

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторного практикуму з дисципліни

**“МЕТРОЛОГІЯ”**

для студентів всіх форм навчання спеціальностей

”

ЗАТВЕРДЖЕНО

кафедрою метрології

Протокол № 3 від 18.09.2019 р.

Харків 2019

## ЗМІСТ

Загальні положення .....	4
1 Вимірювання параметрів елементів електрорадіокіл .....	6
1.1 Організація самостійної роботи .....	6
1.2 Лабораторне завдання .....	17
1.3 Опис лабораторної установки .....	17
1.4 Методичні вказівки до виконання лабораторного завдання .....	18
1.5 Контрольні запитання та завдання .....	19
2 Дослідження електронного осцилографа .....	20
2.1 Організація самостійної роботи .....	20
2.2 Лабораторне завдання .....	24
2.3 Опис лабораторної установки .....	24
2.4 Методичні вказівки до виконання лабораторного завдання .....	24
2.5 Контрольні запитання та завдання .....	26
3 Вимірювання частоти .....	27
3.1 Організація самостійної роботи .....	27
3.2 Лабораторне завдання .....	38
3.3 Опис лабораторної установки .....	38
3.4 Методичні вказівки до виконання лабораторного завдання .....	38
3.5 Контрольні запитання та завдання .....	41
Перелік посилань .....	55

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Лабораторний практикум є важливим елементом навчального процесу, служить для закріплення лекційного матеріалу та придбання практичних навичок роботи з вимірювальною апаратурою. В процесі лабораторної роботи студент перевіряє свої теоретичні знання на практиці.

Виконання лабораторного завдання містить в собі такі етапи: позааудиторну самостійну підготовку, здачу допуску до роботи, експеримент, оформлення звіту та захист роботи.

Самостійна робота студента передбачає ознайомлення з вказівками до лабораторної роботи, визначення її мети і задач, вивчення відповідних розділів рекомендованої літератури, ознайомлення з правилами експлуатації використовуваної вимірювальної апаратури.

Допуск до занять проводиться за контрольними питаннями, наведеними в кожній роботі, після чого студент приступає до проведення експерименту. По закінченні роботи студент подає результати викладачу для перевірки та відмітки про виконання, наводить порядок на робочому місці та приступає до оформлення звіту, виконуючи необхідні розрахунки, креслення та ін.

Звіт оформлюється індивідуально з дотриманням нормативної документації. Оформлення звіту починається з титульної сторінки, на якій вказуються кафедра, назва роботи, прізвище та ініціали студента, котрий виконав звіт, група, в якій студент навчається, прізвище та ініціали викладача, який прийняв звіт. До звіту включають: мету роботи; лабораторне завдання; схеми вимірювальних установок; результати експерименту та розрахунків; розрахункові співвідношення; висновки з оцінкою проведеного експерименту та поясненням отриманих результатів.

Захист роботи проводиться в навчальний період після завершення експерименту та підготовки звіту. До наступної роботи не допускаються студенти, які не захистили попередню роботу. Під час виконання лабораторних робіт необхідно дотримуватись таких правил техніки безпеки:

1. Перед початком роботи перевірити наявність захисного заземлення на всіх приладах, що вмикаються в мережу.

2. Кожну роботу виконувати за допомогою призначеного для цього обладнання та приладів. Використовувати прилади з інших робочих місць без дозволу викладача або лаборанта забороняється.

3. Забороняється без дозволу викладача виймати вимірювальні прилади з кожухів.

4. Не залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою.

5. Категорично забороняється виконувати будь-які перемикання на загальних лабораторних розподільних щитах.

6. При виникненні будь-яких збоїв в режимі роботи схеми або при зникненні напруги живильного кола негайно вимкнути прилади та повідомити про це викладача.

7. До виконання лабораторного практикуму допускаються студенти, які ознайомилися з правилами техніки безпеки.

# 1 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОРАДІОКІЛ

Мета роботи – вивчення методів та засобів вимірювання параметрів елементів електричних та радіотехнічних кіл, придбання практичних навичок роботи зі стандартною вимірювальною апаратурою.

## 1.1 Організація самостійної роботи

### 1.1.1 Завдання до самостійної підготовки до роботи

Ознайомитися з лабораторним завданням та вказівками до його виконання.

Ознайомитися з правилами експлуатації, технічними та метрологічними характеристиками засобів вимірювальної техніки, що використовуються у лабораторній роботі для експериментальних досліджень [1-2].

Вивчити методи вимірювань параметрів елементів електричних та радіотехнічних кіл [3-5].

Вивчити методи перевірки омметрів [6].

Вивчити методики проведення вимірювань параметрів елементів електрорадіокіл стандартною вимірювальною апаратурою, що використовується в лабораторній роботі .

### 1.1.2 Методичні вказівки до самостійної підготовки

#### 1.1.2.1 Еквівалентні схеми елементів електрорадіокіл

Електричні та радіотехнічні кола містять пасивні двополюсники (ДП) із зосередженими постійними – резистори, котушки індуктивності, конденсатори, що характеризуються своїми технічними параметрами та властивостями. Передача електричної енергії крізь електричне коло супроводжується складними процесами утворення електричних та магнітних полів й перетворенням енергії. При деяких припущеннях електричне коло можна розглядати як коло, що складене з ідеальних елементів  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , у кожному з яких відбуваються електромагнітні явища одного типу.

Властивості електричних пасивних ДП досліджують шляхом впливу на них синусоїдального струму, а в якості узагальнених характеристик використовують комплексний опір  $Z = \dot{U}/\dot{I}$  або комплексну провідність  $Y = 1/Z = \dot{I}/\dot{U}$ . Отже, результати вимірювань узагальнених характеристик залежать від параметрів еквівалентної схеми ДП та частоти, на якій проводять вимірювання.

У будь-якого ДП, окрім його основних параметрів, існують паразитні, значення яких залежать від конструкції, матеріалів, що використовуються, технології виготовлення.

Для визначення впливу паразитних параметрів на роботу ДП розглянемо еквівалентні схеми ДП (див. рис. 1.1).

Для резисторів (рис. 1.1 а)) основним параметром є опір електричному струму  $R$ , а паразитними – індуктивність  $L_R$  дротів обмотки та виводів, а також ємність  $C_R$  між витками та виводами. При постійному струмі або струмі

низької частоти паразитні параметри не впливають на точність вимірювань або їх вплив незначний.

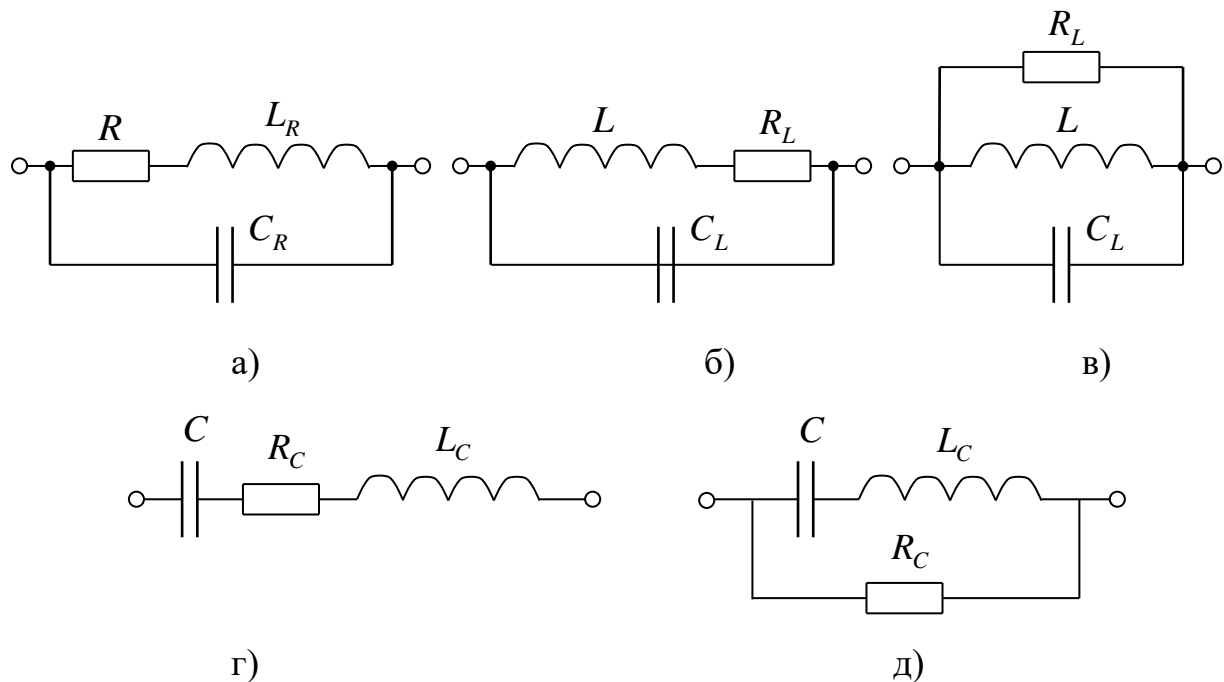


Рисунок 1.1 – Еквівалентні схеми заміщення двополіусників

Для котушки індуктивності (рис. 1.1 б) та в)) основним параметром є індуктивність  $L$ , паразитними – опір втрат  $R_L$  та власна ємність котушки  $C_L$ . Замість опору втрат котушки індуктивності зазвичай характеризуються добротністю

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R_L},$$

де  $\omega$  – кругова частота.

Важлива характеристика котушки – її власна резонансна частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_L}}.$$

Котушки індуктивності зазвичай застосовуються на частотах нижче резонансної. У цьому випадку параметром  $C_L$  можна зневажити і еквівалентну схему представити як послідовне або паралельне з'єднання індуктивності  $L$  та опору  $R_L$ .

Для конденсатора основний параметр – ємність  $C$ , а паразитними параметрами є індуктивність  $L_C$  пластин і виводів та опір втрат  $R_C$  у діелектрикові. Існують дві схеми заміщення конденсатора:

- із послідовним з'єднанням ємності  $C$  та опору втрат  $R_C$  (рис. 1.1. г)), якщо втрати конденсатора малі;

- із паралельним з'єднанням (рис. 1.1 д)), якщо втрати конденсатора великі.

У більшості конденсаторів параметр  $L_C$ , що визначається здебільшого індуктивністю виводів, мало впливає до частот 50 – 100 МГц й ним можна зневажити.

Для врахування опору втрат конденсатора вводиться поняття кут втрат  $\delta$ , що доповнює до  $90^\circ$  зсув фаз між струмом, що протікає крізь конденсатор, і прикладеною до конденсатора напругою. У ідеального конденсатора  $\delta = 0$ . На практиці використовують не самий кут втрат, а величину  $\operatorname{tg} \delta$ . Для схеми заміщення рис.1.1 г)

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C \cdot R_C,$$

а для схеми рис.1.1 д)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R_C}.$$

Параметри ДП вимірюють наступними методами:

- 1) перетворення вимірюваного параметру в струм або напругу;
- 2) урівноважених кіл;
- 3) резонансним;
- 4) генераторним;
- 5) дискретного рахунку.

1.1.2.2 Метод перетворювання вимірюваного параметру в струм або напругу

Це різновид методу амперметра-вольтметра, у якому одна з величин підтримується постійною. Метод застосовується здебільшого для вимірювання опорів постійному, але в останній час – також і для вимірювань параметрів елементів кіл на змінному струмі.

Найчастіше застосовні схеми омметрів – схеми електромеханічних омметрів з послідовним (рис. 1.2 а)) та паралельним (рис.1.2 б)) включенням вимірюваного опору  $R_x$ .

Для омметрів із послідовною схемою кут відхилення стрілки вимірювального перетворювача визначається виразом

$$\alpha = S \cdot \frac{U}{R_x + R_k + R},$$

де  $S$  – чутливість магнітоелектричного перетворювача до струму;  $R_k$  – змінний резистор;  $R$  – опір вимірювача.

