

## ЗМІСТ

Вступ	4
Вимоги до виконання та оформлення лабораторних робіт	5
Лабораторна робота № 1. Оцінка похибок прямих та непрямих вимірювань	7
Теоретичні відомості	7
Хід роботи	20
Лабораторна робота № 2. Вимірювання параметрів сигналів за допомогою електронно-променевого осцилографа	25
Теоретичні відомості	25
Хід роботи	37
Лабораторна робота № 3. Вимірювання електричних величин компенсатором постійного струму	42
Теоретичні відомості	42
Хід роботи	49
Лабораторна робота № 4. Вимірювання кутової швидкості	56
Теоретичні відомості	56
Хід роботи	66
Лабораторна робота № 5. Індуктивні перетворювачі лінійних переміщень	70
Теоретичні відомості	70
Хід роботи	80
Лабораторна робота № 6. Цифрові вимірювальні прилади	82
Теоретичні відомості	82
Хід роботи	105
Методика роботи з програмою Numeri	111

## ВСТУП

Суттєвою умовою підвищення якості знань студентів з реалізація в процесі викладання принципу єдності теорії і практики. Безпосередній зв'язок з практикою дозволяє допомогти студентам оволодівати знаннями фізичних закономірностей, які є теоретичною основою техніки і виробництва. Одним з шляхів здійснення зв'язку теорії з практикою є постановка лабораторного практикуму, під час проведення якого результати робіт і перевірка теоретичних положень, що одержуються на основі експериментальних досліджень.

Метою лабораторного практикуму з дисципліни “Основи метрології та вимірювальної техніки” є поглиблення та вивчення прослуханого на лекціях і здобутого в результаті самостійної роботи теоретичного матеріалу, закріплення та розвиток практичних навичок розрахунку, побудови і налагодження вимірювальної техніки, її експериментального дослідження і практичного використання, обробка одержаних результатів вимірювання, оформлення звітної документації.

Навчальний посібник призначений для студентів усіх спеціальностей, усіх форм навчання, на яких читається курс “Основи метрології та вимірювальної техніки”, а також для викладачів і асистентів, які безпосередньо проводять лабораторні роботи з студентами.

## **ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

На першому занятті викладач повідомляє студентам план виконання лабораторних робіт, кількість балів за лабораторні роботи, строки їх виконання та захисту, рекомендує їм необхідну літературу, знайомить з прийнятою методикою проведення робіт, а також з дією різних технічних засобів.

Окрім того, на першому занятті особисто викладачем проводиться інструктаж з техніки безпеки. Після проведення інструктажу студенти обов'язково підтверджують підписами знайомство з правилами техніки безпеки і зобов'язання не порушувати встановлені правила у спеціальному лабораторному журналі.

Лабораторні роботи виконуються бригадами у складі не більше чотирьох чоловік. Роботи проводяться циклічним методом, тобто одна бригада починає з першої роботи, а інші – з наступних, змінюючись згідно з графіком проведення лабораторних робіт. Така організація проведення лабораторних робіт дозволяє виконати усі лабораторні роботи, які передбачені програмою, але не забезпечує узгодження з часом тематики цих робіт, з матеріалом, який викладається на лекціях, що зумовлює необхідність наявності теоретичних відомостей до кожної лабораторної роботи у навчальному посібнику. Кожна лабораторна робота розрахована на виконання протягом однієї пари.

При проведенні лабораторних робіт викладач повинен притримуватись принципу максимальної самостійності студентів як при підготовці до лабораторних занять, так і при їх виконанні. Кожен студент повинен самостійно виконувати пошук несправностей і відмов обладнання під контролем викладача, але особистої участі викладач не братиме.

Перед виконанням кожної лабораторної роботи викладач опитує студентів як по змісту самої роботи, так і з методики її виконання. Непідготовлені студенти не допускаються до виконання лабораторної роботи, а вивчають в лабораторії не засвоєний ними матеріал з рекомендованої літератури. Окрім того, до виконання лабораторної не допускаються студенти, які не мають належним чином оформленого протоколу перед виконанням роботи.

Після дозволу на виконання лабораторної роботи студент виконує її згідно з планом проведення. Якщо в процесі роботи схема чи установка працюють неправильно, він зобов'язаний знайти причину та усунути її, дотримуючись правил техніки безпеки. Після виконання лабораторної роботи експериментальні дані, отримані під час виконання роботи, підписуються викладачем.

Захист протоколів лабораторних робіт проводиться на лабораторних заняттях, консультаціях, під час самостійної роботи студентів, під контролем викладача.

Протоколи усіх робіт зберігаються у студента до виконання останньої роботи, після чого доповнюються загальною анотацією, змістом і резюме. Протоколи робіт можуть використовуватись студентом під час підготовки до

екзамену, після чого вони здаються викладачеві.

Протоколи лабораторних робіт оформлюються на листах білого паперу формату А4 (210x297) і повинні включати в себе титульний лист, мету роботи, короткі теоретичні відомості, хід роботи, результати експериментальних досліджень, необхідні розрахунки і графіки, висновки по роботі. Бажаним є використання обчислювальної техніки для обробки результатів експериментальних досліджень.

Даний навчальний посібник зберігається на кафедрі “Метрології та промислової автоматики” Вінницького державного технічного університету на магнітних носіях і може видаватись студентам для підготовки протоколів робіт.

# Лабораторна робота № 1

## Оцінка похибок прямих та непрямих вимірювань

**Мета роботи:** засвоїти на практиці (в лабораторних умовах) методику оцінки похибок прямих та непрямих вимірювань.

Після виконання роботи студенти повинні:

- знати види похибок, закони розподілу випадкових похибок, похибки ряду прямих та опосередкованих вимірювань, форми представлення результатів вимірювань;
- вміти застосовувати отримані знання при обробці ряду прямих та непрямих вимірювань, представляти результати вимірювань згідно з ДСТУ 2681-94.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Похибки вимірювань класифікують за трьома основними класифікаційними ознаками - за способом вираження, за характером зміни, за місцем виникнення. Класифікація похибок вимірювань наведена на рис.1.

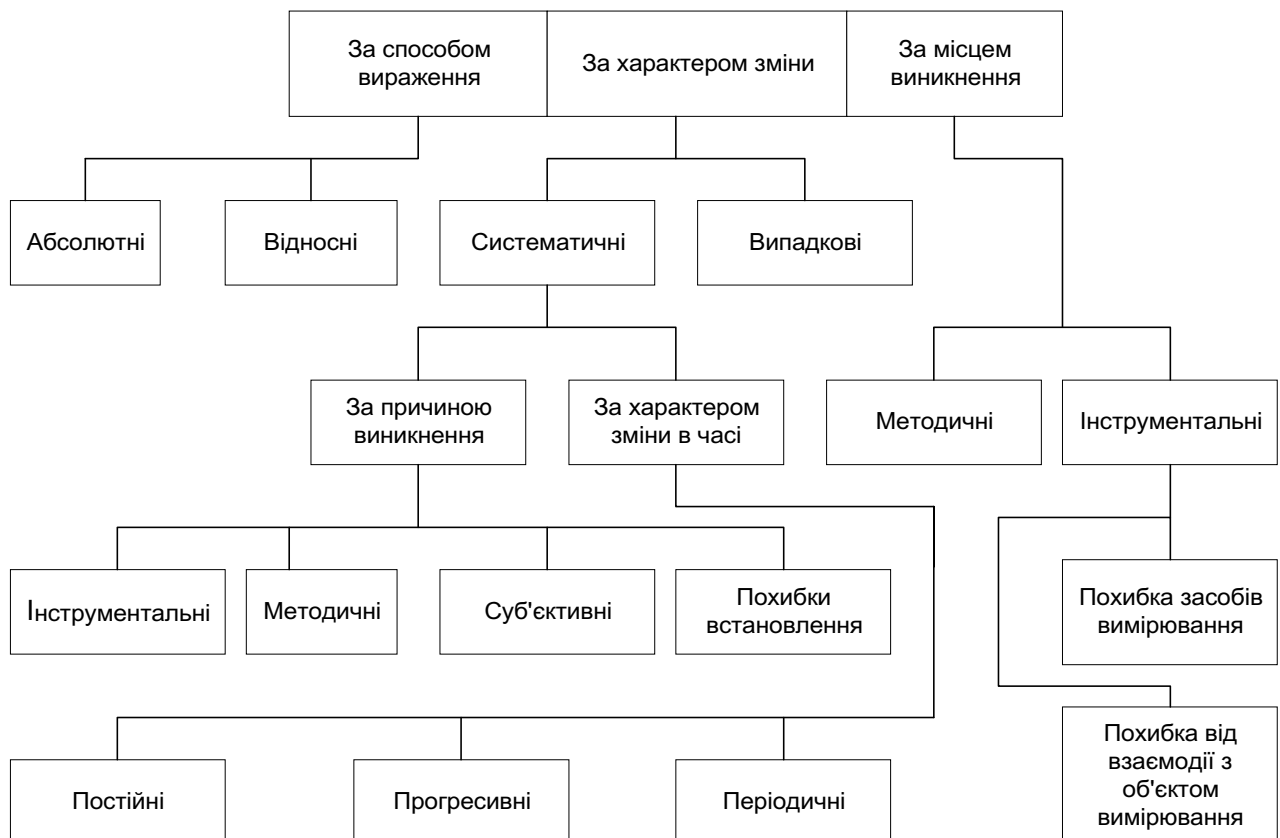


Рисунок 1 - Класифікація похибок вимірювання

**За способом вираження** похибки поділяються на абсолютні та відносні. Класична метрологія виходить з позиції, що результат вимірювання зав-

жди відрізняється від істинного значення вимірюваної величини. Тому під час вимірювань фізичної величини (ФВ) виникає похибка, яка дорівнює різниці між вимірним значенням  $X$  фізичної величини та її істинним  $X_1$  значенням

$$\Delta X = X - X_1. \quad (1)$$

**Істинне значення.** *Значення фізичної величини, яке ідеально відобразило б певну властивість об'єкта.*

Визначити істинне значення величини вимірюванням неможливо через обмежені можливості засобів вимірювань. Однак існують величини, істинне значення яких відоме за значенням, наприклад, один повний оберт дорівнює  $2\pi$  радіанів або  $360^\circ$ . Раніш відмічена неможливість визначення істинного значення є наслідком принципової недосконалості відображення при вимірюванні та причиною неминучості похибки вимірювання. Оскільки істинне значення ФВ нам за умовою невідоме, то похибку вимірювання з останнього рівняння визначити неможливо. Для визначення похибки істинне значення ФВ замінюють дійсним -  $X_D$ .

**Абсолютна похибка вимірювання.** *Різниця між результатом вимірювання і дійсним значенням вимірюваної величини*

$$\Delta X = X - X_D. \quad (2)$$

Абсолютною дану похибку назвали тому, що вона виражена в абсолютних одиницях вимірюваної величини.

**Дійсне значення.** *Значення фізичної величини, знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що його можливо використати замість істинного для даної мети.*

На практиці дійсне значення ФВ може бути знайдено за допомогою багаторазових вимірювань з наступним усередненням результатів спостережень і представленням цього середнього в якості дійсного або за допомогою зразкового засобу вимірювання. Якщо абсолютну похибку взяти з протилежним знаком і алгебрично додати до результату вимірювання, то можна ввести поправку в результати вимірювання.

$$\Delta q = -\Delta X. \quad (3)$$

**Поправка** - значення величини, що алгебрично додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної похибки.

У багатьох випадках числове значення абсолютної похибки не дає правильного уявлення про точність вимірювання, ступінь достовірності одержаного результату. Тому введено більш універсальну характеристику точності у вигляді **відносної похибки**.

**Відносна похибка вимірювання.** *Відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини*

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_D} = \frac{X - X_D}{X_D}. \quad (4)$$

Відносна похибка може виражатися не тільки у відносних величинах, але і в відсотках

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_D} \cdot 100\% = \frac{X - X_D}{X_D} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Аналіз останніх двох рівнянь дозволяє дійти висновку, що чим менша похибка вимірювання, тим вища його точність, отже, тим менша різниця між істинним значенням ФВ і результатом її вимірювань. Із збільшенням похибки зменшується точність.

**Точність вимірювання.** Головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

Кількісно точність  $\Theta$  вимірювання визначається як величина, обернена до відносної похибки

$$\Theta = \frac{1}{\delta} = \frac{X_D}{X - X_D}. \quad (6)$$

Крім точності вимірювань на практиці застосовують також такі характеристики якості вимірювань: правильність, збіжність та відтворюваність вимірювань.

**Правильність вимірювань.** Характеристика якості вимірювання, що відображає близькість до нуля систематичної похибки вимірювання.

**Збіжність результатів вимірювання.** Характеристика якості вимірювань, що відображає близькість повторних результатів вимірювань однієї й тієї ж величини в однакових умовах.

Збіжність результатів вимірювань відображає близькість до нуля випадкової похибки. Збіжність може бути оцінена кількісно дисперсією результатів вимірювань.

**Відтворюваність вимірювань.** Характеристика якості вимірювань, що відображає близькість результатів вимірювань однієї й тієї ж величини, виконаних в різний час, в різних умовах, різними методами і засобами.

Розрізняють надмірну похибку і промах.

**Надмірна похибка.** Похибка вимірювання, що суттєво перебільшує очікувану (в даних умовах) похибку.

**Промах.** Результат вимірювання, що має надмірну похибку.

В методиках оцінки результатів вимірювання промахи вилучають із ряду багаторазових спостережень, як аномальні результати вимірювання.

**За характером зміни** похибки вимірювання поділяють на систематичні і випадкові.

**Систематична похибка.** Складова похибки  $\bar{\Delta}$ , що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї ж величини.

**Випадкова похибка.** Складова похибки  $\overset{\circ}{\Delta}$ , що не прогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї ж величини.

У загальному випадку похибка результату вимірювання містить систематичну і випадкову складові, навіть якщо було введено поправки на систематичні похибки, викликані відомими факторами впливу. Пояснюється це,

по-перше, тим, що значення факторів не залишаються в процесі вимірювання постійними, а по-друге, тим, що на результат вимірювання впливають фактори, дія яких у даному експерименті не передбачалася, або ж фактори, дію яких неможливо врахувати. Оскільки у похибку вимірювання входить випадкова складова, то її слід вважати величиною випадковою. Значення повної похибки вимірювання для будь-якого моменту часу визначається

$$\Delta = \bar{\Delta} + \overset{0}{\Delta}. \quad (7)$$

Використовуючи апарат підсумовування частинних /часткових/ похибок випадкового характеру і часткових /частинних/ похибок систематичного характеру, можна оцінити похибку вимірювання.

**Примітка:** У 1980 році з'явилася рекомендація робочої групи вчених Міжнародного комітету мір і ваг у Парижі, що пропонує розділити похибку результату вимірювань на дві групи - А і В. Складові групи А оцінюються статистичними методами, а складові групи В - іншими методами. Поняття "систематична похибка" признається неточним, тому що може вводити в оману. Вказується, що розходження між групами А і В має скоріше практичне значення, ніж фундаментальне. Рекомендується внесок у загальну похибку похибок обох категорій розглядати як випадковий, що визначає порядок підсумовування цих складових загальної похибки.

Систематичні похибки в свою чергу поділяються за **причиною виникнення** та за **характером зміни у часі**. За причиною виникнення систематичні похибки поділяються на інструментальні, методичні, суб'єктивні, похибки встановлення.

**Похибки встановлення.** До них належать такі, прояви яких зумовлені неправильним застосуванням міри: встановлення приладу з нахилом або відхилення зовнішніх умов від нормальних (наявність зовнішніх полів, відхилення температури від нормальної тощо).

**Суб'єктивні похибки** проявляються в результаті особливостей самого спостерігача. Наприклад, при підрахунку поділок шкали різні люди по-різному оцінюють одне і те саме положення стрілки. Один схильний завжди занижувати показання, інший - завищувати їх.

**Методичні похибки** виникають через недоліки самого методу вимірювання або через неточність застосованих спрощених формул. Скажімо, при непрямому вимірюванні площі перерізу круглого стержня прямим вимірюванням діаметра з наступним обчисленням площі  $S = \pi d^2 / 4$  результат буде із систематичною методичною похибкою через обмежене число знаків і значення числа  $\pi$ .

**Інструментальні похибки** властиві усім вимірювальним приладам і мірам. Ці похибки виникають у результаті допущених при виготовленні і градуванні засобів вимірювання (ЗВ), порушень технології при нанесенні міток на шкали стрілочних приладів, за рахунок різних відхилень при підганянні дійсних значень фізичної величини (ФВ) до номінального. Наприклад, додаткових резисторів, при визначенні коефіцієнта трансформації, площі поршня у манометрів. При використанні таких засобів вимірювальної техніки усі вимірювання будуть супроводжуватися постійною похибкою.



За характером зміни у часі систематичні похибки поділяються на постійні, прогресивні, періодичні.

**Постійні похибки.** До них належать такі, які тривалий час залишаються незмінними і протягом вимірювального експерименту є постійними.

**Прогресивні похибки.** Це такі похибки, які в процесі даної серії вимірювань безперервно зростають або зменшуються, тобто є функцією часу.

**Періодичні похибки.** До їх числа належать систематичні похибки, значення яких є періодичною функцією або часу, або самої вимірюваної величини.

За місцем виникнення похибки вимірювання розподіляються на інструментальні і методичні.

**Інструментальна похибка.** Складова похибки вимірювання, зумовлена властивостями засобів вимірювальної техніки.

**Методична похибка.** Складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю об'єкта вимірювання та його моделі, прийнятою при вимірюванні.

Інструментальна похибка складається з **похибки засобів вимірювання та похибки від їх взаємодії з об'єктом вимірювання.**

**Похибка від взаємодії.** Складова інструментальної похибки, що виникає внаслідок впливу засобів вимірювальної техніки на стан об'єкта вимірювання.

**Похибка засобів вимірювальної техніки.** Складова інструментальної похибки, що виникає внаслідок наявності похибки певного засобу вимірювання.

Похибки засобів вимірювальної техніки в свою чергу поділяються на абсолютні, відносні та зведені, систематичні та випадкові, адитивні, мультиплікативні і нелінійні, основні і додаткові, статичні і динамічні.

**Абсолютною похибкою засобу вимірювань** називають різницю між показом засобу вимірювань та істинним значенням вимірюваної величини за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання

**Відотною похибкою засобу вимірювань** називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до істинного значення вимірюваної величини

**Зведеною похибкою засобу вимірювань** називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до нормованого значення

**Основна похибка** - похибка засобу вимірювальної техніки за нормальних умов його використання.

**Додаткова похибка** - похибка засобу вимірювальної техніки, яка додатково виникає під час використання засобу вимірювань в умовах відхилення хоча б однієї з впливних величин від нормального значення або її виходу за границі нормальної зони значень.

**Адитивна** - складова абсолютної похибки засобу вимірювальної техніки, яка не залежить від вимірюваної величини.

**Мультиплікативна** - складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка пропорційна вимірюваній величині.

**Нелінійна** - складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка нелінійно залежить від вимірюваної величини.

**Систематична похибка засобу вимірювання** – складова похибки засобу вимірювання, яка є постійною під час проведення вимірювань або змінюється за певним законом.

**Випадкова похибка засобу вимірювання** – складова похибки засобу вимірювання, яка під час проведення вимірювань змінюється випадково.

**Динамічна похибка** - складова похибки, що виникає додатково до статичної під час динамічних вимірювань.

**Статична похибка** – похибка засобу вимірювання, що виникає при проведенні статичних вимірювань.

**Імовірність появи випадкових похибок.** При проведенні вимірювань разом з детермінованими процесами виникають стохастичні процеси, для яких не можна передбачити ступінь їхньої дії і характер ФВ, що впливає на результат вимірювань. При оцінці значення ФВ, що вимірюється, говорять не про одне її фіксоване значення, а про область, у якій можуть знаходитися значення вимірюваної ФВ. Отже, при повторних вимірюваннях через зміну характеру і інтенсивності ФВ, що впливають, кожен раз буде з'являтися новий результат вимірювання.

Тому результати вимірювань слід розглядати як випадкові величини, які підкоряються визначеним закономірностям, що з'ясовуються при обробці ряду результатів багатократних вимірювань. Одержані результати відносяться до випадкових величин і характер їх поведінки описується теорією імовірностей і математичної статистики.

Проведемо ряд вимірювань ФВ  $X$ . Під дією випадкових похибок одержимо  $n$  декілька відмінних один від одного результатів, що займуть деякий діапазон значень. Розіб'ємо весь інтервал значень на декілька піддіапазонів, що мають досить малі кроки квантування. Можна згрупувати результати вимірювань у ці піддіапазони, кожний із яких буде характеризуватися кількістю результатів вимірювань, що попали до нього. На основі отриманих результатів побудуємо гістограму розподілу результатів вимірювань у вигляді, зображеному на рис. 2. Висота прямокутників визначається частотою  $p$  появи результатів у кожному піддіапазоні. При зменшенні ширини інтервалів до нуля гістограма перейде в плавну криву, яка називається кривою щільності розподілу імовірностей (рис. 3).

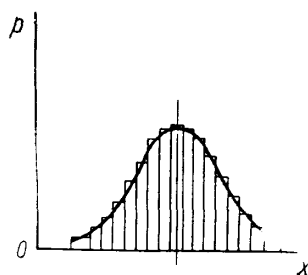


Рисунок 2

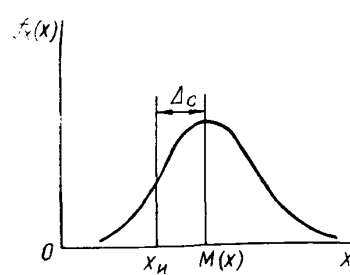


Рисунок 3

Центр розподілу результатів вимірювання називається математичним

сподіванням  $M(X)$  величини  $X$  і наближається, якщо немає систематичної похибки  $\bar{\Delta}$ , до істинного значення вимірюваної фізичної величини  $X_1$ .

Якщо змінити умови вимірювань і застосувати інші ЗВ, то форма гістограми і кривої щільності розподілу змінюється. У випадку застосування більш точного ЗВ крива підніметься в центрі і буде швидше спадати при видаленні від нього і, навпаки, вона зменшиться в центрі, збільшиться розмах коливань результатів вимірювань, коли буде використано менше точний ЗВ.

Припустимо, що виконано ряд із  $n$  рівноточних вимірювань величини  $X$ . Вважаючи (рис. 4), що число вимірів, укладених в інтервалі від  $X$  до  $X + dx$ , пропорційно числу вимірів  $n$ , знайдемо число результатів  $dn$ , які увійшли в інтервал  $dx$ :

$$dn = n f_x(x) dx . \quad (8)$$

У (8) невідомої є  $f_x(x)$  - висота заштрихованого стовпчика, що називають *щільністю розподілу імовірностей випадкової величини  $X$* , тобто *щільністю розподілу результатів вимірювань*.

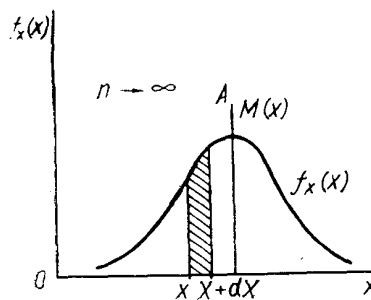


Рисунок 4

Перетворимо (8) до вигляду

$$\frac{dn}{n} = f_x(x) dx . \quad (9)$$

Новий вираз (9) показує імовірність появи результатів вимірювань в інтервалі  $dx$ . Функція  $f_x(x)$  може мати будь-який закон зміни. З її допомогою можна знайти імовірність  $P$  того, що результати вимірювань потраплять в інтервал від  $X_H$  до  $X_B$ , для чого диференціал імовірності  $\frac{dn}{n}$  необхідно проінтегрувати:

$$P = \int_{X_H}^{X_B} f_x(x) dx , \quad (10)$$

де  $X_H$ ,  $X_B$  - нижня і верхня межа інтервалу.

Імовірність попадання результатів вимірювання величини  $X$  в діапазоні з нижньою  $X_H$  і верхньою  $X_B$  межами можна записати так:

$$P(X_H < X < X_B) = \int_{X_H}^{X_B} f_x(x) dx . \quad (11)$$

Ліва частина цього виразу показує тільки імовірність події, що знаходиться в діапазоні від  $X_H$  до  $X_B$ . Права частина також показує імовірність цієї події, але додатково ще вказує щільність розподілу імовірності. Права частина (11) більш повна, ніж ліва. Тому ліву частину можна назвати неповною

формою представлення результатів вимірювання.

**Нормальний закон розподілу.** Якщо випадкова похибка є результатом впливу більш ніж чотирьох впливних ФВ, рівновеликих і незалежних, які викликають похибки, що мають будь-які закони розподілу, то закон розподілу випадкової композиційної похибки наближається до так званого нормального закону розподілу імовірностей.

Нормальний закон розподілу похибок має такі дві властивості:

- число позитивних похибок дорівнює числу негативних - розподіл симетричний;
- малі похибки зустрічаються частіше, ніж великі, поява дуже великих похибок - малоімовірна подія.

Нормальний закон розподілу називають також законом Гауса. Щільність розподілу імовірності представляється формулою

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[x - M(x)]^2}{2\sigma^2}\right), \quad (12)$$

де  $\sigma$  - середнє квадратичне відхилення (СКВ) випадкової величини  $X$ .

Координатою центру ваги фігури, яка обмежена кривою щільності розподілу і віссю абсцис (рис. 4), буде математичне сподівання  $M(X)$  розглянутої сукупності випадкових величин  $X$ , яким є ряд результатів рівноточних повторних вимірювань.

Якщо вилучити з  $M(X)$  істинне значення вимірюваної величини  $X_1$ , то одержимо значення систематичної похибки:

$$\bar{\Delta} = M(X) - X_1. \quad (13)$$

Систематична похибка  $\bar{\Delta}$  в цьому випадку розглядається як постійна величина. Якщо  $\bar{\Delta} = 0$ , то  $M(X) = X_1$ , і математичне сподівання збігається з істинним значенням ФВ, що вимірюється.

Значення випадкових похибок  $\overset{\circ}{\Delta}_i$ , що входять у результат  $i$ -го вимірювання, можна одержати з виразу

$$\overset{\circ}{\Delta}_i = X_i - M(X). \quad (14)$$

Виходячи з цієї залежності, можна, віднімаючи від результатів повторних вимірювань ( $X_1, X_2, \dots, X_i$ ) значення математичного сподівання  $M(X)$ , одержати новий ряд випадкових похибок  $\overset{\circ}{\Delta}_1, \overset{\circ}{\Delta}_2, \overset{\circ}{\Delta}_3$ . Цей ряд має щільність розподілу, що за формою збігається з розподілом величини  $X$ . Його центр буде зміщеним по осі абсцис на величину, рівну  $M(X)$ . Аналітичний вираз для кривої, наведеної на рис. 5, буде мати вигляд

$$f_{\overset{\circ}{\Delta}}(\overset{\circ}{\Delta}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\overset{\circ}{\Delta}^2}{2\sigma^2}\right). \quad (15)$$

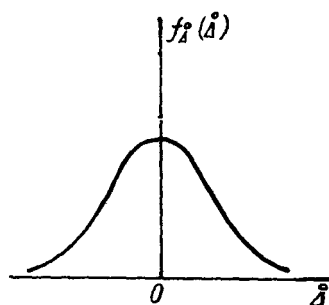


Рисунок 5

Імовірність перебування похибки в інтервалі від  $\overset{\circ}{\Delta}_H$  до  $\overset{\circ}{\Delta}_B$  буде визначатися виразом

$$P(\overset{\circ}{\Delta}_H < \overset{\circ}{\Delta} < \overset{\circ}{\Delta}_B) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\overset{\circ}{\Delta}_H}^{\overset{\circ}{\Delta}_B} \exp\left(-\frac{\overset{\circ}{\Delta}^2}{2\sigma^2}\right) d\overset{\circ}{\Delta}. \quad (16)$$

Формулу закону Гауса часто видозмінюють, ввівши нормовану безрозмірну величину  $g = \overset{\circ}{\Delta}/\sigma$ :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-g}^g \exp\left(-\frac{g^2}{2}\right) dg. \quad (17)$$

Цей інтеграл не виражається через елементарні функції. Для зручності він був протабульований математиком Фішером, що склав таблиці для значень інтеграла:

$$\Phi(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^g \exp\left(-\frac{g^2}{2}\right) dg. \quad (18)$$

У деяких таблицях доводиться подвоєне значення  $\Phi(g)$ . У якості нормованої безрозмірної величини взята величина, рівна  $g$ , що виражається через межі довірчого інтервалу  $\pm a$ , так що  $g = \frac{a}{\sigma}$ .

Інтеграл  $\Phi(g)$  називають нормованою функцією Лапласа. Для крайніх значень справедливі такі рівності:

$$\Phi(-\infty) = -0.5; \Phi(0) = 0; \Phi(\infty) = 0.5.$$

Значення інтеграла  $\Phi(g)$  наводяться у довідниках з математики.

Розглянемо деякі особливості нормального розподілу похибок. На рис. 6 наведено криву нормального розподілу.

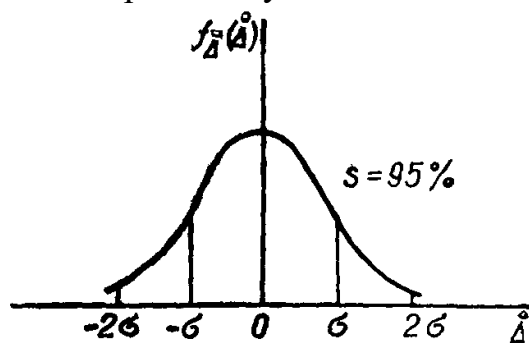


Рисунок 6

Якщо вважати, що вся площа між кривою щільності розподілу і віссю абсцис дорівнює 100%, то площа, обмежена кривою і вертикалями, проведеними через точки з значеннями  $a = \pm 2\sigma$ , буде дорівнювати 95%. Поза цією площею будуть похибки інших 5% результатів. Між кривою і вертикалями, проведеними через точки  $a = \pm 3\sigma$ , і віссю абсцис, буде знаходитися 99,73% площі. З цього випливає що якщо  $a = \pm 3\sigma$ , то імовірність попадання похибки результатів виміру в цей інтервал буде дорівнювати  $P = 0.9973$ .

*Довірчим інтервалом називається інтервал, в який похибка попадає з наперед заданою імовірністю.*

Так для нормального закону розподілу для  $P = 0.9973$  довірчий інтервал дорівнює  $\pm 3\sigma$

**Середнє арифметичне значення результатів багаторазових вимірювань.** Представимо  $i$ -й результат вимірювання у вигляді

$$X_i = X_1 + \bar{\Delta} + \overset{\circ}{\Delta}_i. \quad (19)$$

Якщо провести  $n$  повторних вимірювань і знайти їх суму, то середнє арифметичне значення ряду результатів буде представлятися виразом

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = X_1 + \bar{\Delta} + \frac{\sum_{i=1}^n \overset{\circ}{\Delta}_i}{n}. \quad (20)$$

Як видно з цього виразу, середнє арифметичне значення ряду вимірювань  $\bar{X}$  буде містити  $X_1$ , систематичну похибку і усереднену випадкову складову похибки. При збільшенні числа  $n$ , коли  $n \rightarrow \infty$ , усереднена випадкова похибка

$$\frac{\sum_{i=1}^n \overset{\circ}{\Delta}_i}{n} = 0 \quad \text{і} \quad \bar{X} = X_1 + \bar{\Delta}. \quad (21)$$

Якщо  $\bar{\Delta} = 0$ , то тоді  $\bar{X} \rightarrow X_1$ . З цього випливає, що середнє арифметичне значення ряду вимірювань при збільшенні їх кількості прямує до істинного значення вимірюваної величини  $X_1$  або до її математичного сподівання:

$$\bar{X} = X_1 = M(X). \quad (22)$$

У звичайних умовах, коли  $n \neq \infty$ , ми маємо тільки оцінку математичного сподівання, і в якості такої оцінки приймається середнє арифметичне  $\bar{X}$ .

**Середнє квадратичне відхилення (СКВ) результатів вимірювання.** В функції розподілу імовірності для нормального закону розподілу є символ  $\sigma$ , що називається середнім квадратичним відхиленням. Середнє квадратичне відхилення визначається виразом

$$\sigma = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\overset{\circ}{\Delta}_i\right)^2}{n}}. \quad (23)$$

Однак практичне визначення за формулою  $\overset{\circ}{\Delta}_i = X_i - X_1$  неможливо, тому що невідомі ні значення  $X_1$ , ні математичне сподівання  $M(x)$ . Тому доводиться скористатися середнім арифметичним значенням. Тоді значення СКВ визначається

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (24)$$

Знайдене значення СКВ характеризує будь-яке разове вимірювання, що входить у ряд значень  $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ .

**Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення результатів вимірювань.** Відзначено, що при одержанні виразу для середнього арифметичного значення вимірюваної величини  $\bar{X}$  відбувається усереднення випадкових похибок. Тому  $\bar{X}$  характеризується своїм СКВ  $S$ , що обчислюють за формулою

$$\sigma(\bar{X}) = S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad (25)$$

тобто при збільшенні числа вимірів у  $n$  разів СКВ  $S$   $\bar{X}$  зменшиться в  $\sqrt{n}$  разів.

**Непрямі вимірювання.** Непрямі вимірювання складаються із власне прямих вимірювань ФВ  $X_1, X_2$  і  $X_n$ , які називаються вимірюваними аргументами, і розрахунків, коли знаходять шукану величину  $Z$  і параметри її точності. Шукана величина  $Z$  має такий зв'язок з вимірюваними аргументами:

$$Z = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (26)$$

Розглянемо найбільш простий випадок непрямих вимірювань, коли є лінійна залежність між шуканою величиною  $Z$  і вимірюваними аргументами. Припустимо, що всі вимірювані аргументи не взаємозалежні, вони некорельовані. Припустимо, також, що при проведенні вимірювань виникли тільки випадкові похибки, а систематичні похибки виключені. У цьому випадку :

$$Z_1 + \overset{\circ}{\Delta} = \varphi(X_{11} + \overset{\circ}{\Delta}_1; X_{21} + \overset{\circ}{\Delta}_2; \dots; X_{n1} + \overset{\circ}{\Delta}_n); \quad (27)$$

де  $Z_1$  - істинне значення шуканої ФВ,  $X_{11}, X_{21}$  - істинні значення вимірюваних аргументів.

Щоб оцінити  $\overset{\circ}{\Delta}$ , розкладемо попередній вираз в ряд Тейлора і після спрощень отримаємо

$$\overset{\circ}{\Delta} = m_1 \overset{\circ}{\Delta}_1 + m_2 \overset{\circ}{\Delta}_2 + \dots + m_i \overset{\circ}{\Delta}_i, \quad (28)$$

де значення  $m_1, m_2 \dots$  називають коефіцієнтами впливу похибки прямого вимірювання на сумарну похибку непрямого вимірювання, їх визначають за формулою

$$m_i = \frac{\partial Z}{\partial X_i}. \quad (29)$$

Розглянемо подальшу методику обробки результатів непрямих вимірювань, застосовувану головним чином для випадків, коли є нормальний розподіл щільності результатів.

При багаторазових вимірюваннях значення кожного аргументу знаходимо як середнє арифметичне значення

$$\bar{X}_k = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ki}}{n_k}. \quad (30)$$

Значення шуканої величини знаходимо за формулою

$$Z = \varphi(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n). \quad (31)$$

Вважаючи, що розподіл похибок у всіх аргументів підпорядковано нормальному закону, визначаємо СКВ кожного аргументу.

$$\bar{s}_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ki} - \bar{X}_k)^2}{n_k(n_k - 1)}}. \quad (32)$$

Визначаємо коефіцієнти впливу кожного аргументу:

$$m_k = \frac{\partial Z}{\partial \bar{X}_k}. \quad (33)$$

Нарешті, СКВ для  $Z$  можна знайти за формулою

$$\bar{\sigma}_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X_1}\right)_{X_1=\bar{X}_1}^2 \bar{s}_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial X_2}\right)_{X_2=\bar{X}_2}^2 \bar{s}_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial X_k}\right)_{X_k=\bar{X}_k}^2 \bar{s}_{X_k}^2}. \quad (34)$$

Вважаємо, що закон розподілу сумарної похибки  $Z$  також буде нормальний.

**Теоретичне визначення середньоквадратичного відхилення та математичного сподівання.** Вище вказані вирази застосовуються при обробці результатів експериментальних даних. У випадку, коли відомий аналітичний вираз для закону розподілу випадкової величини, її математичне сподівання

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} X \cdot p(X) dX, \quad (35)$$

де  $p(X)$  – аналітичний вираз закону розподілу випадкової величини  $X$ .

Середнє квадратичне відхилення цієї величини

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (X - M(X))^2 \cdot p(X) dX}. \quad (36)$$

**Композиція законів розподілу.** Особливості законів розподілу випадкових похибок вимірювань полягають в їх великій кількості. Дана обставина пояснюється тим, що результуюча похибка засобу вимірювальної техніки є сумою декількох складових. Якщо ці складові розглядати як випадкові величини, то підсумовування складових похибок зводиться до підсумовування випадкових величин. Але під час підсумовування випадкових величин закон їх розподілу суттєво змінює свою форму.



Закон розподілу суми незалежних випадкових величин  $p(x) = p(x_1 + x_2)$ , що мають відповідні розподіли  $p_1(x_1)$  і  $p_2(x_2)$ , називається композицією і представляється інтегралом згортки

$$p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(z) \cdot p_2(x-z) dz. \quad (37)$$

**Обробка результатів вимірювань з використанням розподілу Ст'юдента.** У випадку, коли вимірювана величина розподілена за нормальним законом і немає можливості провести багаторазові вимірювання, використовують розподіл Ст'юдента. Якщо число вимірювань  $n \leq 30$ , то довірчий інтервал  $\Delta_D$  випадкової похибки при заданих ймовірності  $P$  і середньому квадратичному відхиленні середнього арифметичного  $\sigma(\bar{X})$  визначається за формулою Ст'юдента

$$\Delta_D = \pm k_t \cdot \sigma(\bar{X}), \quad (38)$$

де  $k_t$  - коефіцієнт розподілу Ст'юдента, який залежить від заданої ймовірності  $P$  і числа вимірювань  $n$ . Значення  $\sigma(\bar{X})$  знаходиться за результатами невеликої кількості вимірювань за виразом (25).

Аналітичний вираз для закону розподілу Ст'юдента :

$$p(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{(n-1)\pi} \cdot \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{x^2}{n-1}\right)^{\frac{n}{2}}}, \quad (39)$$

де  $\Gamma$  - гамма-функція;

При  $n > 30$  розподіл Ст'юдента майже не відрізняється від нормального. Значення коефіцієнтів Ст'юдента наведено у табл. 1.

Таблиця 1 - Значення коефіцієнтів Ст'юдента

Кількість вимірювань $n$	Довірча імовірність ( $P = 0.95$ )	Довірча імовірність ( $P=0.99$ )
2	12.7	63.7
3	4.30	9.92
4	2.35	5.84
5	2.78	4.60
6	2.57	4.03
7	2.49	3.71
8	2.36	3.50
9	2.31	3.36
10	2.26	3.25
11	2.20	3.10

**Представлення результатів вимірювань.** Для представлення абсолютної похибки результатів користуються однією зі стандартних форм, згідно з

ДСТУ 2681-94.

**Перша форма.** Результат вимірювання представляється числом  $A$  в одиницях вимірюваної величини. Сумарна абсолютна похибка  $\Delta$  в тих самих одиницях обмежується інтервалом (від нижньої  $\Delta_{\text{н}}$  до верхньої  $\Delta_{\text{в}}$  границі), в якому з вказаною ймовірністю  $P$  знаходиться сумарна похибка (тобто наводиться довірчий інтервал і відповідна йому ймовірність).

**Друга форма.** Наводиться значення результатів вимірювання  $A$ , вказується верхня і нижня ( $\Delta_{\text{с.н}}$ ,  $\Delta_{\text{с.в}}$ ) границі інтервалу, в якому може знаходитись систематична похибка, ймовірність цієї події, дається оцінка СКВ випадкової складової похибки і умовне позначення стандартної апроксимації функції розподілу щільності ймовірності випадкової похибки.

**Третя форма.** Наводиться значення результату вимірювання, вказується СКВ випадкової і систематичної похибки, наводяться умовні назви стандартних функцій розподілу щільності ймовірності.

**Четверта форма.** Наводиться значення результату вимірювання, наводяться повні функції розподілу як для випадкових, так і для систематичних похибок у вигляді відповідних таблиць.

## ХІД РОБОТИ

1. Скласти схему лабораторного макета (рис.7). Ввімкнути живлення після перевірки схеми викладачем.

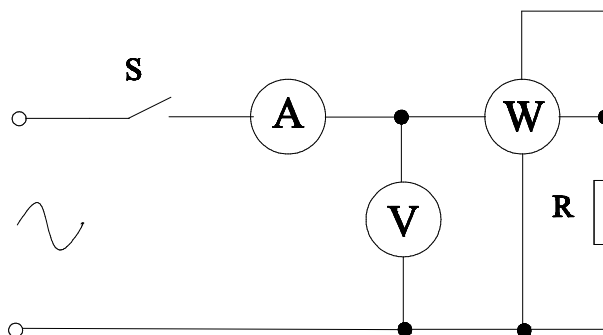


Рисунок 7 - Схема лабораторного макета

2. Дослідження систематичної похибки:

2.1. Встановити прилади строго горизонтально і ретельно встановити механічний нуль, провести вимірювання  $U$ ,  $I$ ,  $P$ ;

2.2. Примусово ввести систематичну похибку в показання амперметра, вольтметра, ватметра. Для цього встановити прилади не горизонтально (під нахилом), змістити механічний нуль приладів. Провести вимірювання  $U, I, P$ ;

2.3. Провести серію вимірювань, щоб переконатись у наявності систематичної похибки цих приладів.

2.4. Визначити відносну систематичну похибку. За дійсне значення вимірюваної величини прийняти результати вимірювання, отримані при вимірюванні приладами, встановленими горизонтально з точно встановленим механіч-

ним нулем. Результати вимірювань занести до табл. 2.

Таблиця 2

Положення приладу	U	$\Delta_U$	I	$\Delta_I$	P	$\Delta_P$
Горизонтальне		–		–		–
Не горизонтальне						

3. Дослідження випадкової похибки:

3.1. Вилучити систематичну похибку, для чого встановити прилади строго горизонтально та ретельно встановити на всіх приладах стрілку на нуль при виключеному живленні;

3.2. Виконати серію з 100 вимірювань U, I, P і результати занести до табл. 3. Для того, щоб дослідити випадкову похибку, необхідно під час проведення серії вимірювань змінювати взаємне розташування вимірювальних приладів, з'єднувальних проводів, кут зору на стрілкові індикатори приладів.

Таблиця 3

Фізична величина	1	2	3	4	...	100
Напруга, U						
Струм, I						
Потужність, P						

4. Провести обробку результатів прямих вимірювань для кожної фізичної величини (U, I, P) і представити результати вимірювань згідно з першою формою ДСТУ. Прийняти, що систематична похибка відсутня, знайти математичне сподівання вимірюваної величини, середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань, середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення результатів вимірювання. Закон розподілу випадкової похибки прийняти за нормальний з нульовим математичним сподіванням. Довірчий інтервал прийняти рівним  $3\sigma$ .

5. Знайти результат та СКВ випадкової складової похибки непрямого вимірювання потужності  $P=U \times I$  за результатами прямих вимірювань напруги та струму. Приймавши закон розподілу похибки непрямого вимірювання за нормальний представити результат вимірювання згідно з першою формою ДСТУ, знайшовши  $\Delta_H$ ,  $\Delta_B$  та імовірність аналогічно п. 4.

6. Провести обробку результатів прямих вимірювань для кожної фізичної величини (U, I, P) використовуючи розподіл Ст'юдента і представити результати вимірювань згідно з першою формою ДСТУ. Кількість вимірювань n задаються викладачем. Результати вимірювань для розрахунків взяти з табл. 3.

7. Проведення обробки результатів прямих і непрямих вимірювань за допомогою програми Numeri.

7.1. Запустіть програму NUMERI (numeri.exe).

7.2. Клавiшею «1» ввійдiть у роздiл «Статистика», а клавiшею «2» у пiдроздiл «Статистичнi оцiнки».

7.3. Ввійдiть в режим введення експериментальних даних (клавiша «1») iз клавiатури (клавiша «3»).

7.4. Установiть необхіднi параметри для введення експериментальних даних iз клавiатури:

-кiлькiсть значень 100;

-крок по X 1;

-початкове значення 1.

Натиснiть клавiшу «F10».

7.5. Введiть iз клавiатури монiтора 100 значень результатiв вимiрювань струму I. Пiсля введення 100-го значення натиснiть клавiшу «F10» i побудуйте графiчну залежнiсть вимiрюваної величини вiд кiлькостi виконаних вимiрювань.

**Примiтка:** Отриману графiчну залежнiсть наведiть у звiтi.

7.6. Клавiшею «Esc» увiйдiть у пiдроздiл «Статистичнi характеристики» i результати розрахункiв програми занесiть до табл.4.

Таблиця 4

Найменування параметра i його розмiрнiсть	Числове значення
Загальна кiлькiсть вимiрювань	
Максимальне значення	
Мiнимальне значення	
Середнє арифметичне значення	
Середнє квадратичне значення	

7.7. Клавiшею «Esc» вийдiть iз пiдроздiлу «Статистичнi характеристики», а клавiшею «5» увiйдiть у меню «Chi<sup>2</sup>-тест». Задайте необхіднi данi i перевiрте гiпотезу про закон розподiлу вимiрюваної величини.

**Примiтка:** Результати розрахунку за Chi<sup>2</sup>-тестом представте у звiтi.

7.8. Клавiшею «Esc» вийдiть iз пiдроздiлу «Статистичнi оцiнки», а клавiшею «1» увiйдiть у пiдроздiл «Функцiї розподiлу».

7.9. Клавiшею «3» виберiть нормальний закон розподiлу, а клавiшею «2» - функцiї розподiлу.

7.10. Задайте необхіднi параметри для побудови закону розподiлу, використавши для цього числовi значення табл. 3. Натиснiть клавiшу «F10».

7.11. Побудуйте графiк закону розподiлу вимiрюваної величини i представте його у звiтi.

7.12. Пункти 4.2...4.11 виконайте для обробки результатiв прямих вимiрювань напруги U.

7.13. Пункти 4.2...4.11 виконайте для обробки результатiв прямих вимiрювань потужностi P.

7.14. Клавiшами «Esc» i «Y» вийдiть iз програми NUMERI.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте поняття абсолютної похибки вимірювання.
2. Що собою представляє дійсне значення фізичної величини?
3. Які Ви знаєте шляхи експериментального визначення дійсного значення фізичної величини?
4. Як визначити поправку?
5. Дайте поняття відносної похибки.
6. Дайте поняття точності вимірювань.
7. Наведіть класифікацію похибок вимірювань
8. Дайте поняття систематичної складової похибки вимірювань.
9. Дайте поняття випадкової складової похибки вимірювань.
10. Що собою представляє інструментальна похибка та які Ви знаєте складові цієї похибки?
11. Яку складову похибки вимірювань називають методичною?
12. Наведіть класифікацію систематичних похибок за двома найбільш суттєвими класифікаційними ознаками.
13. Яку похибку називають похибкою встановлення?
14. Що собою представляє суб'єктивна похибка?
15. Яку складову систематичної похибки називають постійною?
16. Які систематичні похибки називають прогресивними?
17. Що собою представляє періодична складова систематичної похибки?
18. Назвіть три найбільш широко вживаних у практиці вимірювань способи вилучення систематичних похибок.
19. Розкрийте суть методу дворазових спостережень.
20. Розкрийте суть методу поправок.
21. Розкрийте суть методу рандомізації.
22. Наведіть аналітичне та графічне представлення нормального закону розподілу.
23. Як впливають на форму нормального закону розподілу систематична складова похибки і середнє квадратичне відхилення?
24. Чому для оцінки випадкових похибок необхідно виконати багаторазові вимірювання?
25. Як визначити математичне очікування випадкової похибки і яку складову похибки вимірювання воно характеризує?
26. Що собою представляє випадкове відхилення і як воно визначається?
27. Наведіть формулу Бесселя для оцінки експериментального середнього квадратичного відхилення.
28. Як визначити середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного?
29. Покажіть, що багаторазові вимірювання з наступним усередненням результатів є досить ефективним методом зменшення випадкових похибок.
30. Як визначити довірчий інтервал для розподілу Стюдента?
31. Як визначити довірчий інтервал для нормального закону розподілу ви-

падкових похибок?

32. Наведіть одну з форм представлення результатів вимірювань.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. – М.: Мир, 1985.
2. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для ВУЗов /Под ред. Е.М. Душина/. – Л.: Энергоатомиздат, 1987 /Глава 2, с.23-35/.
3. Сурикова Е.И. Погрешности приборов и измерений. – Л.: Издательство Ленингр. ун-та, 1975 /Глава 1, с.3-52/.
4. Поджаренко В.О., Кухарчук В.В. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка. – К.:УМК ВО, 1991 /Глава 3, с.29-46/.
5. Грохольский А.Л. Основы авиационной метрологии: Учебное пособие.- Киев: КИИГА, 1983. – 80 с.

## Лабораторна робота №2

### Вимірювання параметрів сигналів за допомогою електронно-променевого осцилографа

**Мета роботи:** вивчити принцип дії та навчитись користуватись електронно-променевим осцилографом

В результаті виконання лабораторної роботи студенти повинні:

*знати* загальні питання теорії осцилографів загального призначення, основні вузли електронних осцилографів, їх схеми, принципи вимірювання часових та амплітудних значень електричних сигналів;

*вміти* працювати з осцилографами С1-73, з генераторами Г5-54, Г4-18А та застосовувати отримані знання під час виконання вимірювань в інших лабораторіях університету.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

### Електронний осцилограф С1-73

Електронний осцилограф призначений для спостереження та дослідження електричних сигналів у діапазоні частот від постійного струму до десятків мегагерц, шляхом візуального спостереження та вимірювання їх часових і амплітудних параметрів. Схема електронного осцилографа наведена на рис. 1.

Основний елемент електронного осцилографа - електронно-променева трубка (ЕПТ) з електростатичним керуванням променя та люмінесцентним екраном для перетворення досліджуваного сигналу у видиме зображення на екрані, вертикально та горизонтально відхиляльні пластини ЕПТ переміщують електронний промінь в двох взаємно перпендикулярних напрямках, які можна розглядати як координатні осі. Тому для спостереження на екрані електронного осцилографа картину зміни сигналу в часі, напруга цього сигналу подається на вертикально відхиляльні пластини, та одночасно електронний промінь відхиляється з постійною швидкістю в горизонтальному напрямку за допомогою лінійно змінної напруги, прикладеної до горизонтально відхиляючих пластин. Напругу, що відхиляє промінь в горизонтальному напрямку, називають розгортувальною. Після закінчення циклу розгортки розгортувальна напруга приймає первинне значення, при цьому промінь повертається в початкове положення і цикл починається спочатку. Чутливість ЕПТ мала, тому для відхилення променя на весь екран необхідна досить велика напруга (3-200В). Напруги досліджуваного сигналу та розгортки можуть бути малими, тому в каналах вертикального (ВВ) і горизонтального (ГВ) відхилення електронного осцилографа передбачаються підсилювачі. Підсилювач верти-

кального відхилення, на вхід якого подається досліджуваний сигнал, повинен мати великий вхідний опір та малу вхідну ємність, що зумовлює мінімальний вплив підключення осцилографа на електричний режим вимірювального кола; високим та регульованим коефіцієнтом підсилення; широкою смугою пропускання.

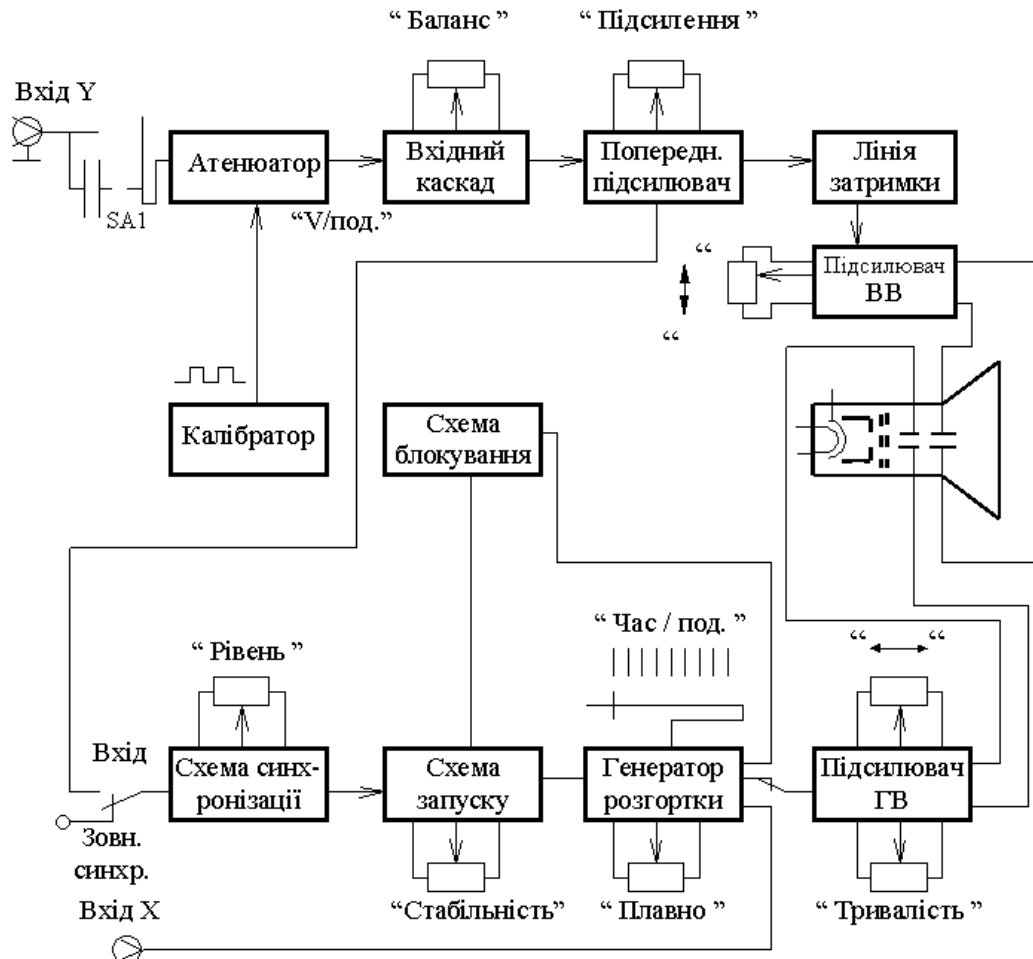


Рисунок 1 - Структурна схема осцилографа

Смугою пропускання підсилювача - діапазон частот, в межах якого вихідна напруга підсилювача падає в  $\sqrt{2}$  від максимального значення при незмінній вхідній напрузі. Чим ширше смуга пропускання частот, тим менше частотні спотворення.

Досліджуваний сигнал подається безпосередньо (вхід Y відкритий, або через роздільний конденсатор вхід - Y закритий) на атенюатор каналу вертикального відхилення осцилографа. За допомогою атенюатора встановлюється необхідне послаблення сигналу, що дозволяє забезпечити роботу підсилювача ВВ в режимі мінімальних нелінійних спотворень. З виходу атенюатора досліджуваний сигнал через вхідний каскад (емітерний або стоковий повторювач) подається на попередній підсилювач. Підсилений сигнал затримується лінією затримки на час, необхідний для спрацьовування



каналу горизонтального відхилення осцилографа, тобто генератора розгортки та підсилювача ГВ, щоб рух променя по горизонталі почався раніше, ніж підсилений сигнал поступить на вертикально відхиляльні пластини ЕПТ.

Вихідний підсилювач ВВ, зібраний за балансною схемою, підсилює затриманий сигнал до значення, необхідного для спостереження на екрані. З його виходу сигнал поступає на вертикально відхиляльні пластини ЕПТ. Стійкість зображення на екрані досягається синхронізацією напруги розгортки з сигналом, що досліджується.

Запуск схеми синхронізації може бути як від внутрішнього, так і від зовнішнього сигналу. Крім того, схема синхронізації дає можливість змінювати рівень та полярність сигналу синхронізації. При роботі осцилографа в режимі внутрішньої синхронізації з каналу вертикального відхилення (до лінії затримки) знімається досліджуваний сигнал та подається на вхід схеми синхронізації. Остання сумісно зі схемою запуску розгортки формує короткі імпульси запуску незалежно від значення та форми сигналу, що поступає на вхід. Завдяки цьому досягається стійкий запуск генератора розгортки. Для запуску генератора розгортки може бути використано і сигнал зовнішній, якщо його подати на вхід схеми синхронізації (зовнішня синхронізація). Генератор розгортки формує пилкоподібну лінійну напругу (рис. 2.) для тимчасової розгортки променя ЕПТ. Час прямого ходу променя  $t_{пр}$  набагато більше часу зворотного ходу  $t_{зв}$ , тому період розгортки  $t_p \approx t_{пр}$ .

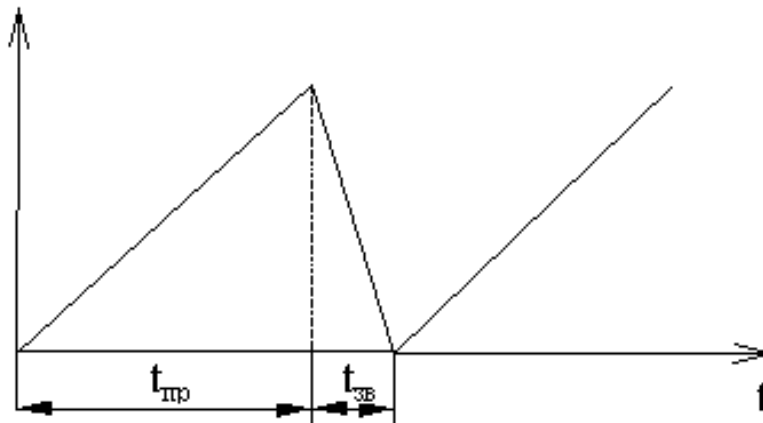


Рисунок 2 - Пилкоподібна напруга генератора розгортки

Вихідний сигнал генератора розгортки поступає на вихідний підсилювач ГВ, призначений для перетворення пилкоподібної напруги, що поступає з генератора розгортки в два протифазних сигнали та підсилення їх до значення, достатнього для відхилення променя по горизонталі на весь екран ЕПТ. Потім сигнал подається на горизонтально відхиляльні пластини. В осцилографі передбачена можливість надходження зовнішнього сигналу на горизонтально відхиляльні пластини при подачі його на вхід Х. При цьому підсилювач ГВ відключається від схеми генератора розгортки та підключається до входу Х. Генератор розгортки може працювати в режимі:

а) автоколивальної періодичної розгортки (схема синхронізації переводиться в режим неперервних коливань, тобто на її вхід не подається сигнал);

б) очікувальної розгортки (запускається тільки при наявності сигналу синхронізації).

Схема блокування забезпечує роботу генератора розгортки в автоколивальному режимі, а також попереджує повторний запуск при зворотному ході розгортувальної напруги. Для збільшення яскравості лінії розгортки використовують прямокутний імпульс підсвічення променя, який з підсилювача подається на модулятор ЕПТ. Тривалість його повинна збігатись з тривалістю зростаючої частини розгортувальної пилкоподібної напруги та служити для відпирання ЕПТ при прямому ході розгортки та запирання її при зворотному. В деяких електронних осцилографіях імпульс підсвічення виробляється генератором розгортки. Для отримання яскравих міток часу в ряді осцилографів є вхід Z. Зовнішній сигнал модуляції через конденсатор подається на модулятор. Чіткість зображення досягається регулюванням яскравості та фокусуванням променя, для цього на модулятор та аноди ЕПТ, подається висока регульована напруга. Для підвищення точності вимірювань в склад осцилографа входять калібратори напруги та часу, призначені відповідно для перевірки вірності масштабу вертикальної (в одиницях напруги) та горизонтальної (в одиницях часу) осей екрана осцилографа. В сучасних осцилографіях в одному калібраторі суміщені калібратори напруги та часу. Калібратор формує прямокутні сигнали типу «меандр» (рис. 3.) встановленого розмаху (500 мВ або 1В) та частоти (1 або 2 кГц). При строго каліброваній напрузі, що подається на вхід осцилографа (коефіцієнт ділення атенюатора 1:1), визначається мінімальний коефіцієнт відхилення тракту вертикального відхилення. Коефіцієнт відхилення  $C_y$  (В/под) - це відношення напруги каліброваного сигналу  $U$  до відхилення  $h$  по вертикалі, тобто  $C_y = U/h$ . Мінімальний коефіцієнт  $C$  в осцилографіях, як правило, дорівнюється 0,01 В/под.

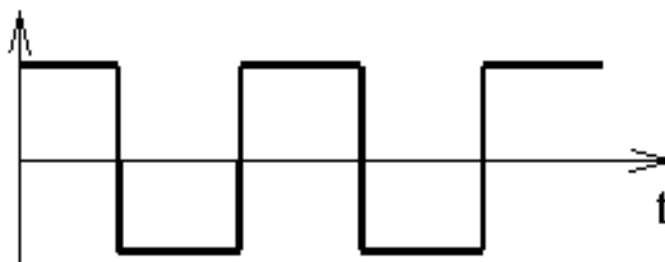


Рисунок 3 - Вихідний сигнал калібратора

Канал вертикального відхилення електронного осцилографа призначений для передачі досліджуваного електричного сигналу на вертикально відхиляльні пластини ЕПТ. До каналу вертикального відхилення входять вхідний пристрій (вхідне коло та атенюатор), підсилювач з лінією затримки.

Електронно-променева трубка. ЕПТ є основним елементом осцилографа. Вона представляє собою скляну колбу, з високим вакуумом, яка має в середині електроди. Пристрій найпростішої трубки з електростатичним керуванням наведено на рис. 4.

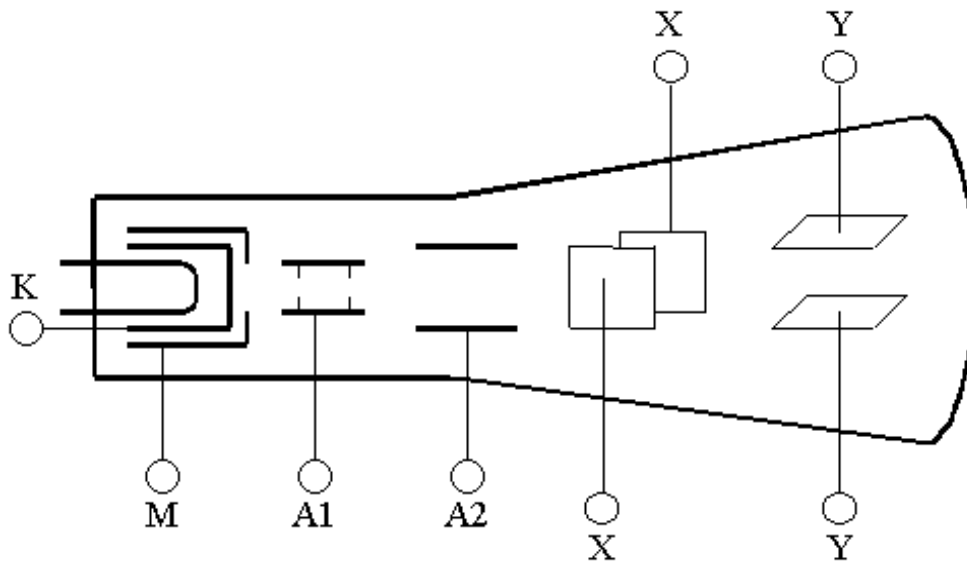


Рисунок 4 - Структурна схема ЕПТ

Електронний пучок випромінюється електронною гарматою, яка складається з катода К, охоплюючого його циліндричним керуючим електродом М та двох анодів  $A_1$  і  $A_2$ . Електрони, які випромінює наганий катод, проходять через малий отвір в керуючому електроді, на який подається від'ємний (по відношенню до катода) потенціал. Змінюючи цей потенціал, керують інтенсивністю електронного пучка. Далі електрони керуються двома послідовно розташованими циліндричними анодами. Перший анод називається *фокусуючим*, оскільки між ним та другим анодом створюється поле спеціальної конфігурації, яке стискає електронний промінь і дає на екрані точку. Другий анод називається *прискорюючим*, оскільки остаточна швидкість електронів при вилітанні з пушки визначається його потенціалом по відношенню до анода. Вилітаючи з електронної гармати електрони пролітають між двома парами відхиляльних пластин, на які безпосередньо чи після підсилення подаються відповідні напруги. Одна пара пластин розташована в горизонтальній площині і викликає відхилення пучка в вертикальному напрямку (вертикально відхиляльні або Y-пластини); друга пара пластин викликає горизонтальне відхилення пучка (горизонтально відхиляльні пластини або X-пластини). Екран ЕПТ, як правило, покривають вілемітом чи сірчистим цинком, які під дією електронів, що попадають на екран, світяться зеленим світлом (область максимальної чутливості ока).

Вхідний сигнал може подаватись на атенюатор двома способами: відкритий вхід осцилографа (рис. 5, а) - вхід, при якому сигнал подається безпосередньо на атенюатор та використовується для передачі сигналу з постійною складовою; закритий вхід осцилографа (рис.5,б) - вхід, при якому сигнал подається через роздільний конденсатор та не пропускає постійної складової.

Атенюатор (подільник напруги) призначено для регулювання коефіцієнта відхилення  $S_y$  по вертикалі шляхом послаблення сигналу для забезпечення постійного значення коефіцієнта відхилення на всьому проміжку смуги

пропускання підсилювача ВВ, майже незмінний великий вхідний опір та малу вхідну ємність при переході від одного коефіцієнта поділу до іншого (рис. б). Атенюатор ( $U_{вхА}$  і  $U_{вихА}$  - відповідно вхідна та вихідна напруги атенюатора), складається з резисторів опороми  $R_1$ ,  $R_2$  та конденсаторів  $C_1$ ,  $C_2$ .

Коефіцієнт ділення атенюатора визначається

$$K_d = Z_2 / (Z_1 + Z_2), \quad (1)$$

де  $Z_1 = R_1 / (1 + j\omega R_1 C_1)$ ;  $Z_2 = R_2 / (1 + j\omega R_2 C_2)$  - комплексні опори ланцюгів  $R_1 C_1$  і  $R_2 C_2$ . Якщо в  $K_d$  підставити значення  $Z_1$ ,  $Z_2$  і прийняти  $R_1 C_1 = R_2 C_2$ , то

$$K_d = C_1 / (C_1 + C_2) = R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2)$$

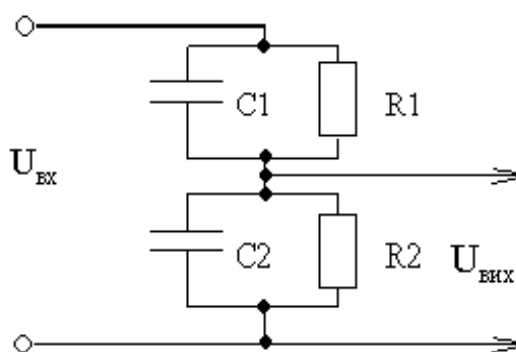
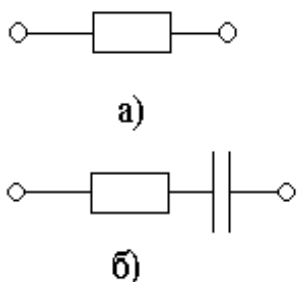


Рисунок 5 - Відкритий та закритий вхід

Рисунок 6 - Атенюатор

Атенюатор працює як омичний в області низьких частот і як ємнісний в області високих частот. Теоретично  $K_d$ , а відповідно і  $C_y$  не залежать від частоти, тому атенюатор називають частотнокомпенсованим для всієї робочої смуги частот осцилографа. Похибка коефіцієнта ділення не перевищує  $\pm 3\%$ .

Вхідний опір (за виключенням низькоомного входу)

$$R_{вх} = R_1 + R_2, \quad (3)$$

Вхідна ємність

$$C_{вх} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2), \quad (4)$$

Підсилювач ВВ призначено для перетворення вимірюваного сигналу в два протифазних сигнали та підсилення їх до значення, якого досить для відхилення променя по вертикалі на весь екран. Для узгодження виходу атенюатора з входом попереднього підсилювача існує вхідний каскад, виконаний за схемою стокового (катодного, емітерного) повторювача. Стоковий повторювач забезпечує великий вхідний опір та малу вхідну ємність.

З виходу стокового повторювача досліджуваний сигнал поступає на балансний підсилювач зі зворотним зв'язком, який має високу стабільність та широкосмужність, великий вхідний та малий вихідний опір. Одне плече трикаскадного балансного підсилювача навантажено на лінію затримки, а з другого плеча знімається сигнал для внутрішньої синхронізації.

Лінія затримки – це однопровідний коаксіальний кабель або штучні довгі лінії. Коаксіальний кабель з хвильовим опором порядку 800-1000 Ом забезпечує затримку досліджуваного сигналу приблизно на 200 нс.

Вихідним каскадом є парафазний підсилювач, який утворює на відхиляльних пластинах дві симетричні протифазні напруги та забезпечує малий вихідний опір. Парафазний підсилювач при будь-якому значенні вихідного сигналу створює незмінний потенціал середньої лінії між пластинами, що перешкоджує появі нелінійних спотворень в осцилограмі сигналу, покращує фокусування.

На рис.7. показана передня панель осцилографа СІ – 73, який використовується у роботі.

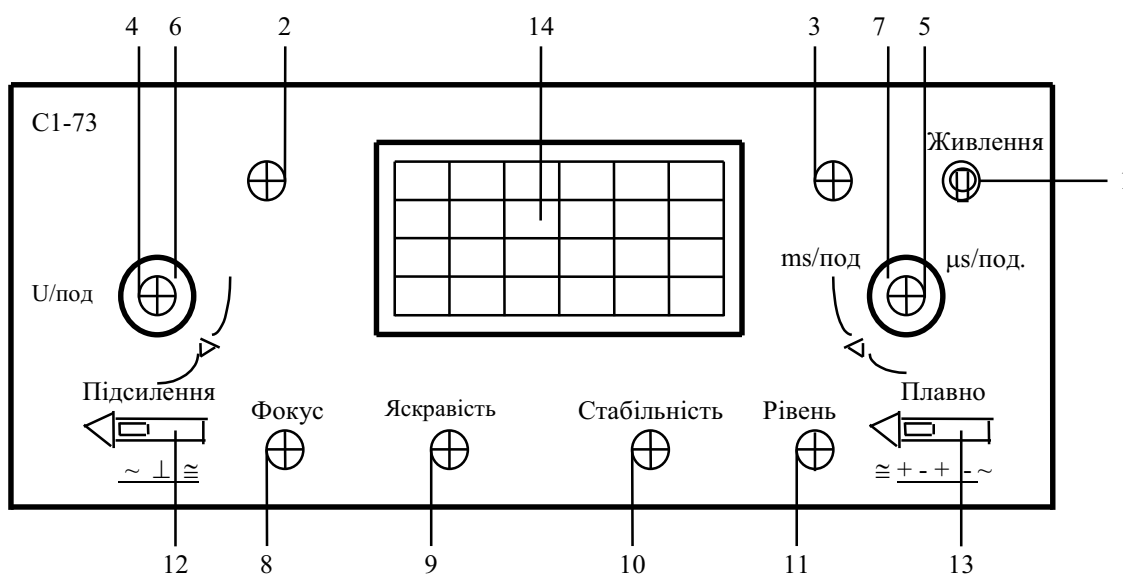


Рисунок 7 - Передня панель осцилографа С1-73

1 - тумблер включення джерела осцилографа; 2- ручка потенціометра переміщення променя по вертикалі; 3 - ручка потенціометра переміщення променя по горизонталі; 4 - ручка потенціометра плавного підсилення по вертикалі; 5 - ручка потенціометра плавної зміни тривалості розгортки; 6 - ручка перемикача «V/под.» - ступінчате встановлення необхідного коефіцієнта відхилення; 7 - ручка перемикача «mS/под. і μS/под.» - ступінчате перемикання тривалості розгортки; 8-11- ручки потенціометрів «Фокус», «Яскравість», «Стабільність» та «Рівень»; 12 - перемикач входу. Має три положення: («≅») відкритий вхід (подається сигнал на схему безпосередньо); («~») закритий вхід (передає сигнал крізь роздільний конденсатор); («⊥») вхідне коло підсилювача приєднується до корпусу; 13 - перемикач синхронізації; 14 - екран ЕПТ

### Генератор імпульсів Г5-54

Генератор - лабораторний прилад, який формує прямокутні імпульси заданої полярності в діапазоні тривалості 0,5.....1000 мкс. Максимальна амплітуда імпульсів на зовнішньому навантаженні 500 Ом не менша 50 В. Частота повторення імпульсів при внутрішньому запуску регулюється від 0,01 до 100 кГц.

Принцип дії приладу пояснюється схемою рис. 8. Задаючий генератор 1 видає тактові імпульси, які надходять на схему зовнішнього і одноразового запуску 2. Працюючи в автоколивальному режимі, задаючий генератор 1 за-

безпечує плавно-ступінчате регулювання частоти повторення імпульсів. В режимі зовнішнього запуску і одноразового пуску приладу задаючий генератор 1 відключається від схеми зовнішнього запуску 2. Сформований за тривалістю та амплітудою сигнал схеми зовнішнього запуску 2 надходить на схему затримки основного імпульсу 3 і на схему формування імпульсів синхронізації 4.

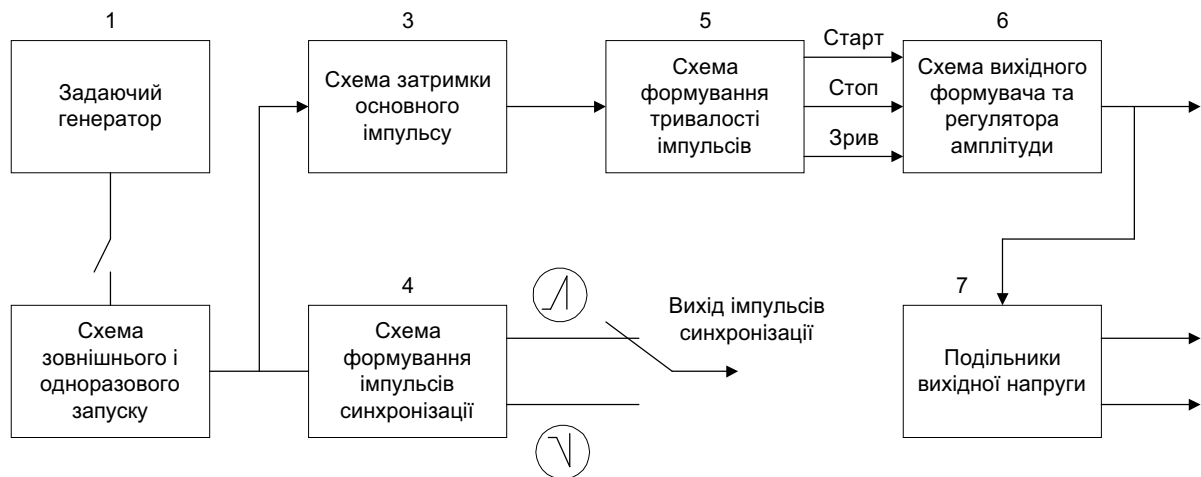


Рисунок 8 - Структурна схема генератора Г5-54

Схема формування імпульсів синхронізації 4 видає синхроімпульси обох полярностей. Через елемент комутування синхроімпульси надходять на вихідне гніздо приладу. Схема затримки основного імпульсу 3 видає імпульс з регульованим часовим зсувом, а також забезпечує режим нульового часового зсуву основного імпульсу відносно імпульсу синхронізації приладу. Імпульс з виходу системи затримки основного імпульсу 3 запускає схему формування тривалості основних імпульсів 5, яка видає стартовий імпульс і стоповий імпульс з регульованим зсувом між ними. Надходячи на схему вихідного формувача та регулювання амплітуди 6, стартовий імпульс визначає фронт вихідного основного імпульсу, а стоповий - його зріз. З схеми формування тривалості основних імпульсів 5 на схему вихідного формувача 6 надходить також імпульс зриву, який збігається за часом з стоповим імпульсом і забезпечує швидке відновлення схеми вихідного формувача в початковий стан. Схема вихідного формувача і регулювання амплітуди забезпечує формування прямокутних імпульсів з вказаними параметрами і плавно-ступінчатим регулюванням їх амплітуди в проміжках від 1 до 100 % максимального значення. Через елемент комутування вихідний імпульс з схеми вихідного формувача 6 надходить або на вихідне гніздо 1:1 або на подільники 7, які забезпечують додаткове послаблення амплітуди імпульсів в 10 і 100 разів. На лицьовій панелі генератора Г5-54 (рис.9.) розташовані кнопки управління, приєднання та контролю:

Тумблер МЕРЕЖА та індикаторна лампа ввімкнення;

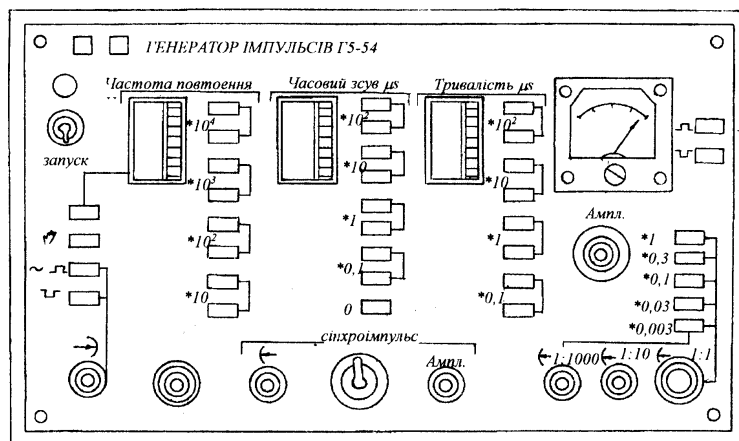





Рисунок 9 - Передня панель генератора Г5-54

Група кнопок ЗАПУСК: при натиснутій кнопці  відбувається запуск зовнішнім від'ємним імпульсом; при натиснутій кнопці  - запуск зовнішнім додатковим імпульсом або синусоїдальним сигналом; при натиснутій кнопці  працює разовий (одноразовий) запуск; при натиснутій верхній кнопці прилад працює в режимі внутрішнього запуску.

Група ЧАСТОТА ПОВТОРЕННЯ містить в собі шкальний пристрій плавного регулювання частоти і перемикач діапазонів частоти (колір кнопки відповідає кольору шкали плавного регулювання, за якою необхідно вести відлік);

Група СИНХРОІМПУЛЬСИ - вихідне гніздо синхроімпульсів, перемикач полярності синхроімпульсів та регулятор амплітуди АМПЛ;

Група ЧАСОВИЙ ЗСУВ містить в собі шкальний пристрій плавного регулювання часового зсуву основного імпульсу відносно синхроімпульсу і перемикач піддіапазонів часового зсуву (колір кнопки відповідає кольору шкали плавного регулювання, за якою треба вести відлік);

Група ТРИВАЛІСТЬ містить шкальний пристрій плавного регулювання тривалості основного імпульсу і перемикач піддіапазону тривалості основних імпульсів (колір кнопки відповідає кольору шкали плавного регулювання, за якою необхідно вести відлік);

Група виходів має вихідне гніздо 1:100, 1:10, 1:1, ручку регулювання амплітуди, перемикач дільника амплітуди основного імпульсу, вольтметр, що показує амплітуду основного імпульсу (відлік за шкалою вимірювального приладу відбувається в вольтах з врахуванням включеного подільника напруги і коефіцієнта ділення вихідного гнізда) і перемикач полярності імпульсів.

Прилад допускає за родом запуску три режими роботи: внутрішній запуск, зовнішній і разовий.

Внутрішній запуск. Натиснути верхню кнопку перемикача ЗАПУСК. Встановити кнопками і шкальним пристроєм ЧАСТОТА ПОВТОРЕННЯ необхідну частоту повторення імпульсів. Кнопками і шкальним пристроєм ЧАСОВИЙ ЗСУВ встановити необхідний часовий зсув основного імпульсу приладу відносно синхроімпульсу. Якщо часовий зсув непотрібен, обов'язко-

во натисніть кнопку "0" перемикача часовий зсув. Кнопками і шкальним пристроєм ТРИВАЛІСТЬ встановити необхідну тривалість основних імпульсів, **ПРИ ЦЬОМУ МІНІМАЛЬНА ШПАРУВАТИСТЬ ПОВИННА БУТИ НЕ МЕНШЕ ДВОХ.** Кнопками  $\square\square$  і  $\square\square$  встановити необхідну полярність. Кнопками подільника амплітуди (x1; x0,3; x0,1, x0,03) і ручкою АМПЛ плавного регулювання амплітуди основних імпульсів встановивши за шкалою вольтметра необхідну амплітуду імпульсів. Якщо необхідна амплітуда не менше 0.5 В, то зовнішнє навантаження повинно підключатися до гнізд 1:1. Якщо необхідна амплітуда менша 0.5 В то зовнішнє навантаження повинно бути підключено до гнізда 1:10 або 1:100.

### Генератор стандартних сигналів Г4-18А

Генератор стандартних сигналів типу Г4-18А призначений для перевірки та налагодження радіоприймальної апаратури. Прилад генерує синусоїдальний сигнал в діапазоні від 100 кГц до 30 МГц. Зовнішній вигляд приладу та розташування кнопок управління наведено на рис. 10.

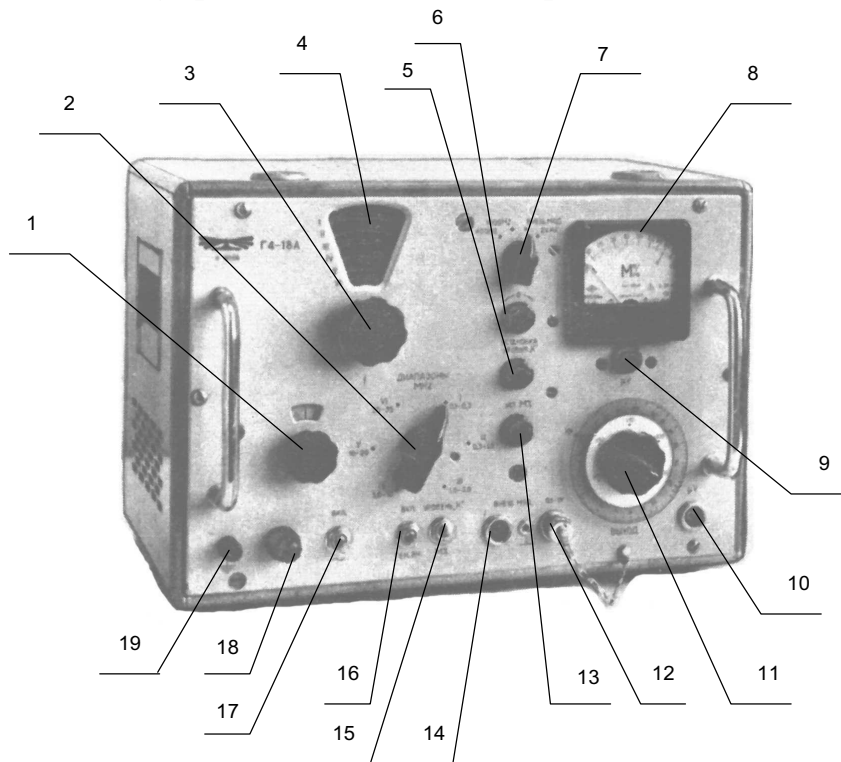


Рисунок 10 - Зовнішній вигляд генератора Г4-18А

1 – ручка плавного встановлення частоти; 2 – ручка переключення піддіапазонів; 3 – ручка грубого встановлення частоти; 4 – шкала частоти; 5 – ручка встановлення «РІВЕНЬ К»; 6 – ручка встановлення нуля; 7 – перемикач роду робіт; 8 – шкала вимірювача коефіцієнта модуляції; 9 – ручка  $\mu\text{V}$ ; 10 - вихід генератора ( $\mu\text{V}$ ); 11 – ручка атенюатора; 12 – вихід генератора (0.1 – 1 V); 13 – ручка встановлення коефіцієнта модуляції (УСТ. М%); 14 – вхід для підключення напруги модулювання; 15 – перемикач “Рівень К” – М%; 16 – тумблер для включення задаючого генератора (ГВЧ.ВКЛ); 17 – тумблер ввімкнення живлення; 18 – індикатор живлення; 19 – клемма заземлення

Перед початком роботи з приладом необхідно ручки операцій встано-



вити в початкові положення. Ручки «УСТАНОВКА РІВНЯ К», «УСТ.М%» повернути вліво до кінця. Візир  $\mu V$ , за допомогою ручки  $\mu V$  (зверху), поставити в крайнє ліве положення. Вимикач живлення і вимикач «ГЕН. ВЧ» поставити в верхнє положення. Генератор може працювати в чотирьох режимах :

- безперервної генерації;
- внутрішньої амплітудної модуляції;
- зовнішньої амплітудної модуляції;
- максимального сигналу.

Після цього прилад може бути підключений до мережі живлення. Для роботи генератора в режимі **безперервної генерації** тумблер «РІВЕНЬ К» - М%» поставити в положення «РІВЕНЬ К». Вставити в гніздо « $\mu V$ » штекер з кабелем. Встановити перемикач роду робіт у положення «ЗОВНІШН. МОД». Ручкою встановлення нуля встановити стрілку вимірювача на 0. Включити вимикач анодної напруги генератора «ГЕН. ВЧ». Установити перемикач «ДІАПАЗОНИ MHz» у положення відповідне необхідному діапазону. Встановити необхідну частоту в межах діапазону і плавно відрегулювати її ручкою плавного встановлення частоти. Обертанням ручки «УСТАНОВКА РІВНЯ К» встановити стрілку вимірювача на риску «К». Візир “ $\mu V$ ” установити вліво до кінця. Поворотом ручок подільника і візира “ $\mu V$ ” зіставити потрібну поділку на лімбі з рисою візира. При повороті ручки “ $\mu V$ ” стрілка індикатора рівня відхиляється вліво, при цьому рівень «К» поправляти не можна. Встановити необхідний множник декадного подільника. Маніпулюючи ручками атенюаторів, ручкою “ $\mu V$ ”, використовуючи той або інший режим подільника, на виході можна одержати необхідну величину вихідної напруги в межах від 0,1 мкВ до 0,1 В.

**Приклад.** Декадний атенюатор у положенні X 100. Риска візира “ $\mu V$ ” збігається з поділкою 32 лімбу атенюатора. Тоді напруга на виході складе **32 X 100 = 3200 (мкв)**.

Для одержання напруги понад 0,1 вольт прилад Г4-18А має друге вихідне гніздо 0,1 - 1V напруга на який надходить прямо з декадного атенюатора. За допомогою атенюатора і ручки “ $\mu V$ ” можна регулювати величину вихідної напруги.

Модуляцією називається процес зміни параметра радіосигналу за законом повідомлення, що передається, тобто інформація повідомлення закладається в параметр сигналу. При амплітудній модуляції обвідна амплітуди змінюється за законом повідомлення, частота і початкова фаза коливання залишається незмінною. Загальний вираз для амплітудно-модульованого сигналу

$$a(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (5)$$

де  $\omega_0, \varphi_0$  - відповідно циклічна частота та початкова фаза несучого високочастотного коливання;  $A(t)$  - функція часу, яка описує закон зміни амплітуди несучого коливання.

На рис. 11. наведено амплітудно-модульований сигнал. Амплітуда високочастотного коливання змінюється за законом повідомлення.

стотної несучої змінюється за законом низькочастотного синусоїдального коливання. Ступінь модуляції характеризує коефіцієнт модуляції, який виражається у відсотках та дорівнює відношенню амплітуди обвідної  $\Delta A_m$  до амплітуди несучого коливання  $A_0$ .

$$M = \frac{\Delta A_m}{A_0} \cdot 100\%. \quad (6)$$

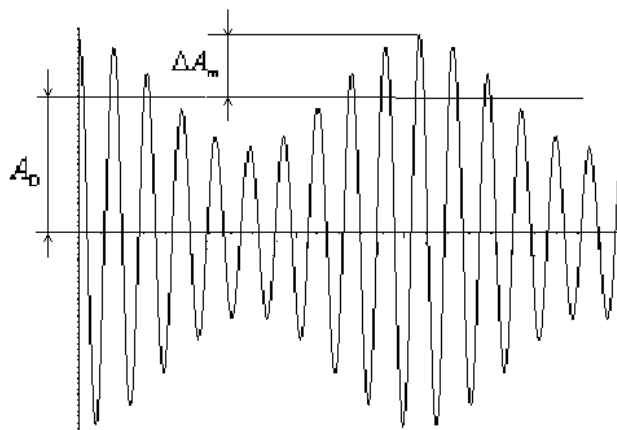


Рисунок 11 - Амплітудно-модульований сигнал.

Для роботи генератора в режимі **внутрішньої амплітудної модуляції**, при знятій напрузі, що модулює, і верхньому («РІВЕНЬ К») положенні тумблера «РІВЕНЬ К» - М%» робиться встановлення стрілки вимірювача рівня вихідного сигналу на контрольну риску (візир "μV" при цьому в лівому крайньому положенні). Потім встановлюють перемикач роду робіт у положення 400 або 1000 Гц, ставлять тумблер «РІВЕНЬ К» - М %» у положення «М%» і безпосередньо за стрілковим індикатором встановлюють необхідний відсоток глибини модуляції в межах від 10 до 95% за допомогою ручки «УСТ. М%».

**Примітка.** При плавному регулюванні вихідної напруги (ручка «μV») необхідно виставляти необхідну глибину модуляції ручкою «УСТ. М %».

При роботі генератора в режимі **зовнішньої амплітудної модуляції** необхідно модулювати генератор від зовнішнього джерела напруги звукової частоти. Звуковий генератор із вихідною напругою приблизно до 100 вольт при навантаженні в 5000 Ом може промодулювати сигнал генератора до  $M=80\%$  при частотах від 50 до 15000 герц.

Для одержання сигналу напругою більше 1 В, що буває необхідний для перевірки деяких вузлів і приладів, використовується **режим максимального сигналу**, перемикач роду робіт ставиться в положення "2V НГ". Напруга високої частоти знімається з виходу «0.1 - 1 V». Отримання такої напруги може бути здійснено тільки в режимі безупинної генерації.

## ХІД РОБОТИ

1. Вимірювання параметрів імпульсних сигналів.

1.1. За допомогою осцилографа С1-73 виміряти параметри вихідних імпульсів генератора Г5-54.

1.1.1. Вивчити методичні вказівки по роботі з осцилографом С1-73 та генератором Г5-54. Включити генератор та осцилограф, виконуючи порядок, що наведений в інструкції;

1.1.2. Встановити тривалість імпульсу 200 мкс і напругу 2 В;

1.1.3. Натиснути чорну кнопку « $\times 10^2$  Частота повторення» і, установлюючи чорну шкалу на оцифровані поділки 3, 4, 5,...10 (300, 400,..., 1000 Гц) з допомогою осцилографа виміряти період повторення імпульсів. Частоту повторення розрахувати за формулою

$$F = \frac{1}{T}. \quad (7)$$

1.1.4. Результати занести до табл. 1.

Таблиця 1

Положення шкали “Частота повторення”, Гц	300	400	500	600	700	800	900	1000
Період повторення імпульсів, мкс								
Частота повторення імпульсів, Гц								

1.2. Виміряти тривалість імпульсів в діапазоні 100...300 мкс для частоти слідування імпульсів 1000 Гц і напруги 5 В, для чого:

1.2.1. Встановити частоту слідування 1000 Гц, напругу 5 В;

1.2.2. Натиснути білу кнопку « $\times 10^2$  тривалість» і встановити білу шкалу на оцифровані поділки 1.0; 1.2; 1.4; ...2.0 (100, 120, 140...200 мкс), за допомогою осцилографа виміряти тривалість імпульсів;

1.2.3. Результати вимірювання занести до табл. 2.

Таблиця 2

Положення ручки “Тривалість”, мкс	100	120	140	160	180	200
Тривалість імпульсу, мкс						

1.3. Виміряти за допомогою осцилографа амплітуду імпульсів позитивної полярності 5, 10, 15 В та негативної полярності 5, 10, 15, 30 В.

1.3.1. Підключити вихід генератора до входу осцилографа.

1.3.2. Встановити вихідну напругу позитивної полярності.

1.3.3. Виміряти амплітуду вихідної напруги за допомогою осцилографа.

1.3.4. Повторити дії п. 2.3.2 і 2.3.3 для негативної напруги генератора.

1.3.5. Результати занести до табл. 3.

Таблиця 3

Напруга на вході генератора, В	+5	+10	+15	-5	-10	-15	-30
Напруга виміряна осцилографом, В							

## 2. Вимірювання параметрів синусоїдальних сигналів

2.1. Згідно з інструкціями, підготувати до роботи генератор Г4-18А, ввімкнути його і подати напругу з виходу « $\mu V$ » генератора на вхід осцилографа.

2.2. Встановити довільну частоту в межах 1-3 піддіапазонів та отримати на екрані нерухоме зображення.

2.3. Встановити послідовно лімб генератора на поділки 100, 80, 60, 40, 20 і з допомогою осцилографа виміряти амплітуду вихідної напруги  $U_m$ , результати занести в табл. 4. Ефективне значення напруги визначити за формулою

$$U_e = U_m / \sqrt{2}. \quad (8)$$

Таблиця 4

Номер виміру	Положення лімбу генератора, под	Амплітуда напруги $U_m$ , В	Ефективне значення $U_e$ , В
1	100		
2	80		
3	60		
4	40		
5	20		

2.4. В кожному з перших трьох піддіапазонів довільно встановити частоту і за допомогою осцилографа виміряти період  $T_x$ .

2.5. Визначити частоту за формулою

$$f_x = 1/T_x. \quad (9)$$

2.6. Визначити похибку

$$\delta = \frac{f_r - f_x}{f_x} \cdot 100\%, \quad (10)$$

де  $f_r$  - встановлена частота.

2.7. Результати занести в табл. 5.

Таблиця 5

Піддіапазон	Частота генератора $f_r$ , кГц	Період $T_x$ , мс	Частота $f_x$ , кГц	Відносна похибка $\delta$ , %
I				
II				
III				

2.8. Зарисувати осцилограми амплітудно-модульованих коливань з частотою модуляції 400 і 1000 Гц та коефіцієнтом глибини модуляції 40 і 60% на несучій частоті 2 МГц. Для цього перемикач роду роботи встановити в положення “400 Гц”, частоту генератора - 2 мГц (несуча частота). Тумблер “Рівень К-М%” встановити в положення “М%” (нижнє положення). Ручкою «Уст.М%» встановити по стрілковому приладу коефіцієнт глибини модуляції - 40% і зарисувати осцилограму. Потім встановити коефіцієнт модуляції - 60% і також зарисувати осцилограму. Аналогічні дії виконати для частоти модуляції 1000 Гц. Всі осцилограми зарисувати в одному масштабі, тобто не змінюючи тривалість розгортки та підсилення осцилографа. Для усіх чотирьох випадків провести вимірювання коефіцієнта модуляції за допомогою осцилографа і навести результати вимірювання.

3. Отримання емпіричної статичної характеристики за допомогою програми Numeri.

3.1. Запустіть програму і за допомогою клавіші «3» ввійдіть у розділ «Інтерполяція».

3.2. Ввійдіть в режим введення експериментальних даних «Введення даних із клавіатури».

3.3. Установіть необхідні параметри для введення даних:

- кількість пар значень 8;
- крок по X 100;
- початкове значення 300.

3.4. Введіть 8 вимірних осцилографом значень частоти, натисніть клавішу «F10» і побудуйте експериментальну статичну характеристику осцилографа. Отриману залежність представте у звіті.

3.5. Клавішею «Esc» ввійдіть у підрозділ «Поліном», задайте степінь полінома 1 і натисніть клавішу «F10».

3.6. Запишіть розраховані програмою коефіцієнти  $a[0]$  і  $a[1]$ .

3.7. Клавішею «Esc» ввійдіть у підрозділ «Дані» і клавішею «1» задайте режим введення даних з інтерпретатора формул.

3.8. Задайте:

- емпіричну залежність виду  $y=a[0]+a[1]*x$ ;
- початкове значення 300;
- кінцеве 1000;
- крок 100.

3.9. Натисніть клавішу «F10» і побудуйте емпіричну статичну характеристику. Отриману графічну залежність наведіть у звіті.

4. Оцінка похибок вимірювання за допомогою програми Numeri.

4.1. Ввійдіть в режим введення експериментальних даних «Введення даних із клавіатури». Установіть необхідні параметри для введення даних:

- кількість пар значень 8;
- крок по X 100;
- початкове значення 300.

- 4.2. Введіть 8 значень розрахованих абсолютних похибок і побудуйте залежність абсолютної похибки від дійсного значення частоти в середовищі програмного забезпечення NUMER1. Отриману залежність представте у звіті.
- 4.3. Введіть 8 значень розрахованих відносних похибок і побудуйте залежність абсолютної похибки від дійсного значення частоти в середовищі програмного забезпечення NUMER1. Отриману залежність представте у звіті.
- 4.4. Визначити абсолютну і відносну похибки вимірювання періоду і результати розрахунків занесіть до табл. 6.

Таблиця 6

Дійсне значення, мкс	100	120	140	160	180	200
Абсолютна похибка, мкс						
Відносна похибка, %						

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Наведіть класифікацію електронно-променевих осцилографів.
2. Представте узагальнену структурну схему електронно-променевого осцилографа.
3. На які відхиляльні пластини подається досліджуваний сигнал?
4. На які відхиляльні пластини подається сигнал розгортки?
5. Призначення підсилювачів вертикального і горизонтального відхилення.
6. Призначення атенюатора.
7. Функціональне призначення лінії затримки.
8. Які види синхронізації ви знаєте?
9. Функціональне призначення генератора розгортки.
10. Наведіть форму сигналу на виході генератора розгортки.
11. Два режими роботи генератора розгортки.
12. Призначення калібратора напруги.
13. Призначення калібратора часу.
14. Яку картину спостерігають на екрані осцилографа, якщо на входи X і Y подано нульовий рівень сигналу?
15. Яку картину спостерігають на екрані осцилографа, якщо на вхід Y подано нульовий рівень сигналу, а на вхід X сигнали з виходу генератора розгортки?
16. Яку картину спостерігають на екрані осцилографа, якщо на вхід Y подано періодичний сигнал, а на вхід X нульовий рівень сигналу?
17. Наведіть методику вимірювання амплітуди за допомогою електронно-променевого осцилографа.
18. Наведіть методику вимірювання частоти за допомогою електронно-променевого осцилографа.
19. Наведіть методику вимірювання тривалості імпульсу за допомогою електронно-променевого осцилографа.
20. Як визначити чутливість електронно-променевого осцилографа?

21. Як у середовищі програмного забезпечення NUMERl отримати емпіричну статичну характеристику осцилографа?
22. Як оцінити абсолютну і відносну похибку вимірювання частоти за допомогою електронно-променевого осцилографа?
23. Як оцінити абсолютну і відносну похибки вимірювання тривалості імпульсу за допомогою електронно-променевого осцилографа?
24. Переваги та недоліки світлопроменевих осцилографів.
25. Наведіть узагальнену структурну схему світлопроменевого осцилографа.
26. Поясніть принцип дії світлопроменевого осцилографа.
27. Наведіть структурну схему магнітоелектричного осцилографічного гальванометра.
28. Виведіть рівняння перетворення осцилографічного гальванометра.
29. Які елементи осцилографічного гальванометра виконують функції розгортки?
30. Яку картину спостерігають на екрані світлопроменевого осцилографа, якщо на вхід гальванометра подано нульовий рівень сигналу, а барабан розгортки нерухомий?
31. Яку картину спостерігають на екрані світлопроменевого осцилографа, якщо на вхід гальванометра подано нульовий рівень сигналу, а барабан розгортки обертається?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов (Под ред. Е.М. Душина. -Л.: «Энергоатомиздат, 1987 (Глава 9, с. 261-267).
2. Драхслер Р. Основы электроизмерительной техники. -М: «Энергоатомиздат», 1982 (Глава 2, с. 171-182).
3. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов. Под ред. Винокурова В.И. -М.: Высшая школа, 1986 (Глава 6, с. 114-141).
4. Измерения и компьютерно-измерительная техника: Учеб. пособие ( В.А. Поджаренко, В.В. Кухарчук. К.: ЕМК ВО, 1991 (Глава 12, с. 97-104).

## Лабораторна робота № 3

### Вимірювання електричних величин компенсатором постійного струму

**Мета роботи** - вивчити метод зрівноваження прямого вимірювання напруги, струму, опору, потужності та порядок проведення повірки міліамперметра за допомогою компенсатора постійного струму.

В результаті виконання роботи студенти повинні:

*знати* всі методи вимірювань, сутність та переваги методу зрівноваження, принцип дії та основні переваги компенсаторів постійного і змінного струму, сутність повірки приладів, будову компенсатора;

*вміти* застосовувати отриманні знання при роботі в лабораторії, працювати з компенсатором постійного струму, проводити повірку міліамперметра.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Метод вимірювання** - сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципу вимірювань для створення вимірювальної інформації.

Серед різних видів вимірювань фізичних величин (ФВ) найточнішими за інших рівних умов є пряме вимірювання. Розглянемо класифікацію методів прямих вимірювань.

**Диференційний (різницевий) метод.** Метод вимірювання, за яким невелика різниця між вимірюваною величиною та вихідною величиною одноканальної міри вимірюється відповідним засобом вимірювання.

Він реалізується шляхом подання на один вхід вимірювальної схеми порівняння (ВСП) величини  $X$ , що вимірюється, а на другий вхід, через масштабний вимірювальний перетворювач, одиниці ФВ  $N$  від міри  $M$ , однорідної з ФВ  $X$ , що вимірюється.

На виході ВСП видається різниця  $\Delta X = X - kN$ , де  $k$  - коефіцієнт перетворення масштабного перетворювача. Схема проведення такого порівняння показана на рис. 1.

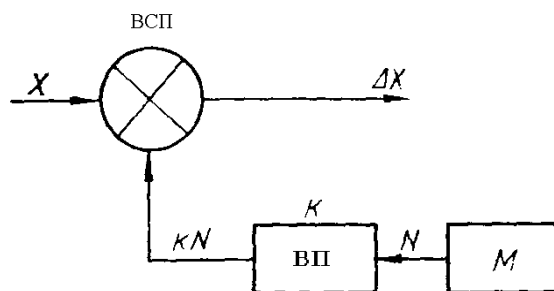


Рисунок 1 - Структурна схема для здійснення диференційного методу вимірювання



При проведенні вимірювань диференційним методом варіацією значень  $N$  або  $k$  домагаються, щоб  $\Delta X$  була невелика і виконувалася нерівність  $\Delta X < X$ . Значення сигналу на виході ВСП пропорційного  $\Delta X$  вимірюється відповідним приладом.

Похибка диференційного порівняння визначається головним чином похибкою відтворення одиниці ФВ мірою  $N$ , похибкою коефіцієнта  $k$  масштабного перетворювача і похибкою приладу, що визначає  $\Delta X$ .

У випадку, коли значення  $\Delta X < X$ , її визначення навіть низькоточним приладом буде вносити незначну частину в загальну похибку порівняння. Застосування масштабного перетворювача в ряді випадків необов'язкове. Зрівноважування можна здійснити, застосовуючи регульовану міру  $N$  або набір мір, сумарне значення ФВ у яких близьке до значення  $X$ . У останньому випадку точність порівняння підвищується, тому що на неї перестає впливати параметр масштабного перетворювача.

**Метод одного збігу (метод ноніуса).** Метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вихідних величин двох багатозначних нерегульованих мір, з різними за значенням ступенями, нульові позначки яких зсунуті між собою на вимірювану величину.

Прикладом методу одного збігу є вимірювання довжини за допомогою двох лінійок з поділками, ціни яких знаходяться в певному відношенні. Вимірювання часу за допомогою двох послідовностей періодичних імпульсів, періоди яких знаходяться в певному відношенні.

При вимірюванні нульові відмітки мір зсувають на вимірювану величину  $X$ , а потім визначають її числове значення за номером найближчої відмітки, що збігається. Таким чином, завдяки надлишковості методу ноніуса (замість однієї багатозначної нерегульованої міри використовується дві), ступінь квантування «зменшується» в  $n$  разів. Це можна трактувати також як «збільшення» розміру величини  $X$  в  $n$  разів. Метод ноніуса використовується тоді, коли неможливо створити міру з надто малими ступенями (наприклад лінійку з поділками 0.1 мм).

**Метод подвійного збігу (метод коінциденції).** Метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням двох квантованих фізичних величин: вимірюваної та відтворюваної багатозначною нерегульованою мірою.

Прикладом методу подвійного збігу є вимірювання зістикованих інтервалів часу або зістикованих відрізків довжини за допомогою відповідно: послідовності періодичних імпульсів з відомим значенням їх періоду або лінійки з відомим значенням поділок.

**Метод зіставлення.** Метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вимірюваної величини з усіма вихідними величинами багатозначної нерегульованої міри.

Прикладами даного методу є вимірювання довжини лінійкою з поділками, вимірювання інтервалу часу годинником.

Цей метод, зокрема, забезпечує максимальну швидкодію вимірювання електричної напруги та механічних переміщень.

Його покладено в основу побудови цифрових хронометрів, частотомірів, надшвидкодіючих цифрових вольтметрів, цифрових вимірювачів індуктивності.

**Метод заміщення.** Метод непрямого вимірювання з багаторазовим порівнянням до повного зрівноваження вихідних величин вимірювального перетворювача з почерговим перетворенням ним вимірюваної величини та вихідної величини регульованої міри.

Цей метод відрізняється від раніше розглянутих тим, що порівняння шуканої величини  $X$  із мірою  $N$  роблять вимірювальним приладом, до входу якого в різний час по черзі підключають об'єкт вимірювання і міри. Метод іноді називають також методом різночасного порівняння. Його широко використовують при точних вимірюваннях. Для його реалізації необхідно мати вимірювальний прилад і набір мір, або регульовані міри, або масштабні ВП.

Вимірювання методом заміщення проводять у два етапи з часовим інтервалом між ними. На першому етапі в момент часу  $t_1$  до вимірювального приладу підключають досліджуваний об'єкт і ФВ, що вимірюється. Елементи пам'яті приладу запам'ятовують значення ФВ, що вимірюється (або показання стрілкового приладу)  $\alpha_1$ .

На другому етапі вимірювань в момент часу  $t_2$ , до приладу підключають регульовану міру або набір мір і зміною їхнього сумарного значення або зміною значення коефіцієнта  $k$  домагаються рівності їх сумарного дійсного значення значенню ФВ, що вимірюється. Момент рівності фіксується вимірювальним приладом, коли стрілка на його шкалі встановлюється на початкове показання  $\alpha_1$ . У цьому випадку вважають, що  $X = N \cdot k$  або  $X = \sum N$ , а показання вимірювального приладу  $\alpha_1$ , яке б воно не було за значенням, не беруть до уваги. Від вимірювального приладу порівняння, застосовуваного в цьому експерименті, потрібно наявність тільки короточасної стабільності основних параметрів. Тому для проведення даного експерименту можна використовувати прилад із підвищеною чутливістю і цим понизити відлікову похибку.

На основі описаних методів можуть створюватися різні комбіновані методи. Розглянуті методи використовуються частіше усього при проведенні метрологічних досліджень, а також при вимірюваннях за допомогою автоматичних ЗВ, у яких на основі вищеописаних методів створюється алгоритм роботи пристрою.

**Метод безпосередньої оцінки.** Розглянутий раніше диференційний метод може перейти в метод безпосередньої оцінки, коли значення  $N = 0$ . У цьому випадку значення  $\Delta X = X$ . З цієї рівності випливає, що всі значення величини  $X$ , що вимірюється, відраховуються за шкалою приладу, що визначає значення  $\Delta X$ . Методом безпосередньої оцінки називають метод вимірювання за допомогою ЗВ, що на своєму відліковому пристрої видає всі значення ФВ, що вимірюється.

Зняття з відлікового пристрою всього значення ФВ, що вимірюється, є перевагою цього методу вимірювання перед іншими методами. Метод безпосередньої оцінки також найменш трудомісткий і найбільш зручний у роботі.

Прилади, що реалізують метод безпосередньої оцінки, можуть бути аналоговими стрілковими і цифровими. При проведенні вимірювального експерименту за допомогою аналогових приладів є ФВ  $X$ , що вимірюється, і вимірювальний стрілковий прилад, що показує значення ФВ. На перший погляд здається, що в цьому випадку порушене саме поняття «вимірювання», тому що не робиться порівняння ФВ з іншою ФВ, прийнятою за одиницю порівняння. У дійсності це не так. І в цьому випадку робиться таке порівняння, але різночасно.

При виготовленні приладу безпосередньої оцінки до його входу підключають міри, що відтворюють ряд значень ФВ. Ці значення прилад «запам'ятовує» за допомогою шкали або механізму і у процесі подальшої експлуатації «зберігає» ці значення у своїй «пам'яті». Таким чином, при проведенні вимірювань методом безпосередньої оцінки відбувається порівняння величини  $X$ , що вимірюється, з «запам'ятованим» значеннями одиниці ФВ  $N$ . Ця операція дуже близька до вище розглянутого методу збігу. При проведенні вимірювань методом збігу відбувається *одночасне* порівняння ФВ, що вимірюється, з одиницями ФВ. У методі безпосередньої оцінки, реалізованому в стрілковому приладі, це здійснюється *різночасно*.

Різночасність порівняння, необхідність зберігати значення ФВ, роблять стрілкові прилади найнижкоточніми ЗВ. Крім того, усі величини, що вимірюються, відраховуються за шкалою приладу, що має обмежену роздільну здатність і значну відлікову похибку. Все це вносить похибки в загальну похибку приладу. Слід зазначити, що від цих недоліків вільні цифрові прилади.

**Метод зрівноваження.** Метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини та величини, що відтворюється мірою, яка регулюється, до їх повного зрівноваження.

Якщо дещо видозмінити хід вимірювального процесу при здійсненні диференційного методу вимірювань (рис. 1), то можна так підібрати сумарне одиначне значення мір або так їх відрегулювати, що на виході ВСП значення  $\Delta X$  буде дорівнювати нулю. У цьому випадку диференціальний метод переходить у метод зрівноваження, а вимірювальна система порівняння - компаратор ВСП - виконує функції нуль-органа, задача якого фіксувати момент рівності  $X = N \cdot k$ , коли  $\Delta X = 0$ . Якщо при методі зрівноваження був використаний тільки набір мір, то похибка вимірювання шуканого значення величини  $X$  методом зрівноваження буде практично дорівнювати похибці міри  $N$ . Цей метод порівняння має найвищу точність. Нуль-орган практично не вносить похибки в результати порівняння. Якщо був застосований ще і масштабний вимірювальний перетворювач (ВП), то його похибка додається до похибки міри  $N$  і їхня сума визначить похибку вимірювання шуканої величини. Прикладом методу зрівноваження є вимірювання електричної напруги компенсатором постійного струму.

Компенсатор постійного струму, за допомогою якого реалізується метод зрівноваження, досліджується у лабораторній роботі.

Схема компенсації напруги зміню робочого струму наведена на рис.2. Вимірювана напруга  $U_x$  компенсується відомою напругою  $U_k$ , що одержується у вигляді падіння напруги певного робочого струму  $I_p$  на резисторі  $R_k$ , значення якого відоме з потрібною точністю. Змінюючи робочий струм  $I_p$  змінним резистором  $R_y$ , домагаються рівності вимірюваної напруги  $U_x$  і  $U_k$  – напруги компенсування. Момент рівноваги характеризується нульовими показаннями гальванометра  $\Gamma$ .

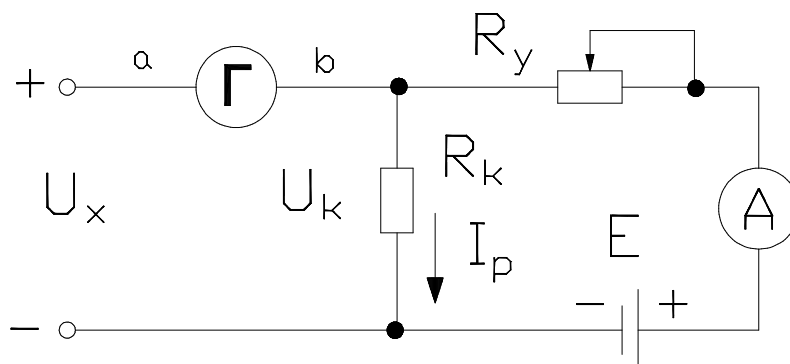


Рисунок 2 - Схема компенсації напруги зміню робочого струму

Напругу компенсування  $U_k = I_p R_k$  можна змінювати також, змінюючи опір резистора  $R_k$  при незмінному робочому струмі. Схема компенсації напруги зміню опором резистора наведена на рис. 3. Момент компенсації характеризується нульовими показаннями гальванометра  $\Gamma$ .

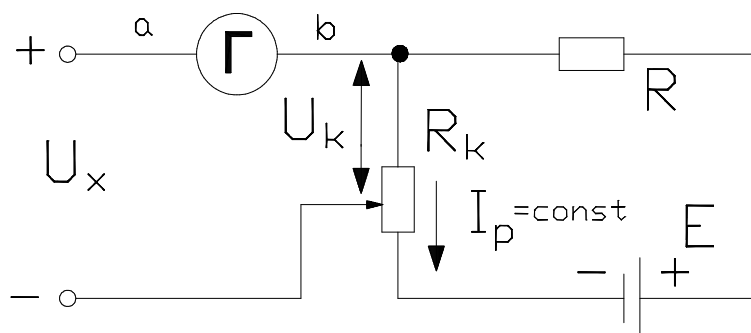


Рисунок 3 - Схема компенсації напруги зміню опором резистора

Широко застосовуваний метод зрівноваження реалізується за допомогою мостових і компенсаційних схем. Компенсатори можуть бути постійного та змінного струму. На рис. 4. наведено схему компенсатора постійного струму, який використовується у роботі і у якому поєднуються дві вищерозглянуті схеми компенсації. Компенсатор використовують для точного вимірювання напруги до 1,2 В. Для вимірювання більших напруг використовують зразкові подільники напруги. Шляхом непрямих вимірювань можливо виміряти струм, опір та потужність.

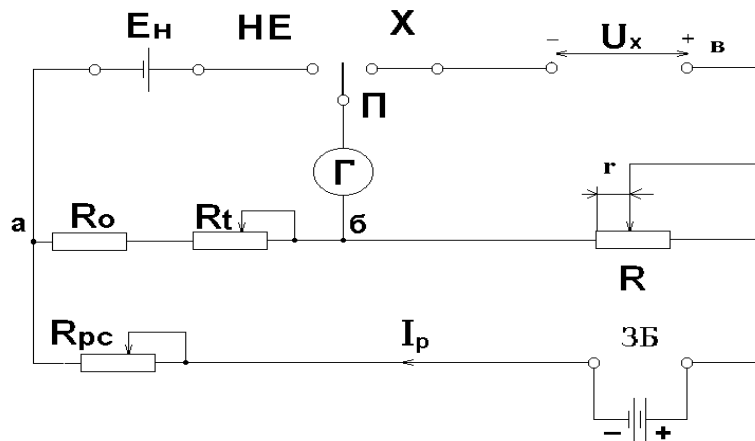


Рисунок 4 - Схема компенсатора постійного струму

Основними елементами схеми компенсатора є: Г - гальванометр; П - перемикач, що має три положення. "НЕ" (нормальний елемент), "Х" - вимірювана напруга та середнє (нейтральне) положення; ЗБ - зовнішня батарея;  $R_{pc}$  - змінний резистор для встановлення робочого струму; R - магазин опорів;  $R_0$  - зразковий опір;  $E_H$  - нормальний елемент - джерело ЕРС, значення якої відоме з точністю до п'ятого знаку після коми. Значення ЕРС при температурі  $20^\circ\text{C}$   $E_{20}$  вказано в паспорті. Для нормального елемента, що використовується в даній лабораторній роботі  $E_{20} = 1,01860 \text{ В}$ .

При температурі, відмінній від  $20^\circ\text{C}$ , ЕРС (В) визначають за формулою:

$$E_t = E_{20} - 40.6 \cdot 10^{-6} (t-20) - 0.95 \cdot 10^{-6} (t-20)^2 - 0.01 \cdot 10^{-6} (t-20)^3, \quad (1)$$

де  $E_t$ ,  $E_{20}$  - ЕРС НЕ відповідно при температурі  $t$  і  $20^\circ\text{C}$ .

Для того, щоб робочий струм не змінювався при зміні ЕРС НЕ, зумовленої відхиленням температури, необхідно змінювати опір зразкового резистора  $R_0$ . Для цієї цілі використовують змінний резистор  $R_t$ , тобто  $R_t$  служить для введення поправки в зразковий опір при відхиленні температури від нормальної. Шкалу цього резистора градуують в вольтах.

Проведення вимірювань складається з двох етапів. По-перше встановлюється певне значення робочого струму  $I_p$ . Для цього перемикач П встановлюють в положення "НЕ" і, змінюючи величину змінного резистора  $R_{pc}$ , досягають нульового показання гальванометра. У цьому випадку :

$$E_t = U_{a\delta} = I_p (R_0 + R_t), \quad (2)$$

Робочий струм в процесі наступних вимірювань не змінюється. У цьому випадку відбувається компенсація ЕРС нормального елемента падінням напруги на резисторах  $R_0$  та  $R_t$  шляхом зміни робочого струму у відповідності з схемою на рис. 2.

По-друге, після встановлення робочого струму переходять безпосередньо до вимірювання  $U_x$ . Для цього перемикач П встановлюють в положення "Х" і, змінюючи опір резистора R, досягають нульових показань гальванометра. У цьому випадку  $U_x$  дорівнює різниці потенціалів між точками б та в,

тобто

$$U_x = U_{a\delta} = I_p \cdot r = -\frac{E_t}{R_0 + R_t} \cdot r, \quad (3)$$

де  $r$  – опір магазину опорів між точками б та в. У цьому випадку відбувається компенсація вимірюваної напруги падінням напруги на резисторі  $R$  шляхом зміни цього опору у відповідності з схемою на рис. 3.

Висока точність вимірювань зумовлена тим, що  $E_t$  і зразковий опір відомі з високою точністю. Точність компенсації залежить від чутливості гальванометра, яка може бути досить великою. Оскільки робочий струм для даного засобу вимірювання величина постійна, то напруга  $U_{a\delta}$  прямо пропорційна  $r$ , що дає змогу відградувати магазин опорів не в омах, а в вольтах.

Компенсатор змонтований в дерев'яному ящику, на металеву панель виведено всі елементи керування та затискачі, розташування яких наведено на рис. 5.

*Примітка: гальванометр знаходиться біля компенсатора в окремому корпусі.*

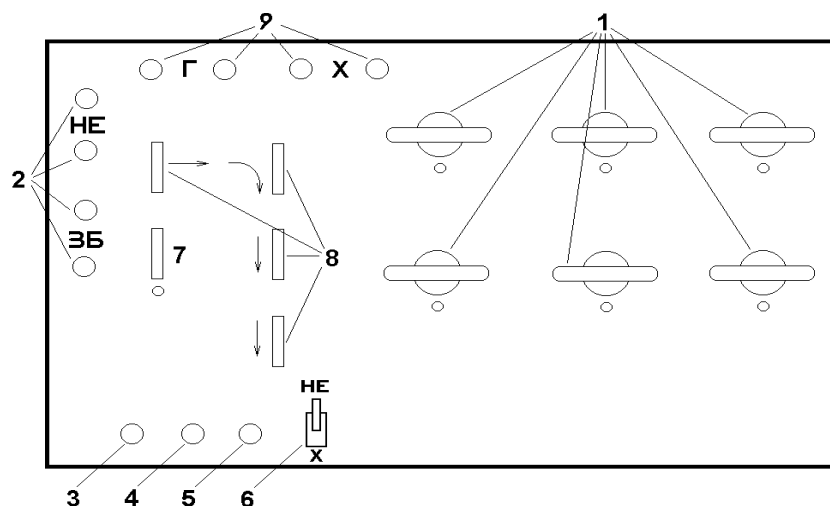


Рисунок 5 - Передня панель компенсатора постійного струму

**1** - ручки декад магазину опорів. Спад напруги на кожній ступені декад відповідно дорівнює: на 1 декаді  $11 \cdot 0.16$ ; на 2 декаді  $9 \cdot 0.16$ ; на 3 декаді  $9 \cdot 0.016$ ; на 4 декаді  $9 \cdot 0.00016$ ; на 5 декаді  $10 \cdot 0.000016$ ; **2** - затискач для підключення зовнішньої батареї та нормального елемента; **3** - кнопка "50000". При натиснутій кнопці послідовно з гальванометром включається опір 50000 Ом, що захищає гальванометр від великих струмів при розбалансі, тобто здійснюється груба компенсація; **4** - кнопка "0". При натиснутій кнопці гальванометр підключається безпосередньо в схему. При цьому здійснюється точна компенсація; **5** - кнопка "КЗ" накоротко перемикає рамку гальванометра і служить для швидкого заспокоєння стрілки; **6** - перемикач "П" має три положення - "HE", "X" та середнє (нейтральне); **7** - ручка зміни опору  $R_t$ ; **8** - ручки зміни опору  $R_{pc}$  для встановлення робочого струму. **9** – затискачі для гальванометра (Г) та напруги, що вимірюється (Х)

На рис. 6. наведено схему лабораторного макета, який використовується-

ся у лабораторній роботі. На елементах Т, VD, С побудовано джерело постійної напруги. Воно навантажене на послідовно ввімкнені резистори  $R_{P1}$ ,  $R_{P2}$ ,  $R_N$  та резистор  $R_X$  (при вимірюванні опору). Резистор  $R_N$  є зразковим з номіналом 10 Ом. Коли необхідно провести перевірку міліамперметра, до затискачів 1 та 2 під'єднується міліамперметр, при вимірюванні опору до цих затискачів замість міліамперметра під'єднується невідомий резистор  $R_X$ , опір якого необхідно виміряти.

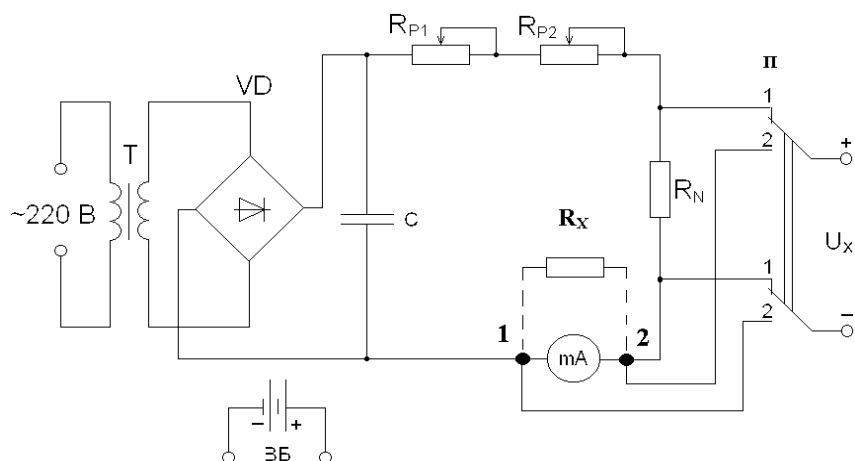


Рисунок 6 - Структурна схема лабораторного стенда

В макет також вбудовано зовнішню батарею (ЗВ), яка використовується в компенсаторі. Макет з'єднується з компенсатором за допомогою з'єднувальних провідників. Затискачі зовнішньої батареї та невідомої напруги під'єднується до відповідних затискачів компенсатора.

## ХІД РОБОТИ

1.1. Вимірювання напруги та опору. Алгоритм вимірювання опору складається з вимірювання падіння напруги на зразковому та невідомому резисторі, які ввімкнені послідовно, і подальшому розрахунку невідомого опору. За допомогою компенсатора вимірюють спад напруг на невідомому та зразковому опорах  $U_X$  та  $U_N$ :

$$U_X = I_p \cdot R_X, \quad (4)$$

$$U_N = I_p \cdot R_N. \quad (5)$$

Якщо розділити перше рівняння на друге, то одержимо

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{R_X}{R_N}, \quad (6)$$

звідки отримуємо співвідношення для знаходження невідомого опору:

$$R_X = R_N \cdot \frac{U_X}{U_N}. \quad (7)$$

1.1.1. Взяти у викладача резистор з невідомим опором  $R_X$ . Під'єднати його до зати-

скачів 1 та 2 лабораторного макета замість міліамперметра, як показано на рис. 4.

1.1.2. Ввімкнути живлення макета. Перемикач П лабораторного макета встановити в положення 1. В цьому положенні перемикача на вхід компенсатора подається падіння напруги на зразковому опорі  $R_N$ . Ручки змінних резисторів  $R_{P1}$ ,  $R_{P2}$  встановити в середнє положення.

1.1.3. Виміряти спад напруги на зразковому опорі  $R_N$ . Для цього ввести поправку на відхилення температури від нормальної - виміряти температуру  $\theta_E$  і, якщо вона відмінна від  $20^\circ \text{C}$ , то розраховують ЕРС для даної температури  $E_t$  за виразом (1) і ручкою 7 компенсатора встановлюють розраховану поправку; Далі встановлюється робочий струм. Перемикач 6 компенсатора встановлюється в положення "HE". При натиснутій кнопці "50000" ручками "Робочий струм" (8) спочатку грубо, а потім точно встановлюють стрілку гальванометра на нульову відмітку. Кінцеву компенсацію здійснюють при натиснутій кнопці "0" (4); Після цього вимірюється напруга  $U_N$ . Перемикач П компенсатора виставляють в положення "X" і стрілку гальванометра встановлюють на нуль ручками 1 магазину опорів R. Відлік напруги здійснюють за показаннями магазину опорів, ручки якого відградуєвано в вольтах.

1.1.4. Перемикач П лабораторного макета встановити в положення 2. В цьому положенні перемикача на вхід компенсатора подається падіння напруги на невідомому опорі  $R_X$ . Виміряти падіння напруги  $U_X$  на опорі  $R_X$  аналогічно пункту 1.1.3.

*Примітка: Робочий струм повторно встановлювати не треба.*

1.1.5. Розрахувати невідомий опір за формулою (7).

1.2. Здійснити перевірку міліамперметра Э513 в оцифрованих точках в діапазоні 0-10 мА і зробити висновок про відповідність засобу вимірювання встановленому заводом класу точності.

1.2.1. Встановити перемикач П лабораторного макета в положення 1. В затискачі 1 і 2 лабораторного макету ввімкнути міліамперметр (резистор  $R_X$  треба зняти).

1.2.2. Реостатами  $R_{P1}$  (грубо) і  $R_{P2}$  (точно) встановити послідовно значення струму від 1 мА до 10 мА з кроком 1 мА (в оцифрованих точках шкали) спочатку з мінімального значення до максимального (зростання струму), а потім навпаки (спадання струму). Відлік здійснювати по міліамперметру.

1.2.3. За допомогою компенсатора, аналогічно п. 1.1.3., виміряти падіння напруги  $U_z$  і  $U_C$  (відповідно напруга при зростанні і спаданні струму) на зразковому резисторі  $R_N=10$  Ом для кожної оцифрованої відмітки шкали  $\alpha$ .

1.2.4. Розрахувати всі значення струму при його зростанні та спаданні  $I_z$ ,  $I_C$  в оцифрованих точках шкали за формулою

$$I_{z(C)} = U_{z(C)} / R_N. \quad (8)$$

1.2.5. Розрахувати абсолютну похибку  $\Delta_{Xz}$ ,  $\Delta_{XC}$  при зростанні та спаданні показань, поправку  $\Delta_{qz}$ ,  $\Delta_{qC}$  (поправкою називається значення абсолютної похибки взятє з протилежним знаком) при зростанні та спаданні показань, зведеної похибка  $\gamma$  міліамперметра. Результати вимірювання та розрахунків занести в таблицю 1.



Таблиця 1

ЗРОСТАННЯ СТРУМУ					
$\alpha$ - оцифрована відмітка шкали (мА)	$U_3$ , [В]	$I_3$ , [мА]	$\Delta_{X3}$ , [мА]	$\Delta_{q3}$ , [мА]	$\gamma$ , %
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
СПАДАННЯ СТРУМУ					
$\alpha$ - оцифрована відмітка шкали (мА)	$U_C$ , [В]	$I_C$ , [мА]	$\Delta_{XC}$ , [мА]	$\Delta_{qC}$ , [мА]	$\gamma$ , %
10					
9					
8					
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					

1.2.6. Провести перевірку міліамперметра. Під час перевірки засобу вимірювання визначають максимальну зведену похибку в його оцифрованих точках і порівнюють з класом точності. Абсолютна похибка приладу  $\Delta_{X3(C)}$  є різниця між його показаннями  $I_{3(C)}$  та дійсним значенням вимірюваної величини  $I$ , тобто  $\Delta_x = I_x - I_d$ . Абсолютна похибка, взята з протилежним знаком, називається поправкою ( $\Delta_{q3(C)}$ ). Зведена похибка  $\gamma$  є виражене у відсотках відношення абсолютної похибки до нормувального значення  $X_H$

$$\gamma = \frac{\Delta_x}{X_H} \cdot 100\% = \frac{I_x - I}{X_H} \cdot 100\% . \quad (9)$$

При розрахунках за дійсне значення струму прийняти значення, виміряне за допомогою компенсатора.

Для приладів з нульовою відміткою на початку шкали нормувальне значення ( $X_H$ ) дорівнює верхній межі вимірювання. Для приладу, що перевіряється, для діапазону 0-10 мА нормувальне значення дорівнює 10 мА.

Клас точності - це гарантована заводом максимальна зведена похибка. Для електровимірювальних приладів ДЕСТом встановлено вісім класів точності: 0.01; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0. Міліамперметр Э513, що перевіряється, має клас точності 0.5, тобто максимальна зведена похибка для всього ді-

апазону вимірювання повинна не перевищувати 0.5%.

1.2.7. На основі даних повірки побудувати криву поправок, тобто залежність поправки  $\Delta_{q3(C)}$  від оцифрованого значення шкали  $\alpha$ . Результати розрахунку  $\gamma$  занести в табл. 1.

1.2.8. Визначити потужність, що споживається міліамперметром при струмах 2 і 3 (мА). Для цього, встановити необхідні значення струмів опорами  $R_{p1}$  (грубо) і  $R_{p2}$  (точно), використовуючи в якості відлікового пристрою міліамперметр. Після цього визначити точне значення струму використавши дані табл. 1 (ввести поправку в показання міліамперметра). Перемикач П лабораторного макета встановити в положення 2 і компенсатором виміряти падіння напруги на міліамперметрі  $U_{mA}$  при двох значеннях струмів через міліамперметр  $I_{mA}$ . Потужність, що споживається міліамперметром визначити за формулою

$$P_{mA} = U_{mA} \cdot I_{mA}. \quad (10)$$

2. Отримання емпіричної статичної характеристики за допомогою програми Numeri.

2.1. Клавішею «3» ввійдіть у розділ «Інтерполяція».

2.2. Задайте режим введення експериментальних даних «Введення даних із клавіатури».

2.3. Установіть необхідні параметри для введення даних під час зростання струму  $I_3$ :

- кількість пар значень 10;
- крок за X 1;
- початкове значення 2.

2.4. Введіть визначених 10 значень струму  $I_3$ , натисніть клавішу «F10» і побудуйте експериментальну статичну характеристику міліамперметра. Отриману залежність наведіть у звіті.

2.5. Клавішею «Esc» ввійдіть у підрозділ «Поліном», задайте степінь полінома 1 і натисніть клавішу «F10».

2.6. Запишіть розраховані програмою коефіцієнти  $a[0]$  і  $a[1]$ .

2.7. Клавішею «Esc» ввійдіть у підрозділ «Дані» і клавішею «1» задайте режим введення даних з інтерпретора формул.

2.8. Задайте:

- емпіричну залежність виду  $y=a[0]+a[1]*x$ ;
- початкове значення 2;
- кінцеве 10;
- крок 1.

2.9. Натисніть клавішу «F10» і побудуйте емпіричну статичну характеристику міліамперметра під час зростання струму. Отриману графічну залежність наведіть у звіті.

2.10. Клавішею «Esc» ввійдіть у підрозділ «Введення даних з клавіатури».

2.11. Побудуйте емпіричну статичну характеристику міліамперметра під час

спадання струму  $I_C$ , для чого повторіть послідовність згідно до п.2.2. ... 2.10.

3. Оцінка похибок вимірювання за допомогою програми Numeri.

3.1. В середовищі програми NUMERI побудуйте криві поправок і залежності зведеної похибки від вимірних значень під час зростання і спадання струму.

3.2. Задайте режим введення експериментальних даних «Введення даних із клавіатури».

Установіть необхідні параметри для введення даних:

-кількість пар значень 10;

-крок по X 1;

-початкове значення 2.

3.3.2. Введіть 10 значень розрахованих поправок і побудуйте залежність поправки від значення  $I_X$  струму зростання в середовищі програмного забезпечення NUMERI. Отриману залежність наведіть у звіті.

3.3.3. Введіть 10 значень розрахованих поправок і побудуйте залежність поправки від значення  $I_X$  струму спадання в середовищі програмного забезпечення NUMERI. Отриману залежність наведіть у звіті.

3.3.4. Введіть 10 значень розрахованих зведених похибок і побудуйте залежність зведеної похибки від виміряного значення  $I_X$  під час зростання струму в середовищі програмного забезпечення NUMERI. Отриману залежність наведіть у звіті.

3.3.5. Введіть 10 значень розрахованих зведених похибок і побудуйте залежність зведеної похибки від виміряного значення під час спадання струму  $I_C$  в середовищі програмного забезпечення NUMERI. Отриману залежність наведіть у звіті.

4. Визначення варіації показань міліамперметра.

Визначити варіацію показань міліамперметра як різницю між двома значеннями струму в одній відмітці шкали під час зростання і спадання струму, а результати обчислень занесіть до табл.2.

Таблиця 2

Оцифрована Відмітка, [mA]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Варіація Показу, [mA]										

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Суть нульового методу вимірювання.
2. Суть компенсаційного методу вимірювання.
3. Наведіть схему компенсації напруги зміною робочого струму.
4. Які функції індикатора рівноваги в наведеній схемі?

5. Яким елементом змінюють величину робочого струму?
6. Шкалу якого елемента градуують в одиницях вимірюваної величини?
7. Наведіть схему компенсації напруги зміною компенсувального резистора.
8. Переваги компенсаційного методу вимірювання.
9. Наведіть структурну схему компенсатора постійного струму.
10. Поясніть принцип дії наведеної схеми в першому режимі роботи «Підготовка до роботи».
11. Які дві напруги компенсуються в даному режимі роботи компенсатора?
12. Поясніть принцип дії компенсатора у другому режимі роботи компенсатора.
13. Які дві напруги компенсуються у цьому режимі роботи компенсатора?
14. Які чотири умови необхідно виконати, щоб компенсувати дві змінні напруги?
15. Наведіть дві форми представлення напруг: у прямокутній і в полярній системах координат.
16. Наведіть структурну схему компенсатора змінного струму у прямокутній системі координат.
17. Покажіть, які елементи в наведеній схемі здійснюють рівність амплітуд і частот, протилежність фаз і ідентичність форми.
18. Наведіть аналітичні залежності для визначення модуля  $U_{xm}$  і кута  $\varphi$  для вимірюваної змінної напруги.
19. Як отримати емпіричну статичну характеристику міліамперметра в середовищі програмного забезпечення NUMERI?
20. Як визначається абсолютна похибка і поправка під час повірки міліамперметра?
21. Як будується крива поправок і як вона застосовується для вилучення систематичної складової похибки міліамперметра під час виконання вимірювань?
22. Дайте поняття зведеної похибки.
23. Розкрийте суть трьох методів визначення нормувального значення для оцінки зведеної похибки.
24. Що розуміють під нормуванням похибок засобів вимірювань?
25. Як нормують похибки засобів вимірювань у вигляді числа?
26. Як нормують похибки засобів вимірювань у вигляді лінійної функції?
27. Яку складову похибки називають адитивною? Чому її ще називають похибкою нуля?
28. Яку складову похибки називають мультиплікативною? Чому її ще називають похибкою чутливості.
29. Для чого необхідно здійснювати повірку засобів вимірювань для зростання і спадання значень вимірюваної величини? Що таке варіація показань?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Электрические измерения : Учебное пособие для вузов / Под ред. В.Н. Малиновского. -М.: Энергоатомиздат, 1985 (Глава 4, с. 238-243).
2. Драхслер Р. Основы электроизмерительной техники. -М.: Энергоатомиздат, 1982 (Глава 2, с.208-213).
3. Основы метрологии и электрические измерения : Учебник для вузов /Под ред. Е.М. Душина. -Л.: Энергоатомиздат, 1987 (Глава 7, с.199-212).
4. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин /Под ред. Полищука. -К.: Вища школа, 1984 (Глава 9, с.147-151).
5. Измерения и компьютерно-измерительная техника: Учеб. пособие /В.А. Поджаренко, В.В. Кухарчук. -К.: УМК ВО, 1991 (Глава 14, с. 115-122).

## Лабораторна робота № 4

### Вимірювання кутової швидкості

Мета роботи: навчитися проводити вимірювання кутової швидкості стробоскопічним та фотоелектричними тахометрами; ознайомитись з найбільш розповсюдженими тахометричними перетворювачами та принципами побудови тахометрів на їх основі.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Положення твердого тіла, що обертається навколо нерухомої осі, визначається кутом повороту  $\varphi$ , тобто двогранним кутом між двома площинами, що проходять через вісь обертання, з яких одна нерухома, а інша жорстко закріплена з твердим тілом і обертається разом з ним. Під час обертання кут повороту  $\varphi$  є функцією часу

$$\varphi = f(t) \quad (1)$$

Дане рівняння називають рівнянням обертання. Якщо воно задано, то для будь-якого моменту часу  $t$  можна визначити значення кута  $\varphi$ , що визначає положення тіла. Якщо взяти два момента  $t$  і  $t+\Delta t$  часу і розкласти  $f(t)$  в степеневий ряд, по приросту  $\Delta t$ , отримаємо

$$f(t+\Delta t) = f(t) + f'(t)\Delta t + f''(t) \frac{\Delta t^2}{2} + \dots, \quad (2)$$

Приріст  $\Delta\varphi = f(t + \Delta t) - f(t)$  за проміжок часу запишеться таким чином:

$$\Delta\varphi = \omega(t)\Delta t + \varepsilon(t) \frac{\Delta t^2}{2} + \dots, \quad (3)$$

де  $\omega(t)$  і  $\varepsilon(t)$  відповідно кутова швидкість і кутове прискорення в момент часу  $t$ . Членами, що вміщують у собі  $\Delta t$  вище другої степені, в першому наближенні можна знехтувати. Якщо поділити обидві частини (3) на  $\Delta t$ , отримаємо:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \omega(t) + \varepsilon(t) \frac{\Delta t}{2} + \dots \quad (4)$$

Кутова швидкість дорівнює похідній кута повороту за часом:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (5)$$

Якщо  $\omega = \text{const}$  обертання є рівномірним. У цьому випадку рівняння обертання:

$$\varphi = \omega t + \varphi_0, \quad (6)$$

де  $\varphi_0$  - початковий кут повороту.

При нульових початкових умовах рівняння рівномірного обертання прийме вигляд:

$$\varphi = \omega t . \quad (7)$$

Якщо кутова швидкість змінюється в часі, то величина

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \varepsilon(t) \quad (8)$$

відображає собою кутове прискорення тіла в даний момент часу.

Обертання, під час якого кутова швидкість є лінійною функцією часу, називають рівнозмінним. Його рівняння обертання матиме вигляд:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \varepsilon \frac{t^2}{2}, \quad (9)$$

де  $\varphi_0$  - початковий кут повороту;  $\omega_0$  - початкова кутова швидкість;  $\varepsilon$  - постійне кутове прискорення.

За основну одиницю кутової швидкості прийнято рад/с. На практиці часто використовують термін швидкість обертання  $n$  - величина, яка дорівнює відношенню кількості обертів, здійснених тілом, до часу обертання.

Засіб вимірювання (ЗВ) кутової швидкості називається тахометром. Відомі тахометри будуються на основі трьох принципів вимірювання кутової швидкості :

- вимірюється приріст часу  $\Delta t$ , за який точка об'єкта, що обертається, повернеться на фіксований кут  $\Delta\varphi$ . Кутова швидкість розраховується за виразом (5).

- вимірюється кут  $\Delta\varphi$ , на який точка об'єкта, що обертається, повернеться за фіксований проміжок часу  $\Delta t$ . Кутова швидкість також розраховується за виразом (5).

- значення кутової швидкості безпосередньо перетворюється в іншу фізичну величину, яка вимірюється вторинним засобом вимірювання.

Вимірювальні пристрої, що здійснюють перетворення кутової швидкості, кута повороту, часу, за який відбувається поворот на фіксований кут, в іншу фізичну величину, називаються тахометричними перетворювачами (ТП).

В наш час, за допомогою будь-якого одного тахометра неможливо з високою точністю виконувати вимірювання в усіх діапазонах можливої зміни кутових швидкостей. Практично тахометри будуються як спеціалізовані технічні засоби, призначені для перекриття тільки певних ділянок діапазону. Дана обставина зумовлює велику кількість існуючих в теперішній час ТП і тахометрів на їх основі.

Узагальнена структурна схема ТП наведена на рис. 1. ТП подається як двовимірний перетворювач енергії. Енергія до нього підводиться від об'єкта вимірювання (ОВ) і від внутрішнього джерела енергії (ДЕ). В якості приймача енергії (ПЕ) може бути використаний один з перетворювачів, відповідний за фізичною суттю джерелу енергії. В ТП відбувається модуляція узагальне-

ного потоку  $\Phi$  за законом зміни  $\omega$  або  $\varphi$  і на виході модулятора М, тобто на вході ПЕ буде модульований потік енергії  $\Phi_M$ . ПЕ перетворює інформативний параметр у модульований потік енергії в фізичну величину  $Y$  (як правило електричний сигнал), зручну для вимірювання.

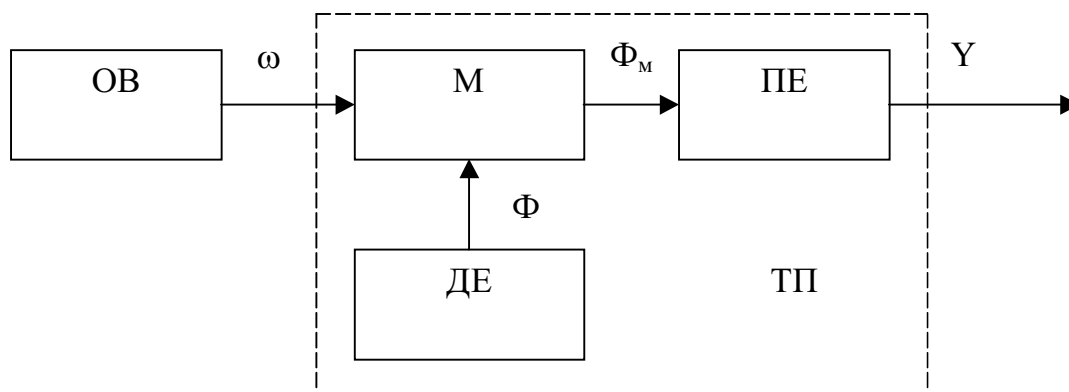


Рисунок 1 - Узагальнена структурна схема ТП

ТП можна класифікувати за такими ознаками :

За способом сполучення з валом об'єкта вимірювання ТП поділяються на контактні і безконтактні. До контактних належать ТП, що знаходяться в постійному чи тимчасовому з'єднанні з ОБ. З'єднання виконують муфтою, щітками та іншими способами. До них можна віднести відцентрові, гіроскопічні, тахогенераторні та інші ТП. До безконтактних ТП відносяться перетворювачі, які не змінюють момент інерції ОБ і не створюють гальмівний момент. Вони не з'єднуються з ОБ безпосередньо, а передавання вимірювальної інформації здійснюється за допомогою світлового потоку, електромагнітного поля і т.ін.

За типом внутрішнього джерела енергії, що створює потік  $\Phi$  ТП поділяються на ТП з джерелом електростатичної енергії; з джерелом гідроаеродинамічного потоку; з джерелом електромагнітної енергії, які, в свою чергу, поділяються за частотним діапазоном на радіохвильові, оптичні, промислової частоти (електромагнітні і радіоактивні); з джерелом електрохімічної енергії; з джерелом механічної енергії.

За видом інформативного параметра вихідної фізичної величини  $Y$  ТП поділяються на ТП амплітудного перетворення, ТП частотно-часового перетворення і просторового кодування.

**Амплітудні тахометричні перетворювачі.** До даного класу ТП відносяться тахогенератори змінного та постійного струму, фотоелектричні перетворювачі з просторовими фільтрами, амплітудні фотоелектричні перетворювачі та інші.

Тахогенераторами (ТГ) називаються електричні машини невеликої потужності, призначені для перетворення кутової швидкості в електричний сигнал. Тахогенератори представляють собою перетворювачі механічної енергії в електромагнітну.



Основними вимогами, які пред'являються до тахогенераторів є : лінійність статичної характеристики; велика крутизна характеристики; малий вплив на статичну характеристику зміни температури навколишнього середовища і навантаження; мінімум пульсацій напруги на колекторі. Тахогенератори бувають постійного та змінного струму.

У тахогенераторів постійного струму вихідна постійна напруга прямо пропорційна кутовій швидкості. Рівняння перетворення тахогенератора постійного струму має вигляд:

$$U_{\text{ТГ}} = \frac{k_E \omega - U_{\text{Щ}}}{1 + \frac{k_K k_P \omega + R_{\text{Я}}}{R_{\text{НАВ}}}} \approx k_E \omega - U_{\text{Щ}}, \quad (10)$$

де  $U_{\text{ТГ}}$  - вихідна напруга тахогенератора,  $U_{\text{Щ}}$  - напруга на щітковому контакті,  $k_E$  - постійна машини,  $k_K$  - конструктивний коефіцієнт,  $k_P$  - коефіцієнт пропорційності між струмом якоря та потоком,  $R_{\text{Я}}$  - опір обмотки якорю,  $R_{\text{НАВ}}$  - опір навантаження. Схематичне креслення тахогенератора постійного струму наведено на рис. 2.

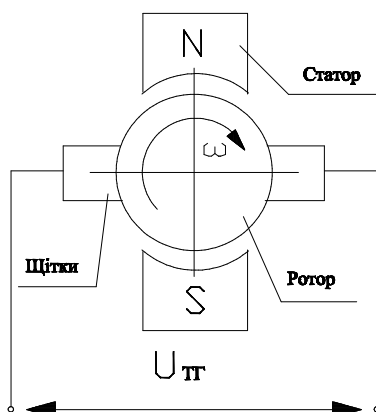


Рисунок 2 - Тахогенератор постійного струму

В процесі обертання ротора у полі статора на щітковому контакті виникає постійна напруга. Залежність вихідної напруги тахогенератора від кутової швидкості має високу лінійність, але при її нульовому значенні не дорівнює нулю, тобто присутня зона нечутливості. Окрім того вихідна напруга тахогенератора постійного струму має пульсуючу складову, яка зумовлює виникнення додаткової похибки первинного перетворення. Наявність щіткового контакту підвищує момент опору на валу тахогенератора.

Тахогенератори змінного струму використовуються в автоматичних пристроях для перетворення частоти обертання в амплітуду змінної ЕРС. Найбільше розповсюдження серед генераторів змінного струму отримали асинхронні тахогенератори з полим ротором, конструкція яких не відрізняється від конструкції виконавчого електродвигуна з полим немагнітним ротором. Частота вихідного сигналу асинхронного тахогенератора з полим ротором не залежить від кутової швидкості (на відміну від інших типів тахогенераторів), і дорівнює частоті мережі живлення.

Залежність амплітуди вихідного сигналу тахогенератора змінного струму від кутової швидкості в першому наближенні описується рівнянням

$$U_{\text{ТГ}} = k_{\text{T}}\omega = k_{\text{T}} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (11)$$

де  $k_{\text{T}}$  - коефіцієнт передачі тахогенератора.

**Тахометричні перетворювачі просторового кодування.** У ТП просторового перетворення інформація про кутову швидкість утворюється шляхом диференціювання кутового переміщення вала за часом.

Простими і зручними пристроями кодування, які одержали найбільш широке поширення є кодові диски. Значення розрядних коефіцієнтів (1 або 0) задається в них у вигляді провідних і непровідних, прозорих і непрозорих, магнітних і немагнітних ділянок. Відповідно використовують контактні, фотоелектричні, індуктивні і інші зчитуючі пристрої. На один кодовий розряд необхідно мати один зчитуючий пристрій. На рис. 3. а, б показані варіанти кодових дисків (а – двійковий код, б – код Грея).

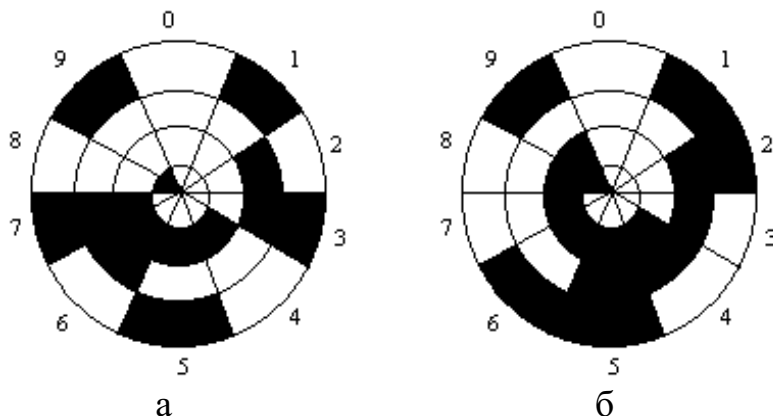


Рисунок 3 - Кодові диски

Вихідний код представляє собою код кутового положення диску відносно нульового положення. Кутова швидкість знаходиться шляхом цифрового диференціювання залежності вихідного коду від часу за виразом:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot N_2 - N_1}{n \cdot t_2 - t_1}, \quad (12)$$

де  $n$  – кількість кодових секторів;  $N_2, N_1$  - значення вихідного коду ТП в моменти часу  $t_2, t_1$ . Вираз (12) визначає середню кутову швидкість за проміжок часу від  $t_1$  до  $t_2$ .

Точність ТП просторового кодування визначається розрядністю коду, точністю виготовлення кодового диску, точністю зчитування інформації і точністю виконання операції цифрового диференціювання.

**Тахометричні перетворювачі частотно-часового перетворення** здійснюють перетворення вимірюваної кутової швидкості в імпульсну послідовність, частота якої прямо пропорційна, а період є оберненою функцією до

вимірюваної швидкості.

Схематичне креслення найпростішого фотоелектричного ТП частотно-часового перетворення з перериванням світлового потоку наведено на рис. 4.

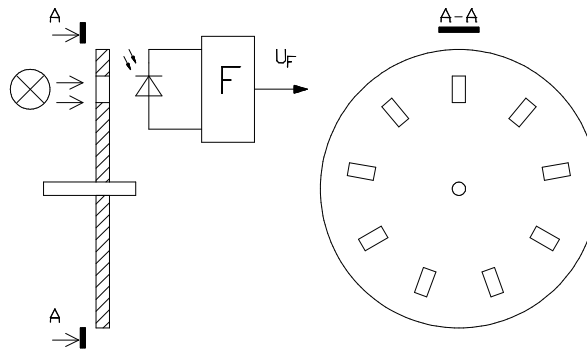


Рисунок 4 - Фотоелектричний ТП частотно-часового перетворення з перериванням світлового потоку

Принцип дії цього ТП засновано на перериванні освітленості робочої поверхні фотоприймача за допомогою модулятора, який має вигляд диску з виконаними в ньому радіальними отворами і який жорстко з'єднаний з валом об'єкта вимірювання. Фотоприймач освітлюється лампою через прорізи модулятора. При обертанні останнього здійснюється переривання світлового потоку, який попадає на фотоприймач (фотодіод на рис. 3), в результаті чого струм фотодіода має імпульсний характер. Формувач F перетворює імпульси струму (які мають складну форму і тривалість яких залежить від кутової швидкості) в прямокутні імпульси напруги  $U_F$  калібровані за тривалістю та амплітудою. Як правило в такий ТП додатково вводять другий фотоприймач, зсунутий відносно першого на половину кута між отворами модулятора. Це необхідно для забезпечення можливості визначення напрямку обертання вала об'єкта вимірювання.

Частота та період вихідних імпульсів цього ТП з кутовою швидкістю пов'язані таким співвідношенням

$$f = \frac{1}{T} = \frac{z}{2\pi} \omega, \quad (13)$$

де  $z$  - кількість імпульсів, що формуються на виході ТП частотно-часового перетворення за один оберт вала (для розглядуваного ТП дорівнює кількості отворів модулятора).

Перетворення кутової швидкості в частоту може також реалізуватися за допомогою магнітоелектричних, електромагнітних, гальваноманітних та багатьох інших видів ТП. Розглянемо найпростіший гальваноманітний ТП (рис. 5), принцип дії якого заснований на фізичному ефекті Гауса або Хола.

В основу побудови гальваноманітних ТП покладено ефекти, суть яких полягає в зміні фізичних властивостей провідників або напівпровідників при протіканні через них струму з одночасним впливом на них магнітного поля. Найбільше розповсюдження в практиці вимірювань знайшли ТП з використанням ефектів Хола і Гауса (магніторезистивний ефект).

Елемент Хола або магніторезистор виконує роль чутливого елемента, напруга або опір якого змінюється при обертанні модулятора – магнітного або феромагнітного зубчатого диску. Зміна опору або напруги носить імпульсний характер, частота імпульсів прямо пропорційна кутовій швидкості.

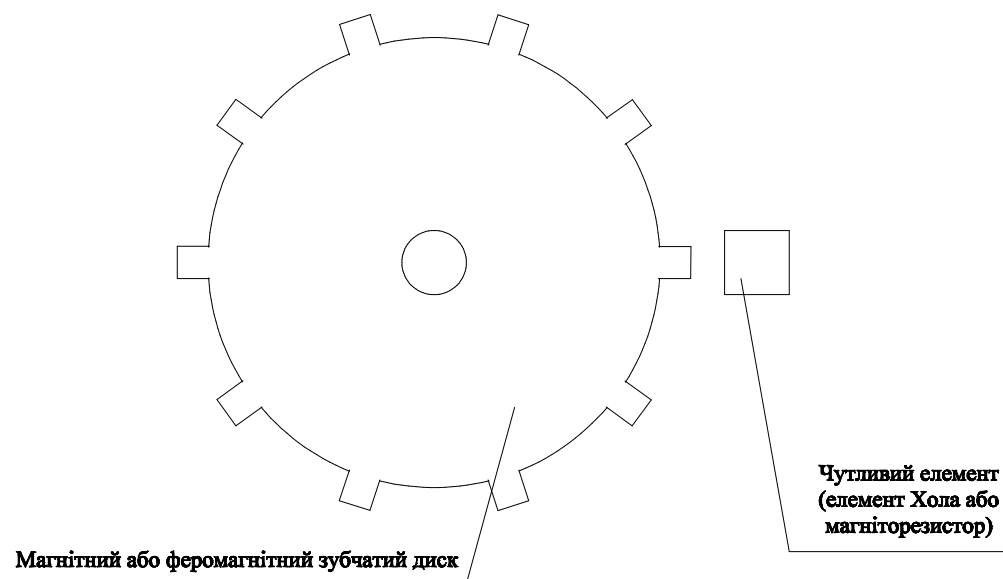


Рисунок 5 - Гальваномагнітний ТП

Роздільна здатність гальваномагнітних ТП може бути доведена до 1000-15000 квант/мм. Однак їх використання обмежується достатньо складними електронними схемами зчитування і обов'язковим екрануванням від зовнішніх магнітних полів.

На основі ТП частотно-часового перетворення можливе створення як аналогових, так і цифрових тахометрів. Принцип дії цифрових тахометрів полягає у визначенні відношення

$$\omega = \frac{\alpha_0}{t_i}, \quad (14)$$

де  $\alpha_0, t_i$  – відповідно кут та час повороту ТП, який встановлено на валу об'єкта вимірювання.

В залежності від того, який з вище вказаних параметрів вимірюється, розрізняють цифрові тахометри середнього значення і цифрові тахометри миттєвого значення.

У цифрових тахометрах середніх значень методом підрахунку імпульсів визначають кут повороту вала об'єкта за зразковий інтервал часу, який задається зовнішнім зразковим генератором, тобто цифровий тахометр будується за схемою цифрового частотоміра середніх значень. Такі вимірювачі придатні тільки для статичних вимірювань кутової швидкості. Їх рівняння перетворення має вигляд

$$\omega = \frac{2\pi N_C}{zt_0}, \quad (15)$$

де  $t_0$  - зразковий часовий інтервал, що формує зразкова міра часу від цифрового частотоміра середніх значень;  $\omega$  - виміряне значення кутової швидкості;  $N_C$  - код у двійковому лічильнику частотоміра, відповідний кількості імпульсів, підрахованих за часовий інтервал  $t_0$ ;

У цифровому тахометрі миттєвих значень здійснюється вимірювання часу повороту вала ТП на фіксований кут, тобто вимірюється період сигналу ТП шляхом квантування цього часового інтервалу імпульсами зразкової частоти від зовнішнього генератора. Цифровий тахометр будується за схемою цифрового періодоміра. Кутова швидкість визначається за співвідношенням

$$\omega = \omega(t) + \varepsilon(t) \frac{t_B}{2} = \frac{2\pi f_0}{z \cdot N_M}, \quad (16)$$

де  $\omega(t), \varepsilon(t)$  - відповідно миттєва кутова швидкість та миттєве кутове прискорення;  $t_B$  - час між двома вихідними імпульсами;  $f_0$  - частота зразкового генератора;  $N_M$  - код у двійковому лічильнику періодоміра, відповідний кількості імпульсів, підрахованих за часовий інтервал  $t_B$ ;

Працює такий тахометр циклічно, в кінці кожного періоду вихідного сигналу ТП вимірювальна інформація передається та запам'ятовується у зовнішньому обчислювальному пристрої для визначення кутової швидкості.

У лабораторній роботі необхідно провести вимірювання кутової швидкості за допомогою стробоскопічного тахометра. Принцип дії стробоскопічних тахометрів заснований на фізіологічній особливості ока зберігати протягом деякого часу короткочасні світлові зображення після їх зникнення.

Розглянемо випадок, коли періодичними короткими спалахами освітлюється диск, що обертається, і на який нанесена мітка. В момент спалаху око зафіксувало диск з міткою. Якщо в проміжок часу між двома спалахами диск повернеться точно на один оберт, зображення диска з міткою на сітчатці ока поновиться. Якщо періоди спалахів та обертання будуть рівні, то ми будемо спостерігати стробоскопічне явище – буде здаватися, що диск не обертається. Таким чином, справедлива рівність :

$$f_{\text{СПАЛ}} = n \text{ (об/с)}, \quad (17)$$

$f_{\text{СПАЛ}}$  - частота спалахів;  $N$  – швидкість обертання.

Якщо за період між двома спалахами диск зробить два і більше обертів, то стробоскопічне явище буде спостерігатися при умові

$$f_{\text{СПАЛ}} = \frac{n}{k} \text{ (об/с)}, \quad (18)$$

де  $k$  – ряд цілих чисел, що характеризують порядок стробоскопічної фігури.

У сучасних стробоскопах в якості джерел світла використовують газорозрядні лампи і світлодіоди. Частотою спалахів керують генератори змінного струму, мультівібратори. Перевагою стробоскопічних тахометрів є відсутність навантаження на об'єкт вимірювання. Недоліком – можливість вимірювання тільки у статичному режимі.

На рис. 3 наведено зовнішній вигляд стробоскопічного тахометра, який використовується в лабораторній роботі.

Тумблер «Живлення» у верхньому положенні вмикає живлення строботометра. Тумблер «Лампа» у верхньому положенні вмикає імпульсну лампу (після ввімкнення тумблера «Лампа» необхідно декілька хвилин чекати, поки прилад не прогріється). Тумблер «Синхр.» при виконанні лабораторної роботи повинен бути в нижньому положенні. Його вмикають коли необхідно синхронізувати спалахи лампи зовнішнім генератором.

Частота спалахів лампи строботометра встановлюється ручкою переключення діапазонів в межах  $250 \div 32000$  Гц за допомогою перемикача шкал і лімба. Перші три положення (1/2, 1, 2) ручки відносяться до шкали  $(50 \div 100) \times 10$  об/хв, четверте і п'яте положення відносяться до шкали  $(20 \div 40) \times 100$  об/хв, шосте і п'яте - до шкали  $(8 \div 16) \times 1000$  об/хв.

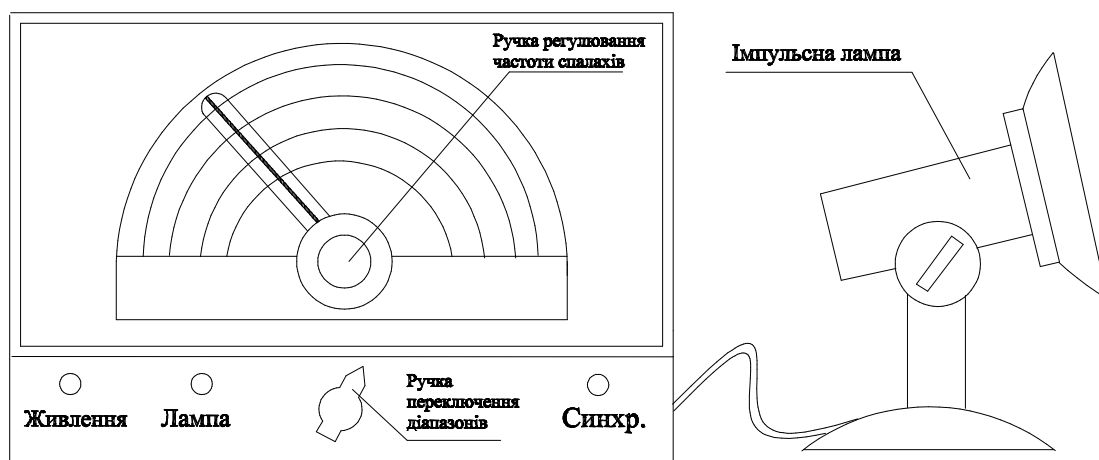


Рисунок 6 - Стробоскопічний тахометр

Наприклад, під час встановлення частоти спалахів лампи, що відповідає  $1500$  об/хв необхідно перемикач шкали встановити в третє положення "2", а ручку лімба встановити на відмітку "75" верхньої шкали. Значення швидкості обертання зчитується з шкали строботометра у об/хв.

В лабораторній роботі вимірюється швидкість обертання диску, який вбудовано в лабораторний макет (рис. 7.) Цей диск виконує також роль модулятора фотоелектричного ТП з перериванням світлового потоку фотоелектричного аналогового тахометра, який вбудовано в лабораторний макет.

Тумблер «Живлення» лабораторного макета призначений для ввімкнення живлення, тумблер S1 «Лампа» призначений для ввімкнення лампи фотоелектричного тахометра, тумблер S2 призначений для ввімкнення фотоелектричного тахометра. Ручка переключення кутової швидкості лабораторного макета призначена для дискретного переключення кутової швидкості і має п'ять положень.

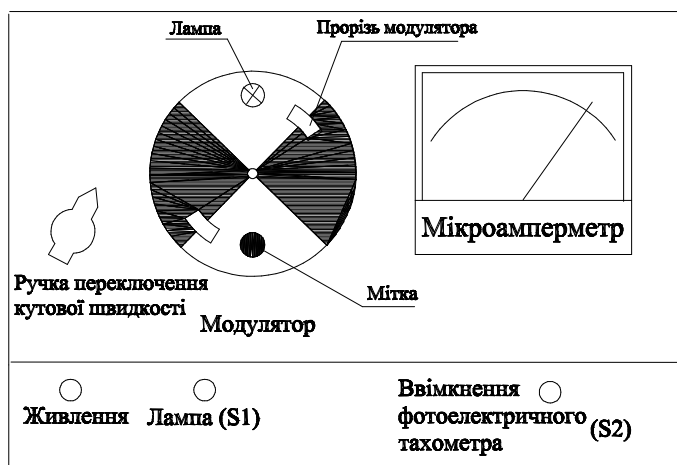


Рисунок 7 - Лабораторний макет

Схему електричну принципову фотоелектричного тахометра наведено на рис. 8.

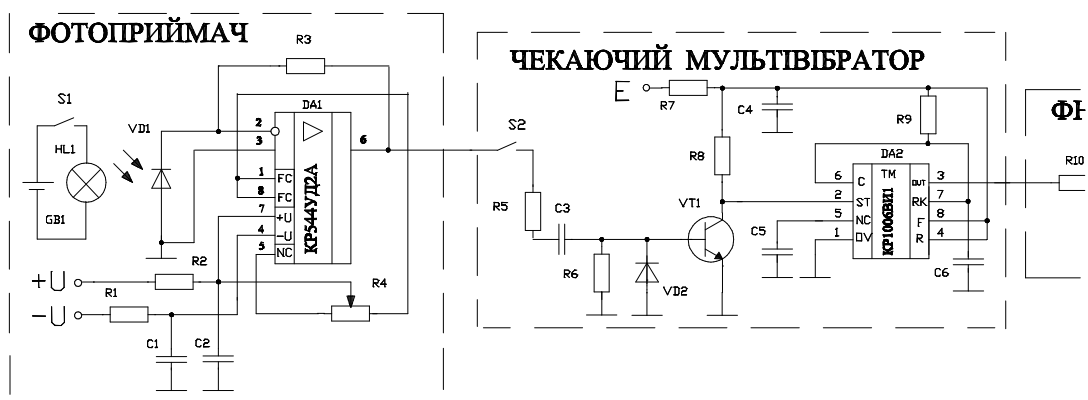


Рисунок 8 - Схема електрична принципова фотоелектричного тахометра

Принцип його дії полягає в наступному. При включеній за допомогою перемикача S1 лампі і обертанні диска лабораторного макета (рис. 7), в якому виконано два прорізи (тобто  $z=2$ ), відбувається переривання світлового потоку, який попадає на фоточутливий шар фотодіода VD1 (рис. 8), з'являється імпульсний струм фотодіода. Операційний підсилювач DA1 перетворює цей струм в імпульсну напругу  $U_{\phi}$ , форма якої залежить від конфігурації прорізів модулятора та фоточутливого шару фотодіода і є досить складною. За допомогою перемикача S2 вихідний сигнал операційного підсилювача під'єднується до входу чекаючого мультивібратора, який реалізовано на транзисторі VT1 і таймері KP1006ВН1. Чекаючий мультивібратор формує калібровані імпульси позитивної полярності з амплітудою  $U_i$  та тривалістю  $T_i$ , частота яких прямо пропорційна кутовій швидкості. Аналітичний вираз для ви-

хідної напруги чекаючого мультівібратора

$$U_M(t) = U_i \cdot \sum_0^{\infty} (1(nT) - 1(nT - T_i)), \quad (19)$$

де  $T$  – період вихідних імпульсів мультівібратора;  $1(t)$  – функція Хевісайда.

Часові діаграми вихідної напруги операційного підсилювача та чекаючого мультівібратора, що пояснюють роботу фотоелектричного тахометра, наведено на рис. 9.

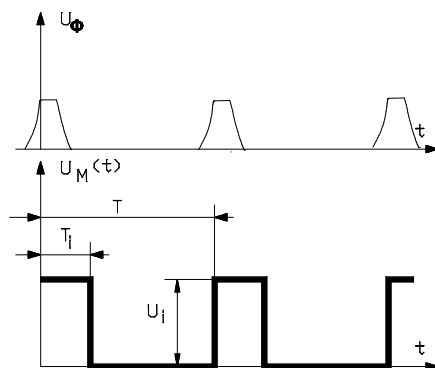


Рисунок 9 - Часові діаграми роботи фотоелектричного тахометра

Вираз (19) є періодичною функцією і його можливо розкласти в ряд Фур'є. Постійна складова вихідного сигналу чекаючого мультівібратора визначається виразом

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U_M(t) dt = \frac{U_i T_i}{T}. \quad (20)$$

З урахуванням виразу (13), (20) приймає вигляд

$$U_0 = \frac{U_i T_i z}{2\pi} \omega. \quad (21)$$

З (21) випливає, що постійна складова вихідного сигналу чекаючого мультівібратора прямо пропорційна кутовій швидкості.

У аналоговому фотоелектричному тахометрі, що використовується в лабораторному макеті, для виділення постійної складової використовується фільтр нижніх частот (ФНЧ), реалізований на RC-колі. Він відфільтровує вищі гармоніки сигналу, і вони дуже мало впливають на показання мікроамперметра. Струм, що протікає через мікроамперметр, лінійно залежить від значення постійної складової вихідного сигналу чекаючого мультівібратора, що дає змогу відградувати мікроамперметр в одиницях кутової швидкості.

## ХІД РОБОТИ

1. Ретельно ознайомитись з методичними вказівками до лабораторної роботи, вивчити принцип дії стробоскопічного та фотоелектричного тахометрів, методику проведення вимірювань.
2. Ввімкнути живлення і лампу строботахометра а також живлення лабораторного стенда.



3. За допомогою строботахометра виміряти значення швидкості обертання (в об/хв) для кожного з п'яти положень ручки переключення кутової швидкості лабораторного макета. Результати вимірювань занести в таблицю.

Таблиця

Положення ручки встановлення кутової швидкості	1	2	3	4	5
Швидкість обертання, виміряна строботахометром, об/хв					
Розрахована кутова швидкість, рад/с					
Показання мікроамперметра					

4. Встановити декілька значень частоти спалахів, в ціле число разів менше вимірних значень частоти обертання. Впевнитись, що спостерігається стробоскопічна картина різних порядків.

5. Розрахувати значення кутової швидкості (у рад/с) для кожного положення ручки переключення кутової швидкості лабораторного макета. Результати розрахунку занести в табл. 1. Розрахунок провести за формулою

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (21)$$

де  $n$  – швидкість обертання у об/хв.

6. Зняти залежність струму мікроамперметра фотоелектричного тахометра від кутової швидкості (статичну характеристику)  $i_M(\omega)$  в п'яти точках, що відповідають кожному положенню ручки переключення кутової швидкості лабораторного макета. Значення кутової швидкості для кожного положення взяти з таблиці 1.

7. Апроксимувати зняту статичну характеристику лінійною функцією виду  $i_{MA}(\omega) = A_1\omega + A_2$ , де  $A_1$ ,  $A_2$  - постійні коефіцієнти. Пряму провести через крайні точки. Навести аналітичний вираз статичної характеристики фотоелектричного тахометра.

8. Побудувати графіки  $i_M(\omega)$  і  $i_{MA}(\omega)$  в одній системі координат.

9. Отримати емпіричну статичну характеристики фотоелектричного тахометра за допомогою програми Numeri.

9.1. Клавішею «3» ввійдіть у розділ «Інтерполяція».

9.2. Ввійдіть в режим введення експериментальних даних «Введення даних із клавіатури».

9.3. Установіть необхідні параметри для введення даних:

- кількість пар значень 5;
- крок по X xxx;
- початкове значення xxxx.

9.4. Введіть 5 значень струму мікроамперметра для кожного положення, натисніть клавішу «F10» і побудуйте експериментальну статичну ха-

рактеристику фотоелектричного тахометра. Отриману залежність наведіть у звіті.

8.5. Клавішею «Esc» ввійдіть у підрозділ «Поліном», задайте степінь полінома 1 і натисніть клавішу «F10».

8.6. Запишіть розраховані програмою коефіцієнти  $a[0]$  і  $a[1]$ .

8.7. Клавішею «Esc» ввійдіть у підрозділ «Дані» і клавішею «1» задайте режим введення даних з інтерпретатора формул.

8.8. Задайте:

-емпіричну залежність виду  $y=a[0]+a[1]*x$ ;

-початкове значення xxx;

-кінцеве xxxx;

-крок xxx.

9.9. Натисніть клавішу «F10» і побудуйте емпіричну статичну характеристику. Отриману графічну залежність наведіть у звіті.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яка одиниця кутової швидкості є основною?
2. Який засіб вимірювання називають тахометром?
3. Які три основних принципи вимірювання кутової швидкості Ви знаєте?
4. Який вимірювальний перетворювач називають тахометричним?
5. Наведіть узагальнену структурну схему тахометричного перетворювача.
6. За якими трьома ознаками класифікують тахометричні перетворювачі?
7. Наведіть структурну схему і рівняння перетворення тахогенератора постійного струму.
8. Що собою представляють тахометричні перетворювачі просторового кодування?
9. Наведіть структурну схему і рівняння перетворення фотоелектричного тахометричного перетворювача.
10. Які дві основні складові мають цифрові тахометри середніх значень?
11. