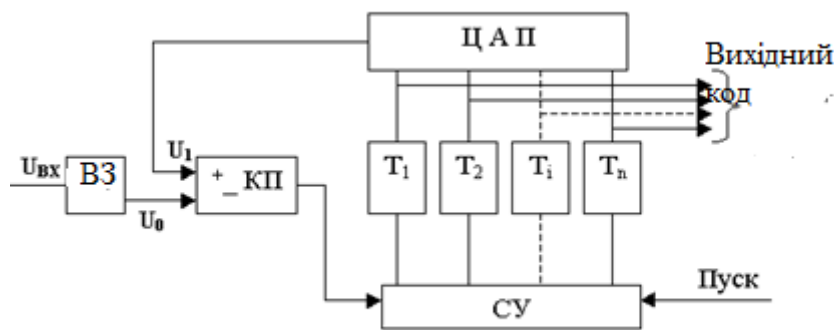


Рис. 3.2. Схема АЦП послідовного наближення

Структурна схема АЦП приведена на рис. 3.2. Схема працює таким чином. Вхідний аналоговий сигнал  $U_{вх}$  перед початком перетворення запам'ятовується схемою вибірки - зберігання ВХ, що необхідно, оскільки в процесі перетворення необхідна зміна аналогового сигналу. Далі по команді "Пуск" за допомогою зсувного регістра послідовно в часі кожен тригер  $T_i$ , починаючи із старшого розряду, переводить в положення 1 відповідний розряд ЦАП. Напруга  $U_1$  (або струм) з виходу ЦАП порівнюється з вхідним аналоговим сигналом за допомогою компаратора КП. Якщо  $U_0 > U_1$ , на виході компаратора зберігається низький рівень і в тригері зберігається одиниця, при  $U_0 < U_1$  спрацьовує компаратор і переводить тригер в стан 0. Після закінчення циклу на виходах тригерів виходить двійковий код, відповідний (при ідеальних елементах)  $U_0$  з точністю до половини молодшого розряду. Похибка АЦП визначається неточністю ЦАП, зоною нечутливості і зсувом нуля компаратора, а також похибкою схеми вибірки - зберігання. Оскільки в такій схемі помилка в якому - або розряді надалі не коректується, необхідно, щоб час на "зважування" кожного розряду було досить для загасання перехідного процесу до рівня, відповідного половині молодшого розряду, і щоб при розбалансі  $U_1 - U_0$  на це значення компаратора встиг спрацювати. Загальний час перетворення

$$t_{пр} = t_{вх} + n(t_{з,к} + t_y + t_{ц}) + t_{ск},$$

де  $t_{вх}$  - час, необхідне для фіксації  $U_{вх}$  схемою ВХ;  $n$  - число розрядів;  $t_{з,к}$  - час затримки, що вноситься компаратором;  $t_y$  - час встановлення  $U_1$  на вході ЦАП;  $t_{ц}$  - час затримки цифрових елементів в схемі управління і спрацьовування тригера;  $t_{ск}$  - час, необхідне для скидання ЦАП в початковий стан, включаючи час, необхідне для синхронізації з початком такту.

Найбільшу частку в  $t_{пр}$  звичайно вносить  $t_y$ , найбільша величина якого може бути оцінена таким чином:

$$t_y = (1+n)T_{екв} \ln 2,$$

де  $T_{екв}$  - еквівалентна постійна часу на вході ЦАП. При 12 - розрядному АЦП і використанні швидкодіючого ЦАП з  $t_y = 100$  нс час  $t_{пр}$  близько до 1,5 мкс. В більшості випадків  $t_{пр}$  такого перетворювача досягає 10 - 100 мкс.

Паралельні АЦП. Істотне зменшення  $t_{пр}$  вдається одержати в АЦП паралельного типу. Тут вхідна аналогова величина  $U_0$  з виходу схеми ВХ порівнюється за допомогою  $2n+1$  компаратора з  $2(2n-1)$  еталонними рівнями, освіченими ділниками з резисторів рівного опору. При цьому спрацьовують  $m$  молодших компараторів, створюючи на виходах схем І-НІ нормальний одиничний код, потім який за допомогою спеціального дешифратора ДШ перетвориться в двійковий вихідний сигнал.

Похибка АЦП визначається неточністю і нестабільністю еталонної напруги, резистивного ділника і погрішностями компараторів. Значну роль можуть грати вхідні струми компараторів, якщо ділник недостатньо низькоомний. На рис. 3.3 приведена структурна схема АЦП паралельного типу.

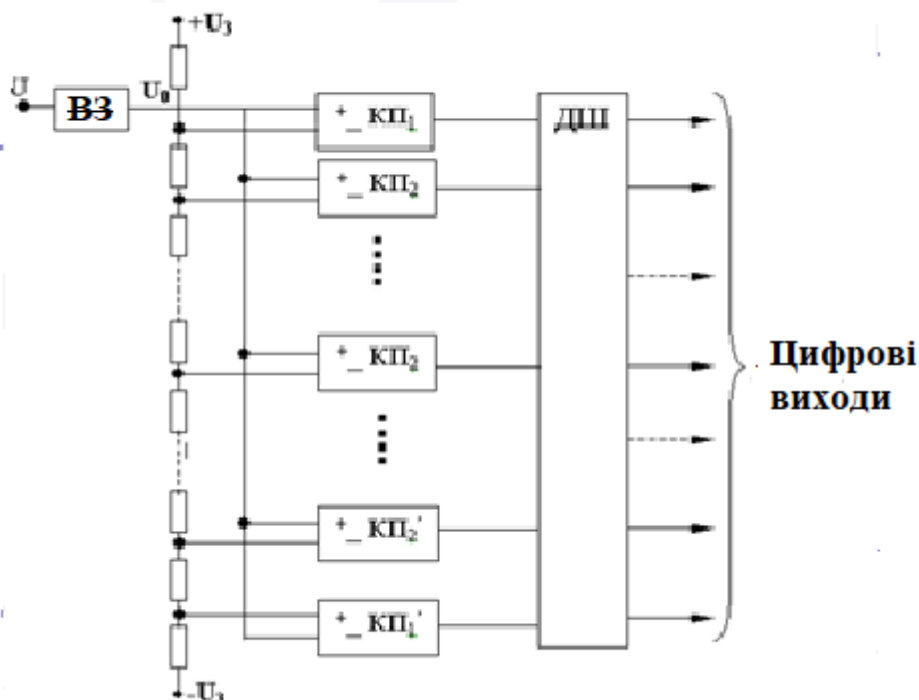


Рис. 3.3. Схема АЦП паралельного типу.

Час перетворення складається з наступних складових:

$$t_{пр} = t_{вх} + t_{з,к} + a t_{л,сi}$$

де  $t_{л,сi}$  – час затримки логічних схем;  $k$  - число послідовно включених логічних схем.

При використанні компараторів з тим, що стробує АЦП може бути без схеми ВЗ. При цьому він забезпечує найбільшу швидкодію в порівнянні з будь-якими іншими АЦП.

### Завдання.

Використовуючи пакет Electronics Workbench спроектувати схему представлену на рис. 3.4, і провести аналіз зміни напруги, міняючи частоту і амплітуду, змінити час замикання і розмикання кожного з ключів.

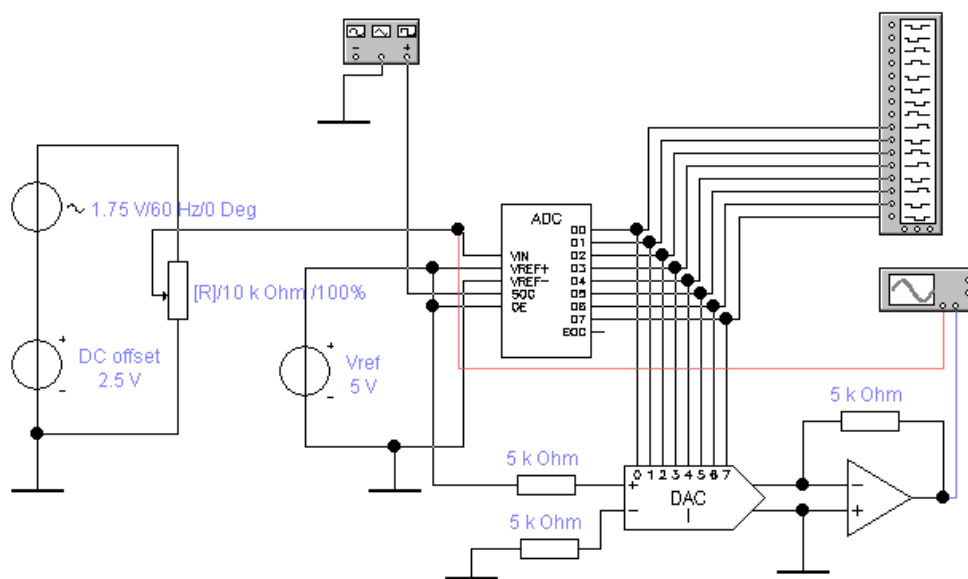


Рис. 3.4. АЦП і ЦАП.

На рис. 3.4 показана схема для перетворення аналогової величини (напруги) в цифровий код і зворотне перетворення цифрового коду в аналогову величину. Процес роботи схеми показаний на часовій діаграмі. Часова діаграма, що ілюструє роботу АЦП і ЦАП, наведена на рис. 3.5.

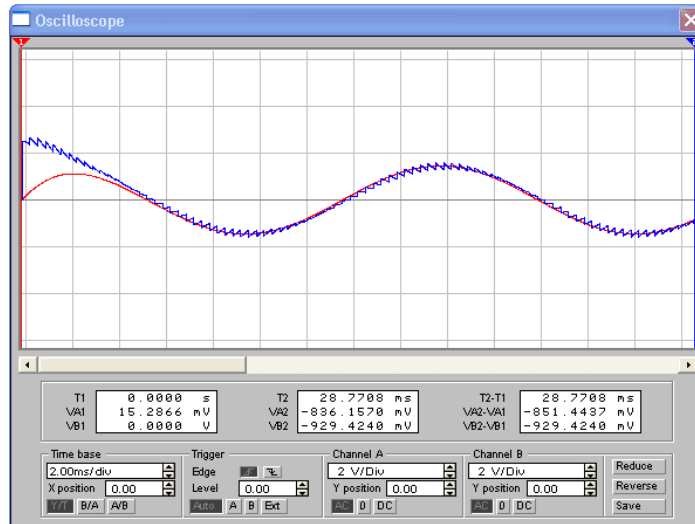


Рис. 3.5. Діаграма роботи АЦП і ЦАП.

Скласти звіт про виконання лабораторної роботи в MS Word в який включити. Схеми ЦАП і АЦП та часові діаграми роботи ЦАП і АЦП.

### Вимоги до оформлення звіту

Звіт повинен бути представлений в електронному вигляді. Вихідний файл звіту повинен бути збережений у форматі «\*.docx» та «\*.pdf».

*Структура звіту повинна містити наступні елементи:*

титульний аркуш; мету роботи; покроковий опис виконаних дій з рисунками, таблицями тощо; висновки по роботі. Усі рисунки, таблиці, схеми та розділи у звіті повинні бути підписані .

### Контрольні питання.

- 1.Що розуміють під дискретизацією та під квантуванням?
2. Що з себе представляють АЦП прямого перетворення, в яких пристроях його краще використовувати?
- 3.Які додаткові пристрої необхідно підключити до схеми, щоб отримати цифровий відлік вимірюваної напруги?
- 4.Принцип роботи АЦП.

## Лабораторна робота № 4

### Дослідження аналого-цифрових перетворювачів

**Мета роботи.** Вивчення роботи АЦП прямого перетворення.

#### *Короткі теоретичні положення*

*Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) здійснюють перетворення аналогової величини, наприклад, вхідної напруги, у вихідну кодову комбінацію.*

З багаточислених різновидів АЦП досить розповсюдженими є АЦП розгортаючого урівноваження та слідкуючий.

АЦП розгортаючого зрівноваження (рис. 4.1) містить компаратор  $D1$ , до першого входу якого надходить вхідна напруга  $U_{ВХ}$ , а до другого – компенсуюча напруга  $U_{К}$ , яку виробляє ЦАП  $D5$  з підсилювачем  $D6$  в залежності від вмісту лічильника  $D4$ .

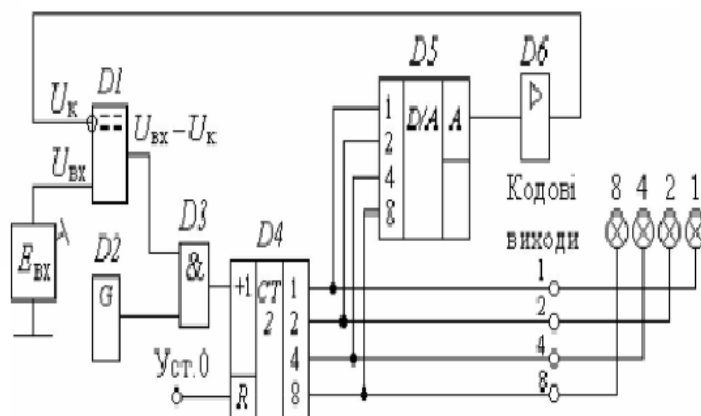


Рис.4.1. Схема дослідження АЦП розгортаючого зрівноваження.

За допомогою підсилювача  $D6$  забезпечується рівність  $U_{К} = U_{ВХ}$ , тобто здійснюється масштабування АЦП з метою отримання точної цифрової копії сигналу.

При вхідній напрузі  $U_{ВХ} > U_{К}$  кожний імпульс генератора  $D2$  збільшує вміст лічильника  $D4$  на одиницю, через що компенсуюча напруга  $U_{К}$  зростає на один крок квантування (рис. 4.2).

При  $U_{К} = U_{ВХ}$  здійснюється відлік показань  $N_1$ ;  $N_2$  і т.д. Це реалізується тим, що коли  $U_{К}$  дорівнюватиме вхідній напрузі  $U_{ВХ}$ , то компаратор  $D1$  ключем  $D3$  запирає вхід лічильника, і він зупиниться.

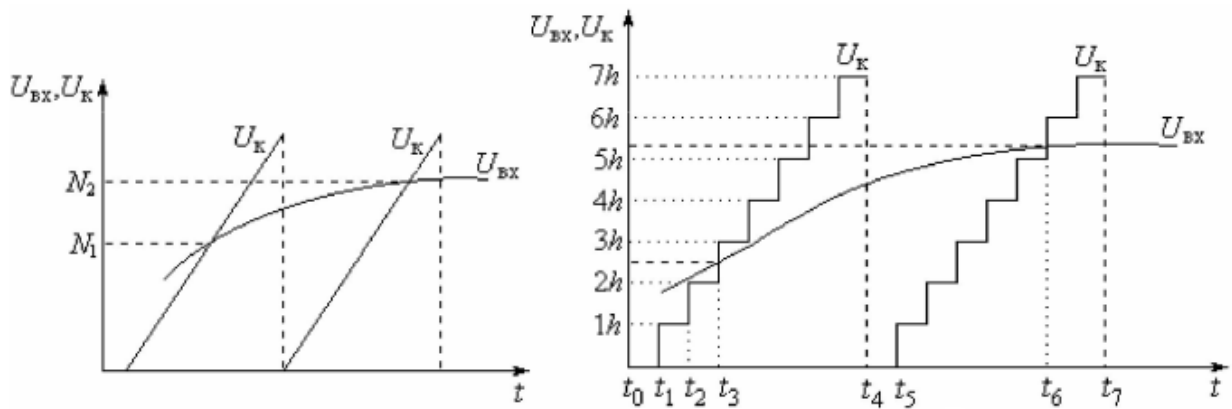
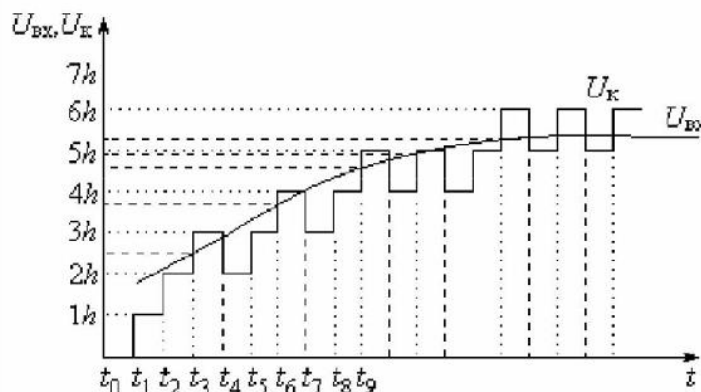
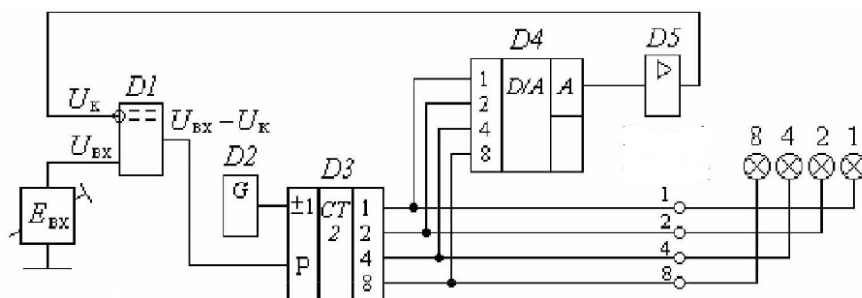


Рисунок 4.2 – Аналого-цифрове перетворення розгортаючого зрівноваження: а) принцип; б) реалізація

На індикаторах висвітиться цифрова копія вхідної напруги з похибкою  $\pm 0,5h$ , тобто плюс-мінус половина кроку квантування. Так здійснюється аналого-цифрове перетворення.

Для наступного вимірювання необхідно установити лічильник в нуль, через що швидкодія досить мала, бо кожне наступне вимірювання починається з нуля.

Більш швидкодіючим є слідкуючий АЦП (рис. 4.3).

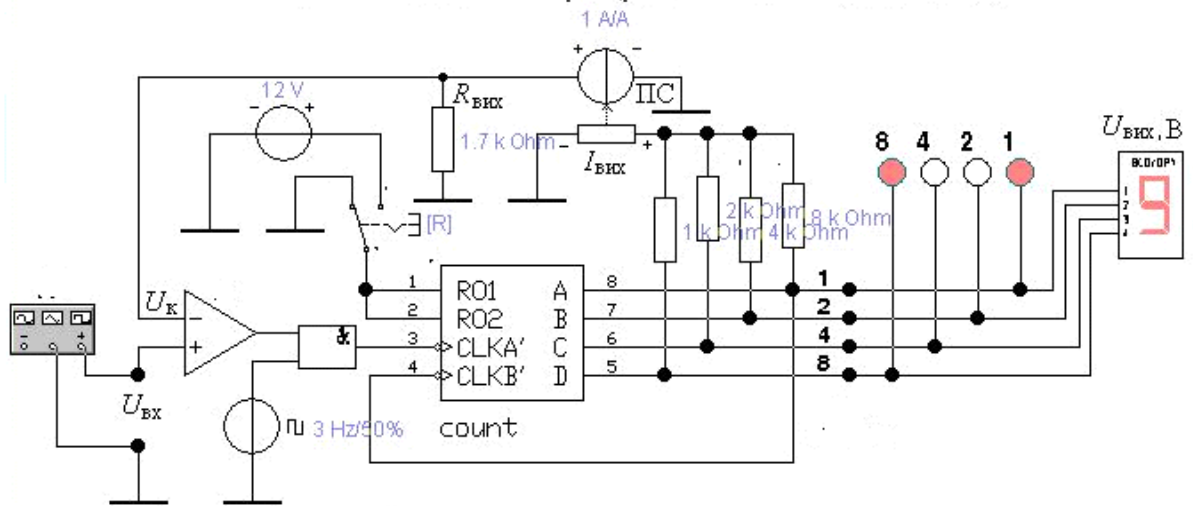


Його різниця полягає в тому, що вихід компаратора  $D1$  підключений до входу реверсу  $P$  лічильника  $D3$ . Тому після перекомпенсації сигналу лічильник переключається на віднімання, а після недокомпенсації – знову на додавання (рис. 4.2), через що на наступне вимірювання витрачається лише один крок

квантування, завдяки чому швидкодія занадто більша за АЦП послідовного зрівноваження.

**Завдання до лабораторної роботи.**  
*Дослідити АЦП послідовного зрівноваження*

1. Зібрати схему, яка наведена на рис.4.4.



2. На генераторі встановити прямокутну форму сигналу.

3. Задаючи постійну вхідну напругу на генераторі, виміряти вихідну напругу та заповнити таблицю.

