МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

І.Д. Шовкун, Т.А. Саурова, О.В. Семеновська

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ «ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ»

для бакалаврів з галузі знань
15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю
153 Мікро- та наносистемна техніка,
та 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 171 Електроніка

Рекомендовано Вченою радою факультету електроніки
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Київ – 2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

І.Д. Шовкун, Т.А. Саурова, О.В. Семеновська

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ «ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ»

для бакалаврів з галузі знань
15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю
153 Мікро- та наносистемна техніка,
та 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 171 Електроніка

Київ – 2017

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Вступ до техніки вимірювань» для бакалаврів з галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 153 Мікро- та наносистемна техніка,та 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 171 Електроніка/ Уклад.: І.Д. Шовкун, Т.А. Саурова, О.В. Семеновська. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 96 с.

Гриф надано Вченою радою ФЕЛ
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
(протокол № __ від ___ р.)

Затверджено на засіданні
кафедри фізичної та
біомедичної електроніки
(протокол № 19 від 15.03.2017р.)

Навчально-методичне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ «ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ»

для бакалаврів з галузі знань
15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю
153 Мікро- та наносистемна техніка,
та 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 171 Електроніка

Укладачі: *Ірина Денисівна Шовкун*, старший викладач,
Тетяна Асадівна Саурова, канд. техн. наук, старший викладач,
Олена Володимирівна Семеновська, канд. техн. наук, старший викладач.

Відповідальний редактор:
Володимир Іванович Тимофєєв, доктор технічних наук, професор

Рецензент:
Тетяна Любомирівна Волхова, канд. техн. наук, доцент

За редакцією укладачів

Цитати та фактичний матеріал перевірено.
Зауваження рецензентів враховано.

Автори:
Шовкун Ірина Денисівна, ст. викладач,
Саурова Тетяна Асадівна,
канд. техн. наук, ст. викладач,
Семеновська Олена Володимирівна,
канд. техн. наук, ст. викладач.

Рецензент:
Волхова Тетяна Любомирівна,
канд. техн. наук, доцент кафедри
мікроелектроніки НТУУ «КПІ ім.Ігоря
Сікорського»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ДИСЦИПЛІНИ «ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ»

для бакалаврів з галузі знань
15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю
153 Мікро- та наносистемна техніка,
та 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 171 Електроніка

Автори: ст.викл. *Шовкун І.Д.*, к.т.н., ст.викл. *Саурова Т.А.*,
к.т.н., ст.викл. *Семеновська О.В*.

Відповідальний редактор: *В.І. Тимофєєв*, д.т.н., професор
кафедри ФБМЕ НТУУ «КПІ ім.Ігоря
Сікорського»

ЗМІСТ

ВСТУП……6

Лабораторна робота №1……...……7
ОСЦИЛОГРАФІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

Лабораторна робота №2……...……..37
ВИМІРЮВАННЯ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ І СИЛИ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Лабораторна робота №3……...……..55
ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ПРЯМИМ І ОПОСЕРЕДКОВАНИМ МЕТОДАМИ

Лабораторна робота №4……..…… .65
ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ БАГАТОКРАТНИХ РІВНОТОЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПРИ ПРЯМИХ ВИМІРЮВАННЯХ

Лабораторна робота №5……...……..82
ВИМІРЮВАННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….96

Вступ

Основна мета лабораторного практикуму для майбутніх спеціалістів з електроніки і мікро- та наносистемної техніки – закріпити й поглибити теоретичні знання з курсу «Вступ до техніки вимірювань», набути практичних навичок у роботі з електронними вимірювальними приладами, ознайомитись з методиками проведення вимірювань, навчитись вимірювати параметри електричних сигналів та визначати похибки вимірювань.

У методичних вказівках описані лабораторні роботи, які включають вимірювання напруги (постійної та змінної), струму та опору електронними вимірювальними приладами (універсальним вольтметром та цифровим мультиметром). Описання лабораторних робіт містить основні теоретичні відомості про методику експериментів, вимірювальні прилади та причини виникнення похибок.

Для майбутніх фахівців важливим є ознайомлення з універсальними приладами, якими є, наприклад, електронні осцилографи для настроювання та ремонту різноманітних електронних пристроїв. Лабораторна робота №1 присвячена осцилографічним вимірюванням гармонічних сигналів та послідовності періодичних прямокутних імпульсних сигналів.

Для успішного виконання лабораторних робіт студент повинен ознайомитись з їх метою і об’єктом дослідження. Виконувати роботу можна лише після засвоєння методу дослідження, ознайомлення з електричною схемою (лабораторним макетом) і вимірювальними приладами.

Заключним етапом роботи є оформлення звіту, в якому найважливіша творча частина – *висновки* про хід і результати роботи.

Лабораторна робота №1

ОСЦИЛОГРАФІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

Мета роботи: Ознайомитись з призначенням та функціональною схемою універсального електронно-променевого осцилографа. Навчитись отримувати осцилограми та вимірювати параметри періодичних електричних сигналів за допомогою електронно-променевого осцилографа

І. Теоретичні відомості

1.1. Універсальний електронно-променевий осцилограф

Електричні процеси, що протікають в колах радіоелектронних пристроїв, часто дуже складні і характеризуються великим числом параметрів. І не всі з цих параметрів можна безпосередньо виміряти аналоговими чи цифровими приладами типу амперметр, вольтметр тощо.

Для повної характеристики електричних процесів необхідно знати закон їх зміни в часі. Для дослідження зміни електричних сигналів в часі використовують осцилографи.

Електронно-променевий осцилограф (від латинського слова «oscillo» ─ коливання і грецького «grapho» ─ пишу) ─ прилад, призначений для спостереження форми електричних сигналів в координатах x, y і вимірювання їх амплітудних і часових параметрів (характеристик) в діапазоні частот від нуля (постійний струм) до десятків гігагерц.

Осцилограф відноситься до аналогових засобів динамічних вимірювань. В електротехніці та електроніці осцилограф використовується для спостереження зміни в часі струму чи напруги, а також для вимірювання різних електричних величин: амплітуди струму і напруги, частоти, зсуву фаз, періоду коливань тощо.

Основним елементом осцилографа є електронно-променева трубка (ЕПТ), в якій сфокусований пучок електронів (промінь) використовується як «олівець», який малює на екрані з напиленою хімічною сполукою (люмінофором) зображення, що світиться (рис. 1.1).

Для дослідження різних сигналів (періодично повторюваних, одноразових, які повільно змінюються і швидкоплинних) використовують різні осцилографи. Осцилографи для періодично повторюваних сигналів називають універсальними і позначають *С1-XX*. Для візуалізації сигналів, які повільно змінюються, використовують ЕПТ з люмінофором тривалого післясвітіння, а для швидкоплинних сигналів ЕПТ з люмінофором короткого післясвітіння.

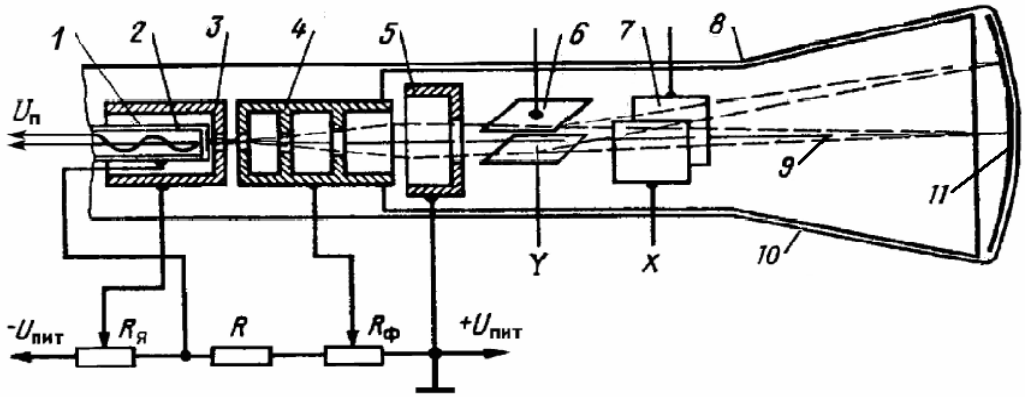


Рис. 1.1. Будови електронно-променевої трубки: 1 – підігрівач; 2 – катод; 3 – модулятор; 4 – перший анод; 5 – другий анод; 6 – пластини вертикального відхилення променя; 7 – пластини горизонтального відхилення променя; 8 – третій анод (аквадаг); 9 – електронний промінь; 10 – балон ЕПТ; 11– люмінофор

Універсальний електронно-променевий осцилограф включає наступні функціональні блоки (вузли) (рис. 1.2):

- блок ЕПТ з органами управління та регулювання;
- блок керування променем, що включає:

1) канал *Y* — для управління переміщенням променя уздовж вертикальної осі *y*. Це переміщення здійснюється досліджуваним сигналом *U(t)*;

2) канал *X* — для управління переміщенням променя уздовж горизонтальної осі *x* з постійною, обраною оператором, швидкістю υ_x;

3) канал *Z* — для управління струмом променя (яскравістю зображення).

На функціональній схемі універсального осцилографа (рис. 2) позначені: МП – масштабні перетворювачі, ЛЗ – лінія затримки, П1-П5 – перемикачі, СС – селектор синхронізації, ВП – вимірювальний перетворювач, К – катод, М – модулятор, А1-А3 аноди.

Електронно-променева трубка (ЕПТ) складається з катода (джерела електронів), системи формування сфокусованого вузького електронного пучка, системи його відхилення в напрямку осі x і y і люмінесцентного екрану. Всі системи електродів розміщені в скляному балоні, з якого відкачане повітря (рис. 1.1).

В торці вузької частини балона розміщений катод у вигляді невеликого циліндра. Всередині катода знаходиться спіраль для підігріву. Підігрів здійснюється змінним струмом $0{,}1 \ldots 1A$ при напрузі 6,3В. Дно циліндра з зовнішньої сторони покрито оксидним шаром. При розжаренні катода до температури $T \sim 900 \ldots 1000\text{К}$ з оксидного шару вилітають електрони (явище термоелектронної емісії). Для управління величиною струму біля катода розміщений модулятор (диск з малим отвором). На модулятор подається негативний щодо катода потенціал. Зміною різниці потенціалів в проміжку простору модулятор-катод ($U_{\text{мк}}$ — одиниці, десятки вольт) регулюють кількість електронів в промені (регулювання «Яскравость»). При досить великому негативному потенціалі модулятора електронний промінь можна повністю заперти.

Тонкий електронний промінь формується ***електронним прожектором***, що складається з катода, модулятора, анодів $A1$, $A2$ з високими позитивними потенціалами. Перший анод А1, знаходячись під потенціалом в кілька сотень вольт, прискорює потік електронів, що рухаються від катода. До другого анода $A2$ підводиться напруга, що досягає в деяких ЕПТ десятків кіловольт. В результаті цього електронний потік з другого анода виходить з достатньо високою швидкістю.

Між електродами прожектора створюється сильно неоднорідне електричне поле, яке стискає електронний пучок в тонкий промінь з фокусом біля поверхні екрана. Фокусування променя можна змінювати, регулюючи напругу U_{A1} (регулювання «Фокус»). Після електронного прожектора сформований електронний промінь, рухаючись вздовж осі трубки, потрапляє в відхиляюче поле, створюване двома парами відхиляючих пластин X і Y, і досягає люмінесцентного екрану. Найпростіша конструкция відхиляючих пластин відповідає плоскому конденсатору. Одна пара пластин служить для відхилення електронного променя у вертикальному напрямку, а інша в горизонтальному.

Процес відхилення електронного променя в електростатичному полі ілюструється на рис. 1.3. Напруженість електричного поля між пластинами

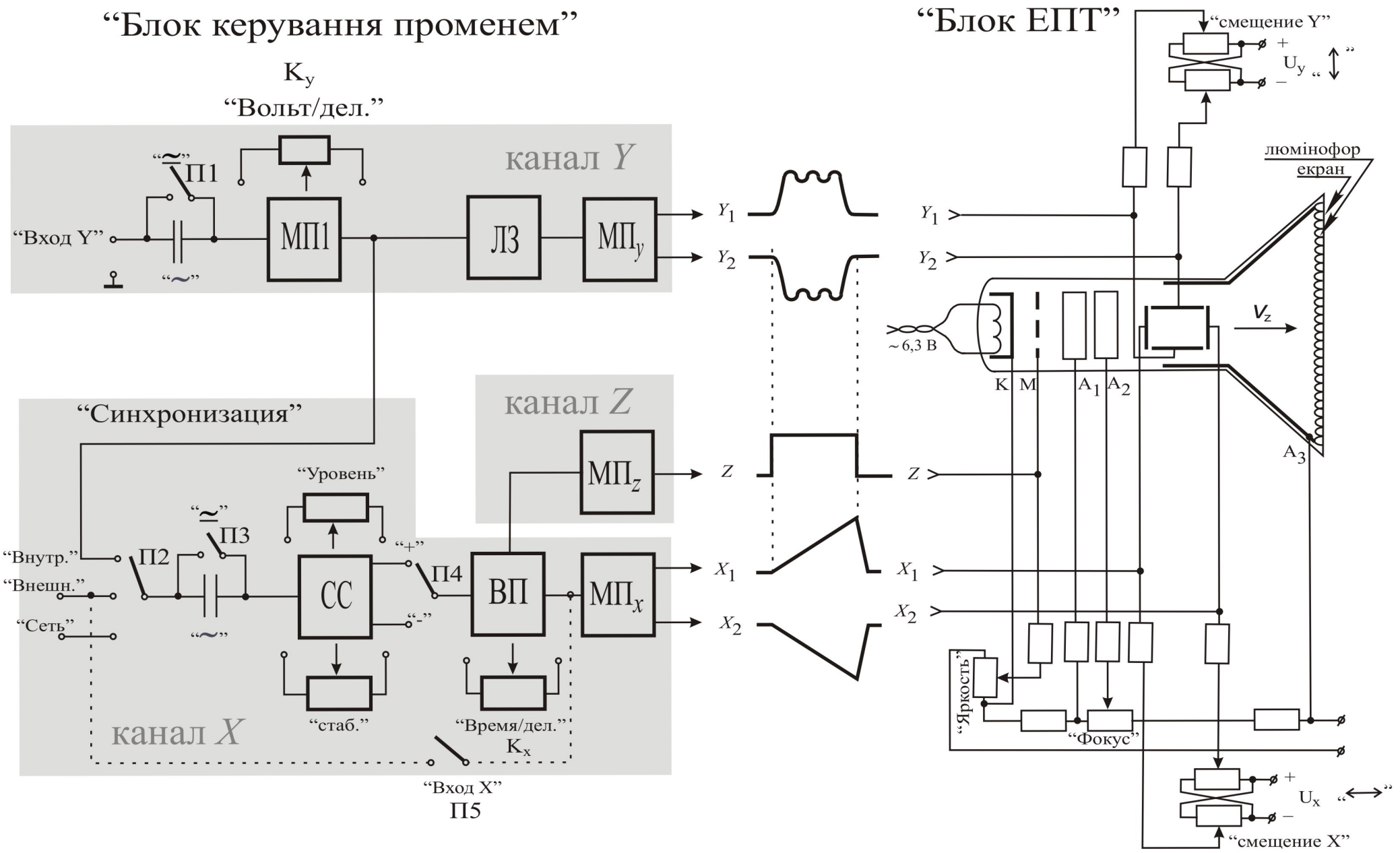


Рис. 1. Функціональна схема однопроменевого електронного осцилографа

$$E_y = U_{від х} / d,$$

де d — відстань між пластинами, мм.

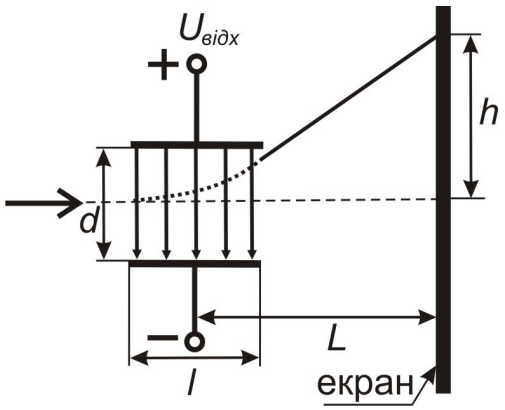


Рис. 1.3. Рух електронного променю в полі відхиляючої системи

Важливим параметром ЕПТ є ***чутливість за відхиленням*** ε

$$\varepsilon = h / U_{від х}\text{ , мм/В.}$$

Величина відхилення h світлової плями на екрані визначається за формулою:

$$h = \frac{lLE_y}{2U_{A2}},$$

де U_{A2} — напруга другого анода, В; l — довжина пластин, мм; L — відстань від центра пластини до екрану, мм.

Чим вище чутливість, тим легше керувати променем.

Яскравість B зображення на екрані визначається струмом променя $I_п$ (регулювання «Яркость»), швидкістю електронів при бомбардуванні люмінофора $\upsilon_z = f(U_{A3})$, швидкістю руху променя по екрану $\upsilon_e = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}$ і хімічним складом люмінофора. Таким чином, яскравість осцилограми $B = f(I_п, \upsilon_z, \upsilon_e)$ є функцією

- напруги на модуляторі U_M ($I_п = f(U_M)$);

- сигналів на пластинах X і Y, тобто U_X ($\upsilon_x = f(U_X)$ та U_Y ($\upsilon_y = f(U_Y)$);
- напруги третього аноду U_{A3} ($\upsilon_z = f(U_{A3})$);
- хімічним складом люмінофора,

тобто

$$B = f(U_M, U_Y, U_X, U_{A3}, \text{хімічний склад люмінофора}).$$

Інтервали швидких змін сигналу $U(t)$ на екрані мають меншу яскравість через малий час перебування променя на екрані в ці інтервали часу. Посилення яскравості світіння можна досягти збільшенням або прискорюючої напруги U_{A2}, або густини електронного пучка. Однак збільшення U_{A2} призводить до зниження чутливості за відхиленням ε. Щоб розв'язати цю суперечність, в ЕПТ застосовується принцип ***післяприскорення*** електронів. Як відомо, швидкість електрона в електростатичному полі визначається потенціалом тієї точки простору, в якій він знаходиться:

$$\upsilon = \sqrt{2\frac{e}{m}U} \approx 600\sqrt{U[\text{В}]}, \text{ км/с.}$$

Підібравши належним чином потенціали електродів, можна відхиляти промінь при меншій швидкості υ (менш високе значення потенціалу U_{A2}) і цим забезпечити велику чутливость за відхиленням ε, а прискорити електрони можна за межами відхиляючої системи. Для цього на стінки балона ЕПТ наноситься графітове покриття (аквадаг), яке служить третім анодом U_{A3} ($U_{A3} > U_{A2}$).

Свічення екрана відбувається завдяки люмінофорному покриттю під дією бомбардуючих його електронів (явище люмінесценції). При бомбардуванні екрана електронами пучка з його поверхні вилітають також вторинні електрони, які створюють небажане «розмивання» світлової плями. Для зменшення цього ефекту використовується аквадаг, тобто вторинні електрони з екрана відводяться полем третього анода U_{A3}.

Щоб уникнути розфокусування променя в процесі його відхилення між пластинами X та Y, відхиляючі напруги на однойменні пластини $X1$, $X2$ і $Y1, Y2$

подають в протифазі так, щоб сума напруг на однойменних пластинах не змінювалася і дорівнювала нулю.

Початкове положення променя на екрані вздовж осі y встановлюється напругою «Смещение Y» (або «↕»), а початкове положення променя уздовж осі x встановлюється напругою «Смещение X» (або «↔»).

1.2. Отримання осцилограми досліджуваного сигналу

Для отримання осцилограми необхідно керувати рухом променя на екрані ЕПТ в горизонтальному і вертикальному напрямку. Зсув променя в вертикальному напрямку здійснюється під дією досліджуваного сигналу $U(t)$, а в горизонтальному — напруги розгортки U_x. Генератор розгортки виробляє коливання пилкоподібної форми (рис. 1.4)

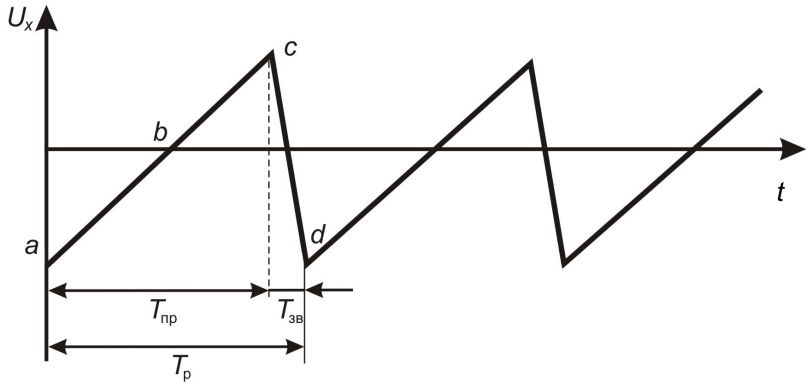


Рис. 1.4. Сигнал генератора розгортки: пилкоподібна напруга

На ділянці ac напруга розгортки U_x лінійно наростає. $T_{пр}$ — час прямого ходу променя, $T_{зв}$ — час зворотного ходу. Під дією напруги U_x електронний промінь буде відхилятися тільки в горизонтальній площині. При негативному максимальному значенні U_x (точка a на рис. 1.5) світлова пляма знаходиться в крайньому лівому положенні (точка a') на екрані. При лінійному наростанні U_x пляма поступово переміститься в точку b', а потім в точку c'. На ділянці $a'c'$ швидкість руху плями буде постійною. З точки c в початковий стан промінь повертається за час $T_{зв} << T_{пр}$, тому швидкість руху плями в зворотному напрямку значно більша.

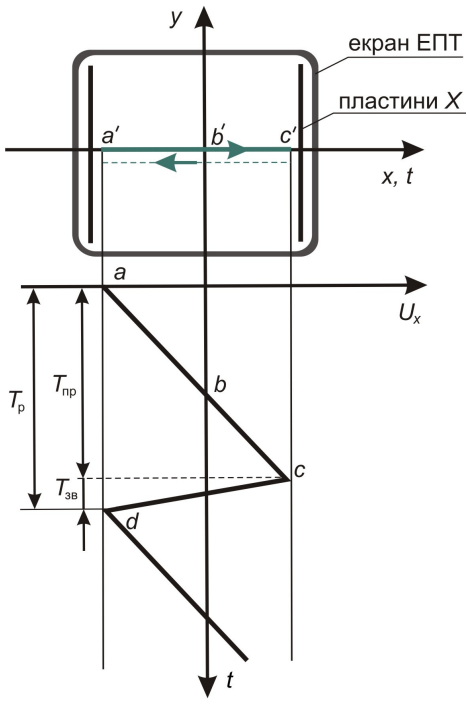
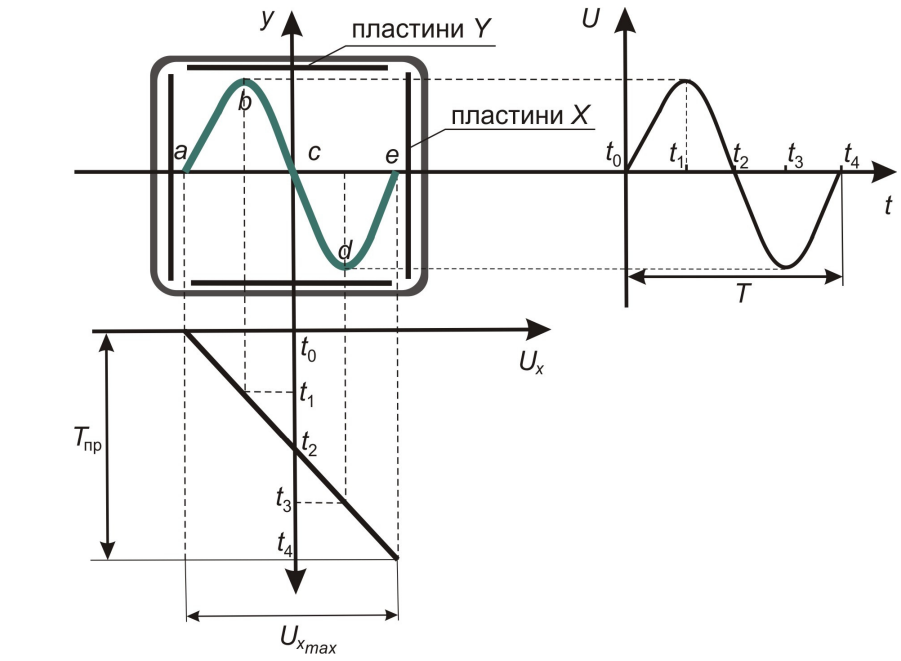


Рис. 5. Рух електронного променя під дією напруги генератора розгортки

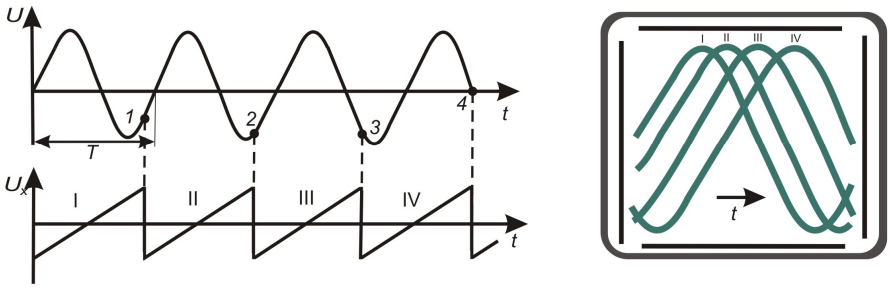
Утворення зображення на екрані ЕПТ при впливі напруги розгортки U_x (підводиться до пластин X) і досліджуваного сигналу $U(t)$ (підводиться до пластин Y) показано на рис. 1.6.а. При побудові осцилограми прийнято, що період пилкоподібної напруги T_p дорівнює періоду сигналу $T_с$, а $T_{зв} = 0$. Період розгортки умовно розділений на чотири рівних інтервали з межами t_0, t_1, t_3, t_4. В момент t_0, $U_x = 0$, U_x має максимальне від'ємне значення і світлова пляма знаходиться в точці a. У момент t_1, напруга сигналу має максимальне позитивне значення, а $U_x = U_{xm}/4$ і пляма знаходиться в точці b.