Для омметрів з паралельною схемою

The figure contains four circuit diagrams, each labeled with a Cyrillic letter in a box below it:

- а)** A series circuit containing a DC voltage source  $G_{=}$ , a variable resistor  $R_K$  (with a slider), an ammeter  $A$ , and the resistor  $R_x$  to be measured.
- б)** A series circuit containing a DC voltage source  $G_{=}$ , a variable resistor  $R_K$ , an ammeter  $A$ , and the resistor  $R_x$ . A voltmeter  $V$  is connected in parallel across  $R_x$ .
- в)** A circuit with a DC voltage source  $G_{=}$  connected to a series combination of  $R_0$  and  $R_x$ . The junction between  $R_0$  and  $R_x$  is connected to the non-inverting input of an operational amplifier. The other input of the op-amp is grounded, and its output is also grounded, forming a voltage follower configuration. A voltmeter  $V$  measures the voltage across  $R_x$ .
- д)** A circuit with a DC voltage source  $G_{=}$  connected to a series combination of  $Z1$  and  $Z2$ .  $Z1$  is a variable resistor (potentiometer) and  $Z2$  is a fixed resistor. A voltmeter  $V$  is connected in parallel across  $Z2$ .

Якщо в процесі вимірювання прикладена напруга  $U$  підтримується постійною, то кут відхилення в обох випадках є функцією  $R_x$ . Зазвичай в якості джерела напруги в електромеханічних омметрах застосовуються гальванічні елементи. Оскільки їх напруга при експлуатації зменшується, то перед вимірюванням необхідне ручне регулювання, що здійснюється за допомогою змінного резистора  $R_k$ .

Омметр із послідовним включенням  $R_x$  має якості двозатискового приєднувального кола, тому не придатний для вимірювань малих опорів, оскільки на результат вимірювань будуть впливати опори провідників та контактів.

9

тому що вони включені послідовно із опором джерела та з великим вхідним опором вольтметра. Таким чином схема має якості чотиризапискового приєднувального кола та застосовується для вимірювання малих опорів в омметрах та міліомметрах.

Недоліки розглянутих вище омметрів – велика похибка (1,5 – 5 %) та необхідність ручного регулювання.

В омметрах зі схемою рис. 1.2 в) за допомогою електронного вольтметра з великим вхідним опором вимірюється падіння напруги на  $R_x$  або зразковому  $R_0$  опорах

$$U_x = \frac{U}{1 + \frac{R_0}{R_x}}; \quad U_0 = \frac{U}{1 + \frac{R_x}{R_0}}.$$

При вимірюванні малих опорів, коли  $R_0 > R_x$ , зазвичай вимірюють  $U_x$ , а при вимірюванні великих опорів, коли  $R_0 < R_x$ , вимірюють  $U_0$ . Означений омметр на практиці використовується як електронний тераомметр.

Схема рис. 1.2 г) може застосовуватись як на постійному, так і на змінному струмі. Основним вузлом є операційний підсилювач з глибоким негативним зворотним зв'язком. При достатньо глибокому зворотному зв'язку напруга на виході підсилювача  $U = -e \cdot \frac{Z1}{Z2}$  прямо пропорційна вимірюваному опору  $R_x$ , якщо вимірюваний ДП включений у коло зворотного зв'язку ( $Z_x = Z2$ ), або провідності  $Y_x = \frac{1}{Z_x}$ , якщо ДП включений на вході підсилювача ( $Z_x = Z1$ ).

Схема має якості тризапискового кола, тому що вхідний та вихідний опори підсилювача, що охоплені глибоким негативним зворотним зв'язком, малі на постійному струмі. Наведена схема використовується зазвичай у серійних вимірювачах великих опорів Е6-17, а також у вимірювачах опорів в складі цифрових універсальних вольтметрів.

На змінному струмі схема рис. 1.2 г) використовується у цифрових вимірювачах опору  $Z_x$  або провідності  $Y_x$  інтегруючого типу.

#### 1.1.2.3 Метод врівноважених вимірювальних кіл

З методів врівноважених кіл для вимірювання параметрів ДП найчастіше застосовуються чотириплечові мостові кола (рис.1.3). вони можуть використовуватися як на постійному (мости постійного струму), так і на змінному струмі (мости змінного струму).

Мости постійного струму застосовуються для вимірювання активних опорів. Найбільш розповсюдженими є одинарні та подвійні мости постійного струму з ручним або автоматичним врівноваженням. При вимірюванні міст балансується (отримують нульові показання індикатору) зміною опору одного з плечей, в якості якого використовується магазин опорів. Межі вимірювань



збільшуються зміною відношення опорів двох інших плечей. Вимірюваний опір визначають з умови рівноваги мосту.

Для мосту постійного струму умова рівноваги

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3.$$

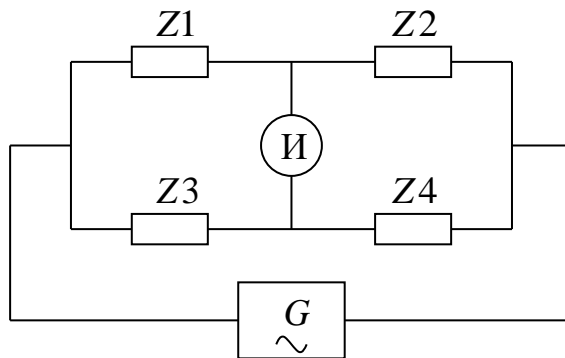


Рисунок 1.3 – Чотирьохплечове мостове коло

Якщо невідомим є опір  $R_x = R_1$ , то  $R_x = R_2 \cdot R_3 / R_4$ .

Похибка мостів постійного струму визначається чутливістю індикатора та похибкою опорів плечей і складає  $\pm(0,01 \dots 0,5) \%$  при вимірюванні опорів від 5 Ом та вище.

Рівновага чотирьохплечового мосту змінного струму настає при виконанні умови

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3,$$

тобто необхідно врівноважувати як активну, так і реактивну складові плечей.

При зміні значень активної та реактивної складових одночасно змінюються модуль та фаза, тому міст змінного струму врівноважують методом послідовних наближень до одержання мінімальних показань індикатору. Параметри вимірюваних елементів визначають з умови рівноваги мостів, прирівнюючи окремо уявні та дійсні частини. Чотирьохплечові мости забезпечують вимірювання при двох-, трьох- та чотирьохзатисковому включенні вимірюваного ДП. Чотирьохплечові мости зазвичай використовуються на низьких частотах.

Умова рівноваги для схеми мосту змінного струму для вимірювання параметрів котушок індуктивності (рис. 1.4 а))

$$(R_x + j \cdot \omega \cdot L_x) \cdot \frac{R_0}{1 + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot R_0} = R_2 \cdot R_3,$$

для схеми мосту змінного струму для вимірювання параметрів конденсаторів (рис. 1.4 б))

$$\left( R_x + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_x} \right) \cdot R_4 = \left( R_0 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0} \right) \cdot R_2.$$

Параметри вимірюваних елементів, отримані з умов рівноваги, для схеми рис. 1.4 а)

$$L_x = C_0 \cdot R_2 \cdot R_3; \quad R_L = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_0}; \quad Q = \omega \cdot C_0 \cdot R_0;$$

для схеми рис. 1.4 б)

$$C_x = \frac{C_0 \cdot R_4}{R_2}; \quad R_C = \frac{R_0 \cdot R_2}{R_4}; \quad \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_0 \cdot R_0.$$

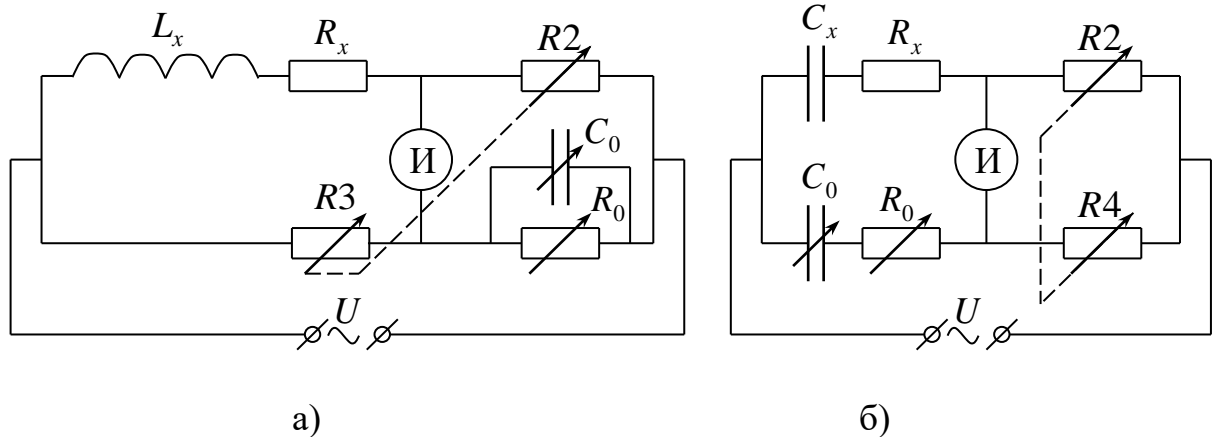


Рисунок 1.4 – Спрощені принципові схеми мостів змінного струму:  
а) для вимірювання параметрів котушок індуктивності;  
б) для вимірювання параметрів конденсаторів

#### 1.1.2.4 Резонансний метод

Резонансний метод використовується для вимірювання параметрів ДП на високих частотах. Його покладено в основу роботи куметрів – приладів для вимірювання добротності. Побічним шляхом ці прилади дозволяють вимірювати інші параметри котушки індуктивності  $L$ ,  $C_L$ , а також параметри конденсаторів  $C$ ,  $R_C$ ,  $\operatorname{tg} \delta$ . Одна з можливих спрощених схем куметра зображена на рис. 1.5.

Принцип вимірювання добротності  $Q$  оснований на тому, що при настройці послідовного контуру в резонанс вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$ , що вимірюється на конденсаторі (або індуктивності), більша за вхідну  $U_{\text{вх}}$  в  $Q$  разів. Підтримуючи значення вхідної напруги постійною, шкалу індикатора

резонансу, в якості якого застосовується електронний вольтметр  $V2$ , можна проградувати в одиницях добротності.

Параметри котушки індуктивності визначають зазвичай безпосередньо резонансним методом. При цьому вимірювану котушку приєднують до затисків 1-2 (рис. 1.5) та настраюють контур у резонанс зміною частоти генератора або ємності зразкового конденсатора  $C_0$ . Добротність контуру в цьому випадку визначається практично лише добротністю котушки, тому що втратами застосованих в куметрі високодобротних конденсаторів та шунтуючою дією другого вольтметра можна зневажити. З цієї причини добротність котушки визначається безпосередньо за шкалою вихідного індикатора. Значення індуктивності та активного опору обчислюють з виразів

$$L_x = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 (C_0 + C_L)}; \quad (1.1)$$

$$R = \frac{2\pi \cdot f \cdot L_x}{Q}. \quad (1.2)$$

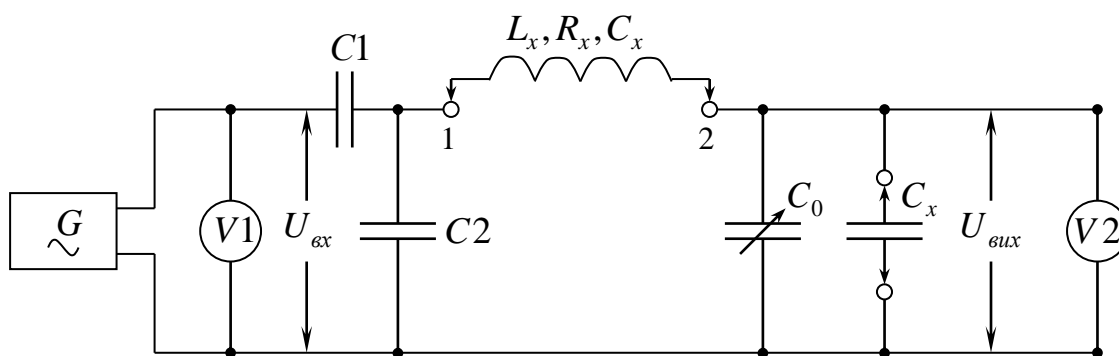


Рисунок 1.5 – Спрощена схема куметру

Власна ємність котушки індуктивності визначають за допомогою сукупних вимірювань, для чого контур настраюють в резонанс на різних частотах  $f_1$  та  $f_2$  і отримують значення ємності зразкового конденсатора  $C_{01}$  та  $C_{02}$ . Значення власної ємності котушки обчислюють за формулою

$$C_L = \frac{f_1^2 \cdot C_{01} - f_2^2 \cdot C_{02}}{f_2^2 - f_1^2} = \frac{C_{01} - n^2 \cdot C_{02}}{n^2 - 1}, \quad (1.3)$$

де  $n = f_2 / f_1$ .

Параметри конденсатора вимірюють методом заміщення. До затисків 1-2 підключають зразкову котушку індуктивності. Змінюючи частоту генератора або ємність зразкового конденсатора, настраюють контур в резонанс і отримують значення  $C_{01}$  та  $Q_1$ . Після цього в залежності від значення ємності

вимірюваного конденсатора підключають його паралельно (якщо  $C_x < C_{0\max}$ ) або послідовно (якщо  $C_x > C_{0\max}$ ) в контур та, не змінюючи частоти генератора, знову настроюють контур в резонанс змінюючи ємності зразкового конденсатора  $C_0$ , отримують значення  $C_{02}$  та  $Q_2$ . параметри конденсаторів визначають з таких виразів:

- при паралельному включенні

$$C_x = C_{01} - C_{02}; \quad (1.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_{01} \cdot (Q_1 - Q_2)}{(C_{01} - C_{02}) \cdot Q_1 \cdot Q_2}; \quad (1.5)$$

- при послідовному включенні

$$C_x = \frac{C_{01} \cdot C_{02}}{C_{02} - C_{01}}; \quad (1.6)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_{01} \cdot Q_1 - C_{02} \cdot Q_2}{C_{01} - C_{02}}. \quad (1.7)$$

Основними факторами, що впливають на похибку вимірювання куметром, є похибка визначення точки резонансу, нестабільність частоти, похибка градування частотної шкали генератора, похибка градування та відліку шкали зразкового конденсатора, а також похибка, викликана паразитними елементами, оскільки у куметрі реалізується двозатискова схема включення. Зниження похибки за рахунок паразитних елементів здійснюється конструктивними методами. Похибка вимірювання складає (2...5) %.

Застосовуються куметри в діапазоні частот від десятків (іноді одиниць) кілогерц приблизно до 250 МГц. На низьких частотах резонансні явища виявляються слабо, внаслідок чого точність вимірювань недостатня для практичних цілей. Верхня межа обмежена труднощами конструювання коливального контуру на зосереджених елементах.

#### 1.1.2.5 Генераторний метод

Генераторний метод базується на зміні частоти генератора при включенні у вимірювальний контур досліджуваних індуктивності та ємності і застосовується для вимірювання малих індуктивностей та ємностей з малими втратами.

Похибка методу визначається неточністю настройки на нульові биття, нестабільністю параметрів зразкового та вимірювального контуру, неточністю відліку ємності конденсатора зразкового контуру та впливом паразитних параметрів, оскільки метод реалізує двохзатискову схему включення. Похибка методу складає  $\pm (1,5...2,5)$  %. Метод реалізовано у приладі Е7-9.

#### 1.1.2.6 Метод дискретного рахунку

Метод дискретного рахунку при вимірюванні параметрів елементів електрорадіокіл полягає в аналоговому перетворенні вимірюваного параметру у часовий інтервал з подальшим його вимірюванням методом дискретного рахунку.

#### 1.1.2.7 Повірка омметрів

Омметри, як і інші вимірювальні прилади, потребують метрологічного забезпечення, однією з найважливіших складових якого є повірка.

Повірка засобів вимірювальної техніки – встановлення придатності засобів вимірювальної техніки, на які поширюється державний метрологічний нагляд, до застосування на підставі результатів контролю їх метрологічних характеристик.

Повірка омметрів регламентується [6].

Періодична повірка омметра передбачає здійснення зовнішнього огляду, випробування, а також визначення метрологічних характеристик: основної похибки та варіації показань.

При здійсненні зовнішнього огляду необхідно встановити:

- відсутність зовнішніх пошкоджень корпусу і пошкоджень покриття шкали, незадовільного кріплення скла, сторонніх предметів всередині корпусу;
- чіткість усіх надписів;
- надійність кріплення деталей електричних з'єднань;
- укомплектованість приладу запасними частинами і приладдям, необхідними для проведення повірки.

При випробуванні омметра необхідно переконатися у чіткій фіксації положень перемикачів, можливості їх встановлення у кожне з передбачених положень, справності зйомних частин елементів комутації, плавності ходу органів плавного регулювання. Також треба перевірити роботу механічного коректору та можливість встановлення електричного нуля на усіх піддіапазонах вимірювання. Після підготовки приладу до роботи та підключення до його входу робочого еталону-міри слід переконатися у можливості переміщення показчика уздовж всієї шкали та у відсутності затирань рухомої частини вимірювального механізму. Прилад повинен бути працездатним на усіх піддіапазонах вимірювання.

Для однодіапазонних омметрів основна похибка визначається на всіх числових позначках шкали. Для багатодіапазонних – на всіх числових позначках одного довільно обраного діапазону, а на решті діапазонів – лише у двох точках, а саме у точках, в яких зафіксовано найменшу та найбільшу похибки при повірці на усіх числових позначках першого діапазону.

Основну похибку омметра визначають шляхом вимірювання омметром опору робочого еталону-міри (магазину опорів), похибка якого не повинна перевищувати 0,2 межі допустимої основної похибки омметра. Робочий еталон повинен забезпечувати зміну опору степенями, які не перевищують 0,1 межі допустимої основної похибки омметра. Якщо робочий еталон не задовольняє цій вимозі, послідовно з ним включають робочий еталон-міру з меншими дискретністю зміни опору та межею допустимої похибки.

Абсолютну основну похибку на певній відмітці шкали визначають наступним чином. Магазин опорів підключають до зажимів омметра, що підлягає повірці. Змінюючи опір магазину, встановлюють показчик на позначку шкали, що перевіряється, підводячи показчик до цієї позначки спочатку з одного боку, а потім з іншого (при плавному переміщенні показчика з однієї сторони стрілка не повинна переходити через позначку, що перевіряється). Визначають відповідно два значення абсолютної похибки  $\Delta_1$  та  $\Delta_2$ :

$$\Delta_1 = R - R_{01}; \Delta_2 = R - R_{02}, \quad (1.8)$$

де  $R$  – номінальне значення опору, що відповідає позначці шкали;  $R_{01}$  та  $R_{02}$  – значення опорів магазину опорів при плавному переміщенні показчика з одного та другого боків.

За абсолютну основну похибку  $\Delta$  приймають найбільшу (за абсолютним значенням) різницю.

Приведену основну похибку розраховують для всіх позначок, що перевіряються, з урахуванням особливостей нормування меж допустимої основної похибки омметрів різних типів.

Для омметрів, похибка яких нормована у відсотках від довжини всієї шкали (клас точності позначено значенням меж допустимої основної похибки з кутом під ним, наприклад 1,5), наведена основна похибка

$$\gamma_{\text{л}} = \frac{\Delta \cdot S}{L} \cdot 100, \quad (1.9)$$

де  $\gamma_{\text{л}}$  – лінійно-зведена похибка (похибка, що виражена у відсотках від довжини всієї шкали або її частини), %;  $L$  – довжина шкали, мм;  $S = \Delta l / \Delta R$  – чутливість омметра в даній позначці шкали, тобто довжина частки шкали  $\Delta l$ , що приходить на одиницю опору біля позначки, що перевіряється, мм/Ом.

Для омметрів, похибка яких нормована у відсотках від кінцевого значення діапазону вимірювання (клас точності позначено значенням меж допустимої похибки, 1,5), наведена основна похибка

$$\gamma = \frac{\Delta}{R_{\text{н}}} \cdot 100, \quad (1.10)$$

де  $\gamma$  – зведена похибка, %;  $R_{\text{н}}$  – кінцеве значення діапазону вимірювання в тих самих одиницях, що й  $\Delta$ .

Для омметрів, похибка яких нормована у відсотках від робочої частини шкали, наведена основна похибка

$$\gamma_{л,р} = \frac{\Delta \cdot S}{L_p} \cdot 100, \quad (1.11)$$

де  $\gamma_{л,р}$  – лінійно-приведена похибка робочої частини шкали, %;  $L_p$  – довжина робочої частини шкали, мм.

Варіацію показань визначають в процесі визначення абсолютної основної похибки на тих самих позначках шкали як різницю між двома значеннями абсолютної похибки  $\Delta_1$  та  $\Delta_2$

$$b = |\Delta_1 - \Delta_2| = |R_1 - R_2|. \quad (1.12)$$

Припустима варіація показань залежить не тільки від класу точності приладу, але й від його стійкості до механічних впливів, а також від габаритів та деяких інших чинників. Варіація показань не повинна перевищувати:

1)  $1,5 \cdot \Delta_{дон}$  – для:

- приладів, стійких до механічних впливів;
- щитових приладів з розміром фланця до 100 мм;
- переносних приладів з розміром лицевої частини до 150 мм;
- засобів вимірювальної техніки змінного струму класів точності 0,1 та вище;

2)  $0,5 \cdot \Delta_{дон}$  – для:

- комбінованих засобів вимірювальної техніки, які мають рухому частину на розтяжках;
- будь-яких засобів вимірювальної техніки, які атестовані як робочі еталони;

3)  $1,0 \cdot \Delta_{дон}$  – для всіх інших приладів.

За результатами порівняння визначеної основної похибки та варіації показань з допустимими роблять висновок про придатність приладу до застосування.

За результатами повірки складають протокол, в якому вказують:

- тип, назву та заводський номер приладу, що підлягав повірці;
- перелік робочих еталонів (з їх заводськими номерами);
- умови повірки;
- результати вимірювань та розрахунків метрологічних характеристик;
- висновки за результатами виконання кожної процедури.

Позитивні результати періодичної повірки оформлюють нанесенням на омметр печатки повірочного клейма. За негативних результатів повірки клейма гасять та видають власникові повідомлення про непрацездатність омметра із зазначенням причин.

## 1.2 Лабораторне завдання

1. Здійснити навчальну повірку мегаомметра Е6-17.

2. Виміряти мегаомметром Е6-17 опір високоомних резисторів.
3. Виміряти параметри котушки індуктивності вимірювачем добротності Е4-11.
4. Виміряти параметри конденсатору вимірювачем добротності Е4-11.

### 1.3 Опис лабораторної установки

До складу лабораторного робочого місця входять наступні засоби вимірювальної техніки і вимірювальні приналежності:

мегомметр Е6-17;  
 вимірювач добротності Е4-11;  
 магазин опорів Р4831;  
 резистори;  
 зразкова котушка індуктивності;  
 конденсатори.

### 1.4 Порядок виконання роботи

1.4.1 Навчальна повірка мегаомметра Е6-17 полягає в визначенні його похибки та варіації показань згідно пп. 1.1.2.2. В якості робочого еталону при повірці виступає зразковий магазин опорів Р4831.

Для визначення похибки стрілку приладу встановити регулюванням магазину опорів на оцифровану позначку шкали спочатку з лівого, а потім з правого боків. Отримати дійсні значення, відповідні цій позначці,  $R_{01}$  та  $R_{02}$ . Отримані дані занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати навчальної повірки мегаомметра Е6-17

Повірочна точка $R$ , Ом	$R_{01}$ , Ом	$R_{02}$ , Ом	$\Delta_1$ , Ом	$\Delta_2$ , Ом	Значення нормуючого коефіцієнту	$\gamma$ , %	$b$ , Ом

Розрахувати два значення абсолютної основної похибки за формулами (1.8), результати занести в табл. 1.1. За абсолютну основну похибку  $\Delta$  прийняти найбільшу за абсолютним значенням різницю.

Розрахувати приведену основну похибку з урахуванням нормування меж допустимої основної похибки однією з формул (1.10) – (1.11). Значення нормуючого коефіцієнту та приведенної основної похибки навести в табл.1.1.

Розрахувати варіацію показань за формулою (1.12).

Аналогічні результати отримати для інших оцифрованих позначок шкали заданого викладачем діапазону. Результати занести в табл. 1.1.



Найбільшу за абсолютним значенням похибку порівняти з межею допустимої основної похибки, приведеною у паспорті приладу (класом точності), зробити висновок про придатність приладу до експлуатації.

1.4.2 Виміряти мегаомметром Е6-17 опори заданих викладачем резисторів. Використовуючи нормовані значення похибки для даного приладу, визначити похибки та записати результати вимірювань.

1.4.3 Користуючись інструкцією з експлуатації вимірювача добротності Е4-11, отримати індуктивність  $L$ , добротність  $Q$ , власну ємність  $C_L$  та активний опір  $R$  зразкової котушки індуктивності (за допомогою виразів (1.1) – (1.3)). Записати результати вимірювань.

1.4.4 Користуючись інструкцією з експлуатації вимірювача добротності Е4-11, отримати ємність  $C$  та тангенс куту втрат  $\operatorname{tg} \delta$  запропонованого викладачем конденсатору (за допомогою виразів (1.4), (1.5)). Записати отримані результати. Визначити похибку вимірювання ємності  $C$ , прийнявши за дійсне номінальне значення ємності конденсатора.

## 1.5 Контрольні запитання та завдання

*Для допуску*

1. Поясніть методику проведення експерименту при повірці мегаомметру Е6-17.
2. Наведіть вимоги, що висуваються до робочого еталону при повірці омметрів.
3. Як позначаються класи точності омметрів, в чому різниця між ними?
4. Вкажіть послідовність операцій при вимірюванні параметрів котушки індуктивності за допомогою вимірювача добротності Е4-11.
5. Вкажіть послідовність операцій при вимірюванні параметрів конденсаторів за допомогою вимірювача добротності Е4-11.
6. Чим зумовлені похибки вимірювача добротності Е4-11.

*Для захисту*

1. Наведіть еквівалентні схеми пасивних ДП. Від чого залежать їх узагальнені характеристики?
2. Які методи вимірювання параметрів ДП ви знаєте? Коротко опишіть їх.
3. Наведіть схему омметру з послідовною схемою включення вимірюваного опору. Поясніть принцип його роботи.
4. Наведіть схему омметру з паралельною схемою включення вимірюваного опору. Поясніть принцип його роботи.
5. Опишіть процедуру повірки омметру.
6. Опишіть метод урівноважених вимірювальних кіл. Наведіть схему чотири плечового мостового кола.

7. Поясніть принцип вимірювання параметрів котушок індуктивності за допомогою вимірювача добротності Е4-11.

8. Поясніть принцип вимірювання параметрів конденсаторів за допомогою вимірювача добротності Е4-11.

9. Наведіть основні фактори, що мають вплив на похибку вимірювача добротності Е4-11. Укажіть межі застосування приладу.

10. Опишіть генераторний метод вимірювання параметрів котушок індуктивностей та конденсаторів. Поясніть, чим зумовлена похибка цього методу.

## **2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА**

Мета роботи – вивчення принципу дії та будови електронного осцилографа, набуття практичних навичок осцилографування електричних коливань та вимірювання їх параметрів за допомогою електронного осцилографа.

### **2.1 Організація самостійної роботи**

#### **2.1.1 Завдання на самостійну підготовку до роботи**

Ознайомитися з лабораторним завданням і методичними вказівками до його виконання.

Вивчити будову, принцип дії, основні технічні та метрологічні характеристики осцилографа та особливості осцилографування електричних і неелектричних процесів [1, 5, 7-8].

#### **2.1.2 Методичні вказівки до самостійної підготовки**

2.1.2.1 Електронний осцилограф – універсальний вимірювальний прилад, основним функціональним призначенням якого є відтворення форми електричних сигналів, тобто графічного зображення залежності миттєвих значень напруги сигналу від часу.

В залежності від технічних характеристик та вузько спрямованого функціонального призначення осцилографи поділяються на універсальні, швидкісні (високочастотні), стробоскопічні, запам'ятовувальні та спеціальні. Основою їх є універсальний осцилограф, а вузька функціональна спрямованість окремих досягається розширенням певних функцій на шкоду універсальності.

Вивчення електронного осцилографа в лабораторній роботі здійснюється на основі універсального осцилографа. Його розгорнута функціональна схема зображена на рис.1.1.

До складу осцилографа входить: електронно-променева трубка (ЕПТ), блок живлення та три електронні канали: вертикального відхилення (канал Y), горизонтального відхилення (канал X), канал управління яскравістю (канал Z) та допоміжний блок - калібратор амплітуди та тривалості.

2.1.2.2 ЕПТ – це перетворювач електро - кінетичної енергії електронів у світлову енергію. Конструктивно трубка являє собою скляну вакуумну колбу, в якій розміщуються електронний прожектор – система електродів, що формує вузький пучок електронів і управляє його густиною, та дві пари взаємоперпендикулярних пластин, які дозволяють спостерігати досліджуваний процес в декартовій системі координат.

Внутрішня поверхня дна колби покривається спеціальним матеріалом (люмінофором). Електрони, співударяючись з люмінофором, збуджують його і він засвічується.

Положення пучка електронів у площині екрана залежить від напруги на пластинах і при її зміні світна точка змінює своє положення так, що траєкторія

руху світної точки повторюватиме залежність  $U_y = F(U_x)$ , де  $U_y$  і  $U_x$  – миттєві значення напруг відповідно на пластинах Y та X.

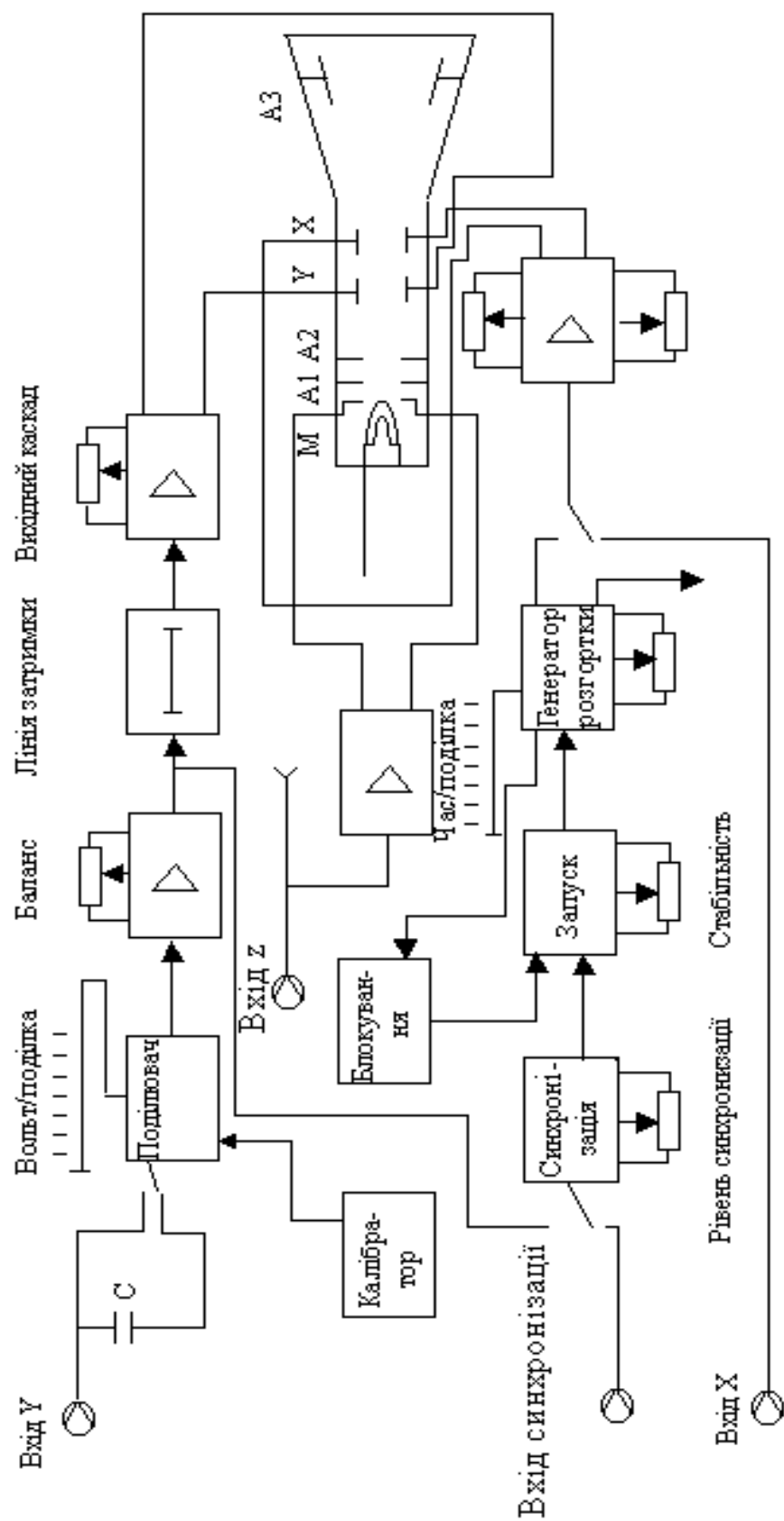


Рисунок 2.1 – Функціональна схема осцилографа

Оскільки світіння люмінофора згасає не миттєво, а має деякий час післясвітіння; то при його достатньому значенні на екрані ЕПТ буде видно всю функцію одночасно.

Таким чином, безпосередньо на екрані трубки з електростатичним управлінням можна спостерігати зображення лише електричних процесів.

Неелектричні процеси  $A = F(B)$  можна спостерігати лише за умов, якщо величини  $A$  та  $B$  можна замінити на їх електричні еквіваленти  $U_a = k_a \cdot A$  та  $U_b = k_b \cdot B$ . Саме такий приклад має місце при відтворенні за допомогою електронного осцилографа форми змінного сигналу, тобто залежності  $U = f(t)$ , в якій час  $t$  є неелектричною величиною. В цьому разі плин часу можна імітувати за допомогою пилоподібної напруги, миттєві значення якої змінюються у часі за законом:

$$U_n(t) = \frac{U_m}{T} \cdot t = k_t \cdot t,$$

де  $U_m, T$  – пікове значення та період пилоподібного коливання;  $k_t = \operatorname{tg} \alpha$  – постійний коефіцієнт для ідеального пилоподібного коливання;  $\alpha$  – кут нахилу пилоподібного коливання.

Під час спостереження форми досліджуваній сигнал подається на пластини Y трубки, а пилоподібне коливання – на пластини X.

Оскільки відображення форми сигналу – основне функціональне призначення осцилографа, то кожен із них містить в собі джерело пилоподібних коливань.

Траєкторія, за якою промінь переміщується у напрямі осі X, називається розгорткою зображення.

Розгортку поділяють на:

- лінійну (здійснюється за допомогою напруги, яка лінійно змінюється у часі і залишає після себе пряму лінію) та нелінійну;

- внутрішню (здійснюється за допомогою генератора, що є в осцилографі) та зовнішню (здійснюється напругою, що подається на вхід X ззовні);

- неперервну (імпульси розгортки прямують один за одним безперервно) та очікувальну (генератор розгортки спрацьовує тільки під впливом імпульсу запуску, виробляє один імпульс і чекає приходу наступного імпульсу запуску).

Зображення на екрані ЕПТ формується за один період розгортки, тому коли імпульси розгортки ідуть один за одним, то зображення, розгорнуте кожним наступним імпульсом, буде нашаровуватись на зображення, розгорнуте попередніми імпульсами, і картинка на екрані ЕПТ сприймається як нерухома лише за умови, що  $T_p = nT_c$  ( $T_p$  і  $T_c$  – періоди сигналів розгортки та досліджуваного;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – цілі числа). Щоб ця умова виконувалась завжди, частоту імпульсів розгортки автоматично підтримують кратною частоті сигналу, що досліджується. Ця операція називається синхронізацією.

В залежності від того, як здійснюється синхронізація, її поділяють на:

- внутрішню (здійснюється напругою, яка береться з каналу Y);
- зовнішню (здійснюється напругою, яка подається на вхід синхронізації або X ззовні);
- від мережі (здійснюється напругою живлення).

Внутрішня синхронізація застосовується при дослідженні неперервних сигналів з малою шпаруватістю, зовнішня – при дослідженні імпульсних сигналів з великою шпаруватістю, від мережі – при дослідженні сигналів, утворених з напруги мережі живлення.

2.1.2.3 Канал вертикального відхилення (канал Y) являє собою масштабний перетворювач напруги, який не повинен змінювати її за формою. Він складається з вхідного послаблювача, підсилювача, лінії затримки та блоків, які забезпечують необхідні параметри каналу з боку входу та виходу.

Вхідний послаблювач та підсилювач дають змогу спостерігати та вимірювати сигнали в широкому діапазоні амплітуд, не перевантажуючи канал Y при великих напругах і забезпечуючи достатню чутливість при малих вхідних напругах.

Лінія затримки використовується тоді, коли генератор розгортки в каналі X працює в очікувальному режимі, тобто спрацьовує тільки від імпульсів запуску. Імпульси запуску формуються із сигналу, що діє на вході лінії затримки, отже, спочатку запускається розгортка і лише потім на пластини Y надходить сигнал, який досліджується. Це дає змогу більш детально, без викривлень, розгледіти його передній фронт.

Як зазначалось вище, осцилограф служить для дослідження електричних сигналів у часовій області і до джерела цих сигналів він підключається паралельно. Щоб не шунтувати джерело досліджуваної напруги, осцилограф повинен мати великий вхідний опір та малу вхідну ємність ( $R_{вх} \geq 1 \text{ МОм}$ ;  $C_{вх} \leq 10 - 30 \text{ пФ}$ ). Це досягається побудовою вхідного кола за схемою емітерного повторювача та підключенням осцилографа до джерела напруги за допомогою спеціальних щупів, пасивних або активних (рідше).

Схема входу може бути відкритою або закритою. При відкритій схемі входу сигнал подається в канал Y безпосередньо, а при закритій – через розподільний конденсатор, завдяки чому до каналу Y не надходить постійна складова сигналу.

Перемикач, який змінює схему входу, має, як правило, ще й нейтральне положення, при якому вхід каналу Y замикається на землю.

Вихідний каскад каналу Y повинен узгоджувати вихід каскаду попереднього підсилення з ЕПТ і забезпечити подачу напруги на пластини Y ЕПТ симетрично відносно нульового потенціалу. Остання вимога необхідна, щоб уникнути трапецієподібних викривлень. З цього приводу вихідні каскади каналів X та Y виконують за фазоінверсними схемами.

2.1.2.4 Канал горизонтального відхилення (канал X) призначається для створення пилоподібної напруги та її синхронізації з досліджуваним сигналом.

Пилоподібна напруга виробляється за допомогою генератора розгортки.. Генератор розгортки може працювати у двох режимах: автоколивальному, який

забезпечує безперервну періодичну розгортку, або в режимі одновібратора, коли генератор виробляє пилоподібний імпульс тільки за наявності сигналу запуску. Перехід з безперервного на очікувальний режим здійснюється за допомогою ручок «Стабільність» та «Рівень».

Синхронізація в очікувальному режимі досягається автоматично, примусовим запуском генератора розгортки досліджуванним сигналом або сигналом, який з ним пов'язаний.

В автоколивальному режимі кратність періодів розгортки і досліджуваного сигналу забезпечується за допомогою схем синхронізації та запуску. Ці схеми виробляють прямокутні імпульси постійної амплітуди незалежно від розміру та форми сигналу, що надходить до них.

У підсилювачі каналу Х пилоподібна напруга підсилюється до необхідного значення. Як і підсилювач каналу вертикального відхилення, підсилювач в каналі Х має симетричний вихід.

При використанні зовнішньої розгортки підсилювач відключається від схеми генератора і підсилює сигнал, який надходить до входу Х ззовні.

До каналу Х входить також схема управління променем ЕПТ, яка виробляє прямокутні імпульси, що подаються на спеціальний блокуючий яскравість електрод ЕПТ (модулятор) і гасять промінь під час зворотного ходу розгортки.

## **2.2 Лабораторне завдання**

1. Провести осцилографування гармонічних сигналів, виміряти їх параметри та визначити похибки вимірювань.
2. Провести осцилографування імпульсної послідовності, виміряти її параметри та визначити похибки вимірювань.

## **2.3 Опис лабораторної установки**

До складу лабораторної установки входять: електронний осцилограф С1-76; генератор гармонічних сигналів; генератор імпульсних сигналів Г5-63.

## **2.4 Методичні вказівки до виконання лабораторного завдання**

2.4.1 Основними параметрами гармонічного сигналу є амплітуда  $A_n$ , період  $T$  (частота  $f$ ).

Порядок виконання п.1 лабораторного завдання:

- 1) з'єднати за допомогою кабелю вихід генератора низькочастотних сигналів Г3-109 зі входом У електроно-променевого осцилографа С1-76;
- 2) користаючись інструкцією з експлуатації осцилографа С1-76, виміряти амплітуду і період двох різних гармонічних сигналів, параметри яких задає викладач.

Амплітуда гармонічних сигналів визначається у вигляді



$$A_n = \frac{K_{\kappa\delta} \cdot h_a}{2},$$

де  $K_{\kappa\delta}$  – номінальне значення коефіцієнту відхилення;

$h_a$  – максимальний розмір зображення у напрямку осі Y.

Період будь-якого сигналу визначається через коефіцієнт розгортки  $K_p$  за формулою

$$T = K_p \cdot l_T,$$

де  $l_T$  – розмір періоду сигналу в поділках масштабної сітки;

3) приймаючи в якості дійсних значень параметри сигналу, що встановлені на генераторі, оцініть абсолютну  $\Delta$  і відносну  $\delta$  похибки вимірювань в кожному випадку. Абсолютна і відносна похибка визначається за формулами відповідно

$$\Delta = P_o - P_e, \quad \delta = \frac{\Delta}{P_o} \cdot 100\%.$$

де  $P_o$  – дійсне значення параметру,

$P_e$  – виміряне значення параметру;

4) занести в звіт осцилограми сигналів, що спостерігалися, результати вимірювань и оцінки похибок (див. табл. 2.1). В табл. 2.1 в третьому стовбці вказати  $h_a$  і  $K_{\kappa\delta}$  для амплітудних параметрів та  $l_T$  і  $K_p$  - для часових.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань і розрахунків

Параметр	Значення, що встановлене на генераторі	Значення, що виміряне за допомогою осцилографа	Абсолютна похибка	Відносна похибка
Параметри гармонічного сигналу				
...				
Параметри імпульсної послідовності				
...				

2.4.2 Основними параметрами для імпульсної послідовності є пікове значення  $A_n$ , період прямування  $T$  і тривалість імпульсів  $\tau$ . Порядок виконання п.2 лабораторного завдання:

1) з'єднати за допомогою кабелю вихід генератора прямокутних імпульсів Г5-63 зі входом Y осцилографа С1-76;

2) користаючись інструкцією з експлуатації осцилографа С1-76, виміряти амплітуду, період і тривалість імпульсів для сигналів великої і малої шпаруватості (параметри сигналів задає викладач);

Амплітуда імпульсної послідовності визначається з формули

$$A_n = K_{кв} \cdot h_a ;$$

3) приймаючи в якості дійсних значень параметри сигналу, що встановлені на генераторі, оцініть похибки вимірювань в кожному випадку;

4) занести в звіт осцилограми сигналів, що спостерігалися, результати вимірювань и оцінки похибок (див. табл. 2.1).

## **2.5 Контрольні запитання та завдання**

*Для допуску*

1. Вказати основне функціональне призначення електронного осцилографа.
2. З яких головних вузлів складається осцилограф, яке їх призначення?
3. Навести структурну схему електронного осцилографа, пояснити принцип дії і призначення окремих блоків.
4. Зобразити графічно гармонічний сигнал і вказати його параметри.
5. Зобразити графічно імпульсну послідовність і вказати її параметри.
6. Що таке коефіцієнт відхилення, як визначити його розмір?
7. Що таке коефіцієнт розгортки, як визначити його розмір?

*Для захисту*

1. Пояснити методику вимірювання за допомогою осцилографа напруги і часових параметрів сигналу.
2. Пояснити, яка напруга подається на відхиляючі пластини Х осцилографа.
3. Пояснити, яка напруга подається на відхиляючі пластини Y осцилографа.
4. Що таке розгортка Для чого вона використовується?
5. Пояснити, за рахунок чого на екрані осцилографа можна спостерігати форму сигналу?
6. Пояснити суть синхронізації, навести види синхронізації та вказати, в яких випадках застосовується кожний вид синхронізації.
7. Вкажіть умови синхронізації.
8. Охарактеризувати основні види розгортки осцилографа та їх використання для вимірювань.

### 3 ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Мета роботи – вивчення методів та засобів вимірювання частоти, придбання практичних навичок роботи з частотомірами.

#### 3.1 Організація самостійної роботи

##### 3.1.1 Завдання на самостійну підготовку до роботи

Ознайомитись з лабораторним завданням і вказівками до його виконання.

Вивчити основні методи і засоби вимірювання частоти [1, 4, 5].

Засвоїти методику обробки результатів рівноточних вимірювань [9].

##### 3.1.2 Методичні вказівки до самостійної підготовки

Частота – кількість коливань, що здійснює сигнал в одиницю часу, є одним з основних параметрів електричних і радіосигналів. Діапазон частот електричних і радіосигналів сягає від одиниць герц до 3000 ГГц. В цьому діапазоні частоти 50, 400 і 1000 Гц є промисловими, тому що такі частоти має напруга змінного струму, яка використовується для живлення електро- і радіоапаратури). Частоти діапазону 20 Гц... 20 кГц називаються звуковими, оскільки коливання таких частот сприймаються вухом людини. Для вимірювання частоти в такому великому діапазоні використовується багато методів, основними з яких є методи: дискретного рахунку, порівняння частот, резонансний, мостовий та перезаряду конденсатора.

##### 3.1.2.1 Метод дискретного рахунку

Метод дискретного рахунку належить до методів безпосередньої оцінки частоти. В основі методу лежить підрахунок числа ідентичних подій за певний інтервал часу вимірювання. На основі методу дискретного рахунку працюють електронно-лічильні (цифрові) частотоміри, які отримали на цей час найбільше розповсюдження. Сучасні типи цифрових частотомірів (ЦЧ) дозволяють вимірювати частоту  $f_x$ , період  $T_x$ , інтервал часу  $\Delta t_x$ , відношення частот  $n = f_1 / f_2$ , а при укомплектуванні відповідними перетворювачами вони перетворюються на цифрові вольтметри та мультиметри.

Типова структурна схема ЦЧ зображена на рис.3.1.

В режимі вимірювання частоти  $f_x$  сигнал подається через вхід 1 на вхідний пристрій ВП1, а блок зразкової частоти БЗЧ підключається до формуючого пристрою ФП1. Формуючі пристрої ФП1 і ФП2 необхідні для перетворення гармонічних сигналів в короткі імпульси, які відповідають моментам переходу сигналів через нуль в одну сторону. Це дає можливість сформувати послідовність імпульсів з періодом  $T_x$  (ФП1) і імпульси міток часу (ФП2), з яких управляючий пристрій УП формує строб-імпульс  $T_g$  (часові ворота). Джерелом міток часу є блок зразкових частот БЗЧ, основою якого є кварцовий генератор з системою посилювачів та помножувачів частоти, що дозволяє вибрати необхідний коефіцієнт ділення та множення при формуванні  $T_g$ . Сформовані ФП1 імпульси надходять до входу часового селектора ЧС, який

відкривається під час дії на його управляючому вході стробуючого імпульсу  $U_0$ . Через відкритий часовий селектор імпульси з періодом  $T_x$  надходять на цифровий індикатор ЦІ через лічильний пристрій ЛП, де фіксується їх число  $N$ , пов'язане з  $T_x$  і  $T_\theta$  співвідношенням (рис. 3.2):

$$T_\theta = (N - 1) \cdot T_x + \Delta t_1 + \Delta t_2 = NT_x + \Delta t_\theta.$$

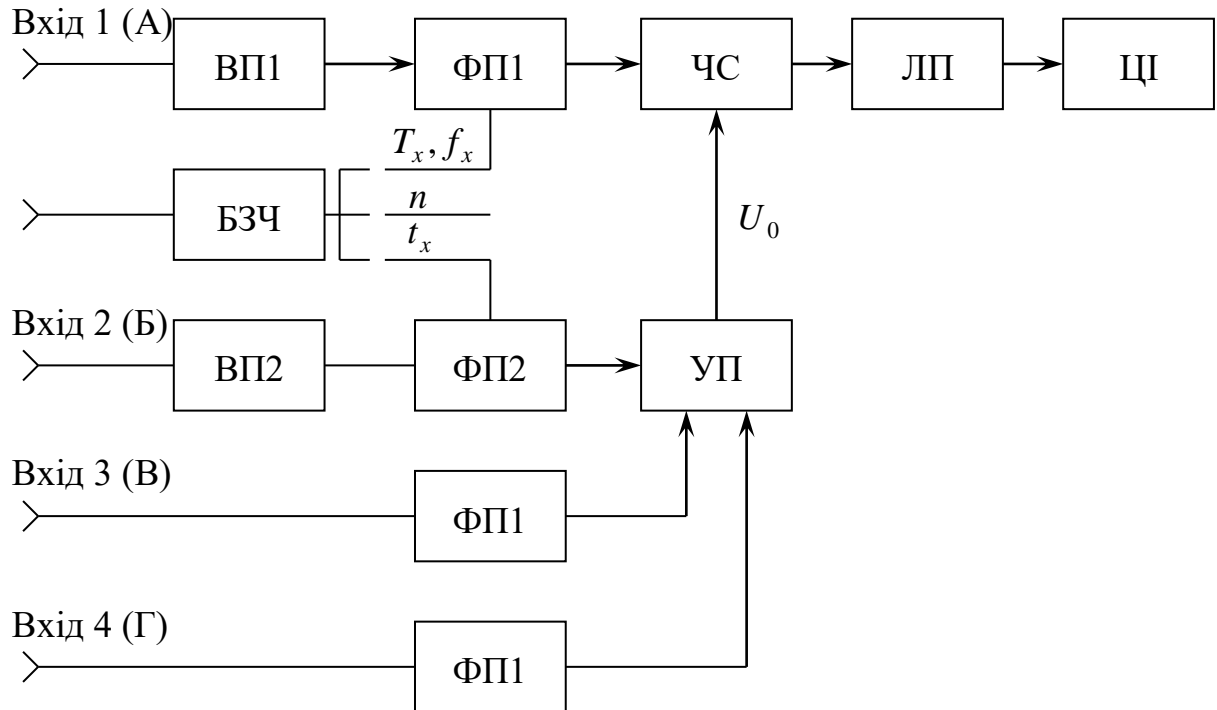


Рисунок 3.1 – Типова структурна схема ЦЧ

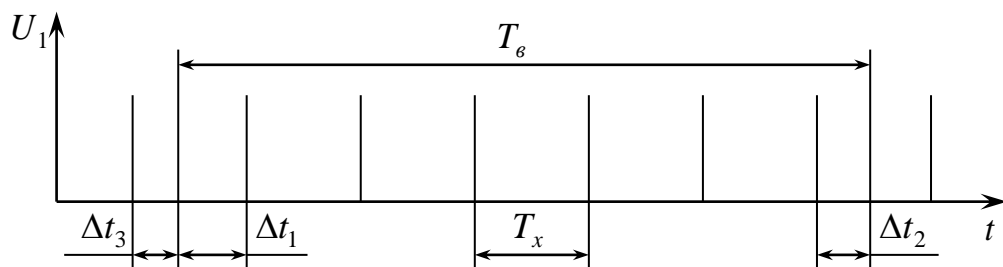


Рисунок 3.2 – Виникнення похибки дискретизації

Звідси

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{N}{T_\theta} \frac{1}{1 - \frac{\Delta t_\theta}{T_\theta}},$$

або приймаючи до уваги, що  $\frac{1}{1 - \frac{\Delta t_\partial}{T_\epsilon}} \approx 1 + \frac{\Delta t_\partial}{T_\epsilon}$ ,

$$f_x = \frac{N}{T_\epsilon} \left( 1 + \frac{\Delta t_\partial}{T_\epsilon} \right).$$

В цих виразах  $\Delta t_\partial = (\Delta t_1 + \Delta t_2 + T_x) = (\Delta t_2 - \Delta t_3)$  є похибка дискретизації, яка виникає внаслідок того, що впродовж часу  $T_\epsilon$  укладається не ціле число періодів  $T_x$  (рис. 3.2). Абсолютне значення цієї похибки не перевищує  $\pm T_x$  і в означених межах розподіляється за трикутним законом.

Загальна похибка вимірювання частоти ЕЛЧ нормується величиною:

$$\delta_f = \pm \left( \delta_0 + \frac{1}{f_x T_\epsilon} \right),$$

де  $\delta_0 = k \cdot 10^n$  ( $k \in 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 5,0; n = -4, -5, \dots$ ) – похибка за частотою опорного генератора БЗЧ.

Другою складовою у виразі для  $\delta_f$  є похибка дискретизації, подана у відносному вигляді:

$$\delta_\partial = \frac{\Delta f_\partial}{f_x} = \frac{N \Delta t_\partial}{T_\epsilon^2}.$$

Приймаючи до уваги, що  $\Delta t_{\text{макс}} = T_x$ , а  $T_\epsilon / T_x = N$ , маємо:

$$\delta_\partial = \frac{1}{f_x T_\epsilon} = \frac{1}{N}.$$

Цей вираз свідчить, що при вимірюванні малих частот похибку дискретизації можна зменшити лише за рахунок збільшення часу вимірювання  $T_\epsilon$ .

В режимі вимірювання періоду  $T_x$  сигнал подається на вхід 2, а БЗЧ підключається до ФП1. В цьому випадку інтервал часу вимірювання визначається  $T_x$ , а рахуються імпульси, сформовані з сигналу зразкової частоти  $f_0$ . Для зменшення похибки дискретизації  $f_0$  звичайно збільшується в  $10^n$  разів. Цей режим роботи ЦЧ описується виразом:

$$T_x = (N - 1) \frac{T_0}{10^n} + \frac{1}{10^n} (\Delta t_1 + \Delta t_2) = N \frac{T_0}{10^n} + \frac{\Delta t_\partial}{10^n}.$$

В цьому виразі збережені позначки, прийняті на рис. 3.2 після заміни  $T_e \rightarrow T_x$  і  $T_x \rightarrow T_0/10^n$ .

Як свідчить вираз для  $T_x$ , при достатньо високих  $n$  і  $T_x$  (на низьких частотах), необхідний інтервал часу вимірювання може дорівнювати  $T_x$ , тобто є можливість вимірювати частоту за один період (неінтегруючий режим). В практичних схемах ЦЧ передбачається можливість вимірювання не тільки одного, а й декількох періодів  $T_x$  з подальшим усередненням результатів вимірювань (інтегруючий режим). Тому в загальному випадку інтервал часу вимірювання вибирається за допомогою управляючого пристрою рівним  $10^m T_x$  ( $m=0,1,2,\dots$ ). Тоді

$$T_x = N \frac{T_0}{10^{(n+m)}} + \frac{1}{10^{(n+m)}} (\Delta t_1 + \Delta t_2 - T_0) = N \frac{T_0}{10^{(n+m)}} + \frac{\Delta t_0}{10^{(n+m)}},$$

або з точністю до похибки дискретизації:

$$T_x = N \frac{T_0}{10^{(n+m)}}.$$

В цьому випадку, як і в наведеному вище

$$\Delta t_{\text{макс}} = \pm T_0.$$

Можливість вимірювання одного або декількох періодів дозволяє використовувати цей режим роботи ЦЧ для вимірювання короточасної нестабільності в реальному масштабі часу.

Похибка  $\delta_T$  вимірювання періоду, як і похибка вимірювання частоти, складається із похибки  $\delta_0$  формування міток часу та похибки дискретизації

$$\delta_T = \pm \left( \delta_0 + \frac{T_0}{10^{(n+m)} T_x} \right).$$

### 3.1.2.2 Метод перезаряду конденсатора

В основу цього методу покладено безпосереднє вимірювання середнього значення  $I_c$  струму заряду або розряду конденсатора, який періодично заряджається від стабілізованого джерела напруги в такт з вимірюваною частотою  $f_x$ . Частотоміри, в основу яких покладено цей метод, називаються конденсаторними. Конденсаторні частотоміри (КЧ) працюють в діапазоні 10 Гц...1 МГц.

Застосовуються два типи схемної реалізації цього методу (рис. 3.3).

В схемі, зображеній на рис 3.3 а), конденсатор за допомогою електронного

ключа ЕК, яким управляє сигнал вимірювальної частоти, поперемінно підключається до джерела постійної напруги ДПН, заряджається від нього до напруги  $U_1$ , а потім розряджається до напруги  $U_2$  через електромагнітний прилад магнітоелектричної системи. За один період переключення конденсатор віддає вимірювальному приладу отриману від ДПН кількість електрики  $q = C \cdot (U_1 - U_2)$ . За декілька періодів сигналу  $q \cdot f_x = C \cdot (U_1 - U_2) \cdot f_x$ , або приймаючи до уваги, що  $q \cdot f_x = q / T_x = I_c$ ,

$$f_x = \frac{1}{C \cdot (U_1 - U_2)} \cdot I_c.$$

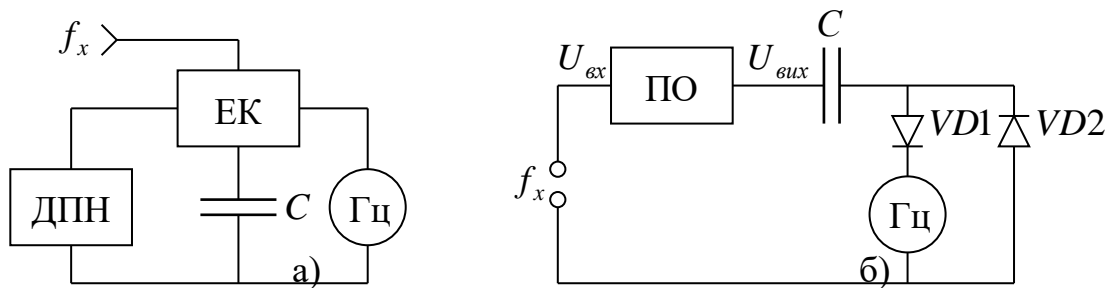


Рисунок 3.3 – Спрощені схеми конденсаторних частотомірів

У другому варіанті схеми (рис. 3.3 б)) сигнал вимірюваної частоти в підсилювачі-обмежувачі ПО перетворюється на однополярні імпульси з постійним піковим значенням  $U_1$  і постійним зміщенням  $U_2$ . За час дії імпульсу конденсатор  $C$  через діод VD1, прилад магнітоелектричної системи і джерело вхідного сигналу заряджається до напруги  $U_1$  (рис. 3.4). За час паузи між імпульсами відбувається розряд конденсатора через діод VD2 і джерело вхідної напруги.

Таким чином, миттєві значення напруги на конденсаторі змінюються відповідно до виразу

$$U_c(t) = \begin{cases} U_2 + (U_1 - U_2) \cdot (1 - e^{-t/\tau_3}), & 0 \leq t < T_x/2; \\ (U_1 - U_2) \cdot e^{-t/\tau_p}, & T_x/2 < t \leq T_x, \end{cases}$$

де  $\tau_3$ ,  $\tau_p$  – сталі заряду та розряду конденсатору відповідно.

Під час заряду конденсатора через вимірювальний прилад протікає струм, миттєві значення якого змінюються у часі за законом

$$i_3(t) = \begin{cases} \frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{C}{\tau_3} \cdot (U_1 - U_2) \cdot e^{-t/\tau_3}, & 0 \leq t < T_x/2; \\ 0, & T_x/2 \leq t < T_x. \end{cases}$$

Середнє значення струму за період:

$$I_c = \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} i_3(t) dt = C \cdot f_x \cdot (U_1 - U_2) \cdot (1 - e^{-T_x/2\tau_3}).$$

При  $\tau_3 \ll T_x/2$ :  $I_c = C \cdot (U_1 - U_2) \cdot f_x$ .

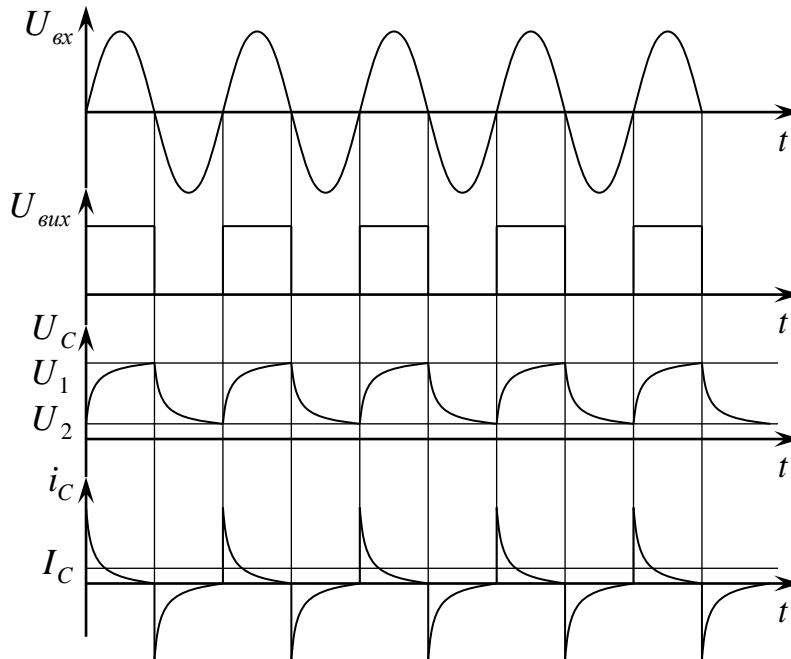


Рисунок 3.4 – Діаграми напруги та струму в різних точках схеми КЧ

В обох варіантах схеми КЧ вимірювальним приладом служить міліамперметр, механічна інерційна система якого діє як фільтр нижніх частот, що забезпечує усереднення імпульсів струму заряду (розряду). Інерційність міліамперметра виявляється на частотах  $> 10$  Гц, тому нижня межа КЧ не може бути меншою за цю частоту. Верхня межа частотного діапазону КЧ обмежується розрізнявальною спроможністю ключової схеми і паразитними ємностями монтажу та елементів схеми, які на високих частотах мають один порядок з ємністю  $C$ . Останнє збільшує сталу заряду  $\tau_3$  до величини, для якої не виконується вимога  $\tau \ll T_x/2$ .

Похибка вимірювання частоти КЧ складається з: похибки  $\delta_I$  вимірювання струму, похибки  $\delta_C$ , обумовленої зміною робочої ємності  $C$ , похибки  $\delta_U$ , обумовленої зміною напруги  $(U_1 - U_2)$ . Перша складова домінує в загальній похибці, розмір її складає зазвичай  $(1,5 \dots 4) \%$ .

### 3.1.2.3 Методи порівняння вимірюваної частоти зі зразковою

В методі порівняння вимірювана частота визначається за зразковою частотою в момент їх рівності. В залежності від способу порівняння частот



розрізняють різновиди методу порівняння: осцилографічний, порівняння за допомогою акустичних та нульових биттів.

Осцилографічні методи порівняння застосовуються в діапазоні частот роботи осцилографів. Порівняння частот здійснюється за допомогою фігур Лісажу, кругової та спіральної розгортки.

Метод акустичних биттів зараз практично не використовується, метод нульових биттів реалізується в гетеродинних частотомірах.

Методи порівняння характеризуються високою точністю вимірювання частоти. Похибка вимірювання визначається неточністю порівняння частот і похибкою, з якою відома зразкова частота. Основним недоліком методів порівняння є трудомісткість процедури вимірювання. Тому з появою ЕЛЧ, які не поступаються за метрологічними характеристиками гетеродинним частотомірам, останні на цей час використовуються в комплекті з ЕЛЧ як дискретні перетворювачі або автоматичні переносники частоти.

#### 3.1.2.4 Резонансний метод

За способом отримання результату резонансний метод подібний до методу порівняння з тою лише різницею, що він не потребує джерела зразкової частоти і компаратора, функції яких водночас виконує коливальний контур. Вимірювана частота в резонансному методі визначається в момент резонансу по власній частоті контуру.

Похибка вимірювання частоти резонансними частотомірами залежить в основному від похибки складання градувальних таблиць та похибки настроювання в резонанс. Остання залежить від добротності резонатора. В надвисокочастотному діапазоні загальна похибка становить  $(0,01 \dots 0,1) \%$ .

#### 3.1.2.5 Повірка частотомірів

Повіркою засобів вимірювальної техніки називається встановлення придатності засобів вимірювальної техніки, на які поширюється державний метрологічний нагляд, до застосування на підставі результатів контролю їх метрологічних характеристик.

Повірка частотомірів регламентується [10].

Періодична повірка частотоміру передбачає здійснення зовнішнього огляду та визначення метрологічних характеристик: основної похибки, варіації показань, додаткової похибки від невірноваженості рухомої частини частотоміру та часу встановлення показань.

При зовнішньому огляді необхідно встановити комплектність, маркування частотоміру, відсутність механічних пошкоджень, що можуть чинити перешкоди при роботі з приладом.

Основну похибку та варіацію показань частотоміра визначають наступним чином. Частотомір, що проходить повірку, підключають до джерела змінного синусоїдального струму (рис. 3.6). Зміною частоти джерела змінного струму встановлюють показчик шкали частотоміру, що проходить повірку, на позначці, в якій здійснюється повірка, а дійсне значення частоти визначають за зразковим частотоміром, який під'єднують паралельно до частотоміру, що проходить повірку. Похибку вимірювань та варіації визначають двічі: при

підході до позначки, в який здійснюється перевірка, з боку збільшення та зменшення частоти.

Основну похибку та варіацію показань визначають порівнянням показів частотоміру, що проходить перевірку, з дійсним значенням вимірюваної частоти на всіх оцифрованих позначках шкали. Границі допустимих основних похибок частотомі-

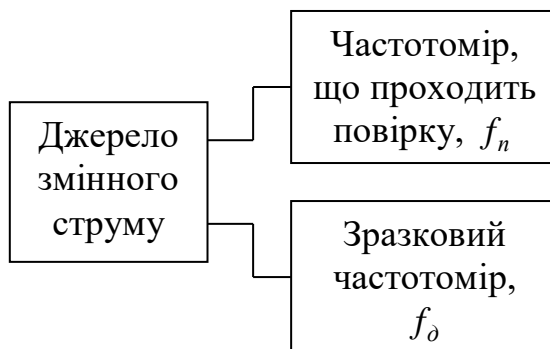


Рисунок 3.6 – Схема підключення приладів при повірці частотоміру

ру можуть бути виражені у вигляді абсолютної, приведеної або зведеної похибки.

Основну абсолютну похибку  $\Delta f_{\max}$  в Гц визначають як максимальну різницю між показаннями  $f_n$  частотоміру, що проходить перевірку, та дійсним значенням вимірюваної частоти  $f_\delta$  та розраховують за формулою

$$\Delta f_{\max} = f_n - f_\delta.$$

Основну відносну похибку  $\delta$  в процентах від значення вимірюваної частоти  $f$  визначають за виразом

$$\delta = \pm \frac{\Delta f_{\max}}{f} \cdot 100.$$

Основна похибка не повинна перевищувати границь допустимої похибки, зазначених класом точності приладу.

зведену похибку  $\gamma$  в процентах від нормуючого значення  $f_N$  визначають за формулою

$$\gamma = \pm \frac{\Delta f_{\max}}{f_N} \cdot 100. \quad (3.1)$$

Варіацію частоти  $b$  в Гц розраховують за формулою

$$b = f_{01} - f_{02}, \quad (3.2)$$

де  $f_{01}$  та  $f_{02}$  – дійсні значення вимірюваної частоти, що відповідають одній і тій самій позначці шкали при плавному збільшенні та зменшенні частоти.

Припустима варіація показань залежить не тільки від класу точності приладу, але й від його стійкості до механічних впливів, а також від габаритів та деяких інших чинників. Варіація показань не повинна перевищувати:

1)  $1,5 \cdot \Delta_{\text{доп}}$  – для приладів, стійких до механічних впливів; щитових приладів з розміром фланця до 100 мм; переносних приладів з розміром лицевої частини до 150 мм; засобів вимірювальної техніки змінного струму класів точності 0,1 та вище;

2)  $0,5 \cdot \Delta_{\text{доп}}$  – для комбінованих засобів вимірювальної техніки, які мають рухому частину на розтяжках; будь-яких засобів вимірювальної техніки, які атестовані як робочі еталони;

3)  $1,0 \cdot \Delta_{\text{доп}}$  – для всіх інших приладів.

За результатами порівняння визначеної основної похибки та варіації показань з допустимими роблять висновок про придатність приладу до застосування.

За результатами перевірки складають протокол, в якому вказують:

- тип, назву та заводський номер приладу, що підлягав перевірці;
- перелік робочих еталонів (з їх заводськими номерами);
- умови перевірки;
- результати вимірювань та розрахунків метрологічних характеристик;
- висновки за результатами виконання кожної процедури.

Позитивні результати періодичної перевірки оформлюють нанесенням на частотомір печатки повірочного клейма. За негативних результатів перевірки клейма гасять та видають власникові повідомлення про непрацездатність частотоміру із зазначенням причин.

### 3.1.2.6 Обробка результатів багаторазових вимірювань

Багаторазові вимірювання проводять з метою визначення найкращої оцінки результату вимірювання та зменшення випадкової похибки результату вимірювання. Для досягнення цієї мети результати окремих спостережень обробляють у такій послідовності.

1. Якщо є можливість, знаходять систематичну похибку вимірювання  $\Delta_c$  і виправляють результати окремих спостережень. Систематичну похибку знаходять у вигляді:

$$\Delta_c = M[A] - X_A,$$

де  $X_A$  – дійсне значення вимірювальної величини;  $M[A]$  – математичне очікування результату спостережень, за оцінку  $\hat{M}[A]$  можна прийняти середнє арифметичне із результатів  $A_i$  окремих спостережень:

$$\hat{M}[A] = \bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i ,$$

де  $n$  – кількість спостережень.

Виправленим  $A_{ei}$  називають результат вимірювання  $A_i$ , з якого вилучена постійна систематична похибка (введена поправка  $\Delta_n = -\Delta_c$ ):

$$A_{ei} = A_i - \Delta_c = A_i + \Delta_n .$$

2. Характеристиками випадкової похибки вимірювання є:

- функція розподілу – імовірність попадання випадкової величини  $A$  на безкінечно малий інтервал  $\Delta a$ ;
- числові характеристики функції розподілення;

Функція розподілу є найбільш інформативною характеристикою випадкових похибок. Для її визначення використовується виправлений варіаційний ряд.

$$A_1 < A_2 < A_3 < \dots < A_{n-1} < A_n .$$

3. Із варіаційного ряду результатів спостережень формують варіаційний ряд випадкових відхилень  $\Delta A_i$ :

$$\Delta A_i = A_i - \bar{A} .$$

4. Діапазон відхилень ( $\Delta A_{\max} - \Delta A_{\min}$ ) поділяють на  $k$  інтервалів однакової ширини

$$D = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{k} .$$

Кількість інтервалів  $k$  рекомендується обирати в межах  $0,55 \cdot n^{0,4} \leq k < 1,25 \cdot n^{0,4}$ , але не менше 5. Краще, якщо  $k$  буде непарним.

5. Для кожного  $k$ -го інтервалу обраховують середину  $\Delta_k$ , нижню  $\Delta_{kн}$  та верхню  $\Delta_{kв}$  межі

$$\begin{aligned} \Delta_{kн} &= \Delta_{\min} + (k-1) \cdot D; \\ \Delta_{kв} &= \Delta_{kн} + D; \\ \Delta_k &= \frac{1}{2}(\Delta_{kн} + \Delta_{kв}). \end{aligned} \tag{3.3}$$

6. Визначають імовірність  $P_k$  (частість) та густину імовірності  $p_k$  похибок для кожного інтервалу:

$$P_k = \frac{m_k}{n}; \quad (3.4)$$

$$p_k = \frac{dP_k}{D} = \frac{1}{D} \frac{m_k}{n}, \quad (3.5)$$

де  $m_k$  – кількість спостережень, похибки яких лежать в межах  $k$ -го інтервалу.

7. За результатами розрахунків будують гістограму експериментального розподілення (рис.3.7). Для цього над кожним інтервалом будують прямокутник з висотою  $p_k$ . Середини вершин прямокутників поєднують плавною кривою так, щоб площа, обмежена цією кривою і віссю абсцис, дорівнювала площі усіх прямокутників. Крива, яку отримали, є графічним відображенням диференційної функції розподілення випадкової величини  $A$ .

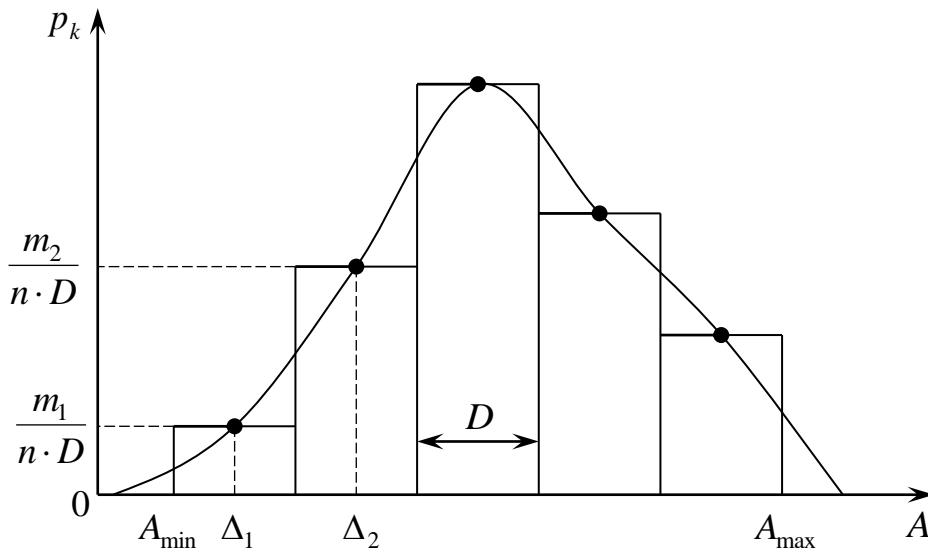


Рисунок 3.7 – Гістограма експериментального розподілу випадкової величини

Найбільш часто приймається нормальний закон розподілу, для якого визначають числові характеристики:

- оцінку математичного очікування  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$  ;
- оцінку середнього квадратичного відхилення окремих спостережень

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} ;$$

- оцінку середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}.$$

Випадкова похибка результату вимірювання визначається у вигляді границь при заданій довірчій імовірності:

$$\Delta = \pm t(n, p) \hat{\sigma}_{\bar{x}},$$

де  $t(n, p)$  – довірчий коефіцієнт, який при кількості спостережень  $n < 30$  вибирається з таблиць розподілу Ст'юдента в залежності від кількості спостережень  $n$  і прийнятої довірчої імовірності  $P$ , при  $n \geq 30$  – з таблиць нормального розподілу в залежності від прийнятої довірчої імовірності  $P$ .

### 3.2 Лабораторне завдання

1. Здійснити навчальну перевірку конденсаторного частотоміру Ф433/3.
2. Виконати ряд рівноточних вимірювань періоду коливань і провести обробку результатів вимірювань.

### 3.3 Опис лабораторної установки

До складу лабораторного робочого місця входять наступні засоби вимірювальної техніки і вимірювальні приналежності:

приймач-компаратор ПК-66;  
електронно-лічильний частотомір ЧЗ-35;  
конденсаторний частотомір Ф433/3;  
генератор сигналів ГЗ-109.

### 3.4 Порядок виконання роботи

3.4.1 Перевірка конденсаторного частотоміра Ф433/3 виконується згідно п.п. 3.1.2.5 у такій послідовності.

1) Подати сигнал з виходу генератора ГЗ-109 одночасно на цифровий та конденсаторний частотоміри.

2) Змінюючи частоту генератора, установити стрілку конденсаторного частотоміра на позначку  $f$ , на якій здійснюється перевірка, спочатку з боку менших значень (на ЕЛЧ отримати значення частоти  $f_{01}$ ), потім з боку більших значень (на ЕЛЧ отримати значення частоти  $f_{02}$ ). Результати занести в табл. 3.1.

3) Розрахувати два значення абсолютної основної похибки за формулами

$$\Delta_{1,2} = f - f_{01,02},$$

результати занести в табл. 5.1. За абсолютну основну похибку  $\Delta f_{\max}$  прийняти найбільшу за абсолютним значенням різницю.

4) Визначити значення нормуючого коефіцієнту  $f_N$ , виходячи з методу нормування похибки конденсаторного частотоміру (клас точності), та розрахувати приведену похибку за формулою (3.1).

5) Розрахувати варіацію показань за виразом (3.2). Результати занести в табл. 3.1.

6) Вимірювання зробити для п'яти оцифрованих позначок конденсаторного частотоміру.

Таблиця 3.1 – Результати навчальної повірки конденсаторного частотоміру

Повірочна точка $f$ , Гц	$f_{01}$ , Гц	$f_{02}$ , Гц	$\Delta_1$ , Гц	$\Delta_2$ , Гц	Значення нормуючого коефіцієнту $f_N$	$\gamma$ , %	$b$ , Гц

Максимальне з отриманих значення приведеної похибки порівняти з границею допустимої похибки конденсаторного частотоміру.

За отриманими значеннями приведеної похибки та варіації показань зробити висновок про придатність частотоміру, що проходить повірку, до застосування.

3.4.2 Для виконання п.2 лабораторного завдання на ЦЧ подати сигнал з приймача компаратора ПК-66 частоти 66,(6) кГц або 200 кГц. Перевести частотомір у режим вимірювання періоду. Положення перемикачів “Час вимірювання” та “Мітки часу” ЕЛЧ поставити у положення, при яких на індикаторі частотоміра буде максимальне число значущих цифр, що відповідає мінімальній похибці дискретизації.

Провести 50 вимірювань періоду  $T_i$  сигналу зразкової частоти. За результатами вимірювань побудувати гістограму експериментального розподілення та визначити похибку вимірювання та її довірчі границі. Для цього виконати наступні дії:

1) розрахувати похибки  $\Delta T_i$  вимірювань за формулою

$$\Delta T_i = T_i - T_0,$$

де  $T_0$  – дійсне значення періоду вимірюваного сигналу;

2) упорядкувати значення  $\Delta T_i$ ;

3) розділити весь діапазон похибок на 5 інтервалів однакової ширини

$$D = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{5};$$

4) визначити границі та середину кожного інтервалу за формулами (3.3).  
Результати занести до табл. 3.2;

5) підрахувати кількість  $m_k$  значень  $\Delta T_i$ , що потрапили в кожен інтервал.  
Результати занести в табл. 3.2;

6) оцінити імовірність  $P_k$  потрапляння випадкової похибки  $\Delta T$  в кожний інтервал за формулою (3.4) та густину імовірності  $p_k$  за формулою (3.5).  
Результати занести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Обробка результатів багаторазових вимірювань

$k$	Нижня границя інтервалу $\Delta_{kn}$	Верхня границя інтервалу $\Delta_{kv}$	Середина інтервалу $\Delta_k$	Частота потрапляння $m_k$	Імовірність $P_k$	Щільність імовірності $p_k$
1						
2						
3						
4						
5						

7) побудувати гістограму розподілення випадкової похибки  $\Delta T$ ;

8) розрахувати середнє значення похибки вимірювання періоду

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i;$$

9) розрахувати оцінку середнього квадратичного відхилення окремих спостережень

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2};$$

10) отримати оцінку середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного

$$\hat{\sigma}_{\overline{\Delta T}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}};$$



11) визначити границю випадкової похибки при заданій довірчій імовірності

$$\Delta = \pm t_p \hat{\sigma}_{\Delta T} .$$

### 3.5 Контрольні запитання та завдання

*Для допуску*

1. Які методи вимірювання частоти ви знаєте?
2. Поясніть методику повірки конденсаторного частотоміра.
3. Охарактеризувати похибку дискретизації.
4. З якою метою проводять багаторазові вимірювання?
5. Поясніть методику обробки результатів багаторазових вимірювань.
6. З якою метою будують гістограму?

*Для захисту*

1. Поясніть принцип дії ЕЛЧ в режимі вимірювання частоти. Вкажіть джерела його похибок.
2. Поясніть принцип дії ЕЛЧ в режимі вимірювання періоду. Вкажіть джерела його похибок.
3. Поясніть будову та принцип дії конденсаторного частотоміру. Охарактеризуйте його похибки.
4. Що таке повірка засобу вимірювальної техніки, з якою метою вона проводиться, які висновки роблять в результаті повірки?
5. Як визначається результат багаторазових спостережень?
6. Як визначається границя випадкової похибки результату багаторазових спостережень?
7. Вкажіть послідовність побудови гістограми результатів спостережень.