$U_{ВХ}, В$	$U_{ВИХ}, В$	Похибка

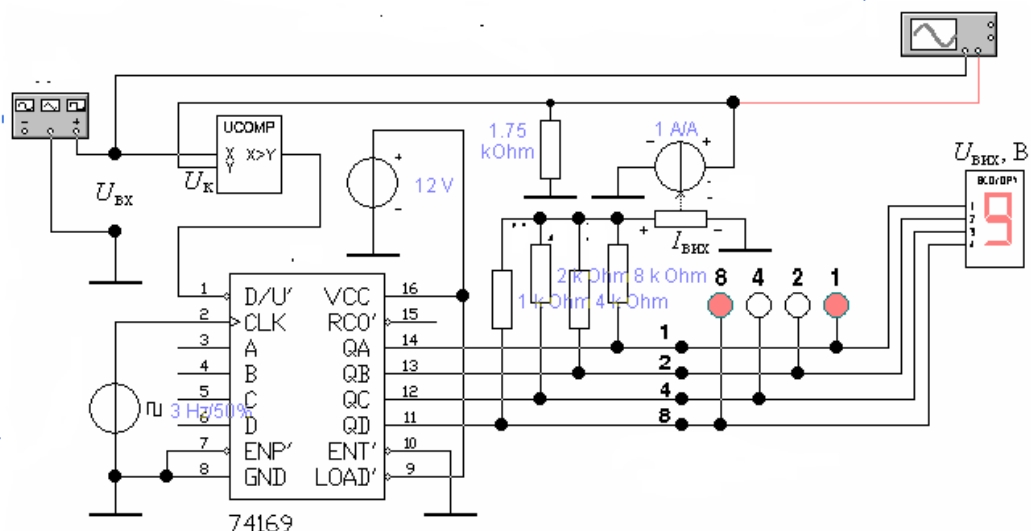
4. Визначити крок квантування

$$h = U_{ВХ k} - U_{ВХ i},$$

де  $U_{ВХ k}$  та  $U_{ВХ i}$  – вхідні напруги, які відповідають суміжним показанням  $U_{ВИХ}$ .

**Дослідити сліdkуючий АЦП.**

1. Зібрати схему, яка наведена на рис.4.5.



2. На генераторі встановити прямокутну форму сигналу.
3. Задаючи постійну вхідну напругу на генераторі, виміряти вихідну напругу та заповнити таблицю.

U <sub>ВХ.</sub> В	U <sub>ВИХ.</sub> В		Похибка, В
	мін	макс	
0			
5			
7			
9			

4. Визначити крок квантування

$$h = U_{ВХ\ k} - U_{ВХ\ i}$$

де  $U_{ВХ\ k}$  та  $U_{ВХ\ i}$  – вхідні напруги, які відповідають суміжним показанням  $U_{ВИХ.}$

### Вимоги до оформлення звіту

Звіт повинен бути представлений в електронному вигляді. Вихідний файл звіту повинен бути збережений у форматі «\*.docx» та «\*.pdf».

Структура звіту повинна містити наступні елементи:

титульний аркуш; мету роботи; покроковий опис виконаних дій з рисунками, таблицями тощо; висновки по роботі. Усі рисунки, таблиці, схеми та розділи у звіті повинні бути підписані .

### **Контрольні питання.**

- 1 .Принцип цифро-аналогового та аналого-цифрового перетворень.
- 2 .Зв'язок між кількістю кроків квантування та місткістю лічильника.
- 3 .АЦП послідовного наближення.
4. Слідкуючий АЦП.

## Лабораторна робота № 5

### Дослідження цифро-аналогових перетворювачів

**Мета роботи.** Вивчення принципу роботи ЦАП в статичному та динамічному режимах.

#### Короткі теоретичні відомості

Цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП) називають пристрої, які перетворюють вхідну кодову комбінацію у вихідну аналогову величину, наприклад, у вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$  (рис. 5.1). Тут наведений *тривходовий* ЦАП, але кількість входів  $x_i$  не обмежена і може бути будь-якою. Зараз вона досягає десятків. До входу  $E_0$  подається так звана опорна напруга  $U_{\text{оп}}$ , з якої утворюється аналогова копія  $U_{\text{вих}}$  вхідного числа.

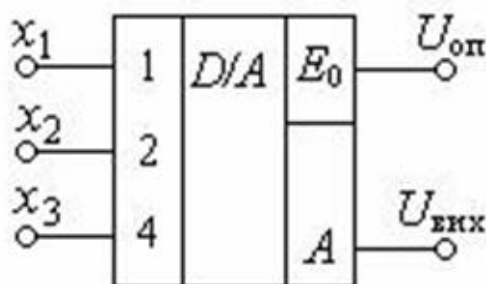


Рис.5.1. Умовне графічне позначення ЦАП.

Сукупність значень вихідної аналогової величини (найчастіше це напруга  $U_{\text{вих}}$ ), в залежності від вхідного числа  $N_i$ , називається *номінальною функцією* або *характеристикою перетворення* (ХП). Така сукупність може надаватися у вигляді графіка (рис. 5.2)

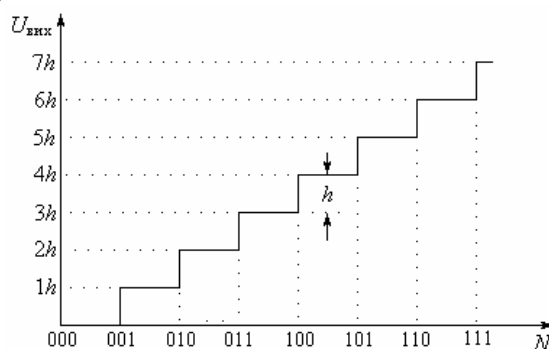


Рисунок 5.2. Характеристика перетворення трирядного двійкового ЦАП

Значення дискретної зміни вихідної аналогової величини при зміні вхідного числа на одиницю називається *кроком квантування*  $h$  (рис. 5.2).

Кількісний зв'язок між вхідним числом та його аналоговим еквівалентом показує формула

$$U_{\text{вих},i} = hN$$

де  $h$  – крок квантування;  $N$  – вхідне число.

Одна з простіших схем ЦАП показана на рис. 5.3.

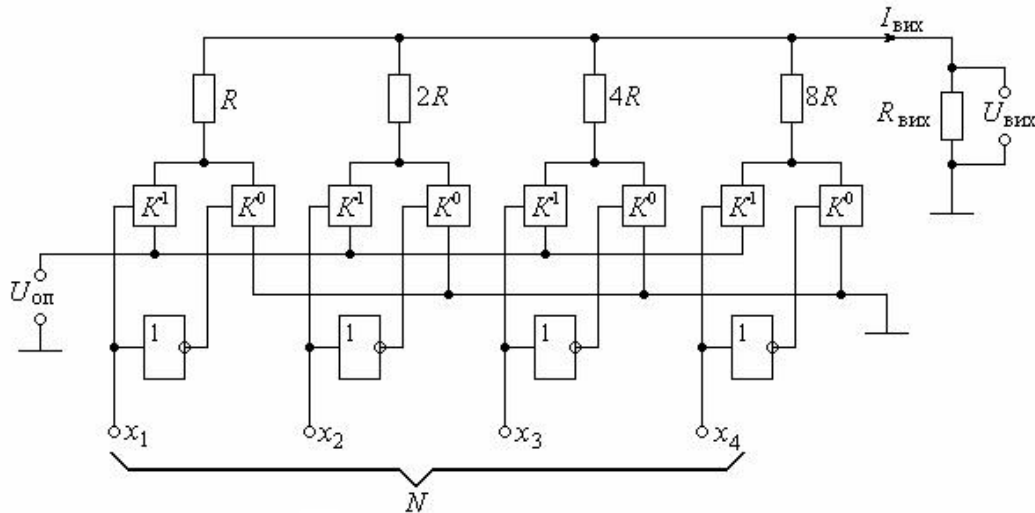


Рис.5.3. Схема ЦАП

У початковому стані  $x_1 = 0$ ;  $x_2 = 0$ ;  $x_3 = 0$ ;  $x_4 = 0$ , через що одиничні ключі  $K^1$  закриті, а нульові  $K^0$  – відкриті. Тому входи резисторів  $R$ ,  $2R$ ,  $4R$  та  $8R$  відірвані від  $U_{\text{оп}}$  і підключені до нуля через відкриті ключі  $K^0$ . Через це вихідного струму немає:  $I_{\text{вих}} = 0$  і, як слідує, вихідна напруга теж дорівнює нулю:  $U_{\text{вих}} = I_{\text{вих}} R_{\text{вих}} = 0$ .

Якщо будь-який вхід одиничний ( $x_i = 1$ ), то  $K^1$  відкривається і підключає відповідний резистор до  $U_{\text{оп}}$ , через що на виході з'являється струм  $I_{\text{вих}}$ , який протікаючи через  $R_{\text{вих}}$ , створює на ньому вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$ . Так вхідний код (цифра) перетворюється в аналог (напругу  $U_{\text{вих}}$ ).

На практиці роль ключів  $K^1$  та  $K^0$  виконують якісь безконтактні пристрої, наприклад, виходи лічильника (рис. 5.3), а кількість входів  $x_i$  досягає 10 ... 16.

На рис. 5.4.показана схема дослідження ЦАП у статичному режимі.

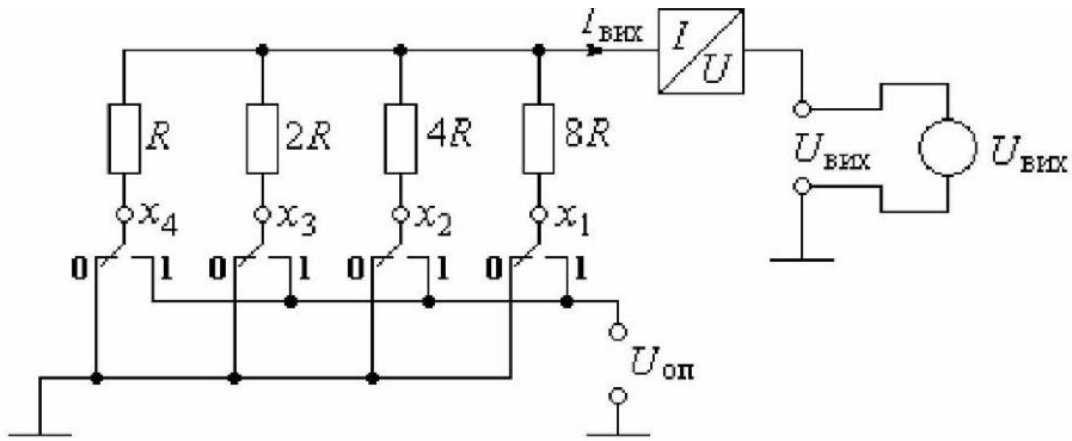


Рис.5.4. Схема для дослідження ЦАП в статичному режимі.

На рис. 5.5 показана схема дослідження ЦАП в динаміці.

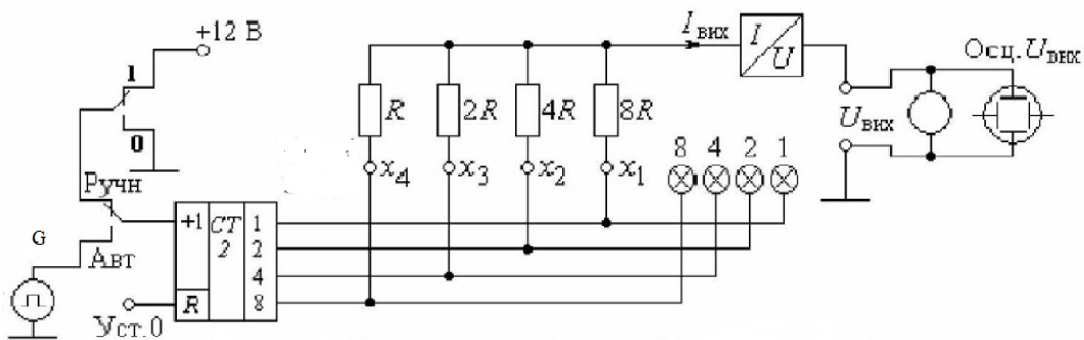
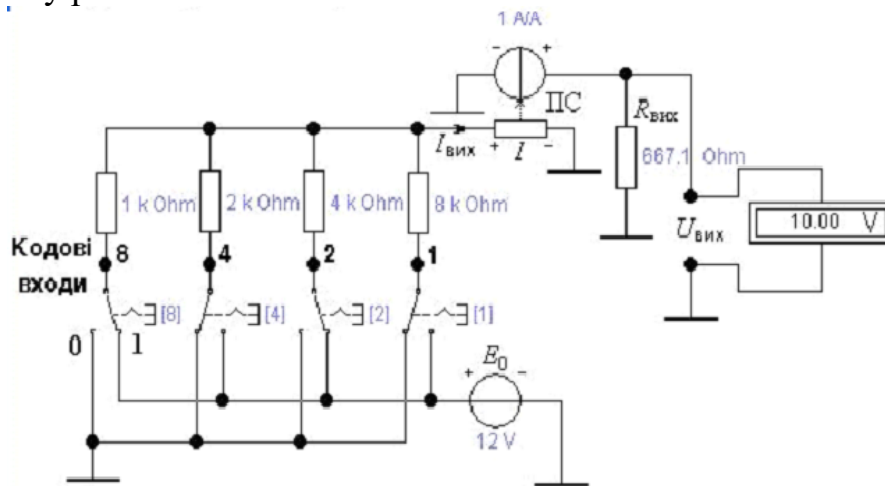


Рис.5.5. Схема для дослідження ЦАП в динамічному режимі.

### Завдання до лабораторної роботи

1. Зібрати схему рис.5.6.



2. Зняти залежність вихідної напруги  $U_{\text{вих}}$  від вхідного числа, яке визначається станом тумблерів [1]...[8]. Стан тумблерів [1]...[8] установлюється клавішами [1] ... [8].

3. Визначити крок квантування

$$h = U_{\text{вих } k} - U_{\text{вих } i}$$

для кожного наступного вхідного числа.

4. Визначити відносну похибку для кожного кроку квантування

$$\Delta = \frac{h_k - h_i}{N_k - N_i} \cdot 100\%$$

де  $N_k$  та  $N_i$  – будь-які суміжні десяткові числа.

5. Результати вимірювань занести до табл. 5.1..

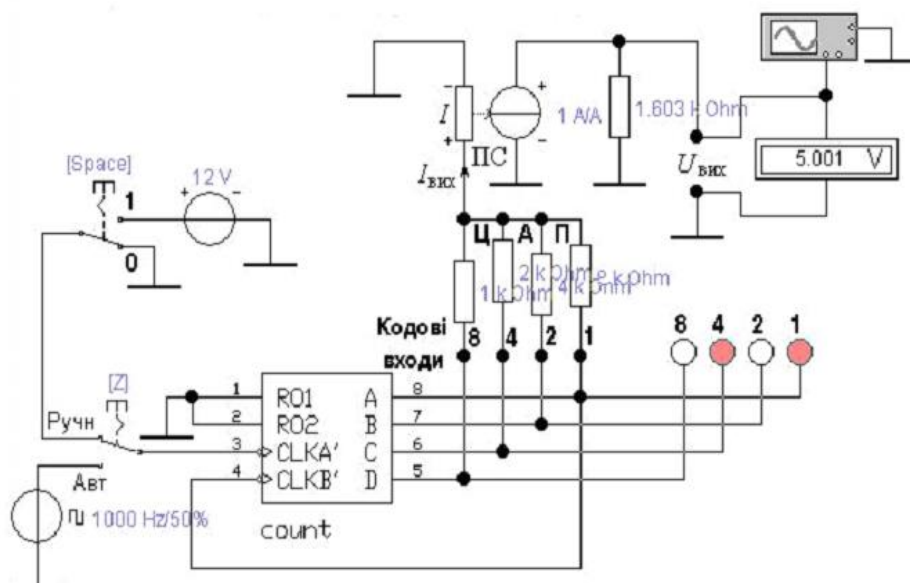
6. Побудувати характеристику перетворення 4-розрядного двійкового ЦАП (рис. 5.6) за даними табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Вхідне число		Показання тумблерів				$U_{\text{вих,}}$	$h,$	$\Delta,$
десяткове	двійкове	[8]	[4]	[2]	[1]	В	В	%
0	0000	0	0	0	0	0	0	
1	0001	0	0	0	1			
2	0010	0	0	1	0			
3	0011	0	0	1	1			
4	0100	0	1	0	0			
5	0101	0	1	0	1			
6	0110	0	1	1	0			
7	0111	0	1	1	1			
8	1000	1	0	0	0			
9	1001	1	0	0	1			

### Дослідити ЦАП в динамічному режимі

1. Зібрати схему рис.5.7.



2. Зняти залежність вихідної напруги  $U_{\text{вих}}$  від показань лічильника. Для цього установити ручний запуск лічильника клавішею Z. Вміст лічильника змінювати в межах 0000-1001.

3. Виміряти вихідну напругу вольтметром. Заповнити таблицю.

Вхідне число	Покази лічильника				$U_{\text{вих.}}$ В	Крокиквантування, В
	8	4	2	1		
0000	0	0	0	0	1.000	1.000
0001	0	0	0	1	2.000	1.000
0010	0	0	1	0	3.000	1.000
0011	0	0	1	1	4.000	1.000
0100	0	1	0	0	5.000	1.000
0101	0	1	0	1	6.000	1.000
0110	0	1	1	0	7.000	1.000
0111	0	1	1	1	8.000	1.000
1000	1	0	0	0	9.000	1.000
1001	1	0	0	1	10.000	1.000

– установити ручний запуск лічильника переведенням тумблера Z в положення „Ручн” клавішею Z;

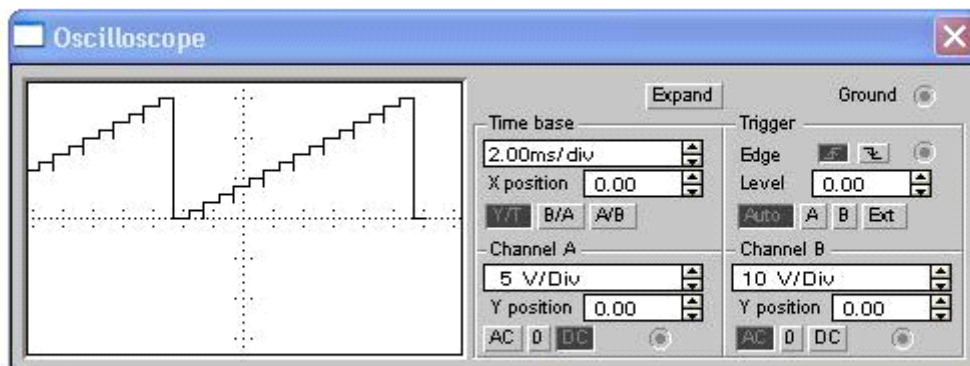
5 Дослідити ЦАП в динамічному режимі.

1. установити автоматичний запуск лічильника переведенням тумблера Z в положення „Авт” клавішею Z;

2. Відкрити осцилограф установленням курсора на його зображення і по-двійним клацанням лівою клавішею миші;

3. після появи на екрані зображення (рис. ) зупинити його кнопкою *Pause*;

4. навести в *масштабі* один період діаграми роботи за формою (рис. 5.8).



### Вимоги до оформлення звіту

Звіт повинен бути представлений в електронному вигляді. Вихідний файл звіту повинен бути збережений у форматі «\*.docx» та «\*.pdf».

*Структура звіту повинна містити наступні елементи:*

титульний аркуш; мету роботи; покроковий опис виконаних дій з рисунками, таблицями тощо; висновки по роботі. Усі рисунки, таблиці, схеми та розділи у звіті повинні бути підписані .

### **Контрольні запитання**

1. Принцип дії ЦАП.
2. Зв'язок між кількістю кроків квантування та місткістю лічильника.
3. ЦАП на двійково-зважених резисторах.
4. ЦАП на основі матриці резисторів

## Література

- 1.Рибальченко М.О., Єгоров О.П.,Зворикін В.Б Цифрова обробка сигналів Дніпро НМетАУ 2018,79с.
- 2.Засоби передавання інформації в системах технічного захисту інформації: лабораторний практикум / укл.: С.В. Єгоров, Т. В. Німченко, В. А. Швець. – К.: НАУ, 2015. – 117 с.
- 3.Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електроніка» / Укладачі: Воробйова О.М., Савицька М.П., Флейта Ю.В., Альошина Л.О. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2016. – 48 с.
- 4.Ошаровська О.В., Устінов С.С., Мазуркевич О.Ф., Патлаєнко Н.О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Цифрова обробка сигналів» ,Одеса,74с.