Аналогічно можна знайти положення точок c, d і e на екрані ЕПТ. По закінченні розгортки світлова пляма по прямій лінії ea миттєво повертається в початкове положення. В наступні цикли розгортки осциллограми виходять такі самі, причому всі її точки співпадуть з аналогічними точками осцилограми, зображеної на рис.4, що створює на екрані стійку осцилограму.

Формування зображення при порушенні кратності частот розгортки і сигналу показано на рис. 1.6.б.



а



б

Рис. 1.6. Утворення осцилограм для двох режимів генератора розгортки:

а – режим «очікування»; б – «автоколивний» режим

Нехай період сигналу синусоїдальної форми більший за період розгортки ($T_c < T_p$). При першому циклі розгортки на екрані відображається осцилограма у вигляді відрізка синусоїди між точками 0-1, при другому – відрізок 1-2, при третьому – 2-3 і т.д. Послідовна поява осцилограм I-IV створює відчуття руху зображення в напрямку, показаному стрілкою на рис. 1.6.б. Швидкість руху осцилограми тим вища, чим більше відрізняється період розгортки від періоду сигналу. Якщо $T_c < T_p$, осцилограма буде переміщуватися справа наліво.

Для отримання нерухомої осцилограми необхідно підібрати період розгортки рівним (або кратним) періоду сигналу. Для цього служить система синхронізації: внутрішня, зовнішня, від мережі (рис. 1.2).

1.3. Функціональна схема осцилографа

Блок керування променем включає:

- ***канал*** Y для управління положенням променя по вертикалі (під дією досліджуваного сигналу U(t), що подається в гніздо «Вход Y»);
- ***канал*** X — для формування лінійно-наростаючої «пилокоподібної» напруги, під дією якої промінь ЕПТ переміщується по горизонталі;
- ***канал*** Z — для формування прямокутного імпульсу позитивної полярності, який відкриває промінь на час прямого ходу $T_{\text{пр}}$ «пилокоподібної» напруги U_x.

Канал Y включає масштабний перетворювач МП1 амплітуди сигналу $U(t)$ з коефіцієнтом масштабного перетворення $K_{\text{МП1}}$ ($K_{\text{МП1}} > 1$ (підсилення) або $K_{\text{МП1}} < 1$ (послаблення)), лінію затримки (ЛЗ) для затримки в часі сигналу $U(t)$ без спотворення його форми, вихідний масштабний перетворювач МП_y з коефіцієнтом масштабування $K_{\text{МП}y} > 1$ і парафазним виходом (два «симетричних» виходи з сигналами в протифазі).

Таким чином, деяке миттєве значення U_i вхідного сигналу на виході каналу Y стане таким:

$$U_{Y_i} = K_{\text{МП1}} \cdot K_{\text{МП}y} \cdot U_i .$$

Відхиляючі пластини здійснюють функцію вимірювального перетворювача (*ВП*) перетворюють значення напруги, поданої на пластини Y, в довжину сліду на екрані ЕПТ по вертикалі, яка відповідає напрузі з коефіцієнтом ε_y:

$$l_y = \varepsilon_y \cdot U_{Yi} = \varepsilon_y \cdot K_{\text{МП1}} \cdot U_i .$$

З формули видно, що значення напруги U_i визначається довжиною сліду світлової плями l_y на екрані осцилографа:

$$U_i = \frac{l_y}{\varepsilon_y \cdot K_{\text{МП1}} \cdot K_{\text{МП}y}} = K_y \cdot l_y, \left[\frac{B}{\text{см}} \cdot \text{см}\right], \left[\frac{B}{\text{дел}} \cdot \text{дел}\right],$$

Значення ε_y і $K_{\text{МП}y}$ не змінюються.

Значення K_y зчитується за показниками перемикача «Вольт/см» (або «В/дел»).

Перемикач П1, що знаходиться в каналі Y, призначений для установки режимів:

- «***вхід відкритий***» (П1 замкнутий; позначення «≃»);
- «***вхід закритий***» (П1 розімкнутий; позначення «~»).

В положенні «≃» вхідний сигнал $U(t)$ надходить на МП1, а в положенні «~» на вхід МП1 надходить напруга $U_1(t)$.

Для послідовності прямокутних імпульсів (рис. 1.6) маємо:

$$U_1(t) = U(t) - U_0 = U(t) - \frac{1}{T}\int_0^{\tau} U(t)dt = U(t) - \frac{\tau}{T}U_m,$$

де U_0 постійна складова або середнє значення сигналу $U(t)$, τ – тривалість імпульса, T – період повторення, U_m – амплітуда імпульсу.

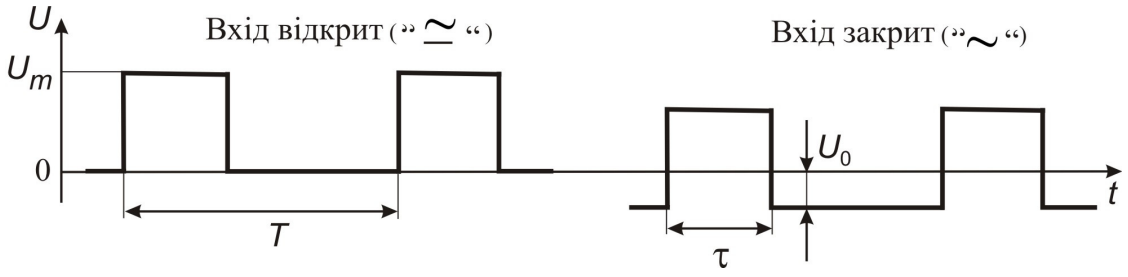


Рис. 1.7. Зміщення променя на екрані при переключенні П1

<u>Канал X</u> містить селектор синхронізації (СС) – для вибору моменту t_0 формування пилокоподібної напруги U_x в залежності від встановленого оператором «рівня» (регулювання «Уровень») по відношенню до вхідного сигналу синхронізації (сигналу, що запускає канал X); вимірювальний перетворювач (ВП), який формує лінійно наростаючу напругу з моменту t_0 з встановленою оператором (перемикачем «Время/дел») швидкістю наростання напруги $U_x(t)$ (рис. 1.8).

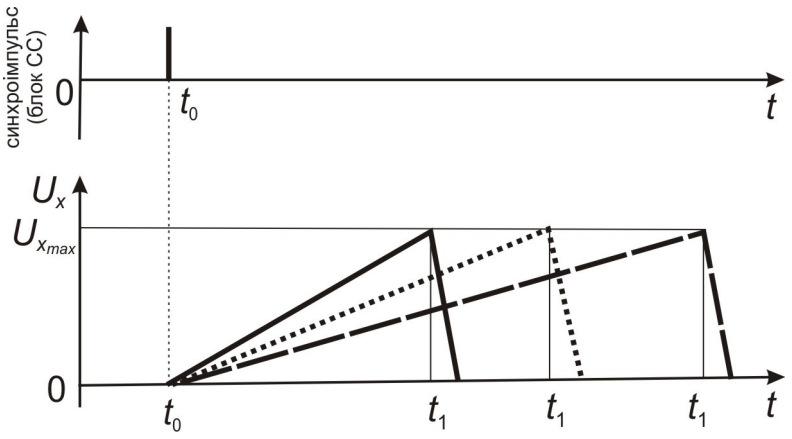


Рис. 1.8. Формування пилкоподібної напруги U_x з різною швидкістю наростання

На ділянці прямого ходу (t_0-t_1) напруга $U_x(t)$ збільшується з обраною оператором швидкістю υ_t [В/с].

$$U_x(t) = \upsilon_t \cdot t \left[\frac{\text{В}}{\text{с}} \cdot \text{с}\right].$$

Пилкоподібна напруга через парафазний масштабний перетворювач МП_X надходить на пластини X. ***Пластини X виконують функцію вимірювального перетворювача*** напруги $U_x(t)$ в довжину сліду l_x на екрані з коефіцієнтом перетворення ε_x.

$$l_x = \varepsilon_x \cdot U_x = \varepsilon_x \cdot \upsilon_t \cdot t, \left[\frac{\text{см}}{\text{В}} \cdot \frac{\text{В}}{\text{с}} \cdot \text{с}\right].$$

Параметр ε_x не змінюється в ЕПТ. Тому значення інтервалу часу t_i, що відповідає довжині сліду променя уздовж ***x,*** визначається за формулою:

$$t_i = \frac{l_x}{\varepsilon_x \upsilon_t} = K_x \cdot l_x, \left[\frac{\text{время}}{\text{см}} \cdot \text{см}\right], \text{ або } \left[\frac{\text{время}}{\text{дел}} \cdot \text{дел}\right].$$

Значення K_x визначається за положенням перемикача «Время/см» (або «Время/дел»).

Перемикач П2 призначений для вибору джерела синхронізації каналу X.

Перемикач П3 – для вибору режиму «≃» або «~» по відношенню до сигналу джерела синхронізації.

Перемикач П4 – для вибору моменту синхронізації t_0 при обраному «рівні» $U_{\text{"Уровень"}}$ (потенціометр «Уровень»): при позитивному «+» або при негативному «-» значенні похідної сигналу джерела синхронізації (рис. 1.9).

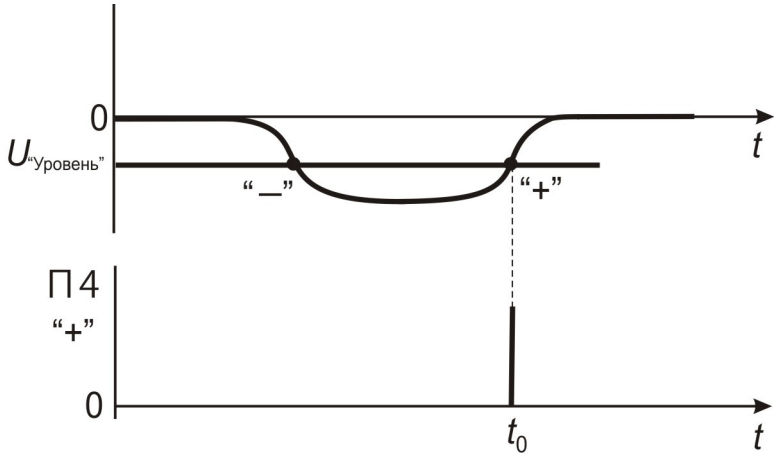


Рис. 1.9. Вибір полярності синхронізації перемикачем П4

Регулювання «Стабильность» в каналі X необхідне для встановлення кратності в ціле число разів періоду повторення пилкоподібної напруги T_p і періоду повторення вхідного сигналу T_c в каналі Y.

МП$_Z$ в каналі Z служить для підсилення прямокутного сигналу, тривалість якого відповідає тривалості прямого ходу пилкоподібної напруги канала X.

Калібровка осцилографа. Проводити вимірювання амплітудних і часових характеристик відображуваних на екрані ЕПТ сигналів можна після перевірки правильності установки коефіцієнтів K_y «В/дел.» і K_x «Время/дел». Цей процес перевірки називають ***калібруванням***.

Для проведення калібрування в осцилографі є вбудована нерегульована міра напруги і часу із заданими значеннями $U_M = \text{const}$ і $T_M = \text{const}$ (рис. 1.10).

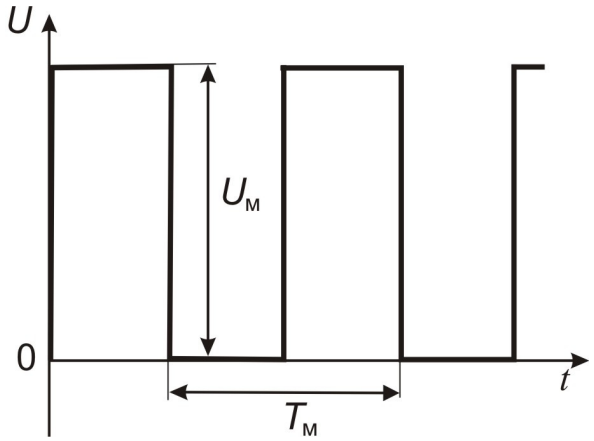


Рис. 1.10. Вихідний сигнал міри (калібратора)

Вихідний сигнал міри подають на «Вход Y» осцилографа, отримують зображення одного періоду на екрані і вимірюють значення $U_м^{вим}$ і $T_м^{вим}$. Якщо виміряні значення не дорівнюють заданим ($U_м^{вим} \neq U_м$; $T_м^{вим} \neq T_м$), то регулюють амплітуду і час ручками плавного регулювання, розташованими в центрі перемикачів «В/дел» і «Время/дел».

Увага! <u>Після проведення калібрування</u> в процесі роботи з осцилографом плавні регулювання амплітуди і часу ***<u>зміщувати не можна</u>***.

Режим внутрішньої синхронізації. В цьому режимі сигналом синхронізації каналу X є досліджуваний сигнал $U(t)$, поданий в канал Y. Перемикач П2 ставлять в положення «Внутр.».

Вхідний сигнал $U(t)$ (рис. 1.11.а) подають в гніздо «Вход Y». Перемикач «В/дел» ставлять в таке положення, щоб на екрані одержати зображення на весь екран (по апріорним знанням про амплітуду вхідного сигналу). Обертаючи регулювання «Уровень», домагаються появи зображення на екрані. Якщо зображення сигналу на екрані нестійке, то регулюванням «Стабильность» домагаються нерухомого зображення.

В моменти рівності встановленого «Уровня» і значення вхідного сигналу $U(t)$ виникають синхроімпульси в моменти часу «-», які відповідають негативній похідній $U(t)$, або в моменти часу «+», що відповідає позитивній похідній $U(t)$. Перемикачем П4 вибираємо полярність синхронізації (на рис. 1.10.в вибрана полярність «+»).

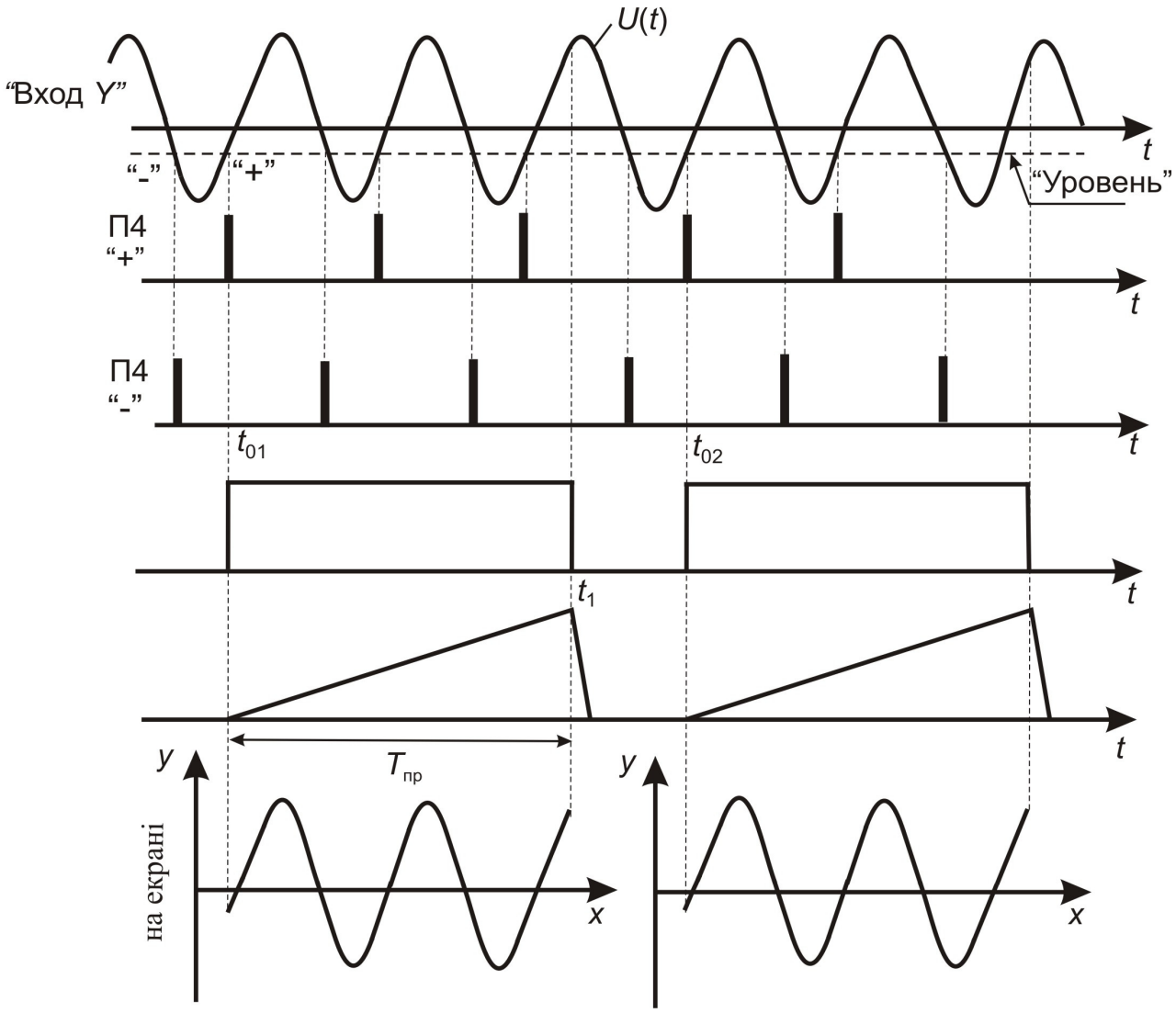


Рис. 1.11. Часові діаграми при внутрішній синхронізації. Рівень синхронізації позитивний

З моменту t_{01} починається формування пилкоподібної напруги з вибраною оператором швидкістю зростання . На екрані ЕПТ буде видно інтервал вхідного сигналу з моменту t_{01} до моменту t_1. Запуск генератора пилкоподібної напруги наступним синхроімпульсом «+» не відбувається до закінчення повного циклу пилкоподібної напруги (момент часу t_1). Затим генератор розгортки запуститься синхроімпульсом «+» в момент часу t_{02} і т.д.

Вибираючи відповідний «Уровень» синхронізації, сигнали синхронізації «+» або «-», швидкість руху променя υ_x і розмір зображення по вертикалі «В/дел», отримують зображення на екрані потрібного інтервалу досліджуваного сигналу.

Якщо при перемиканні «В/дел» зображення пропадає, то це означає, що амплітуда сигналу *U(t)* менша встановленого рівня синхронізації і відновити зображення можна ручкою «Уровень».

Якщо при перемиканні зображення стало нестійким, то це означає, що порушилося співвідношення кратності частот і тоді ручкою «Стабильность» кратність треба відновити.

На рис. 1.12 наведені часові діаграми напруг при від'ємній напрузі рівня синхронізації.

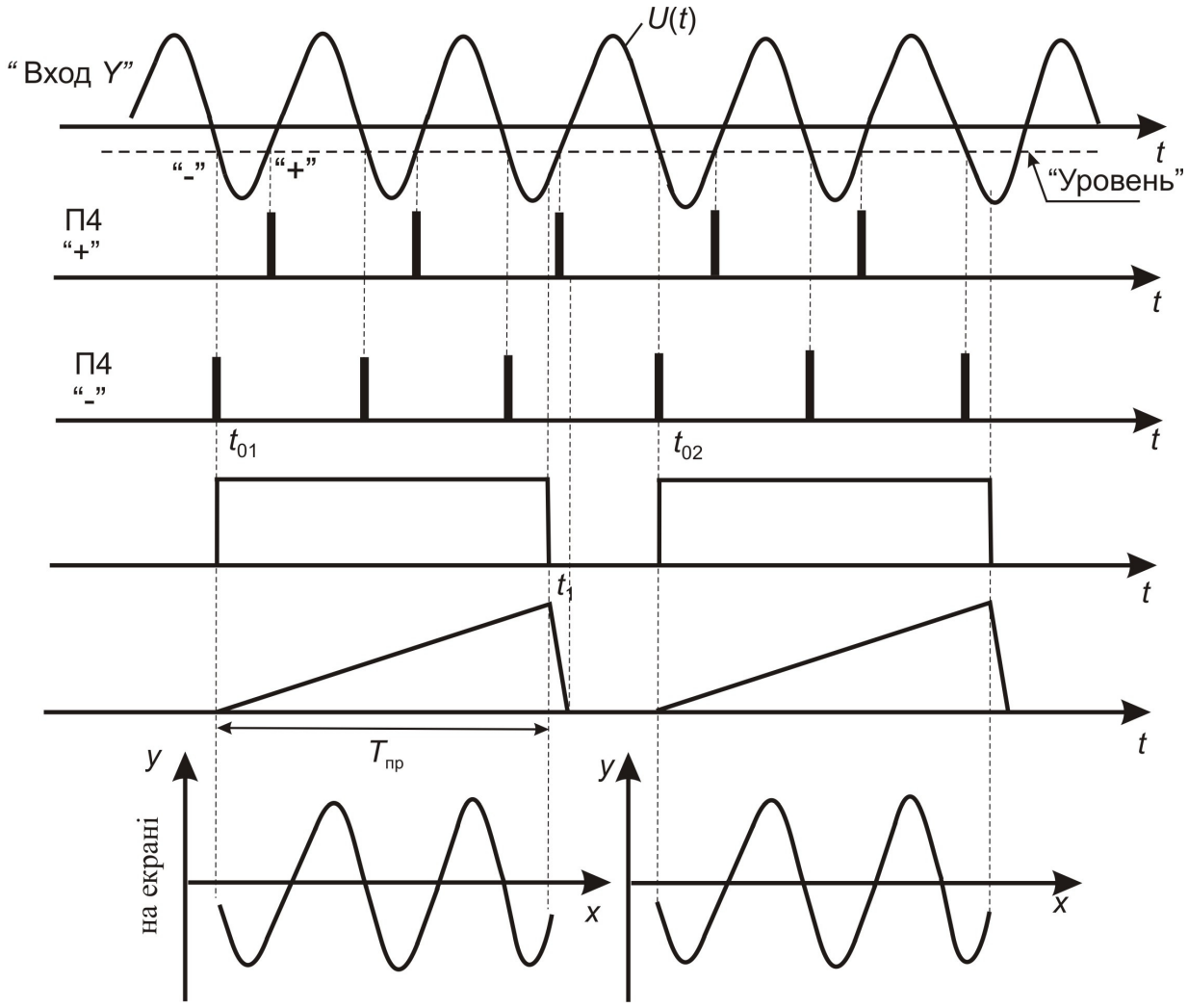


Рис. 1.12. Часові діаграми при внутрішній синхронізації. Рівень синхронізації негативний

Початок горизонтальної розгортки через інерційність блоків синхронізації, підсилення, генератора розгортки може затримуватись на десятки наносекунд. Для узгодження досліджуваного сигналу з початком горизонтальної розгортки в каналі *Y* осцилографа передбачена лінія затримки (ЛЗ, рис. 1.2). Вона затримує досліджуваний сигнал на час $t_з$ (рис. 1.12, 1.13) і компенсує, таким чином, затримку появи розгортки в каналі *X*. При відсутності ЛЗ на осцилограмі не буде видно переднього фронту сигналу.

Режим зовнішньої синхронізації. Перемикач П2 встановлюють в положення «Внешн.». Сигнал зовнішньої синхронізації від генератора подають на вхід «Внеш. синхрон.» каналу X осцилографа.

Якщо амплітуда сигналу зовнішньої синхронізації більша встановленого рівня синхронізації (регулювання «Уровень»), тоді на екрані буде відображатися лінія, що відповідає руху променя уздовж x з встановленою оператором швидкістю «Время/дел».

Поданий на «Вход Y» сигнал буде відображатися на екрані ЕПТ тільки в тому випадку, якщо він синхронізований з сигналом зовнішньої синхронізації і його положення в часі відповідає прямому ходу променя зліва направо.

1.4. Характеристики імпульсного сигналу

На рис.1.14 зображено періодично повторюваний імпульсний сигнал позитивної полярності. Імпульсний сигнал має параметри:

- ***амплітуда*** U_m – найбільше з миттєвих значень (за період повторення T);
- ***період*** повторення T – інтервал часу від будь-якого миттєвого значення сигналу до наступного миттєвого значення сигналу того ж рівня (при однаковому значенні похідної);
- ***частота*** повторення f кількість періодів коливань за 1с;
- ***передній фронт*** сигналу $\tau_{ф}^{+}$ – інтервал часу, протягом якого сигнал збільшується від рівня $0{,}1\,U_m$ до рівня $0{,}9\,U_m$;
- ***задній фронт*** (зріз) $\tau_{ф}^{-}$ – інтервал часу, протягом якого сигнал зменшується від рівня $0{,}9\,U_m$ до рівня $0{,}1\,U_m$;
- ***тривалість імпульсу*** $\tau_{і}$ – інтервал часу на рівні $0{,}5\,U_m$. Іноді тривалість імпульсу вказують на деякому заданому рівні: наприклад, на рівні $0{,}1\,U_m$ ($\tau_{і}^{0,1}$).

Імпульсний сигнал вважають прямокутним, якщо тривалість плоскої частини U_m складає більше трьох тривалостей $\tau_{ф}$.

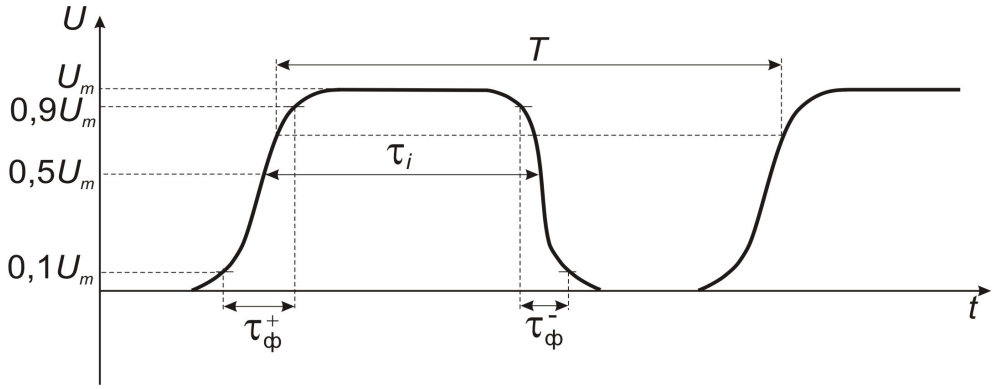


Рис. 1.14. Параметри періодичного імпульсного сигналу

1.5. Генератор імпульсних сигналів Г5-54

Генератор Г5-54 призначений для генерації одноразових (ручний запуск) або періодично повторюваних імпульсних сигналів. Прилад має три обраних оператором режими запуску (ручний, сигналами зовнішньої синхронізації додатної чи від'ємної полярності і автоматичний запуск з встановленою оператором частотою повторень).

Генератор має два канали вихідних сигналів (рис. 1.15)

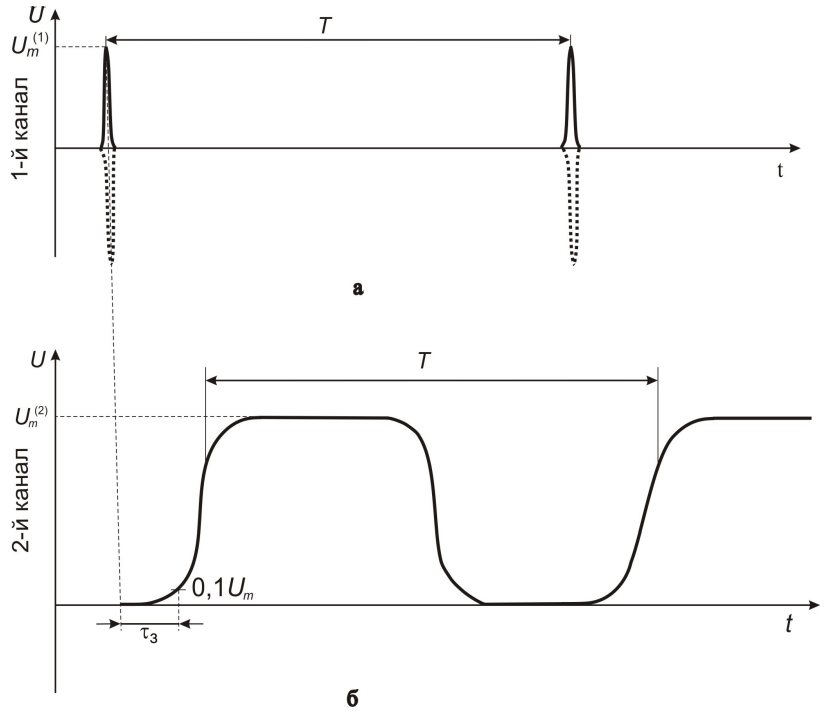


Рис. 1.15. Сигнали генератора Г5-54: а – синхроімпульс; б – періодичний імпульсний сигнал

Вихідний сигнал першого каналу $U^{(1)}$ – синхроімпульс – характеризується вкрай малою тривалістю, що необхідно для застосування його в якості сигналу зовньошньої синхронізації. Синхроімпульс можна регулювати за амплітудою $U_m^{(1)}$ і обирати полярність (додатну чи від'ємну). По 2-ому каналу генеруються періодичні прямокутні імпульси $U^{(2)}$, що мають

- рівну з синхроімпульсами частоту повторень f;
- ***час затримки*** $\tau_з$ відносно сигналу 1-го каналу $U^{(1)}$.

Параметр $\tau_з$ визначає проміжок часу між синхроімпульсом і рівнем $0{,}1U_m^{(2)}$.

Параметри сигналу 2-го каналу $U^{(2)}$ – амплітуда $U_m^{(2)}$, частота f, тривалість імпульсу τ_i та його полярність – регулюються оператором.

При зміні частоти генерації *f*, часу затримки $\tau_з$ й тривалості імпульсу τ_i необхідно виконувати умову $(\tau_з+\tau_i)\le T$; $T=1/f$. Невиконання цієї умови може привести до втрати працездатності приладу.

1.6. Генератор гармонічних сигналів Г3-109

Генератор Г3-109 при вмиканні виробляє змінну напругу відповідно до встановленої оператором частотою від 20 Гц до 200 кГц. Амплітуда вихідного сигналу може регулюватися оператором. Вмонтованим в генератор вольтметром вимірюється середньоквадратичне (діюче) значення напруги.

Параметри гармонічного сигналу (рис. 1.16):

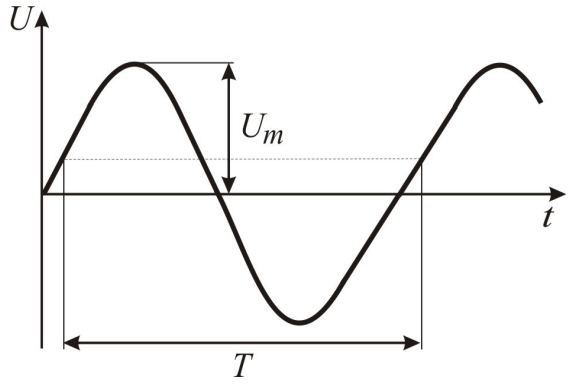


Рис. 1.16. Параметри гармонічного сигналу

- ***амплітуда*** U_m – найбільше з миттєвих значень напруги за період повторення T;
- ***період*** повторення T – інтервал часу від одного миттєвого значення до наступного значення того ж рівня і при тому ж значенні похідної $dU(t)/dt$ (тобто при однаковій фазі сигналу);
- ***частота*** повторення f – кількість періодів коливань за 1с.

$$f, [\text{Гц}] = 1/T\ [\text{с}].$$

II. Програма роботи

1.7. Ознайомитись з блок-схемою осцилографа, його передньою панеллю. Вивчити призначення всіх регулювань, перемикачів та гнізд підключення на передній панелі осцилографа.

1.8. Ввімкнути осцилограф перемикачем «Сеть». Обертаючи регулювання «Яркость», «Уровень», «Стабильность», отримати зображення лінії розгортки. Регулюванням «смещение Y» («↕») встановити лінію по центру екрана, регулюванням «смещение X» («↔») об'єднати початок розгортки з крайньою лівою поділкою шкали. Регулюванями «Яркость» і "Фокус" встановити необхідну яскравість і чіткість зображення (осцилограми) лінії.

1.9. Відкалібрувати осцилограф

1.9.1. Ввімкнути калібратор (перемикач в положенні «*f*=2кГц»), на ньому виставити амплітуду калібровочного сигналу (міри) $U_{mк}$.

1.9.2. З'єднати кабелем «Вихід» калібратора з «Вход Y» осцилографа. Встановити положення перемикача П2 у положення «Внутр.», перемикач П4 в положення «+», перемикач «Вольт/дел» поставити в таке положення, щоб зображення сигналу міри по вертикалі займало всю шкалу, а перемикач «Время/дел» поставити в положення, при якому на екрані спостерігається один період коливань сигналу калібратора (рис. 1.17). Регулюючи «Уровень» й «Стабильность», отримати нерухому*[1] осцилограму. Виконати вимірювання параметрів сигналу калібратора (U_m, T, f).

[1] Нерухоме (стійке) зображення осцилограми отримують в режимі «очікування» генератора розгортки. Перехід в цей режим здійснюють обертанням потенціометра «Стабильность» з крайнього правого положення

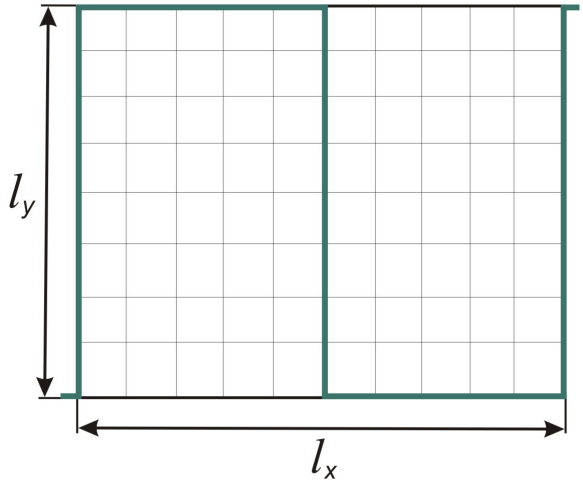


Рис. 1.17. Осцилограма калібровочного сигналу

Наприклад: $U_{mк}$=40В, $f_к$=2кГц,

Розрахувати період калібровочного сигналу (міри):

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2000\text{Гц}} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}\text{с} = 500\text{мкс}$$

Записати масштабні коефіцієнти:

- $K_x = 50\frac{\text{мкс}}{\text{дел}}$, (перемикач «Время/дел»)
- $K_y = 50\frac{\text{В}}{\text{дел}}$, (перемикач «Вольт/дел»)

Записати результати вимірювань параметрів ***в поділках*** («***дел***ениях»):

амплітуда $l_y = 8\text{дел}$;

період повторення $l_x = 10\text{дел}$.

Розрахувати:

амплітуду сигналу: $U_m = K_y \cdot l_y = 5\frac{\text{В}}{\text{дел}} \cdot 8\text{дел} = 40\text{В}$;

вліво (проти годинникової стрілки) ***до моменту зникнення (!)*** зображення на екрані. Потім потенціометром «Уровень» шукають стійку осцилограму.

період повторення: $T = K_x l_x = 5\frac{\text{мкс}}{\text{дел}} \cdot 10\text{дел} = 500\text{мкс}$;

частоту повторення: $f = \frac{1}{T} = 2\text{кГц}$

Якщо виміряні значення U_m, f не відповідають параметрам сигналу міри $U_{m_к}$, $f_к$ заданим на калібраторі, тоді ручками плавного регулювання, які розташовані в центрі перемикачів «Вольт/дел.» і «Время/дел.», проводять регулювання амплітуди U_m і періоду T так, щоб виміряні значення U_m і T дорівнювали заданим значенням міри. При калібровці перемикачі П1 й П3 можуть знаходитись в будь-якому положенні, оскільки постійна складова сигнала калібратора $U_m = 0$. Після проведення калібровки ручки плавних регулювань «Вольт/дел.» і «Время\дел.» **не зміщувати.**

Малюнок осцилограми (зобразити на «міліметровці» у масштабі: одній клітинці сітки екрана відповідає 1 см^2) і розрахунки виміряних параметрів калібровочного сигналу занести в протокол лабораторної роботи.

1.10. Одержати осцилограму та виміряти параметри гармонічного сигналу

Обладнання: осцилограф, генератор гармонічних коливань Г3-109, кабель.

1.10.1. Ввімкнути генератор Г3-109. Встановити рекомендовані параметри вихідного сигналу (високочастотного):

- частота $f_1 = (10 \cdot № + 100)\text{кГц}$,
- напруга $U_{\text{ген}} = (0{,}2 \cdot № + 5)\text{В}$,

де № – номер бригади.

Шкала вмонтованого в генератор Г3-109 вольтметра проградуйована в середньоквадратичних значеннях синусоїдальної напруги, тобто $U_{\text{ген}} = U_m / \sqrt{2}$.

1.10.2. Вихід генератора Г3-109 з’єднати кабелем з «В*ходом Y*» осцилографа. Режим синхронізації – «Внутр.». Положення перемикачів П1 й П3 – будь-яке. Обертанням ручки «Уровень» отримати зображення, а обертанням ручки «Стабильность» зробити осцилограму нерухомою.

За допомогою перемикачів «Вольт/дел.» й «Время/дел.» отримати на екрані зображення одного періоду коливань. Виконати вимірювання параметрів гармонічного сигналу.

Малюнок осцилограми і розрахунки виміряних параметрів занести в протокол. Порівняти виміряні значення параметрів з заданими на генераторі.

Наприклад:

На вхід осцилографа подано гармонічний сигнал з параметрами:

$f = 125\text{кГц}$, $U_{\text{ген}} = 4{,}25\text{В}$.

Отримати стійку осцилограму для вимірювання параметрів гармонічного сигналу (рис. 1.18).

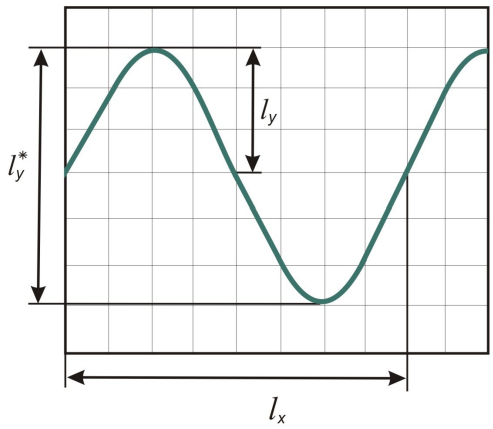


Рис. 1.18. Осцилограма для визначення параметрів гармонічного сигналу

За результатами вимірювань записати масштабні коефіцієнти:

- $K_x = 1\dfrac{\text{мкс}}{\text{дел}}$ (значення перемикача «Время/дел»);
- $K_y = 2\dfrac{\text{В}}{\text{дел}}$ (перемикач «Вольт/дел»).

Записати результати вимірювань параметрів ***в поділках*** («***дел***ениях»):

амплітуда $l_y = l_y^* / 2 = 3\text{дел}$; період $l_x = 8\text{дел}$.

Розрахувати:

амплітуду сигналу : $U_m = K_y \cdot l_y = 2\frac{\text{В}}{\text{дел}} \cdot 3\text{дел} = 6\text{В}$;

період сигналу: $T = K_x \cdot l_x = 1\frac{\text{мкс}}{\text{дел}} \cdot 8\text{дел} = 8\text{мкс}$;

частоту: $f = \frac{1}{T} = 125\text{кГц}$.

1.10.3. Дослідити ***низькочастотний*** сигнал генератора:

- частота $f_2 = (10 \cdot t + 500)\ \text{Гц}$,
- напруга $U_{\text{ген}} = (0{,}2 \cdot \text{№} + 5)\text{В}$,

виконати вимірювання параметрів гармонічного сигналу аналогічно п.4.2.

1.11. Одержати осцилограми та виміряти параметри періодичної послідовності імпульсних сигналів

Обладнання: осцилограф, генератор Г5-54, 2 кабелі.

1.11.1. Встановити на генераторі перемикач роду робіт в положення «Авт.». ***<u>Не вмикаючи тумблер «Сеть»</u>*** генератора Г5-54, встановити:

- тривалість імпульсу $\tau_i = (2 \cdot \text{№} + 2)\text{мкс}$,
- період повторення $T = (3...4) \cdot \tau_i$,
- обчислити ($f = \frac{1}{T}$) і встановити на генераторі частоту повторення f,
- затримка $\tau_з = (0{,}1 \cdot \text{№} + 1)\text{мкс}$ (на шкалі «Временной сдвиг»).

Ввімкнути «Сеть» генератора, встановити напругу вихідного сигналу

- $U_{\text{ген}} = (0{,}2 \cdot \text{№} + 2)\text{В}$ U_m=(0.2*№+2) В

додатньої полярності.

1.11.2. Вихід 2-го каналу генератора (позначення ⊖→ «1:1») з`єднати кабелем з «Вход Y» осцилографа.

1.11.2.а. Встановити перемикачи в наступні положення: П2 → «Внутр.», П4 → «+», П1 → «≃», «Вольт/дел.» в положення, при якому зображення по вертикалі буде на весь екран. Ручками «Уровень» і «стаб.» досягти стійкого зображення на екрані.

1.11.2.б. Змінити положення перемикача «Время/дел.» так, щоб на екрані отримати стійке зображення одного періоду коливань (за допомогою потенциометрів «Уровень» й «Стабильность»). Замалювати осцилограму на міліметрівці за масштабом: одній клітинці шкали екрану відповідає 1 см^2. Записати коефіцієнти K_x, K_y, за осцилограмою визначити величини l_x, l_y й розрахувати: *амплітуду* U_m, *період* T, *частоту* f сигналу (рис. 19.а).

1.11.2.в. Змінюючи положення перемикача «Время/дел.» (зменшувати значення K_x) отримати стійку осцилограму імпульсу на весь екран. Замалювати осцилограму. Визначити l_x, записати K_x та розрахувати *тривалість імпульсу* τ_i (рис. 19.б):

$$\tau_i = K_x \cdot l_x .$$

1.11.2.г. Продовжуючи зменшувати значення K_x (перемикачем «Время/дел.»), отримати на екрані стійку осцилограму для вимірювання *переднього фронту сигналу* $\tau_{ф}^{+}$. Замалювати осцилограму. Визначити l_x, записати K_x та розрахувати тривалість переднього фронту імпульса $\tau_{ф}^{+}$ (рис. 19.г):

$$\tau_{ф}^{+} = K_x \cdot l_x .$$

1.11.2.д. Встановити перемикач П4 в положення «-» і отримати стійке зображення для вимірювання *заднього фронту сигналу* $\tau_{ф}^{-}$. Замалювати осцилограму. Визначити l_x, записати K_x та розрахувати тривалість заднього фронту $\tau_{ф}^{-}$ (рис. 19.д):

$$\tau_{ф}^{-} = K_x \cdot l_x .$$

1.11.2.е. *Виміряти постійну складову сигналу* U_0 за формулою:

$$U_0 = K_y \cdot l_y .$$

Для цього П1 встановити в положення «~». Зміщення сигналу на екрані при перемиканні П1 с положення «~» в положення «⎓» визначає значення U_0. Для отримання великих значень l_y необхідно зменшувати значення K_y перемикачем «Вольт/дел.» (рис. 19.в).

1.11.2.ж. *Виміряти час затримки* $\tau_з$. Перемикач П2 встановити в положення «Внешн.». Вихідний сигнал 1-го каналу (канал синхронізації) генератора Г5-54 подати на вхід осцилографа в гніздо «Внешн. 1:1» (або «1:10»). Перемикач П4 встановити в положення «+». Обертанням пучки «Уровень» досягти виникнення на екрані лінії розгортки. (При відсутності сигналу зовнішньої синхронізації зображення лінії розгортки повинно зникати).

Сигнал 2-го каналу (досліджуваний імпульсний сигнал) генератора подати на «Вход Y» осцилографа. Перемикач «Время/дел» встановити в положення, що дозволяє на екрані спостерігати одночасно початок розгортки сигналу і найбільше миттєве значення сигналу (рис. 19.д).

Виміряти час затримки $\tau_з$ сигналу

$$\tau_з = K_x \cdot l_x$$

2-го каналу генератора по відношенню до сигналу 1-го каналу.

III. Зміст звіту

За результатами виконання лабортаторної роботи студент оформлює протокол, що містить:

- назву та мету роботи;
- блок-схему;
- схематичне зображення передньої панелі керування з вказаними органами керування осцилографом;
- програму роботи: записати завдання відповідного пункту;

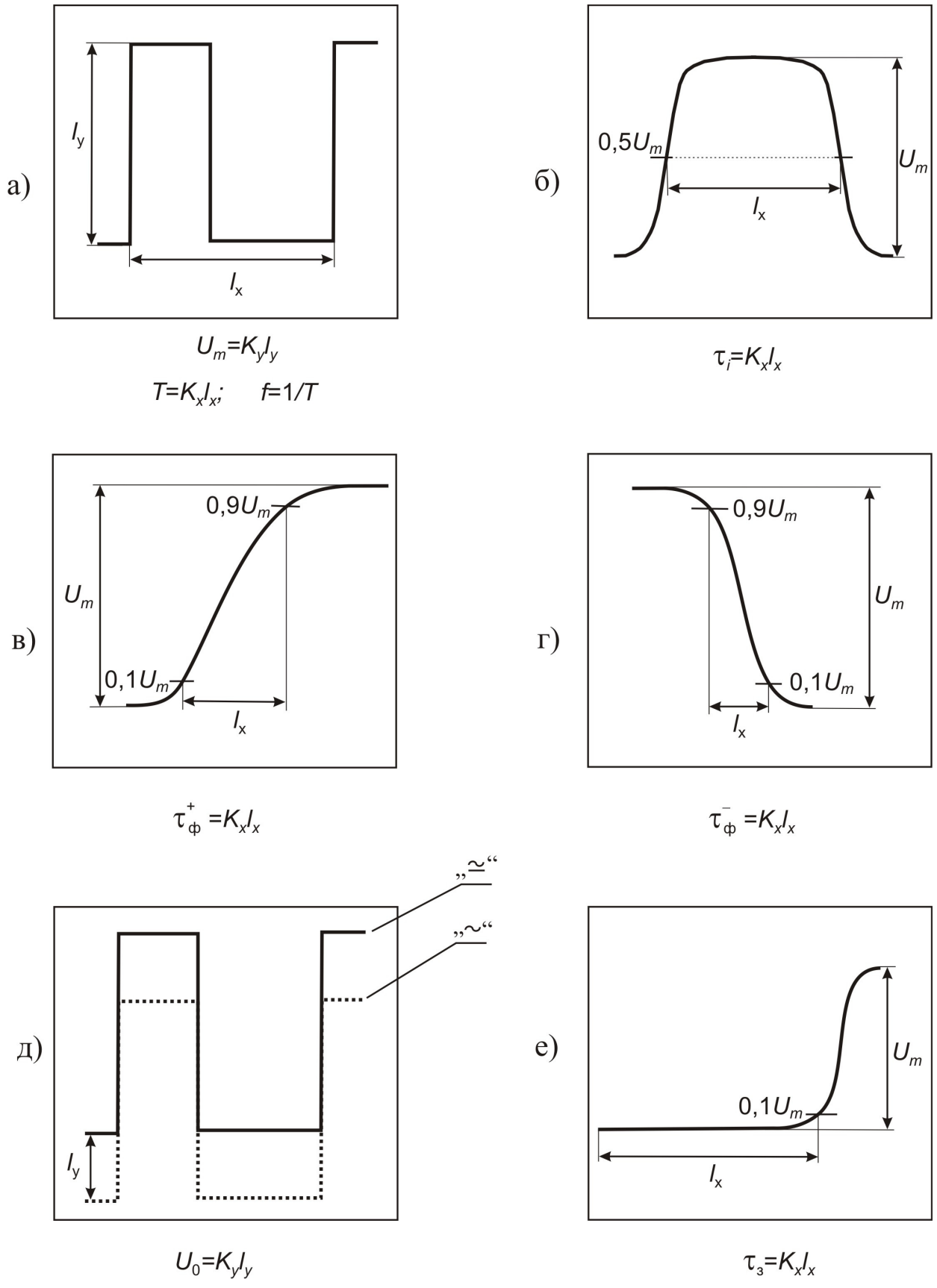


Рис. 1.19. Осцилограми вимірювання параметрів періодичного прямокутного імпульсного сигналу додатної полярності

- навести (вклеїти) рисунки осцилограм (на міліметровці!), за якими проводилися вимірювання (розрахунки параметрів);
- до осцилограм вказують положення перемикачів: значення K_x й K_y («Время/дел.», «В/дел.»), режим синхронізації (П2), полярність синхронізації (П4), вхід відкритий чи закритий (П1);
- на осцилограмі позначити (за допомогою виносних ліній) параметр, що вимірюється. Надати детальний його розрахунок: формулу, значення величин (вказуючи одиниці їх вимірювання);
- зробити висновки (наприклад, порівняти виміряні значення параметрів з заданими на генераторі та інше).

IV. Запитання для самоперевірки

Студент повинен знати функціональну й метрологічну схему осцилографа, призначення органів регулювання й керування, вміти обирати необхідний режим роботи й проводити практичні вимірювання амплітудних й часових парамерів сигналів.

1. Яке основне призначення електронно-променевого осцилографа?
2. Що є основним вимірювальним елементом в осцилографі? Яке його призначення?
3. З яких основних блоків (вузлів) складається електронно-променева трубка (ЕПТ)?
4. Що є джерелом електронів в ЕПТ?
5. В що перетворюється електричний сигнал в ЕПТ?
6. Чим регулюється струм електронного пучка? Що при цьому змінюється?
7. Чому зміною напруги на першому аноді А1 можна змінити фокусування електронного променя?
8. Чому на електроди прожектора ЕПТ подаються високі напруги? Якого порядку?
9. Коли буде світитись люмінофор ЕПТ? від чого залежить колір свічення?
10. Від чого залежить яскравість свічення екрана?
11. Для чого потрібні відхиляючі пластини? Скільки їх? Що таке чутливість пластини?

12. Куди в осцилографі подається напруга, яку виробляє генератор розгортки? Яку форму має ця напруга?
13. Що таке система післяприскорення? Яка її роль?
14. Протягом якого часу світлова точка переміщується екраном від початку (зліва) до кінця (справа)?
15. Чому яскравість зображення залежить від періоду розгортки?
16. Які пластини називають сигнальними? Чому?
17. Що можна змінити перемикачем П1 у вхідному колі каналу Y?
18. Що таке вимірювальний перетворювач? Яку вимірювальну функцію виконують відхиляючи пластини X(Y) в ЕПТ?
19. Для чого потрібна синхронізація в осцилографі?
20. Як здійснюється «внутрішня» («зовнішня») синхронізація? Що з чим при цьому синхронізується?
21. Для чого потрібна калібровка осцилографа? Як вона здійснюється? Яку вимірювальну функцію здійснює «калібровочний сигнал» в процесі калібровки?
22. Що перевіряють в процесі проведення калібровки осцилографа?
23. Якими регулюваннями домагаються нерухомого зображення сигналу?
24. Що змінюється на осцилограмі при перемиканні полярності «Уровня» перемикачем П4?
25. Чому час затримки $\tau_з$ можна виміряти тільки в режимі «зовнішньої» синхронізації?
26. Чим треба керувати для отримання осцилограми досліджуваного сигналу на екрані ЕПТ?
27. Як під впливом напруги розгортки і напруги сигналу утворюється зображення на екрані ЕПТ?
28. Для чого на екран ЕПТ нанесена координатна сітка?
29. Як, користуючись координатною сіткою на екрані ЕПТ та масштабними коефіцієнтами Кх і Ку, визначити параметри певного сигналу? Навести приклад.

30. Від чого залежить числове значення масштабного коефіцієнта Кх? Чим його можна змінити?
31. Від чого залежить числове значення масштабного коефіцієнта Ку? Чим його можна змінити?
32. Де знаходяться (в яких блоках) регулювання коефіцієнтів Кх і Ку?
33. Чим відрізняється «автоколивний» режим роботи генератора розгортки від режиму «очікування»?
34. Чому при осцилографічних вимірюваннях розмір зображення на екрані прагнуть по можливості збільшити?
35. Які параметри повністю характеризують гармонічну напругу? Поясніть на графіку.
36. Які параметри характеризують періодичну послідовність імпульсних сигналів? Поясніть на графіку.
37. Що таке передній (задній) фронти імпульсу? Як їх виміряти?

Лабораторна робота № 2

ВИМІРЮВАННЯ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ І СИЛИ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Мета роботи: Ознайомитись з вимірювальними приладами, вивчити методику вимірювань постійних напруги і струму, визначення похибок й обробки результатів експерименту

І. Теоретичні відомості

2.1. Види вимірювальних приладів

Вимірювальний прилад – це засіб вимірювання, призначений для створення певного виду сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття оператором. В електроніці сигналом вимірювальної інформації є *електричний сигнал*.

За структурною схемою і формою подачі вимірювальної інформації електронні прилади поділяються на аналогові і цифрові.

Аналоговий вимірювальний прилад – засіб вимірювання, покази якого є неперервною функцією зміни вимірювальної фізичної величини.

Цифровим вимірювальним приладом називається засіб вимірювання, який автоматично виробляє дискретні сигнали вимірювальної інформації і покази якого представлені в цифровій формі.

Аналогові вимірювальні прилади за принципом дії та залежно від елементної бази, використаної для їх побудови, можна розділити на *електромеханічні* і *електронні*.

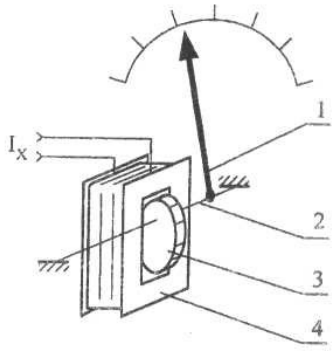
Електромеханічні вимірювальні прилади будують за узагальненою структурною схемою, поданою на рис. 2.1.

Рис. 2.1. Узагальнена структурна схема електромеханічного приладу

Вимірювальна схема здійснює кількісне і якісне перетворення вхідної величини X (напруга, сила струму, потужність, опір тощо) в деяку проміжну електричну величину X_1 (напруга чи струм), на яку реагує вимірювальний механізм. В свою чергу

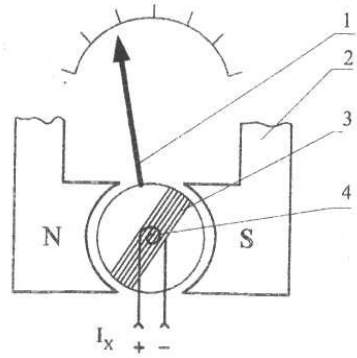
вимірювальний механізм *перетворює електричну величину* X_1 *в механічне кутове чи лінійне переміщення* α, значення якого відраховується за шкалою *відлікового пристрою*, проградуюваного в одиницях вимірювальної величини $N(X)$.

Класифікація електромеханічних приладів проводиться за типом вимірювального механізму. Найбільш розповсюдженими в практиці електричних вимірювань є такі системи: *магнітоелектрична* (рис. 2.2.а), *електромагнітна* (рис. 2.2.б), *електродинамічна, електростатична*.



1 – стрілка; 2 – магніт з полюсними наконечниками; 3 – рамка; 4 – спіральні пружини з вимірювальним струмом

а



1 – стрілка; 2 – вісь; 3 – феромагнітне осердя; 4 – котушка з вимірювальним струмом

б

Рис. 2.2. Електромеханічний вимірювальний механізм

Вимірювальний механізм *магнітоелектричної системи* складається з рамки 3, намотаної мідним чи алюмінієвим дротом, по якій протікає вимірювальний струм I_x. До рамки прикріплено стрілчастий покажчик 1. Рамка розміщується в полі постійного магніту 2. Під дією струму I_x рамка обертається в магнітному полі, кут повороту α обмежується спеціальною пружинкою 4. Функція перетворення магнітоелектричного механізму:

$$\alpha = \frac{BSN}{M} I_x = S_I I_x,$$

де B – індукція магнітного поля, S – площа рамки, N – кількість витків рамки, M – протидіючий момент гальмуючих спіралей, S_I – чутливість за струмом.

Прилади магнітоелектричної системи високочутливі, але працюють тільки на постійному струмі.

Вимірювальний механізм *електромагнітної системи* складається з котушки, по якій протікає вимірювальний струм I_x. В отвір котушки втягується феромагнітне осердя при будь-якій полярності струму.

2.2. Електронні аналогові вимірювальні прилади

Електронні аналогові вимірювальні прилади (АВП) зазвичай будують на основі магнітоелектричного вимірювального механізму з використанням електронних вузлів – вимірювальних підсилювачів, перетворювачів змінного струму в постійний, функціональних перетворювачів тощо. Це дає змогу розширити діапазон вимірювань АВП, а також їх функціональні можливості.

Важливою характеристикою АВП є їх внутрішній або вхідний опір, від якого залежить споживання потужності вимірювальним приладом від джерела вимірювального сигналу і, відповідно, значення методичної похибки, зумовленої цим споживанням. Внутрішній опір приладів може бути вказаний безпосередньо в метрологічних характеристиках приладу або вказується параметр, за яким можна його обчислити.

Аналогові електронні вольтметри. Серед широкої номенклатури аналогових електронних приладів найпоширенішими є електронні вольтметри постійного та змінного струму, зокрема, вольтметри середньовипрямлених, середньоквадратичних та амплітудних значень змінних сигналів.

Електронні вольтметри постійного струму зазвичай будують за структурною схемою, зображеною на рис. 2.3. Вимірювана напруга U_x подається на вхідний пристрій, який являє собою багатограничний високоомний подільник напруги. З подільника напруги сигнал надходить на підсилювач постійного струму, а потім – на магнітоелектричний вимірювальний прилад.

Рис. 2.3. Структурна схема електронного вольтметра постійного струму

Функція перетворення електронного вольтметра постійного струму:

$$\alpha = K_{ПН} K_П S_U U_x = K_U U_x,$$

де $K_{ПН}$ – номінальний коефіцієнт поділу подільника напруги; $K_П$ – коефіцієнт підсилення підсилювача постійного струму; S_U – чутливість по напрузі магнітоелектричного механізму; K_U – коефіцієнт перетворення електронного вольтметра.

Вхідний опір електронного вольтметра постійного струму досягає *десятків мегаом.*

Амперметри. Електричний струм можна виміряти прямим або опосередкованим методом. При прямому вимірюванні постійного струму використовується вимірювальний механізм зі струмом повного відхилення $I_М$ і опором $R_М$. Розширення шкали (рис. 2.4) до значення I_x проводиться за рахунок включення шунта, опір якого вибирають із умови: $R_ш = R_М \left(\frac{I_М}{I_x - I_М} \right)$.

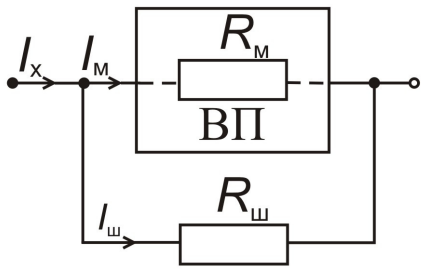


Рис. 2.4. Розширення шкали амперметра

При опосередкованому методі вимірювання значення струму за допомогою вимірювального перетворювача перетворюють в іншу фізичну величину, значення якої вимірюють. Для перетворення значення вимірюваного струму в напругу використовують вольтметр, шкала якого про градуйована в одиницях струму (рис. 2.5).

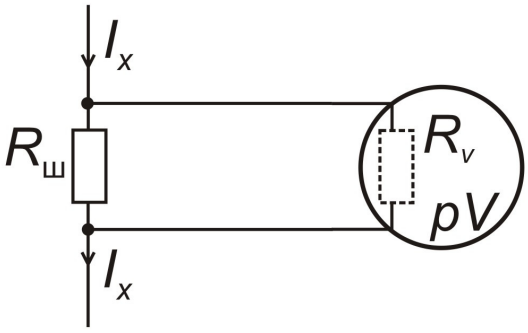


Рис. 2.5. Опосередковане вимірювання струму

При $R_ш << R_v$ вимірюване значення струму визначається за формулою $I_x = \frac{U_v}{R_ш}$.

2.3. Види вимірювань

Вимірювання сили струму і напруги в електричному колі проводять в діапазоні частот від 0 Гц до 1 ГГц. На більш високих частотах ці величини втрачають свою однозначність в лінії передачі і в її поперечному перерізі. З цих причин на надвисоких частотах вимірюють потужність, а не струм і напругу.

З точки зору способу одержання значення вимірюваної величини за результатами первинних вимірювань розрізняють прямі та непрямі (опосередковані) вимірювання.

Прямі вимірювання – при яких фізичні величини знаходяться безпосередньо з дослідних даних. Наприклад, напруга вимірюється вольтметром, струм – амперметром, опір – омметром, розмір – лінійкою і т.д. Математично прямі вимірювання можна охарактеризувати елементарною формулою $A = x$, де x – значення виміряної величини, A – покази вимірювального приладу.

Непрямі опосередковані вимірювання – при яких фізичні величини знаходяться за відомими формулами, в які входять величини, що вимірюються безпосередньо і називаються аргументами. Опосередковані вимірювання можна охарактеризувати такою формулою:

$A = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, де $x_1, x_2, \ldots, x_n$ – результати прямих вимірювань величин, пов'язаних відомою функціональною залежністю f.

Наприклад, при визначенні густини струму j прямими вимірюваннями визначають струм I і розмір, який визначає площу поперечного перерізу провідника S, і далі розраховують $j = I / S$. Опір можна визначити омметром прямим вимірюванням, але якщо вимірюється напруга на опорі U і струм через нього I, то опір визначається опосередкованим методом за формулою закона Ома $R = U / I$.

Сумісні (спільні) вимірювання характеризуються тим, що одночасно вимірюється декілька *різнойменних* фізичних величин для знаходження залежності між ними. Числові значення шуканих величин визначаються із системи рівнянь, які зв'язують їх значення з виміряними прямим або опосередкованим способом.

Сукупні вимірювання – значення декількох *однойменних* фізичних величин знаходять із розв'язку системи рівнянь, які отримані при прямих вимірюваннях різних комбінацій цих фізичних величин.

2.4. Похибки вимірювань і їх класифікація

Якість вимірювань тим вища, чим ближче результат вимірювання X_i до істинного значення X.

Кількісною характеристикою якості вимірювань є *похибка* вимірювань.

Похибка вимірювального приладу відображає властивості тільки самого вимірювального приладу, обумовлені його структурними схемами, конструктивними особливостями, технологією виготовлення тощо.

В метрології розрізняють похибку вимірювального приладу (*інструментальна похибка*) і похибку *результату вимірювання*. Ці два поняття близькі між собою і їх класифікують за однаковими ознаками.

Похибкою вимірювання називають відхилення результату вимірювання від істинного (дійсного) значення вимірюваної фізичної величини.

Похибка засобу вимірювання – різниця між показами приладу ті істинним (дійсним) значенням вимірюваної фізичної величини.

Абсолютна похибка – це різниця між результатом вимірювання та істинним значенням X:

$$\Delta = X_{\text{вим}} - X.$$

Для порівняння якості вимірювань введено поняття *відносної похибки* – відношення абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{\Delta}{X} \cdot 100\%.$$

Для характеристики точності засобу вимірювання введено поняття *зведеної похибки* приладу γ

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\%,$$

де X_N – деяке нормуюче значення (наприклад, кінцеве значення шкали приладу

$X_N = X_k$. Якщо абсолютна похибка постійна по всій шкалі (Δ=const), тоді відносна похибка збільшується до початку шкали. **Тому доцільно вибирати прилад (або шкалу приладу) з такою границею вимірювань, коли його покажчик (стрілка) при вимірюваннях буде розташована ближче до кінця шкали.**

За залежністю похибок від вимірюваної величини розрізняють: *адитивні* похибки, які не залежать від X; *мультиплікативні*, які лінійно залежать від X; та *нелінійні*, які мають нелінійну залежність від виміряної величини.

Узагальненою характеристикою вимірювального приладу є *клас точності*. Клас точності АВП з адитивною похибкою позначають одним числом K, яке дорівнює границі *допустимої зведеної основної похибки* $\gamma_{гр}$, вираженої у відсотках:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{гр}}{X_N} \cdot 100\% = \pm p,\% = \text{const},$$

де $\Delta_{гр}$ – границі допустимої абсолютної основної похибки; X_N – нормувальне значення, яке для приладів з рівномірною шкалою дорівнює кінцевому значенню шкали $X_к$.

За класом точності розраховують найбільшу абсолютну і відносну похибки вимірювань за формулами:

$$\Delta_{гр} = \pm \frac{\gamma_{гр} X_N}{100} = \pm a = \text{const};$$

$$\delta_{гр} = \pm \frac{\Delta_{гр}}{X} \cdot 100\% = \pm \gamma_{гр} \frac{X_N}{X}\%.$$

Для характеристики класів точності аналогових (стрілкових) засобів вимірювання використовують ряд чисел:

$$(1;\ 1{,}5;\ 2;\ 2{,}5;\ 4;\ 5;\ 6) \times 10^n, \text{ де } n = 0, -1, -2\ldots$$

Ці значення затверджені Держстандартом.

Клас точності електровимірювального приладу встановлюють на заводі при калібровці за зразковим приладом в нормальних умовах. Нормальними умовами вважаються: температура навколишнього середовища (20±5)ºС, відносна вологість

(65±15)%, атмосферний тиск (100 000 ± 400)Па або (760 ± 30)мм рт.ст., напруга мережі живлення (220 В ± 2%) з частотою (50 Гц ± 1%).

Для цифрових приладів з адитивною і мультиплікативною складовими похибки клас точності виражається у формі допустимої двочленної відносної похибки

$$\delta_{гр} = \pm\left[c + d\left(\frac{X_к}{X} - 1\right)\right], \%$$

$$\Delta_{гр} = \pm\frac{d \cdot X_к + (c-d)X}{100} = \pm(a + bx)$$

Коефіцієнти c і d обирають з ряду класів точності.

В залежності від причин виникнення похибки поділяють на *інструментальні, методичні та суб'єктивні*.

Інструментальні похибки обумовленні похибками самого засобу вимірювання, їх ще називають апаратними.

Методичні похибки обумовленні:

– відмінністю прийнятої моделі об'єкта вимірювання від моделі, яка адекватно описує його властивості, визначені шляхом вимірювання;

– впливом способів використання засобів вимірювань. Наприклад, вольтметр з кінцевим значенням внутрішнього опору шунтує ділянку кола, на якій вимірюється напруга;

– впливом алгоритмів (формул), за якими проводиться обчислення результатів вимірювань.

Іноді методична похибка є вимушеною, оскільки безпомилкова процедура вимірювань неможлива. Наприклад, методична похибка аналого-цифрового перетворення є вимушеною, оскільки принципово неможливо перетворити аналогову величину, що приймає нескінчену кількість значень, у цифрову, яка виражається кінцевим числом.

Відмінною особливістю методичних похибок є те, що їх неможливо вказати в нормативно-технічній документації даного засобу вимірювання. В зв'язку з цим

оператор повинен чітко розрізняти фактично виміряну ним величину і ту, яку треба було виміряти.

Суб'єктивна (*особиста*) *похибка* обумовлена похибкою відліку оператором показів на шкалах засобу вимірювання, діаграмах реєструючих приладів. Вони викликані станом оператора, недосконалістю органів відчуття, ергономічними якостями засобів вимірювань. Таку похибку визначають на основі нормованої номінальної ціни поділки вимірювального приладу з врахуванням здібностей «середнього оператора» до інтерполяції в границях поділки шкали.

2.5. Похибки вимірювання напруги і струму

2.5.1. Вимірювання напруги джерела

Вимірювальний прилад (вольтметр) включають паралельно до ділянки кола, на якій виміряють напругу (рис. 2.6).

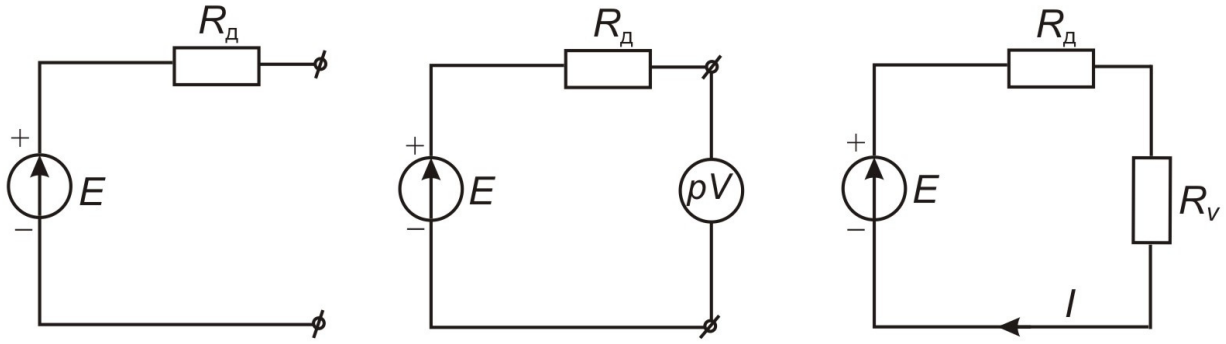


Рис. 2.6. Схема включення вольтметра

E – електрорушійна сила джерела,

$R_д$ – внутрішній опір джерела,

R_v – вхідний опір вольтметра.

При вимірюванні напруги вольтметром з вхідним опором R_v виникають методична (систематична) похибка і інструментальна (випадкова) похибка:

- *методична* обумовлена впливом вимірювального приладу з опором R_v на значення вимірюваної напруги $U_{вим}$;
- *інструментальна* визначається класом точності приладу і вибраною шкалою.

Абсолютна методична похибка:

$$\Delta_M = U_{вим} - U.$$

Відносна методична похибка:

$$\delta_{\text{М}} = \frac{\Delta_{\text{м}}}{U} = \frac{\textit{виміряне\_значення} - \textit{істинне\_значення}}{\textit{істинне\_значення}} = \frac{U_{\text{вим}} - U}{U},$$

де $U_{\text{вим}} = I \cdot R_v = \dfrac{E}{R_{\text{д}} + R_v} \cdot R_v.$

Виконавши перетворення, одержимо вираз для відносної методичної похибки:

$$\delta_{\text{М}} = -\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{д}} + R_v}.$$

З виразу видно, що чим більший вхідний опір вольтметра R_v, тим менша методична похибка.

Для визначення інструментальної похибки необхідно знати клас точності приладу $K_{\text{П}}$, який визначається за формулами:

$K_{\text{П}} = \dfrac{\Delta_{max}}{U_{\text{К}}} \cdot 100\%$, для приладу з адитивною похибкою,

$K_{\text{П}} = \dfrac{\Delta_{max}}{U_{\text{вим}}} \cdot 100\%$, для приладу з мультиплікативною похибкою.

$K_{\text{П}} = \delta(\%) = \pm\left[a + b\left(\left|\dfrac{U_{\text{К}}}{U_{\text{вим}}}\right| - 1\right)\right]$, для приладу з мультиплікативною похибкою і нелінійною шкалою,

де $U_{\text{к}}$ – кінцеве значення вибраної шкали приладу; $U_{\text{вим}}$ – покази приладу на вибраній шкалі; $a,\ b$ – коефіцієнти для вибраної шкали приладу (визначаються за паспортом приладу).

Відповідно, абсолютна інструментальна похибка визначається для приладів з адитивною похибкою:

$$\Delta_{max} = \pm \frac{K_{\text{П}} \cdot U_{\text{K}}}{100\%}.$$

Для приладів з мультиплікативною похибкою (цифра, що позначає клас точності приладу, *вказується в кружечку*):

$$\Delta_{max} = \pm \frac{K_{\text{П}} \cdot U_{\text{вим}}}{100\%}.$$

Для приладів з мультиплікативною похибкою і нелінійною шкалою з класом точності a/b:

$$\Delta_{max} = \pm \frac{K_{\text{П}} \cdot U_{\text{вим}}}{100\%} \cdot \frac{a}{b}.$$

Дійсне значення напруги джерела визначається за виразом:

$$E = U_{\text{вим}} + \text{П} = U_{\text{вим}} + \delta_{\text{М}} \cdot E = U_{\text{вим}} \left(1 + \frac{R_{\text{д}}}{R_v}\right),$$

де П – поправка на систематичну (методичну) похибку, яка дорівнює за значенням і протилежна за знаком абсолютній методичній похибці.

Кінцевий результат вимірювання напруги з урахуванням методичної і інструментальної похибок записують у вигляді:

$$E = U_{\text{вим}} \left(1 + \frac{R_{\text{д}}}{R_v}\right) \pm \Delta_{max}.$$

2.5.2. Вимірювання сили струму

В електричне коло (рис. 2.7.а) прилад для вимірювання струму (амперметр) включається послідовно з навантаженням $R_{\text{н}}$ (рис. 2.7.б). Як і при вимірюванні напруги вольтметром, так і при вимірюванні струму амперметром, який має опір R_A, виникають методична і інструментальна похибки.

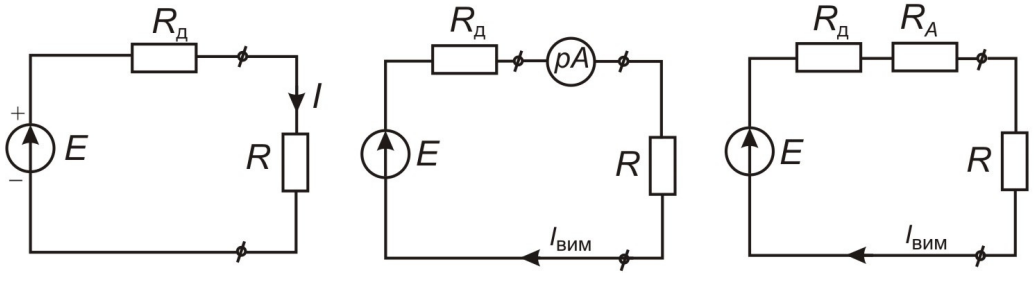


Рис. 2.7. Схема включення амперметра

Перед включенням амперметра через $R_н$ протікав струм I, після включення амперметра, який має опір R_A, в колі буде протікати вимірюваний струм $I_{вим}$ (рис. 2.8.в).

Відносне значення методичної похибки:

$$\delta_М = \frac{\Delta_м}{I} = \frac{виміряне\_значення - істинне\_значення}{істинне\_значення} = \frac{I_{вим} - I}{I},$$

де

$$I_{вим} = \frac{E}{R_д + R_н + R_A}, \quad I = \frac{E}{R_д + R_н} \quad .$$

Після нескладних перетворень одержимо вираз для відносної методичної похибки:

$$\delta_М = -\frac{R_A}{R_д + R_н + R_A}.$$

З виразу видно, що методична похибка є систематичною и її значення тим менше, чим менший опір амперметра R_A.

Дійсне значення струму з урахуванням поправки на методичну похибку буде таким:

$$I = I_А + П = I_А + \delta_М \cdot I = I_А + I \cdot \frac{R_A}{R_д + R_н + R_A},$$

Після перетворення останнього виразу одержимо формулу для дійсного значення струму, який протікає через $R_н$ (без включеного амперметра на рис. 7.а):

$$I = I_A \cdot \frac{R_д + R_н + R_A}{R_д + R_н}.$$

Кінцеве значення результату вимірювання записують у вигляді:

$$I = I_A \cdot \frac{R_д + R_н + R_A}{R_д + R_н} \pm \Delta_{max}.$$

2.5.3. Вимірювання напруги на ділянці кола

Відносна методична похибка вимірювання напруги на ділянці кола має вигляд:

$$\delta_{\text{М}} = \frac{U_{\text{вим}} - U_2}{U_2},$$

де $U_{\text{вим}} = \frac{E}{R_1 + R_{\text{е}}} \cdot R_{\text{е}}$; $U_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2$; $R_{\text{е}} = \frac{R_2 \cdot R_v}{R_2 + R_v}$.

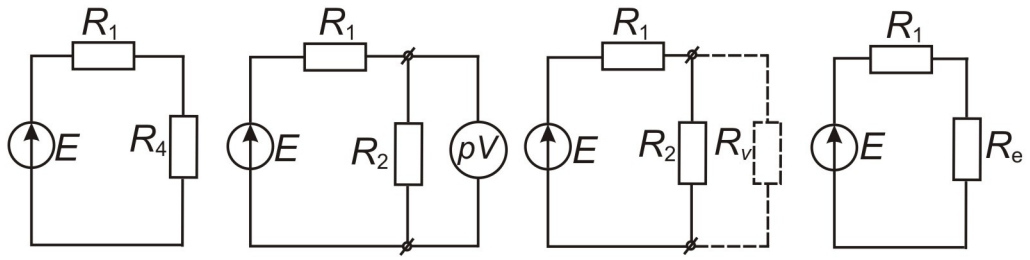


Рис. 2.8. Вимірювання напруги на ділянці кола

Після перетворень виразу для відносної методичної похибки одержимо:

$$\delta_{\text{М}} = -\frac{1}{1 + R_v\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}\right)}.$$

Дійсне значення напруги на резисторі з опором R_2 після введення поправки на методичну похибку буде таким:

$$U_{\text{д(е)}} = U_{\text{вим}} + \delta_{\text{М}} \cdot U_2 = U_{\text{вим}} \cdot \frac{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_V}}{1 + \frac{R_1}{R_2}},$$

де $U_{\text{вим}}$ – покази вольтметра, $U_{\text{д(е)}}$ – дійсне (еквівалентне) значення.

Інструментальна похибка Δ_{max} визначається класом точності і шкалою приладу. Тоді знайдене значення напруги на R_2 буде таким:

$$U_2 = U_{\text{вим}} \cdot \frac{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_V}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \pm \Delta_{max}.$$

II. Програма роботи

2.6. Вимірювання постійної напруги приладами В7-26, Щ4313

2.6.1. Виміряти ЕРС джерела живлення приладом В7-26

а) *Підготовка вольтметра* В7-26 до вимірювання напруги.

Включити “Сеть” приладу. Перемикач роду роботи встановити в полодення “+U” або “-U”. Після прогріву (5÷15 хвилин) закоротити (з’єднати провідником) вхідні гнізда «U» і «*» приладу (рис. 2. 9).

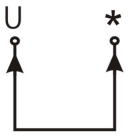


Рис. 2.9.

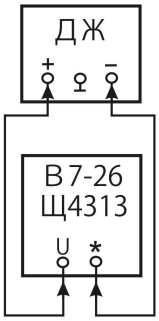


Рис. 2.10. ДЖ – джерело живлення

Перемикач шкал напруги поставити в положення «0,3(0,1)» В. Регулюванням “Устан. «0»” добитися «0» на шкалі «U». Затим перевести перемикач шкал в положення 3(10)В. Перевірити установку нуля. Зняти закоротку.

б) Включити джерело живлення і на ньому встановити необхідну величину ЕРС E.

в) Підключити вольтметр В7-26 до джерела живлення (рис. 2.10). Виміряти ЕРС. Записати кінцеве значення шкали вольтметра $U_к$ і його клас точності (вказаний на передній панелі) $R_V^{\text{В7-26}} = 30\text{МОм}$:

U_x=… – виміряне значення напруги,

$U_к$ =… – кінцеве значення шкали,

$K_П = 2{,}5$

2.6.2. Виміряти ЕРС джерела живлення приладом Щ4313

а) *Підготовка мультиметра* Щ4313 для вимірювання напруги. Включити

«Сеть» приладу Щ4313, вибрати рід роботи «U», виставити “грубу” шкалу (500В чи 50В).

б) Підключити Щ4313 до джерела живлення (рис. 2.10), вибрати шкалу і виміряти ЕРС. Записати виміряне значення U_x і кінцеве значення шкали вольтметра $U_к$.

Для мультиметра Щ4313 клас точності розрахувати за формулою:

$$K_П = \delta(\%) = \pm\left[a + b\left(\left|\frac{U_К}{U_{вим}}\right| - 1\right)\right], \%,$$

де a і b визначаються з таблиці (див. паспорт приладу) $R_V^{Щ4313} = 1МОм$.

2.7. Вимірювання сили електричного струму в колі (приладом Щ4313)

Встановити на джерелі живлення рекомендоване значення напруги E, на магазині опорів – величину навантаження $R_{н1}$ чи $R_{н2}$. **Не вмикаючи джерело живлення**, зібрати схему (рис. 2.11).

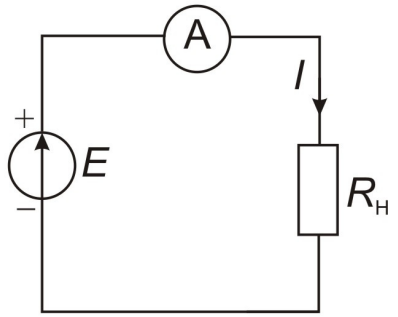


Рис. 2.11. Схема вимірювання сили струму

На Щ4313 натиснути клавіши «mA» і «500». Виміряти струм в колі, правильно підібравши шкалу приладу. Записати виміряний струм I_A та кінцеве значення шкали $I_к$. За паспортом приладу визначити коефіцієнти a і b для розрахунку $K_П$:

$$K_П = \delta(\%) = \pm\left[a + b\left(\left|\frac{I_К}{I_{вим}}\right| - 1\right)\right], \%.$$

2.8. Обробка результатів вимірювань

2.8.1. Правила і приклади округлення результатів вимірювання (слід дотримуватися **в кінцевому!** записі)

2.8.1.1. Результати вимірювань виражаються числом, яке містить значущі цифри. Значущими вважаються всі цифри в числовому результаті, в тому числі і нуль, якщо він знаходиться в середині або в кінці числа.

Приклад. Результати вимірювань напруги 121В і 0,00121В містять три, а 126,05В і 12500В – п'ять значущих цифр.

2.8.1.2. У виразі похибки утримуються не більше двох значущих цифр причому остання округлюється до нуля або п'яти.

Приклад. а) Похибка вимірювання струму складає $\pm 0{,}125$А. Утримуючи одну значущу цифру, значення похибки округлюється до ±0,1А.

б) Похибка вимірювання напруги складає $\pm 0{,}152$В. Утримуючи дві значущі цифри, значення похибки округлюється до ±0,15В.

2.8.1.3. Числове значення результату вимірювань повинно закінчуватись цифрою або нулем того ж дисятичного значення, що і значення похибки.

Приклад. $125{,}832 \pm 0{,}15$ записується $125{,}83 \pm 0{,}15$.

2.8.1.4. Якщо перша з цифр, що відкидаються, менша п'яти, то остання цифра, що утримуються, не змінюється.

Приклад. $(125{,}721 \pm 0{,}2)$В округлюється до $(125{,}7 \pm 0{,}2)$В.

2.8.1.5. Якщо перша з цифр, що відкидається, більша п'яти або дорівнює п'яти, то остання цифра, що утримується збільшується на одиницю.

Приклад. $25{,}268 \pm 0{,}4$ округлюється до $25{,}3 \pm 0{,}4$;

$25{,}253 \pm 0{,}3$ округлюється до $25{,}3 \pm 0{,}3$.

2.8.1.6. Якщо перша з цифр, що відкидається, дорівнює п'яти, а за нею не має значущих цифр, тоді округлення відбувається до найближчого парного.

Пример. $10{,}650 \pm 0{,}3$ округлюється до $10{,}6 \pm 0{,}3$;

$10{,}550 \pm 0{,}3$ округлюється до $10{,}6 \pm 0{,}3$**.**

2.8.2. Обробка результатів вимірювання напруги

2.8.2.1. Обчислити інструментальну похибку і записати результат вимірювання з її врахуванням: $U = U_{\text{вим}} \pm \Delta_U$,

де для В7-26 $\Delta_U = \pm \frac{K_\text{П} \cdot U_\text{к}}{100\%}$, а для Щ4313 $\Delta_U = \pm \frac{K_\text{П} \cdot U_x}{100\%}$

2.8.2.2. Знайти методичну похибку: $\delta_\text{М} = -\frac{R_\text{д}}{R_\text{д} + R_V}$, де $R_\text{д} = 5$ Ом,

$R_V^{\text{В7-26}} = 30\text{МОм}$, $R_V^{\text{Щ4313}} = 1\text{МОм}$.

2.8.2.3. Визначити поправку і похибку поправки за формулами:

$$\text{П} = -\Delta_\text{М} \approx -\delta_\text{М} \cdot U_\text{вим};\ \Delta_\text{П} = \pm \frac{\partial \text{П}}{\partial U_\text{вим}} = \pm \delta_\text{М} \cdot \Delta_V .$$

2.8.2.4. Результат з врахуванням інструментальної і методичної похибки записується у вигляді: $U = U_\text{вим} + \text{П} \pm \sqrt{\Delta_\text{П}^2 + \Delta_U^2}$.

2.8.3. Обробка результатів вимірювання струму

2.8.3.1 Записати результат з врахуванням інструментальної похибки:

$$I = I_\text{вим} \pm \Delta_I, \quad \text{де } \Delta_I = \pm \frac{K_\text{П} \cdot I_x}{100\%}$$

2.8.3.2 Знайти методичну похибку:

$$\delta_\text{М} = -\frac{R_A}{R_\text{д} + R_\text{н} + R_A}.$$

2.8.3.3 Визначити поправку і похибку поправки:

$$\text{П} = -\Delta_\text{М} \approx -\delta_\text{М} \cdot I_\text{вим};\quad \Delta_\text{П} = \pm \frac{\partial \text{П}}{\partial I_\text{вим}} = \pm \delta_\text{М} \cdot \Delta_I .$$

2.8.3.4 Результат з урахуванням інструментальної і методичної похибки записуються у вигляді:

$$I = I_\text{вим} + \text{П} \pm \sqrt{\Delta_\text{П}^2 + \Delta_I^2}.$$

2.9. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювання.
3. Таблиці результатів вимірювання.
4. Результати обробки експериментальних даних.
5. Висновки і зауваження по роботі.

2.10. Контрольні питання

1. Прямі і опосередковані вимірювання.
2. Сумісні і сукупні вимірювання.
3. Істинне, дійсне і виміряне значення фізичної величини.
4. Як розрахувати абсолютну і відносну похибки ?
5. Що таке клас точності приладу? Які бувають класи точності для приладів з адитивною і мультиплікативною похибками?
6. Причини виникнення методичних похибок
7. Як розрахувати методичну похибку вимірювання напруги і струму?
8. Як записати результат вимірювання з урахуванням методичної та інструментальної похибок?

Лабораторна робота №3

ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ПРЯМИМ І ОПОСЕРЕДКОВАНИМ МЕТОДАМИ

Мета роботи: ознайомитись з вимірювальними приладами; вивчити методику вимірювання опору прямим і опосередкованим методами та визначення їх похибок

І.Теоретичні відомості

При опосередкованих вимірюваннях значення вимірюваної величини Y знаходять за результатами прямих вимірювань величин $x_1, x_2, \ldots, x_n$, які пов'язані з нею функціональною залежністю

$$Y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n).$$

Якщо похибки прямих вимірювань x_i відомі, то ***похибка результату*** опосередкованого вимірювання визначається співвідношенням

$$\Delta y = f(x_1+\Delta x_1, x_2+\Delta x_2, \ldots, x_n+\Delta x_n) - f(x_1, x_2, \ldots, x_n),$$

де Δx_i – похибки вимірювань аргументів x_i.

Ця формула не придатна для практичного використання. Тому застосовують правило малого параметру, згідно якого $\Delta y << y$, $\Delta x_i << x_i$, і розклавши функцію $f(x_1+\Delta x_1, x_2+\Delta x_2, \ldots, x_n+\Delta x_n)$ в ряд Тейлора та обмежившись двома першими членами ряду, одержимо вираз для похибки функції Y:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_i} \Delta x_i = \sum_{i=1}^{n} C_i \Delta x_i,$$

де $C_i = \left.\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|_{x_1, x_2, \ldots, x_n}$ – частинна похідна функції по i-му аргументу; Δx_i – абсолютна похибка прямого вимірювання i-го аргументу.

В реальних умовах у разі додавання похибок можлива їх часткова взаємна компенсація, тому формула для Δy дає дещо завищені результати. Щоб цього уникнути користуються середньоквадратичним підсумовуванням похибок:

$$\Delta y \approx \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}.$$

Відносну похибку опосередкованих вимірювань знаходять за формулою:

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} \cong \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_i} \Delta x_i}{f(x_1, x_2, \ldots, x_n)},$$

або

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{y} \right)^2}.$$

Формули для обчислень похибок опосередкованих вимірювань функцій, які часто використовуються в електроніці, наведені в табл. 3.1:

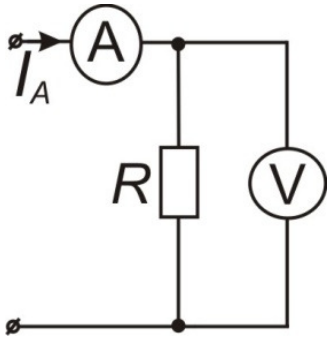
Таблиця 3.1

Похибки опосередкованих вимірювань

Функція	Похибка	
	абсолютна	*Відносна*
$x + y + z$	$\pm\left[\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2\right]^{\frac{1}{2}}$	$\pm\frac{\left[\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2\right]^{\frac{1}{2}}}{x + y + z}$
$x - y$	$\pm\left[\Delta_x^2 + \Delta_y^2\right]^{\frac{1}{2}}$	$\pm\frac{\left[\Delta_x^2 + \Delta_y^2\right]^{\frac{1}{2}}}{x - y}$
$x \cdot y$	$\pm\left[x^2\Delta_y^2 + y^2\Delta_x^2\right]^{\frac{1}{2}}$	$\pm\left[\left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$
x^n	$\pm n x^{n-1}\Delta_x$	$\pm n\frac{\Delta_x}{x}$
$\sqrt[n]{x}$	$\pm\frac{1}{n}x^{\frac{1}{n}-1}\Delta_x$	$\pm\frac{1}{n}\frac{\Delta_x}{x}$
$\frac{x}{y}$	$\pm\left[\frac{x^2\Delta_y^2 + y^2\Delta_x^2}{y^4}\right]^{\frac{1}{2}}$	$\pm\left[\left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$
$\ln\frac{x}{y}$	$\pm\left[\left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$	$\pm\frac{1}{\ln(x/y)}\left[\left(\frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$
$\sin x$	$\pm\cos x\,\Delta_x$	$\pm\operatorname{ctg} x\,\Delta_x$
$\cos x$	$\pm\sin x\,\Delta_x$	$\pm\operatorname{tg} x\,\Delta_x$

tg x	$\pm\frac{\Delta_x}{\cos^2 x}$	$\pm\frac{2\Delta_x}{\sin 2x}$
arctg x	$\pm\frac{\Delta_x}{1+x^2}$	$\pm\frac{\Delta_x}{(1+x^2)\text{arctg}\,x}$

Приклад 1. Виміряти опір R резистора методом амперметра і вольтметра (методичними похибками знехтуємо).



Покази амперметра $I_A = 2$ мА на шкалі $I_K = 5$ мА, клас точності амперметра $K_A = {}^{0,5}/_{0,5}$.

Покази вольтметра $U_A = 5$ В на шкалі $U_K = 10$ В з класом точності K_V=2,5.

Розв'язання:

Запишемо формулу розрахунку опору:

$$R = U / I; \quad U = U_V \pm \Delta_U; \qquad I = I_A \pm \Delta_I.$$

Абсолютна інструментальна похибка вимірювання опору визначається формулою:

$$\Delta_R = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial(U/I)}{\partial U}\Delta_U\right)^2 + \left(\frac{\partial(U/I)}{\partial I}\Delta_I\right)^2}.$$

Знайдемо частинні похідні

$$\left.\frac{\partial(U/I)}{\partial U}\right|_{I=\text{const}} = \frac{1}{I}\frac{\partial U}{\partial U} = \frac{1}{I}; \qquad \left.\frac{\partial(U/I)}{\partial I}\right|_{U=\text{const}} = U\frac{\partial(1/I)}{\partial I} = -\frac{U}{I^2}.$$

Тоді Δ_R:

$$\Delta_R = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta_U}{I}\right)^2 + \left(-\frac{U}{I^2}\cdot\Delta_I\right)^2} = \pm\sqrt{\frac{I^2\Delta_U{}^2 + U^2\Delta_I{}^2}{I^4}}.$$

Знайдемо величини похибок Δ_A та Δ_U:

Клас точності амперметра визначається за двочленною формулою

$$K_A = \delta_A = \pm\left[a + b\left(\frac{I_K}{I_A} - 1\right)\right]\% = \pm\left[0{,}5 + 0{,}5\left(\frac{5\text{мА}}{2\text{мА}} - 1\right)\right]\% = \pm 1{,}25\%.$$

Абсолютна похибка (інструментальна) струму:

$$\Delta_I = \pm\frac{\delta_A \cdot I_F}{100\%} = \pm\frac{1{,}25\% \cdot 2\text{мА}}{100\%} = \pm 0{,}025\text{мА}.$$

Абсолютна похибка напруги:

$$\Delta_U = \pm\frac{K_V \cdot U_K}{100\%} = \pm\frac{2{,}5\% \cdot 10\text{В}}{100\%} = \pm 0{,}25\text{В}.$$

Розрахуємо похибку опору

$$\Delta_R = \pm\sqrt{\frac{\left(2\cdot 10^{-3}\,\text{А}\cdot 0{,}25\,\text{В}\right)^2 + \left(5\text{В}\cdot 0{,}025\cdot 10^{-3}\,\text{А}\right)^2}{(2\cdot 10^{-3}\,\text{А})^4}} =$$

$$= \pm\frac{\sqrt{0{,}25\cdot 10^{-6} + 0{,}02\cdot 10^{-6}}}{(2\cdot 10^{-3})^2}\,\text{Ом} = \pm 130\ \text{Ом}$$

і запишемо результат вимірювання:

$$R = U_V / I_\text{А} \pm \Delta_R = 5\text{В} / 2\text{мА} \pm 130\ \text{Ом} = 2500 \pm 130\ [\text{Ом}].$$

Відносна похибка вимірювання опору:

$$\delta_R = \frac{\Delta_R}{R}\cdot 100\% = \pm\frac{130\ \text{Ом}}{2500\ \text{Ом}}\cdot 100\% = \pm 5{,}2\%.$$

Приклад 2. Розрахувати методичну похибку вимірювання опору методом амперметра і вольтметра.

2.1. Розрахувати методичну похибку для схеми, зображеної на рис. 3.4.

Абсолютна методична похибка опору R:

$$\Delta_\text{М} = R_\text{вим} - R,$$

де R – істинне значення опору, $R_\text{вим} = U_V / I_A = R_A + R$ – виміряне значення,

$R_\text{А}$=800мВ /I_K – внутрішній опір амперметра.

Значення відносної методичної похибки розрахувати за формулою:

$$\delta_\text{М} = \frac{\Delta_\text{М}}{R} = \frac{R_\text{вим} - R}{R} = \frac{R_A}{R} = \frac{R_A}{R_\text{вим} - R_A}.$$

Тоді $\Delta_M = \delta_M \cdot R = R_A$.

Знайти поправку П і записати результат вимірювання:

$П = -\delta_M = -R_A$

$R = R_{вим} + П = U_V / I_A - R_A$.

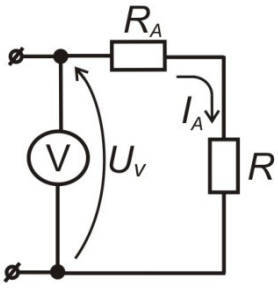
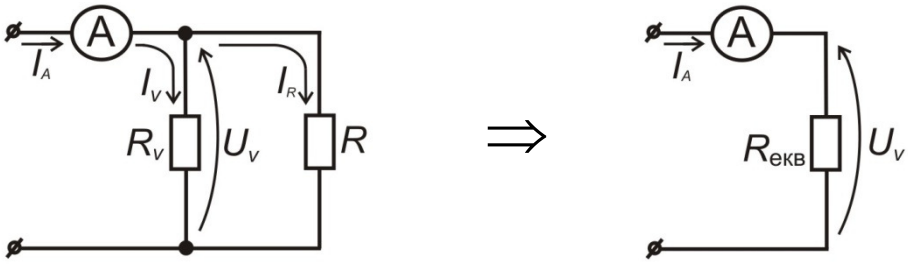


Рис. 3.4

2.2. Розрахувати методичну похибку опору для схеми, зображеної на рис. 3.5.

Абсолютна методична похибка опору R:

$\Delta_M = R_{вим} - R$,



а б

Рис. 3.5

$R_{вим} = U_V / I_A = R_{екв.} = (R_V \cdot R) / (R_V + R)$ – виміряне значення.

$R_{.} = (R_V \cdot R_{вим}) / (R_V - R_{вим})$ – істинне значення.

Відносну та абсолютну методичні похибки розрахувати за формулами:

$$\delta_M = \frac{R_{вим}}{R} - 1 = -\frac{R}{R_V + R} = -\frac{R_{вим}}{R_V}.$$

$$\Delta_M = \delta_M \cdot R = -\frac{R^2}{R_V + R} = -\frac{R_{вим}^{\ 2}}{R_V - R_{вим}}.$$

Розрахувати поправку:

$$П = -\Delta_M = \frac{R_{вим}^{\ 2}}{R_V - R_{вим}}.$$

Розрахувати випадкову похибку поправки. Оскільки поправка є функцією $R_{вим}$, тому похибку поправки знаходять як похибку опосередкованих вимірювань:

$$\Delta_{\text{П}} = \pm \frac{\partial \text{П}}{\partial R} \Delta_R = \pm \frac{-R_{\text{вим}}{}^2 + 2R_{\text{вим}}R_V}{(R_V - R_{\text{вим}})^2} \Delta_R,$$

де Δ_R – інструментальна похибка вимірювання опору.

Записати результат вимірювання

$$R = R_{\text{вим}} + \text{П} \pm \sqrt{\Delta_R{}^2 + \Delta_{\text{П}}{}^2}.$$

II. Підготовка приладів до вимірювання опору

Універсальний вольтметр В7-26

Перемикач роду роботи перевести в положення «**r**» і перевірити нульове положення показчика при замкнених накоротко гніздах «**r**» и «*» (рис. 3.6). Затим розімкнути гнізда і встановити показчик (стрілку) в положення «∞» на шкалі Ω ручкою «Устан. “∞”» (для Ω).

Мультиметр Щ4313

Перемикач роду роботи поставити в положення «$10 \cdot к\Omega$».
Вибрати шкалу приладу.

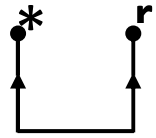


Рис. 3.6

3.1. Вимірювання опорів прямим методом

3.1.1. На магазині опорів встановити:

$$R_{X1} = (200 + 10 * N), \text{ Ом},$$
$$R_{X2} = (100 - 4 * N), \text{ кОм},$$

де N – номер бригади.

Записати $R_{\text{вим}}$, $R_{\text{к}}$, $K_{\text{П}}$.

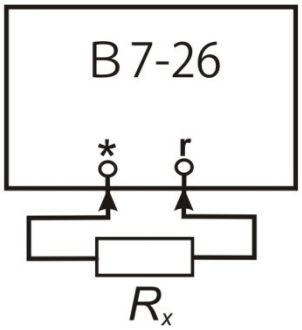


Рис. 3.7

3.1.2. Підключити R_X до В7-26 (рис. 3.7) і виміряти його величину. Кінцеве значення шкали $R_k = 10 \cdot 10^n$ Ом (10^n – множник шкали).

3.1.3. Підключити R_X до Щ4313 (рис. 3.8) і виміряти його величину. Записати значення $R_{вим}$, $R_к$, коефіцієнтів ***a*** і ***b*** (див. паспорт приладу), обчислити клас точності $K_П$ приладу.

Для мультиметра Щ4313 клас точності визначається за формулою:

$$K_П = \delta(\%) = \pm\left[a + b\left(\frac{R_К}{R_{вим}} - 1 \right) \right].$$

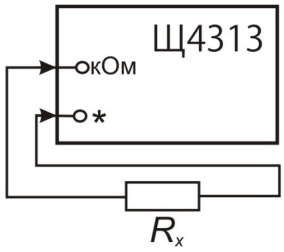


Рис. 3.8

3.1.4. З урахуванням інструментальної похибки результат вимірювань приладом В7-26 записати у вигляді:

$$R_1 = R_{вим1} \pm \Delta_{R1} = R_{вим1} \pm \frac{K_П \cdot R_{К1}}{100\%},$$

где $R_{вим}$ – виміряне значення, $R_К$ – кінцеве значення шкали приладу.

3.1.5. Результат вимірювань приладом Щ4313 записати у вигляді:

$$R_1 = R_{вим1} \pm \Delta_{R1} = R_{вим1} \pm \frac{K_П \cdot R_{вим1}}{100\%}.$$

3.1.6. На магазині опорів встановити $R_2 = (100 - 4 \cdot N)$, кОм і виконати пункти 3.1.1. – 3.1.5.

3.2. Вимірювання опорів R_1 і R_2 опосередкованим методом

3.2.1. Зібрати схему (рис. 3.9). Встановити на джерелі живлення $E = (4+0{,}5 \cdot N)$ (В), де N – номер бригади.

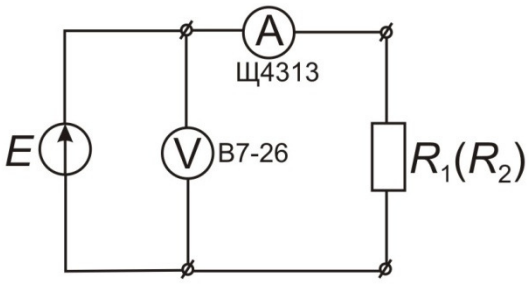


Рис. 3.9

$R_A = \dfrac{800\text{мВ}}{I_К}$ – внутрішній опір амперметра,

$R_V = 30$ МОм – вхідний опір вольтметра, I_K – кінцеве значення шкали амперметра.

$U_К$ – кінцеве значення шкали вольтметра.

Виміряти значення струму і напруги при включених почергово в коло опорах $R_1(R_2)$. Записати результати вимірювання струму і напруги з урахуванням їх інструментальних похибок:

$$I = I_{\text{вим}} \pm \Delta_I = I_{\text{вим}} \pm \frac{K_{\text{П}} \cdot I_{\text{вим}}}{100\%},$$

$$U = U_{\text{вим}} \pm \Delta_U = U_{\text{вим}} \pm \frac{K_{\text{П}} \cdot U_{\text{К}}}{100\%}.$$

Розрахувати і записати результат вимірювання опорів $R_1(R_2)$ з урахуванням інструментальної похибки опосередкованих вимірювань:

$$R_1(R_2) = \frac{U_{\text{вим}}}{I_{\text{вим}}} \pm \Delta_R = \frac{U_{\text{вим}}}{I_{\text{вим}}} \pm \sqrt{\frac{U_{\text{вим}}^2 \cdot \Delta_I^2 + I_{\text{вим}}^2 \cdot \Delta_U^2}{I_{\text{вим}}^4}} = R_{\text{вим}} \pm \Delta_R.$$

Розрахувати методичну похибку вимірювання опору:

$\delta_{\text{М}} = \frac{\Delta_M}{R} = \frac{R_A}{R} = \frac{R_A}{R_{\text{вим}} - R_A}$, $\Delta_{\text{М}} = \delta_{\text{М}} \cdot R = R_A$. Поправка $\text{П} = -R_A$.

Кінцевий результат вимірювань опору:

$$R_1(R_2) = R_{\text{вим}} - R_A \pm \Delta_R$$

3.2.2. Зібрати схему (рис. 3.10). Виміряти струм і напругу та записати результати вимірювань з урахуванням їх інструментальних похибок:

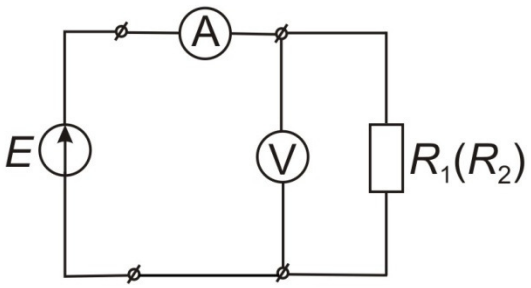


Рис. 3.10

$$I = I_{\text{вим}} \pm \Delta_I;\ U = U_{\text{вим}} \pm \Delta_U.$$

Розрахувати та записати результат вимірювання з урахуванням інструментальної похибки опосередкованих вимірювань:

$$R_1(R_2) = R_{\text{вим}} \pm \Delta_R = \frac{U_{\text{вим}}}{I_{\text{вим}}} \pm \sqrt{\frac{U_{\text{вим}}^2 \cdot \Delta_I^2 + I_{\text{вим}}^2 \cdot \Delta_U^2}{I_{\text{вим}}^4}}.$$

Розрахувати методичну похибку вимірювань:

$$\delta_{\text{М}} = \frac{\Delta_{\text{М}}}{R} = -\frac{R}{R + R_V}; \quad \Delta_{\text{М}} = -\frac{R^2}{R + R_V} = -\frac{R_{\text{вим}}{}^2}{R_V - R_{\text{вим}}}.$$

Поправка на методичну похибку:

$$\Pi = -\Delta_{\text{М}} = -\frac{R_{\text{вим}}{}^2}{R_V - R_{\text{вим}}}.$$

Розрахувати випадкову похибку поправки Δ_{Π}:

$$\Delta_{\Pi} = \pm \frac{d\Pi}{dR} \Delta_R = \pm \frac{-R_{\text{вим}}^2 + 2R_{\text{вим}}R_V}{(R_V - R_{\text{вим}})^2} \Delta_R.$$

Результат вимірювання опору з урахуванням похибок:

$$R_1(R_2) = R_{\text{вим}} + \frac{R_{\text{вим}}^2}{R_V - R_{\text{вим}}} \pm \sqrt{\Delta_{\Pi}^2 + \Delta_R^2}.$$

3.2.3. За отриманими результатами зробити висновки.

3.3. Зміст звіту

1. ,Мета роботи.
2. Схема вимірювань.
3. Таблиці і графіки результатів вимірювань.
4. Результати обробки експеримента.
5. Висновки і зауваження по роботі.

3.3. Контрольні запитання

1. Як виміряти опір прямим методом приладами В7-26, Щ4313?
2. Як виміряти опір резистора методом амперметра-вольтметра? Як при цьому визначити похибку вимірювання опору?
3. Як визначити методичні похибки вимірювання опору методом амперметра-вольтметра схем, поданих на рис. 3.4, рис. 3.5?
4. Як визначити похибку вимірювання опору омметром?

Лабораторна робота №4

ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ БАГАТОКРАТНИХ РІВНОТОЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПРИ ПРЯМИХ ВИМІРЮВАННЯХ

Мета роботи: Вивчити порядок опрацювання результатів багатократних рівноточних спостережень при прямих вимірюваннях; набути навичок стандартного опрацювання результатів спостережень, оцінки похибок і способів подання результатів вимірювань

І. Теоретичні відомості

У вимірювальній практиці для зменшення впливу випадкових похибок на результат вимірювання проводять вимірювання з багаторазовими спостереженнями, а затим статистично опрацьовують одержані результати. При цьому можуть бути використані різні процедури опрацювання.

Рівноточними називаються вимірювання, які проводяться засобами вимірювань однакової точності за однією і тією ж методикою при незмінних зовнішніх умовах. Результат вимірювання містить похибку, що являє собою суму систематичної Δ_c і випадкової $\overset{\circ}{\Delta}$складових:

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}.$$

Ці дві складові похибки відрізняються за своїми якостями. Їх аналіз, способи оцінки і зменшення – абсолютно різні.

Систематична похибка Δ_c залишається постійною, або змінюється за певним законом при повторних вимірюваннях тієї ж фізичної величини. Вона є математичним сподіванням $M(\Delta)$ похибки Δ вимірювання:

$$\Delta_c = M(\Delta) = \lim_{n\to\infty} \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \ldots + \Delta_n}{n} = \overline{\Delta}.$$

Виявлення систематичної похибки – затратна операція і може бути виконана кількома способами:

1) *Перевірка* даного *вимірювального приладу* за допомогою зразкового (більш точного). При вимірюванні однієї й тієї ж фізичної величини вимірювальним і

зразковим приладами одержать різні покази: $X_{роб}$ і $X_{зраз}$ Їх різниця є абсолютною систематичною похибкою приладу:

$$\Delta_c = X_{роб} - X_{зраз}.$$

Тоді покази робочого приладу коректуються введенням поправки $П$, яка чисельно дорівнює:

$$П = -\Delta_c.$$

При цьому за результат вимірювання необхідно приймати величину

$$X_N = X_{роб} + П.$$

2) Метод заміщення. В цьому випадку вимірювана величина X_N замінюється відомою величиною X_y таким чином, щоб покази приладу залишились незмінними. Тоді результат вимірювання $X_N = X_y$.

3) Метод компенсації за знаком застосовується при направленій дії причини, яка викликає систематичну похибку. Виконують вимірювання таким чином, щоб похибка входила з різними знаками у формули:

$$X_1 = X_N + \Delta_c;\ X_2 = X_N - \Delta_c,$$

тоді

$$X_N = \frac{X_1 + X_2}{2}.$$

Змінні систематичні похибки розділяють на прогресуючі і періодичні. Для усунення цих складових необхідно знайти функціональний зв'язок похибки і фактора, який впливає на похибку. Затим вводиться поправка.

Складну задачу з виявлення і виключення систематичної похибки не завжди вдається довести до кінця і тому залишається невиключена частина систематичної похибки. Неважко переконатися, що результат вимірювання – випадкова величина. Для цього достатньо виміряти кілька разів одну і ту ж фізичну величину за допомогою приладу з достатньо високою чутливістю. Результати вимірювання будуть

відрізнятись один від одного. Це пояснюється впливом багатьох дестабілізуючих факторів, до яких можна віднести: тепловий шум, шум електронних приладів, випадковий вплив комутаційних процесів у ланцюгах, випадкова зміна електромагнітних полів, температури навколишнього середовища, вологості, вібрації, напруги живлення тощо. Повне співпадіння результатів вимірювань завжди вказує на те, що чутливість засобів вимірювань недостатня для того, щоб виявити це явище.

Таким чином, випадкова похибка $\overset{\circ}{\Delta}$ змінюється нерегулярно, непередбачувано при повторних вимірюваннях. Вона викликана великою кількістю причин, характер і розмір впливу яких на вимірювану величину при одиничному вимірюванні не може бути визначеним. Однак шляхом виконання багатократних спостережень і опрацювання результатів спостережень статистичними методами можна оцінити ці похибки.

Однією з найважливіших характеристик випадкової похибки є закон розподілу густини ймовірності $\rho(\overset{\circ}{\Delta})$ або функція розподілу ймовірностей $P(\overset{\circ}{\Delta})$. Закони розподілу можуть бути дискретними (для дискретних випадкових величин) і неперервними (для неперервних величин). Дискретний закон розподілу – це сукупність значень випадкових величин X_i і відповідних їм ймовірностей P_i .

Умова нормування закону розподілу ймовірностей дискретної випадкової величини описується співвідношенням:

$$\sum P_i = 1.$$

Для неперервних випадкових величин з відомим законом розподілу $P(\overset{\circ}{\Delta})$ ймовірність того, що дана випадкова величина $\overset{\circ}{\Delta}$ набуде значення в інтервалі від $\overset{\circ}{\Delta}_1$ до $\overset{\circ}{\Delta}_2$, визначається площею, обмеженою цією кривою і віссю абсцис (рис. 4.1), тобто

$$P(\overset{\circ}{\Delta}_1 \le \Delta \le \overset{\circ}{\Delta}_2) = \int_{\overset{\circ}{\Delta}_1}^{\overset{\circ}{\Delta}_2} \rho(\overset{\circ}{\Delta}) d\overset{\circ}{\Delta}.$$

Умова нормування для неперервної випадкової величини:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\overset{\circ}{\Delta}) d\overset{\circ}{\Delta} = 1.$$

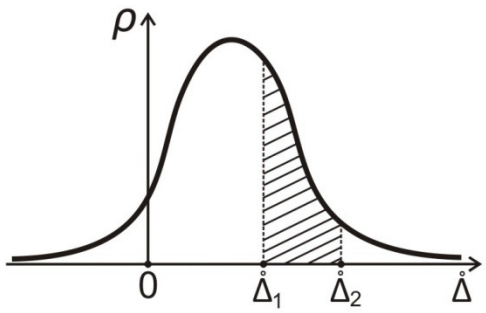


Рис. 4.1. Нормальний закон розподілу неперервної випадкової величини

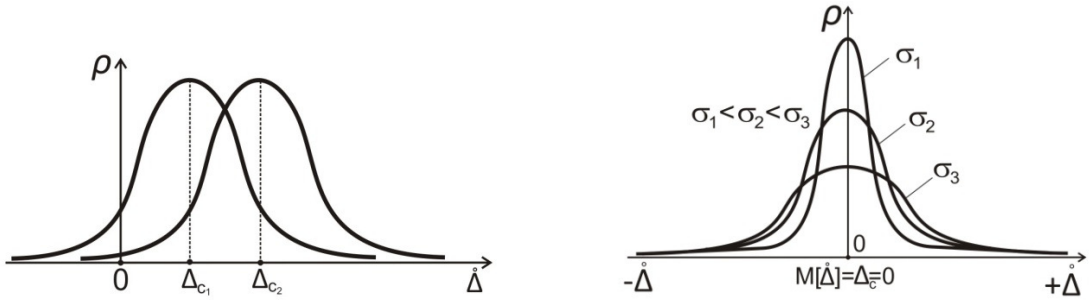
Якщо дестабілізуючих факторів, які обумовлюють випадкову похибку багато (3 і більше), тоді закон розподілу густини ймовірності $\rho(\overset{\circ}{\Delta})$ буде прямувати до кривої Гауса – нормального закону розподілу (рис. 4.2.а), який описується співвідношенням:

$$\rho(\overset{\circ}{\Delta}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\Delta-\Delta_c)^2}{2\sigma^2}}.$$

З наведеного графіка видно: якщо в склад похибки входить систематична складова Δ_c, тоді закон розподілу густини ймовірності буде зміщений на цю величину. Якщо ж систематична похибка виключена $\Delta_c = 0$ ($M[\overset{\circ}{\Delta}] = 0$), то $\Delta = \overset{\circ}{\Delta}$ і максимальне значення такої кривої Гауса

$$\rho(\overset{\circ}{\Delta}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}$$

досягається при $\overset{\circ}{\Delta} = 0$ (рис. 4.2.б).



а б

Рис. 4.2. Криві Гауса для різних значень:

а – систематичної складової Δ_c;

б – для різних значень середньоквадратичного відхилення σ.

Характер закону розподілу змінюється в залежності від параметрів: середньоквадратичного відхилення σ (СКВ) і дисперсії D (або σ^2) (рис. 4.2.б), які взаємозв`язані співвідношенням

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\sigma^2}\,.$$

Дисперсія

$$D = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 \rho(\Delta) d\Delta$$

характеризує розсіювання випадкової величини відносно середнього значення. Параметри σ^2 і σ характеризують точність вимірювань. Чим більші дисперсія σ^2 і СКВ σ, тем менша точність, тобто більша похибка вимірювань.

При нормальному законі розподілу з $\Delta_c = 0$ ймовірність появи випадкової похибки в інтервалі від $-\Delta_{гр}$ до $+\Delta_{гр}$ визначається:

$$P\left(-\Delta_{гр} \le \Delta \le +\Delta_{гр}\right) = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\Delta_{гр}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta\,.$$

При введенні нормованої випадкової змінної $z_{гр} = \frac{\Delta_{гр}}{\sigma}$ вираз $P(\Delta)$ перетворюється до виду:

$$P\left(-\Delta_{гр} \le \Delta \le +\Delta_{гр}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_{гр}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 2\Phi(z),$$

де $\Phi(z)$ – інтеграл ймовірності Лапласа.

Довірча ймовірність $P_{дов}$ при заданих граничних значеннях похибки – це ймовірність знаходження випадкової величини $\overset{\circ}{\Delta}$ всередині довірчого інтервалу $\Delta_{дов}$ (довірчих границь). Довірча ймовірність визначається площею під кривою (на рис. 4.3 заштрихована область).

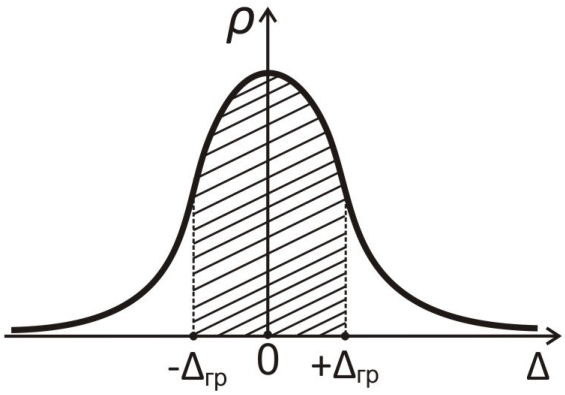


Рис. 4.3. Довірча ймовірність при заданих граничних значеннях похибки

Функция Лапласа $\Phi(z)$ табульована або визначається за графіком (рис. 4.4).

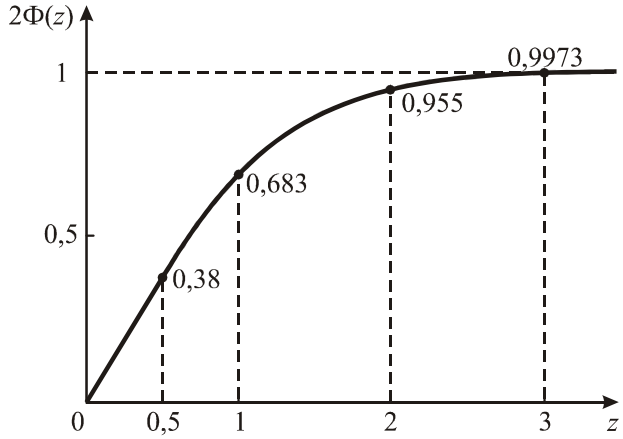


Рис. 4.4. Функція Лапласа для різних значень нормованої змінної

Якщо задана $P_{\text{дов}}$, тоді за графіком чи таблицею знаходять відповідне значення нормованої змінної $z_{\text{гр}}$, затим визначають $\Delta_{\text{гр}} = z_{\text{гр}} \cdot \sigma$. Довірчий інтервал $\Delta_{\text{дов}} = -\Delta_{\text{гр}} ... + \Delta_{\text{гр}}$ накриває істинне значення $x_N = \bar{x}_N \pm \Delta_{\text{гр}}$ із заданою ймовірністю $P_{\text{дов}}$.

В залежності від мети і точності вимірювань довірчу ймовірність $P_{\text{дов}}$ на практиці обирають на рівні $P_{\text{дов}} = 0{,}95 \ldots 0{,}99$.

За максимальне значення випадкової похибки, що описується нормальним законом розподілу $\rho(\overset{\circ}{\Delta})$, приймають інтервал

$$\Delta_{max}^{\text{норм}} = \pm 3\sigma,$$

який відповідає ймовірності появи в цьому інтервалі похибки з $P_{\text{дов}} = 0{,}9973$.

Ймовірність того, що похибка перевищить максимальне значення, визначається виразом:

$$1 - P_{\text{дов}}(\pm 3\sigma) = 1 - 0{,}9973 = \frac{1}{370},$$

який означає, що похибка у 369 випадках з 370 попадає в інтервал $\pm 3\sigma$ і лише в одному випадку виходить за ці границі.

4.1. Інформаційна концепція вимірювань

З точки зору вимірювальної інформації суть вимірювань полягає в звуженні інтервалу невизначеності вимірюваної величини від значення, відомого до проведення вимірювання, до деякої величини $d = 2\Delta_e$, що називається **ентропійним інтервалом невизначеності**, яка стала відомою після проведення вимірювання. Точність вимірювань буде тим більшою, чим меншим буде значення ентропійного інтервалу невизначеності.

Мірою невизначеності знань про значення вимірюваної величини є *ентропія*:

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) \ln[\rho(x)] dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) \ln\left[\frac{1}{\rho(x)}\right] dx.$$

Ентропія є функціоналом закону розподілу густини ймовірності випадкової величини, тобто вона враховує особливості закону $\rho(x)$.

Різниця ентропій до і після вимірювань фізичної величини – це ***кількість інформації***:

$$I(x) = H(x) - H\left(\frac{x}{x_N}\right),$$

де $H(x)$ – апріорна (до вимірювання) ентропія; $H(x/x_N)$ – апостеріорна (після вимірювання) ентропія.

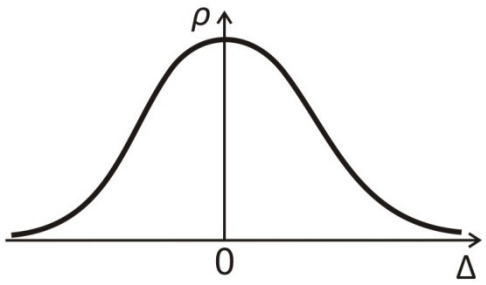
4.2. Ентропія похибки або дезинформуюча дія похибки

Основна перевага інформаційного підходу до описання вимірювань полягає в

тому, що розмір ентропійного інтервалу невизначеності d можна знайти строго математично для будь-якого закону розподілу. Це виключає непорозуміння при довільному виборі різних значень довірчої ймовірності.

Знайдемо ентропію похибок основних законів розподілу.

4.2.1. Ентропія похибки з нормальним законом розподілу.



$$\rho(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}$$

$$H^{\text{норм}}(\Delta) = -\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\Delta) \cdot \ln[\rho(\Delta)] d\Delta = -\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\Delta) \cdot \ln\left(\frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \right) d\Delta =$$

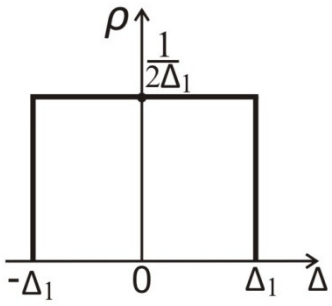
$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\Delta) \cdot \ln\left(2\sigma\sqrt{2\pi} \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \right) d\Delta = \ln(\sigma\sqrt{2\pi}) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\Delta) d\Delta +$$

$$+ \frac{1}{2\sigma^2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 \cdot \rho(\Delta) d\Delta = \ln(\sigma\sqrt{2\pi}) + \frac{\sigma^2}{2\sigma^2} = \ln(\sigma\sqrt{2\pi}) + \ln\sqrt{e} =$$

$$= \ln(\sigma\sqrt{2\pi e}) = \ln(2K_e\sigma).$$

Ентропійний коефіцієнт $K_e = \frac{\sqrt{2\pi e}}{2} = 2{,}07$, а ентропійний інтервал $d = \sqrt{2\pi e} \cdot \sigma = 4{,}133\sigma$.

4.2.2. Ентропія похибки з рівномірним законом розподілу



$$\rho(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta_1}; & -\Delta_1 \le \Delta \le \Delta_1 \\ 0; & -\Delta_1 > \Delta > \Delta_1 \end{cases}$$

$$H^{\text{рівн}}(\Delta) = -\int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \rho(\Delta)\cdot \ln[\rho(\Delta)]d\Delta = -\int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \frac{1}{2\Delta_1}\cdot \ln\left(\frac{1}{2\Delta_1}\right)d\Delta = \quad = -\frac{1}{2\Delta_1}\cdot \ln\left(\frac{1}{2\Delta_1}\right)\cdot 2\Delta_1 = \ln(2\Delta_1).$$

Дисперсія і СКВ рівномірного закону розподілу:

$$\sigma^2 = \frac{\Delta_1^2}{3};\ \sigma = \frac{\Delta_1}{\sqrt{3}};\ \Delta_1 = \sqrt{3}\sigma.$$

Тоді

$$H^{\text{рівн}}(\Delta) = \ln 2\Delta_1 = \ln 2\sqrt{3}\sigma.$$

За ентропійне значення похибки Δ_e приймають максимальне її значення Δ_1, тоді співвідношення між ентропійним Δ_e і середньоквадратичним σ значеннями похибки характеризують ентропійним коефіцієнтом $K_e = \Delta_e / \sigma$:

$$H^{\text{рівн}}(\Delta) = \ln 2\Delta_1 = \ln 2K_e\sigma,$$

а оскільки $\Delta_1 = \sqrt{3}\sigma$, то $K_e = \sqrt{3} \approx 1{,}73$.

Ентропійний інтервал похибок: $d = 2\Delta_e = \exp\left(H^{\text{рівн}}(\Delta)\right)$.

4.2.3. Ентропійне значення похибки, представленої гістограмою розподілу

Якщо на основі обмеженого числа вимірювань була побудована *ступінчаста гістограма*, то знайшовши її ентропію, можна затим замінити гістограму законом розподілу вибраної форми (рівномірним, нормальним чи іншим).

Нехай гістограма складається з m стовпців (рис. 4.5). Висота стовпця

$$\rho_j = \frac{n_i}{nd},$$

де $j = 1{,}2\ldots m$ – кількість інтервалів; n – число всіх вимірювань; n_i – число вимірювань, які попадають в j-й інтервал; $d = \Delta_j - \Delta_{j-1}$ – ширина j-го інтервалу.

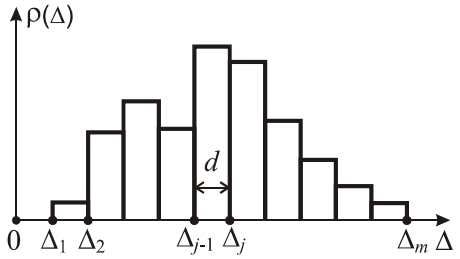


Рис. 4.5. Гістограма розподілу випадкової похибки

Ентропія похибок буде визначатись сумою ентропійних значень для кожного j-го інтервалу:

$$H^{\text{ист}}(\Delta) = -\sum_{j=1}^{m} \int_{\Delta_{j-1}}^{\Delta_j} \frac{n_i}{n \cdot d} \ln\left(\frac{n_i}{n \cdot d}\right) d\Delta = -\sum_{j=1}^{m} \frac{n_i}{n \cdot d} \cdot (\Delta_j - \Delta_{j-1}) \cdot \ln\left(\frac{n_i}{n \cdot d}\right) =$$

$$= \sum_{j=1}^{m} \frac{n_i}{n} \cdot \ln\left(\frac{n \cdot d}{n_i}\right) = \ln\left[d \cdot \prod_{j=1}^{m} \left(\frac{n}{n_i}\right)^{\frac{n_i}{n}} \right].$$

II. Порядок виконання роботи

4.3.1. Виміряти опір n резисторів одного номіналу приладом Щ4313 в режимі омметра. Результати спостережень занести в табл. 4.1.

4.3.2. Припустимо, що вимірювані значення R_i підпорядковуються нормальному закону розподілу. Послідовність опрацювання результатів проводити у відповідності з методикою, викладеною в ГОСТ.

4.3.3. Обчислити середнє арифметичне значення $\overline{R}$ вимірюваної величини:

$$\overline{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} R_i.$$

4.3.4. Обчислити абсолютні випадкові відхилення результатів спостережень Δ_i – різницю між результатами окремих спостережень R_i і середнього значення $\overline{R}$ ($\Delta_i = R_i - \overline{R}$) – та занести в табл. 4.1. Визначити суму всіх абсолютних випадкових відхилень ($\sum_{i=1}^{n} \Delta_i$). З ростом числа вимірювань сума випадкових похибок повинна наближатися до нуля: $\lim_{n \to \infty} \sum_{i=1}^{n} \Delta_i \to 0$. Цей висновок оснований на *аксіомі випадковості* теорії випадкових похибок, що *при дуже великому числі вимірювань і при відсутності систематичних* Δ_c *похибок позитивні і негативні похибки зустрічаються однаково часто*.

4.3.5. Розрахувати величини квадрата абсолютної похибки Δ_i^2, результати занести в табл. 4.1. Знайти суму квадратів випадкових похибок. Ця сума повинна бути мінімальною: $\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2 = min.$ Такий висновок оснований на аксіомі *розподілу*, що при великій кількості вимірювань малі похибки зустрічаються частіше, ніж великі; дуже великі похибки практично не зустрічаються.

Таблиця 4.1

№ №	Виміряне значення R_i, Ом, кОм, МОм	Абсолютна похибка вимірювання $\Delta_i = R_i - \overline{R}$	Квадрат абсолютної похибки Δ_i^2
1			
2			
3			
…	…	…	…
n			
	Середнє арифметичне значення опорів $\overline{R} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i$	Сума абсолютних похибок $\sum_{i=1}^{n} \Delta_i \approx 0$	Сума квадратів абсолютних похибок $\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2 = min$

4.3.6. Визначити оцінку СКВ $(\tilde{\sigma})$ абсолютних випадкових відхилень кожного з одноразових n спостережень за формулою:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2}.$$

4.3.7. Перевірити найбільш відхилені від середнього значення результати спостережень на можливість їх спотворення грубими похибками чи наявністю промахів. Одним з критеріїв визначення грубих похибок є критерій «трьох сігм» $(3\tilde{\sigma})$. За цим критерієм вважається, що результат, який виникає з ймовірністю $P \le 0{,}003$, малоймовірний і його можна вважати промахом, якщо $|\overline{x} - x_i| > 3\tilde{\sigma}$ $(|\Delta_i| > 3\tilde{\sigma})$. Такий критерій надійний при числі вимірювань $n \ge 20…50$.

При потребі результати з грубими похибками *відкидають і повторно виконуються* вище зазначені пункти розрахунків при скороченій вибірці.

4.3.8. Знаходиться оцінка СКВ середнього арифметичного значення

$$\overline{\sigma}_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n}\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}}.$$

З виразу для $\overline{\sigma}_{\bar{x}}$ видно, що воно в $\sqrt{n}$ раз менше за оцінку СКВ окремих спостережень $\tilde{\sigma}$ (рис. 4.6). Звідси висновок, що збільшуючи число вимірювань і прийнявши середнє значення всіх вимірювань за результат вимірювання, можна зменшити середньоквадратичне значення похибки $\overline{\sigma}_{\bar{x}}$ в $\sqrt{n}$ раз. Наприклад, збільшення кількості вимірювань до 100 викликає десятикратне звуження довірчого інтервалу $6\overline{\sigma}_{\bar{x}}$. Однак при цьому різко збільшуються технічні та часові витрати й починає перешкоджати невиключена систематична похибка.

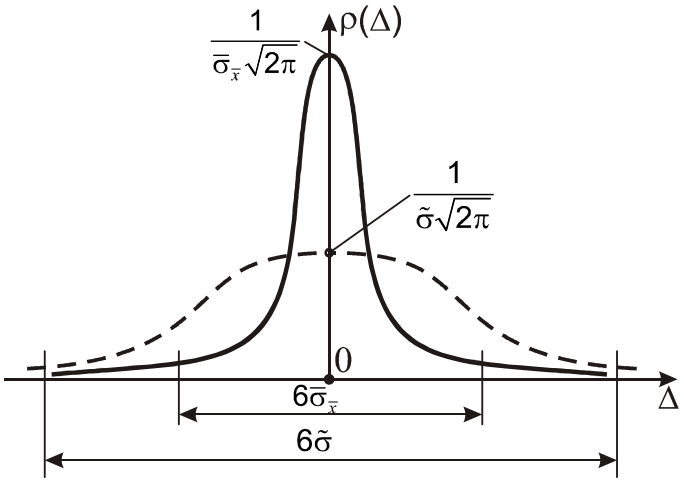


Рис. 4.6. Зміна параметрів нормального закону розподілу випадкової похибки при збільшенні кількості вимірювань

4.3.9. Оцінюються довірчі границі похибки і записується результат вимірювання:

- якщо за результат прийняте будь-яке значення x_i, тоді при відсутності систематичної похибки $X = x_i \pm z_{гр} \cdot \tilde{\sigma}$, $P_{дов}=\Phi(z_{гр})=\ldots$
- якщо за результат прийняте середнє арифметичне значення, тоді при відсутності систематичної похибки $X = \overline{x} \pm z_{гр} \cdot \overline{\sigma}_{\bar{x}}$, $P_{дов}= \Phi(z_{гр})=\ldots$

4.3.10. Для випадку малої кількості прямих вимірювань $(n \le 20)$ границі довірчого інтервалу похибки знаходять за формулою:

$$\Delta_{\text{дов}} = \pm t \cdot \overline{\sigma}_{\bar{x}},$$

де t – коефіцієнт розподілу Стьюдента, що є табульованим для різних значень n довірчої ймовірності $P_{\text{дов}}$ (див. табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнтів Стьюдента

N	P			
	0,9	0,95	0,99	
3	2,92	4,3	9,93	Якщо кількість результатів спостережень становить кілька десятків (n>30), тоді розподіл Стьюдента практично трансформується в нормальний закон розподілу.
5	2,13	2,78	4,6	
10	1,83	2,26	3,25	
15	1,76	2,15	2,98	
20	1,73	2,09	2,86	
∞	1,65	1,96	2,58	

4.3.11. Враховуючи, що систематична похибка $\Delta_{\text{с}}$ увійшла до результату вимірювання $\overline{R}$, необхідно визначити довірчі границі невиключеної систематичної похибки. В якості $\Delta_{\text{с}}$ використовують похибку засобу вимірювання

$$\Delta_{\text{с}} = \pm \frac{K_{\text{п}} \cdot \overline{R}}{100\%},$$

де $K_{\text{п}}$ – клас точності приладу, [%].

Для приладу Щ4313 клас точності є відносною похибкою, яка визначається за формулою:

$$K_{\text{п}} = \delta(\%) = \pm\left[a + b\left(\frac{R_k}{R} - 1\right)\right],$$

де a і b – коефіцієнти, що залежать від кінцевого значення шкали R_k.

Відповідно до паспортних даних приладу Щ4313:

- при $R_k = 500\text{Ом}$, $a = b = 1{,}5$;
- при $R_k = 5\text{кОм}$, $a = b = 0{,}5$.

Абсолютну похибку приладу Щ4313 знаходять за формулою:

$$\Delta_c = \pm \frac{\delta \cdot \overline{R}}{100\%}.$$

У випадку, якщо $\frac{\Delta_c}{\overline{\sigma}_{\bar{x}}} < 0{,}8$, то невиключеною систематичною похибкою нехтують і приймають $\Delta = \Delta_{гр}$; якщо $\frac{\Delta_c}{\overline{\sigma}_{\bar{x}}} < 8$, то нехтують випадковою похибкою і вважають, що $\Delta = \Delta_c$. У випадку нерівності $0{,}8 \le \frac{\Delta_c}{\overline{\sigma}_{\bar{x}}} < 8$ обчислюють $\sigma_\Sigma = \sqrt{\frac{\Delta_c^2}{3} + \sigma_{\bar{x}}^2}$, $\kappa = \pm \frac{\Delta_{гр} + \Delta_c}{\overline{\sigma}_{\bar{x}} + \Delta_c / \sqrt{3}}$, і тоді $\Delta = \kappa \cdot \sigma_\Sigma$, а результат представляють у вигляді:

$$R = \overline{R} \pm \Delta, P_{дов}=\ldots\ldots$$

4.4. Визначення закону розподілу результатів вимірювань та їх випадкових похибок

4.4.1. Для визначення закону розподілу випадкових похибок переходять до вибірки відхилень результатів вимірювання від середнього арифметичного значення (Δ_i): Δx_1, $\Delta x_2,\ldots, \Delta x_n$.

Першим кроком для ідентифікації закону розподілу є побудова варіаційного ряду, а також y_i, де $y_1 = min(x_i)$ і $y_n = max(x_i)$. В варіаційному ряді результати вимірювань (чи їх похибки Δ_i) розташовують у порядку зростання. Далі цей ряд ділять на оптимальне число m однакових інтервалів групування шириною

$$\Delta_j = d = \frac{\Delta_{max} - \Delta_{min}}{m}.$$

Для практичного використання доцільно вибрати $m_{min} = 0{,}55\, n^{0{,}4}$ і $m_{max} = 1{,}25\, n^{0{,}4}$. Значення m повинно бути непарним; зазвичай m лежить в діапазоні від 7 до 15.

4.4.2. Визначаються межі інтервалів $[\Delta_{j-1}, \Delta_j]$ так, щоб нижня межа j-го інтервалу співпадала з верхньою межею $(j-1)$-го інтервалу: $\Delta_{j\text{ниж}} = \Delta_{(j-1)\text{верх}}$ (рис. 4.5).

4.4.3. Підраховують число похибок n_i, які потрапляють в кожний з m інтервалів. За одержаними значеннями розраховують ймовірність попадання результатів в кожний з інтервалів

$$P_j = \frac{n_i}{n}, \text{ де } j=1, 2,\ldots,m.$$

Проведені розрахунки дозволяють побудувати гістограму. Для побудови гістограми по осі результатів спостережень відкладають інтервали Δ_j в порядку зростання номерів і на кожному інтервалі будується прямокутник висотою $\frac{P}{d} = \frac{n_i}{n \cdot d}$ (середня густина в інтервалі Δ_j). В цьому випадку площа під гістограмою дорівнює одиниці. При збільшенні числа інтервалів і відповідно зменшені їх ширини гістограма наближається до плавної кривої – графіка густини розподілу ймовірності.

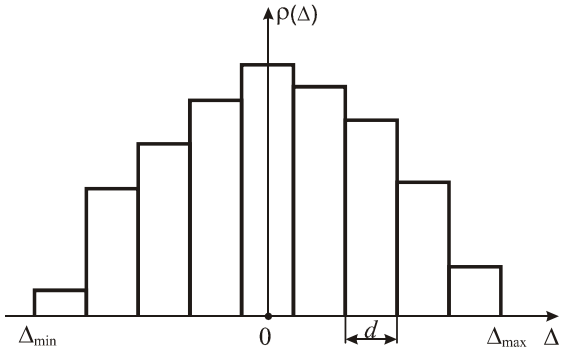


Рис. 4.7. Побудова гістограми за результатами експериментальних вимірювань

Як спосіб оцінки близькості розподілу вибірки експериментальних даних до прийнятої аналітичної моделі закону розподілу використовуються критерії згоди. Найчастіше в практиці використовують критерій Пірсона.

4.5. Визначення ентропійного значення похибки вимірювання

4.5.1. Розрахувати ентропію похибки, представленою гістограмою розподілу.

4.5.2. Прирівнявши ентропію розподілу , який представлений гістограмою $H^{\text{гіст}}(\Delta)$, до ентропії рівномірного закону $H^{\text{рівн}}(\Delta)$, одержимо ентропійне значення випадкової похибки Δ_e (рис. 4.8). При цьому рівність ентропій $H^{\text{гіст}}(\Delta)=H^{\text{рівн}}(\Delta)$ створює однакову дезинформуючу дію похибки на вимірювану величину

$$H^{\text{гіст}}(\Delta)=H^{\text{рівн}}(\Delta)=\ln(2\Delta_e).$$

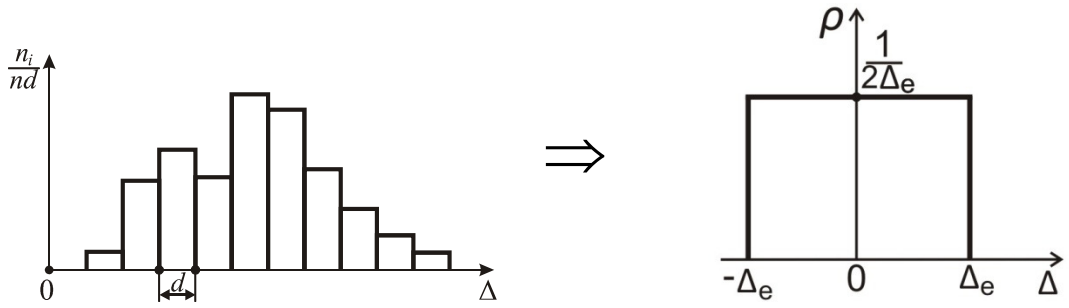


Рис. 4.8. Заміна гістограми рівномірним законом розподілу випадкової похибки

З урахуванням одержаного значення Δ_e результат вимірювання опору R запишемо у вигляді:

$$R = \overline{R} \pm \Delta_e .$$

4.5.3. Прирівнявши ентропію розподілу, який представлений гістограмою, до ентропії нормального закону, одержимо:

$$H^{\text{гіст}}(\Delta) = H^{\text{норм}}(\Delta) = \ln\left(\sigma\sqrt{2\pi e}\right).$$

Обчислимо СКО:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} e^{H^{\text{гіст}}(\Delta)}.$$

Ентропійний інтервал:

$$d = 2\Delta_e = 2K_e\sigma = 4{,}133 \cdot \sigma .$$

Використовуючи розраховане значення σ, можна побудувати графік $\rho(\Delta)$ нормального закону розподілу за формулою $\rho(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}$. Площа під кривою

$\rho(\Delta)$ і площа всіх стовпчиків гістограми повинні бути однаковими. Для наочного порівняння криву $\rho(\Delta)$ нормального закону розподілу необхідно співставити з рисунком гістограми (рис. 4.9).

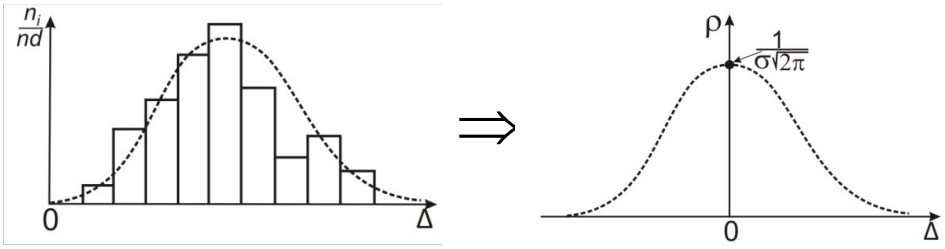


Рис. 4.9. Нормальний закон розподілу випадкової похибки

4.6. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювання.
3. Таблиці і графіки результатів вимірювання.
4. Результати обробки експеримента.
5. Висновки та зауваження по роботі.

4.7. Контрольні запитання

1. Що таке випадкова похибка?
2. Основні закони розподілу випадкової похибки.
3. Ентропійне значення похибки.
4. Як побудувати гістограму?
5. Як визначити максимальну похибку при нормальному законі розподілу?
6. Дати визначення середньоквадратичному значенню похибки.
7. Який порядок опрацювання результатів багатократних вимірювань?
8. Для чого проводять багатократні вимірювання?

Лабораторна робота №5

ВИМІРЮВАННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: вивчити вхідні пристрої і технічні характеристики електронних вольтметрів і порядок користування ними при вимірюванні параметрів змінної напруги; набути навиків при аналізі результатів вимірювань приладами різних типів і визначенні похибок.

І. Теоретичні відомості

5.1. Прилади для вимірювання змінної напруги. Вольтметри

Класифікація вольтметрів. В основу класифікації вольтметрів покладені наступні ознаки:

- *вид вимірюваної напруги*: вольтметри постійного струму (В2), вольтметри змінного струму (В3), вольтметри імпульсного струму (пікові)(В4), селективні (В6), універсальні(В7) для вимірювання постійної і змінної напруги і опору за постійним струмом;
- *принцип функціонування*: електромеханічні та електронні;
- *тип відлікового пристрою*: аналогові(стрілкові), цифрові;
- *вимірюваний параметр* (для вольтметрів змінної напруги): амплітудні; середніх, середньоквадратичних і середньо випрямлених значень;
- *частотний діапазон*: низькочастотні, високочастотні, надвисокочастотні, широкосмугові;
- *тип вхідного кола*: з відкритим і закритим входом.

Електронні аналогові вольтметри являють собою поєднання вимірювальної схеми з електронними вузлами магнітоелектричного вимірювального приладу, проградуйованого в одиницях вимірюваної величини. Структурні схеми електронних вольтметрів змінного струму зображені на рис. 5.1.

Вхідне коло вхідного пристрою дозволяє здійснити два режими роботи: «≃» – вхід відкритий і «~» – Вхід закритий. В режимі «≃» вхідна змінна напруга $U(t)$

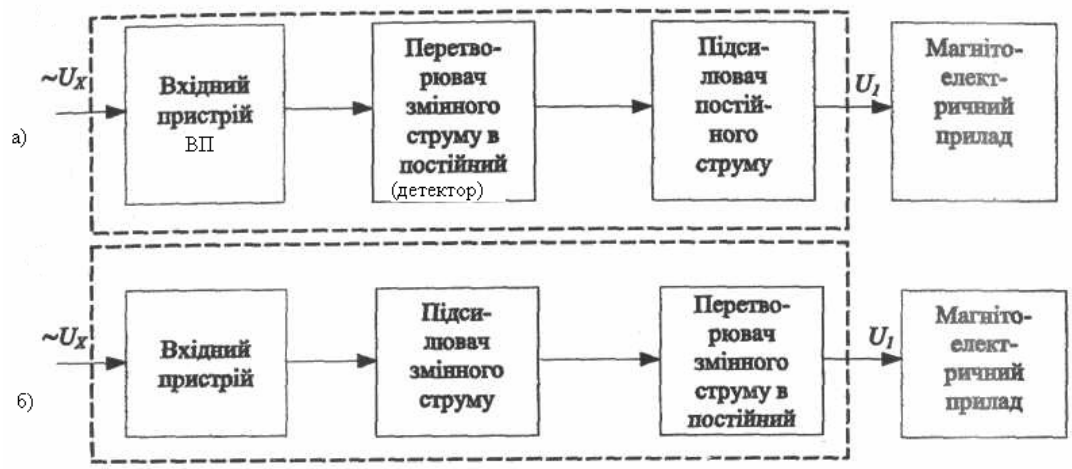


Рис. 5.1. Структурні схеми електронних вольтметрів змінного струму (а) і (б)

поступає на вхід ВП без зміни, а в режимі «~» з вхідної напруги U_x віднімається середнє значення $U_{ср}$ і постійна складова U_0 (якщо вона була присутня у вхідній напрузі $U_x = U_0 + U(t)$. Разом з тим вхідний пристрій є вхідним подільником напруги.

При вимірюванні змінної напруги електронним вольтметром напруга U_x спочатку підсилюється (рис. 5.1.б), а потім детектується в постійну. Ця схема має найвищу чутливість (до 1 мкВ) завдяки вхідному електронному підсилювачу, однак має обмежений частотний діапазон (до 10 МГц). Якщо ж детектор поставити перед підсилювачем постійного струму (рис. 5.1.а), то розшириться частотний діапазон до 1000 МГц.

Метрологічні характеристики електронного вольтметра найбільшою мірою визначаються схемою перетворювача змінного струму в постійний (детектора).

В залежності від *виду перетворення* покази вольтметра на виході можуть бути пропорційними амплітудному (піковому), середньовипрямленому або середньоквадратичному значенню вимірюваної напруги. Однак треба враховувати, *що найчастіше шкалу будь-якого електронного вольтметра градують в середньоквадратичних значеннях напруги синусоїдальної форми*. Виключення складають імпульсні вольтметри, шкалу яких градують в амплітудних значеннях.

Цифрові вольтметри всі електронні. Вони відрізняються від аналогових наявністю аналого-цифрового перетворювача (АЦП) замість вимірювального механізму, а також схеми управління. АЦП – це вимірювальний пристрій, який автоматично перетворює вихідну величину $x'(t)$ вхідного перетворювача у відповідний

їй цифровий код N_x. Цифровий код АЦП надходить на цифровий відліковий пристрій, який за допомогою дешифратора перетворює його в десятковий код і відтворює на табло індикації результат вимірювання.

Цифрові вольтметри один від одного відрізняються принципами будови АЦП, які можуть бути:

- АЦП часо-імпульсного типу;
- АЦП частотно-імпульсного типу;
- АЦП з інтегруванням.

Наприклад, у вольтметра часо-імпульсного типу АЦП складається з двох перетворювачів: перетворювача вимірюваної величини U_x в інтервал часу t_x і перетворювача часового інтервалу t_x у послідовність імпульсів (цифровий код) N_x. Структурна схема цифрового вольтметра зображена на рис. 5.2.

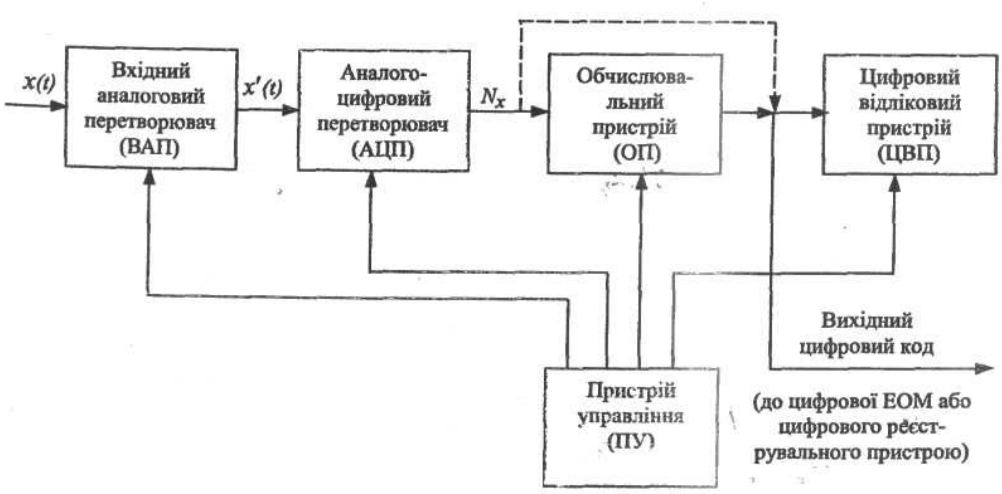


Рис. 5.2. Структурна схема цифрового вольтметра

5.2. Параметри змінної напруги і струму

Слід розрізняти змінний струм і напругу, змінний періодично повторюваний струм і напругу різної форми і змінний неперіодичний (випадковий) струм і напругу.

Характеристики періодичних сигналів. Кожний періодичний сигнал $x(t)$ незалежно від форми характеризують такі його параметри:

- амплітудне або максимальне значення за період X_m;
- середнє значення за період або стала складова $\overline{x} = x_0 = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)dt$;

- середнє випрямлене значення $\overline{x}_{\text{св}} = \frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|dt$;
- середнє квадратичне (діюче, ефективне) значення $\overline{x}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt}$.

Параметри $\overline{x}$, $\overline{x}_{\text{св}}$, $\overline{x}_{\text{кв}}$ називають інтегральними (енергетичними) характеристиками сигналу.

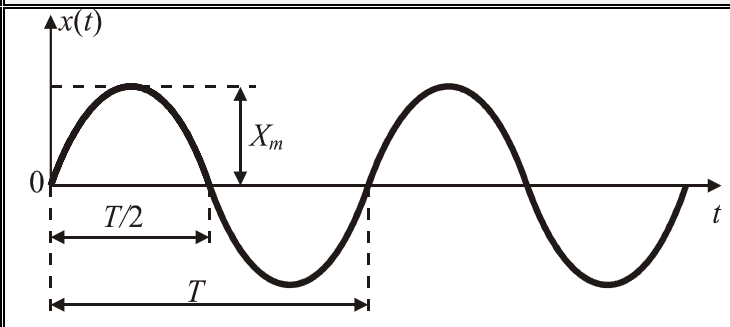
Крім вказаних вище параметрів, для характеристики періодичних сигналів використовують спеціальні коефіцієнти:

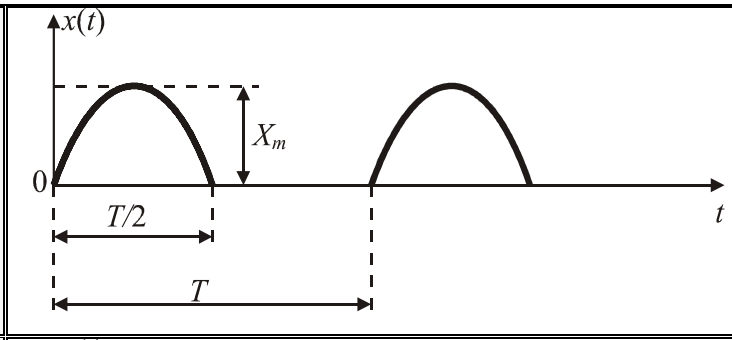
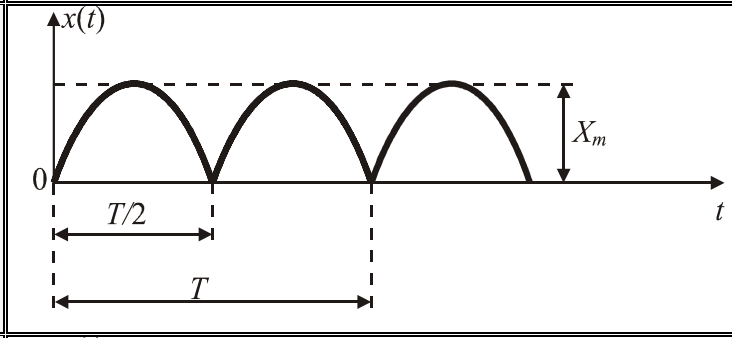
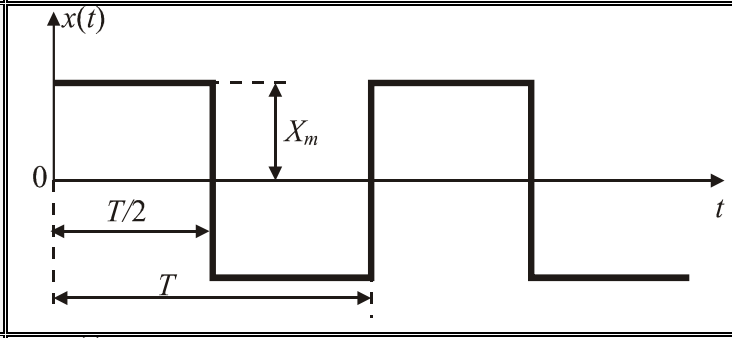
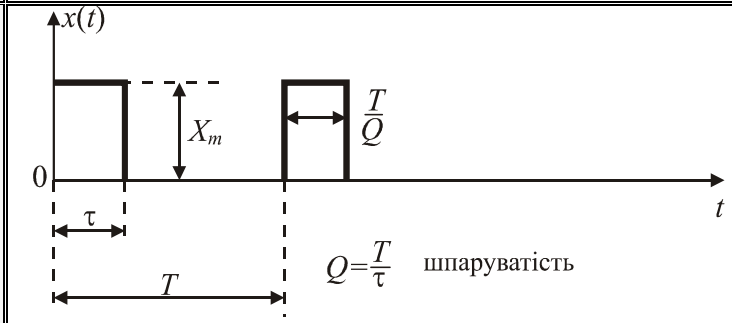
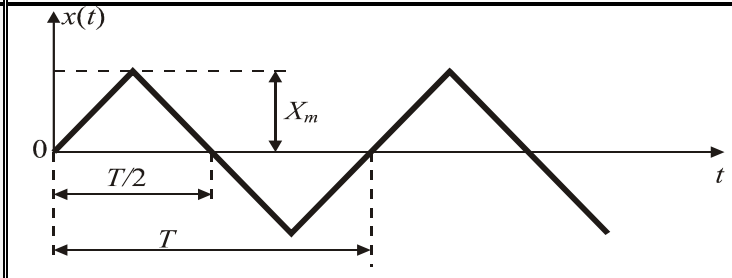
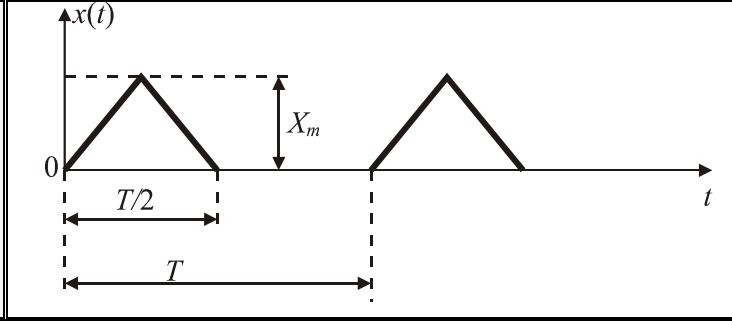
- коефіцієнт амплітуди $K_{\text{а}} = \frac{X_m}{\overline{x}_{\text{кв}}}$;
- коефіцієнт форми $K_{\text{ф}} = \frac{\overline{x}_{\text{кв}}}{\overline{x}_{\text{св}}}$;
- коефіцієнт усереднення $K_{\text{у}} = \frac{X_m}{\overline{x}_{\text{св}}} = K_{\text{а}} \cdot K_{\text{ф}}$.

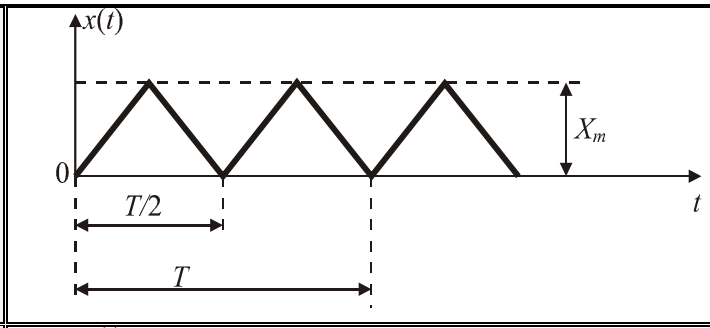
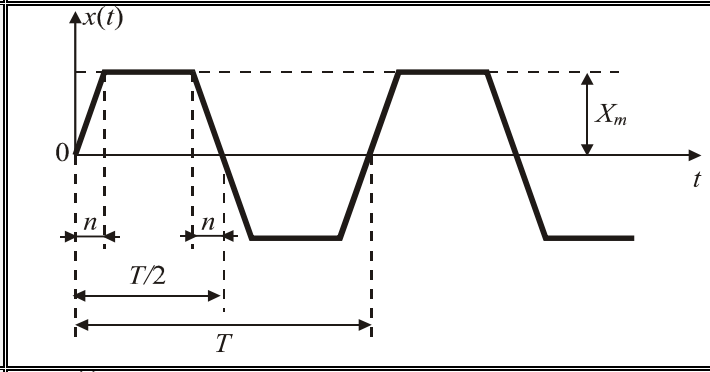
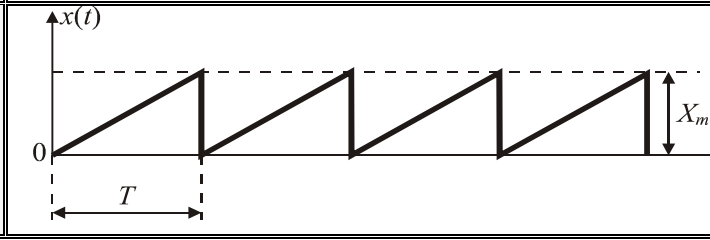
В табл. 5.1 наведені значення коефіцієнтів амплітуди і форми для сигналів різної форми.

Таблиця 5.1

Значення коефіцієнтів амплітуди і форми для сигналів різної форми

№ п/п	Форма кривої сигналу	Коефіцієнт амплітуди $K_{\text{а}}$	Коефіцієнт форми $K_{\text{ф}}$
1		$\sqrt{2}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$

2		2	$\frac{\pi}{\sqrt{2}}$
3		$\sqrt{2}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$
4		1	1
5		$\sqrt{Q}$	$\sqrt{Q}$
6		$\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$
7		$\sqrt{6}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$

8		$\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$
9		$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{8}{3n}}}$	$\frac{\sqrt{1-\frac{8}{3n}}}{1-\frac{2}{n}}$
10		$\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$

Гармонічний або *синусоїдальний* сигнал (рис. 5.3):

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де $U(t)$ – миттєве значення сигналу;

U_m – амплітуда сигналу;

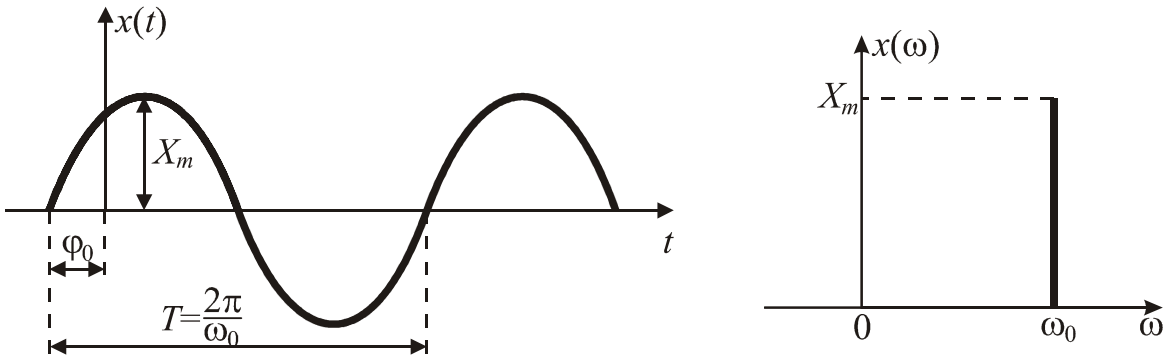
$\omega t + \varphi_0 = \varphi$ – фаза сигналу;

$\omega = 2\pi f$ – колова частота,

φ_0 – початкова фаза.

Гармонічний сигнал є елементарним періодичним сигналом. Миттєве значення $U(t)$ можна виміряти на екрані осцилографа, середньоквадратичне $U_{\text{ср.кв.}}$ і амплітудне U_m обчислюють або виміряють відповідним вольтметром.

Середньоквадратичне значення $U_{\text{ср.кв.}}$ ***синусоїдальної*** напруги:



а б

Рис. 5.3. Гармонічний сигнал: а – в часовій, б – в частотній області

$$U_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U^2(t)dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707 U_m$$

Зв'язок між середньоквадратичним значенням і амплітудою можна виразити через коефіцієнт амплітуди:

$$\frac{U_m}{U_{\text{ср.кв.}}} = K_A = \sqrt{2}\,.$$

В практиці вимірювань використовують також параметр середньовипрямленого значення:

$$U_{\text{ср.випр.}} = \frac{1}{T}\int_0^T |U(t)|dt = \frac{U_{\text{ср.кв.}}}{K_\text{ф}} = \frac{U_m}{K_\text{А} \cdot K_\text{ф}}\,.$$

Для синусоїдальної напруги

$$K_\text{ф} = 1{,}11 \text{ і } U_{\text{ср.випр.}} = 0{,}636 U_m$$

Середнє значення для синусоїдальної напруги

$$U_{\text{ср.}} = \frac{1}{T}\int_0^T U_m \sin \omega t \cdot dt = 0\,.$$

Не слід змішувати постійну напругу $U(t) = U_0 = \text{const}$ з постійною складовою змінної напруги $U_{\text{ср.}}$ (рис. 5.4).

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) - U_0$$

$$U_{\text{ср.}} = \frac{U_m}{T} \int_0^T \sin \omega t \cdot dt - U_0 = -U_0$$

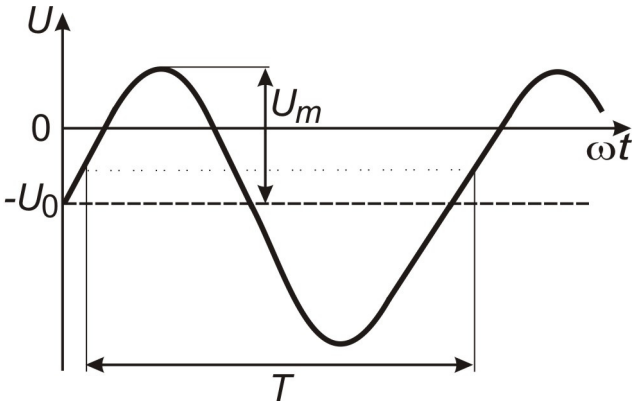


Рис. 5.4

5.3. Вимірювання змінної напруги різної форми

Параметри синусоїдальної напруги U_m, $U_{\text{ср.кв.}}$, $U_{\text{ср.випр.}}$ вимірюються різними вольтметрами. Фактично параметр напруги, вимірюваний приладом, визначається типом *детектора*. Це означає, якщо детектор піковий (амплітудний), квадратичний чи лінійний (середньовипрямляючий), тоді кут повороту рухомої частини стрілкового індикатора електронного вольтметра пропорційний відповідно піковому, середньоквадратичному чи середньовипрямленому значенню вимірюваної напруги. Однак шкали всіх електронних вольтметрів крім імпульсних *градуюють в середньоквадратичних значеннях синусоїдальної напруги.* Тому при вимірюванні такими приладами синусоїдальної напруги по шкалі відраховують середньоквадратичне значення, а середньовипрямлене і амплітудне обчислюють за відомими значеннями коефіцієнтів

$$K_A = 1{,}41; \qquad K_{\text{ф}} = 1{,}11/U_m = K_A \cdot U_v; \qquad U_{\text{ср.випр.}} = U_v / K_{\text{ф}},$$

де U_v – покази вольтметра.

При вимірюванні вказаними приладами *несинусоїдальних напруг* різної форми безпосередній відлік по шкалі не завжди можна виконати, оскільки градуювання шкали справедливе тільки для синусоїдальної напруги. В таких випадках виходять з

того, що вольтметром можна виміряти тільки той параметр напруги, який відповідає типу його детектора, якщо розрахунками привести шкалу до вимірюваного параметра. При цьому приймається, що прилад має *відкритий вхід*. Приведення шкали приладу проводиться множенням його показань на коефіцієнти K=1,41; 1,0; 0,9 відповідно для вольтметрів з піковим, квадратичним і лінійним детекторами.

Наприклад, нехай вольтметрами різних типів з відкритим входом, які мають шкали, проградуйовані в середньоквадратичних значеннях синусоїдальної напруги, за виключенням імпульсного, шкала якого проградуйована в пікових значеннях, виміряна напруга несинусоїдальної форми і одержані наступні покази вольтметрів:

U_{a1} – з піковим детектором;

U_{a2} – з квадратичним детектором;

U_{a3} – з лінійним детектором;

U_{a4} – імпульсний вольтметр.

Приведемо шкали приладів до вимірюваного параметра і визначимо значення виміряних параметрів. Для цього зробимо наступне:

а) покази U_{a1} помножимо на 1,41 і одержимо пікове (амплітудне) значення вимірюваної напруги. Інші параметри можна визначити, якщо відомі K_A і $K_ф$ вимірюваної напруги;

б) покази U_{a2} є середньоквадратичним значенням вимірюваної напруги (К=1). Інші параметри можна визначити, якщо відомі K_A і $K_ф$ вимірюваної напруги;

в) покази U_{a3} помножимо на 0,9 (ділення на 1,11) і одержимо середньовипрямлене значення вимірюваної напруги;

г) покази U_{a4} імпульсного вольтметра дають безпосередньо пікове значення U_m напруги (K=1). Інші параметри можна визначити, якщо відомі K_A і $K_ф$ вимірюваної напруги.

При *закритому вході* вольтметри вимірюють параметри напруги без постійної складової. Наприклад, покази вольтметра з піковим детектором і закритим входом

відповідають піковому значенню тільки змінної складової $(U_m - U_0)$.

5.4. Особливості вимірювань параметрів змінної напруги вольтметрами В7-26, В3-38, Щ4313

1) В лабораторній роботі використовується вольтметр універсальний В7-26, який побудований за структурною схемою рис. 5.1.а). Він має амплітудний детектор з закритим входом рис. 5.5.

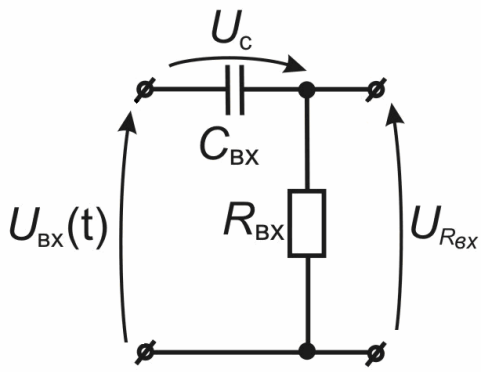


Рис. 5.5

На вході підсилювача постійного струму є високоомний подільник напруги з коефіцієнтом $1/\sqrt{2} \approx 0{,}707$, тому вимірюється тільки діюче значення змінної напруги синусоїдальної форми

$$U_v = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U_{ср.кв.}.$$

При вимірюванні періодичної послідовності імпульсних сигналів покази вольтметра В7-26 будуть залежати від правильності його включення у вимірювальне коло (рис. 5.6).

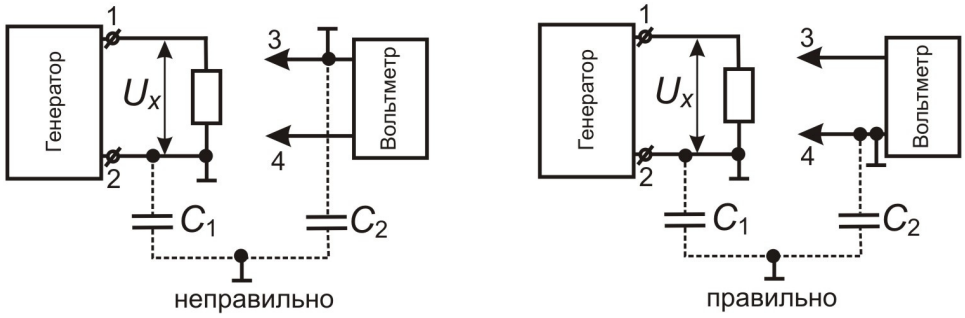


Рис. 5.6

При правильному включенні «+» покази вольтметра будуть такими (рис. 5.7):

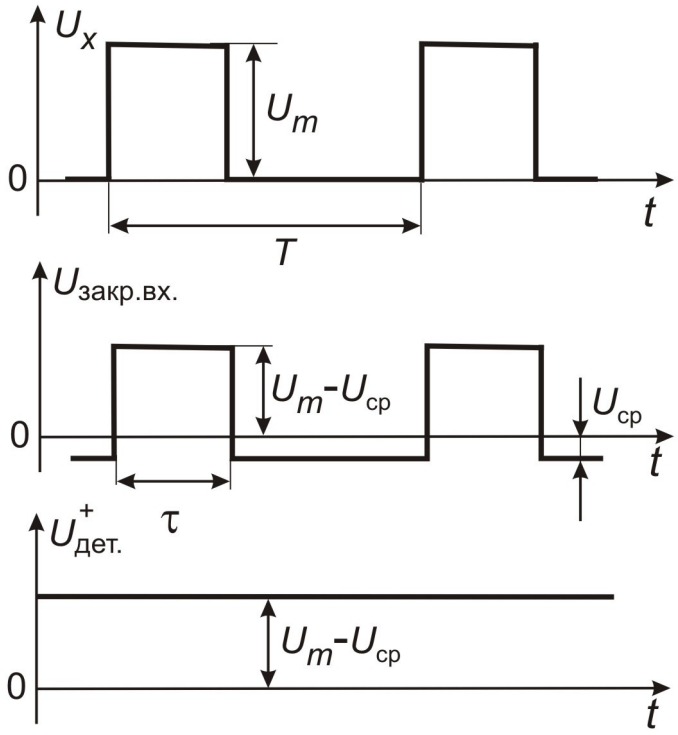


Рис. 5.7

$$U_V^+ = \frac{U_m - U_{ср}}{\sqrt{2}} = \frac{U_m\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)}{\sqrt{2}}.$$

При неправильному включені «-» покази вольтметра зміняться:

$$U_V^- = \frac{U_{ср}}{\sqrt{2}} = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

2) Вольтметри В3-38 та Щ4313 побудовані за структурною схемою зображеною на рис. 5.1.б). Вони мають закритий вхід, лінійний (двохпівперіодний випрямляч) детектор, на виході якого середньовипрямлена напруга $U_{ср.випр.}$. Після детектора розміщений «помножувач» з коефіцієнтом $K = 1{,}11$.

Для синусоїдального сигналу маємо такі покази вольтметра:

$$U_v = U_{\text{ср.випр.}} \cdot 1{,}11 = \frac{U_m}{K_A \cdot K_\phi} \cdot K_\phi = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U_{\text{ср.випр.}}$$

Таким чином, шкали вольтметрів В3-38 та Щ4313 проградуйовані в середньоквадратичних значеннях синусоїдальної напруги.

При вимірюванні імпульсних сигналів будуть відбуватися такі перетворення:

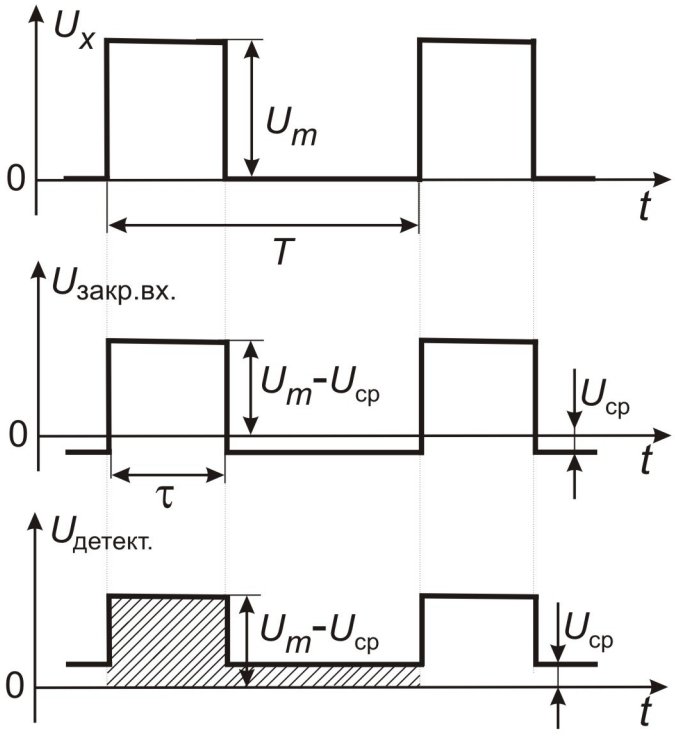


Рис. 5.8

Покази вольтметра:

$$U_v = 1{,}11 \cdot U_{\text{ср.випр.}} = \frac{1{,}11}{T}\left[(U_m - U_{\text{ср}})\tau + U_{\text{ср}} \cdot (T - \tau)\right] = 2{,}22\frac{\tau}{T}\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)U_m .$$

Зміна полярності включення вольтметрів В3-38 І Щ4313 не впливає на покази U_v. Вольтметр Щ4313 має цифровий відлік.

II. Порядок виконання роботи

5.5.1. Ознайомитись з генераторами сигналів Г3-109 і Г5-54, вольтметрами В7-26, Щ4313, В3-38. Відкалібрувати вольтметри і осцилограф.

5.5.2. Встановити на виході генератор Г3-109 напругу 5В (по вольтметру генератора) на частоті у відповідності з табл. 5.2.

Табл. 5.2

Номер бригади	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота, f,кГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Виміряти параметри змінної напруги і результати вимірювань звести в табл. 5.3. Зробити висновки про тип перетворювача вольтметрів. Розрахувати основні параметри змінної напруги та записати їх у таблицю 5.3.

Табл. 5.3.

Тип приладу	Покази приладу і клас точності В, %	Розрахункові значення, [В]			
		U_m	$U_{ср.кв}$	$U_{ср.випр.}$	$U_{ср}$
Індикатор Г3-109					
В7-26 "+"					
В7-26 "-"					
В3-38					
Щ4313					
осцилограф					

5.5.3. Встановити на генераторі імпульсів Г5-54 такі параметри сигналу:

$\tau_U = (300 + №_{бр} \cdot 20)$, мкс,

$U_{ген}$=5В на частоті повторення $f_n = (1 + №_{бр} \cdot 0{,}1)$, кГц.

Виміряти параметри імпульсної послідовності. Результати звести в табл. 5.4. Зробити висновки про тип перетворювача вольтметрів. Розрахувати основні параметри імпульсного сигналу. Результати записати в табл. 5.4. Індикатор генератора Г5-54 – амплітудний.

Табл. 5.4.

Тип приладу	Покази приладу і клас точності В, %	Розрахункові значення					
		U_m	$U_{ср.кв}$	$U_{ср.випр.}$	$U_{ср}$	Δ	δ
Індикатор Г3-109							
В7-26 “+”							
В7-26 “-”							
В3-38							
Щ4313							
осцилограф							

5.6. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювання.
3. Таблиці і графіки результатів вимірювання.
4. Результати обробки експеримента.
5. Висновки та зауваження по роботі.

5.7. Контрольні запитання

1. Будова і призначення вхідних перетворювачів електронних вольтметрів. Що таке «закритий» і «відкритий» вхід?
2. Параметри періодичної змінної напруги і їх визначення.
3. Чим відрізняються структурні схеми вольтметрів змінної та постійної напруги?
4. Якими коефіцієнтами зв’язані параметри гармонічної (синусоїдальної) напруги?
5. Якими коефіцієнтами зв’язані параметри періодичної послідовності імпульсних сигналів?
6. Що таке постійна складова змінної напруги? Чи відрізняється вона від постійної напруги?
7. Які типи детекторів використовуються у вольтметрах змінної напруги?
8. В яких одиницях проградуйовані шкали більшості вольтметрів змінної напруги?
9. Похибки вольтметрів при вимірюванні параметрів змінної напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поліщук Є.С. та інш. Метрологія та вимірювальна техніка. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 544 с.
2. Дорожовець М.М. та інш. Основи метрології та вимірювальної техніки. Том 1, 2. – Львів: 2Львівська політехніка». 2005.
3. Головко Д.Б., Рего К.Г., Скрипник Ю.О. Основи метрології та вимірювань. Навч. посібник – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
4. Ціделко В.Д., Яремчук Н.А. Невизначеність вимірювання. – К.: ІВЦ «Видавництво Політехніка», 2002. – 176 с.
5. Шпінь О. П. Прикладна метрологія. – К. НТУУ «КПІ», 2007.
6. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
7. Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация. – М.: Высш. школа, 2006. – 800 с.
8. Нефёдов В.И. и др. Метрология и электрорадилизмерения в телекоммуникационных системах. – М.: Высш. школа, 2001. – 383 с.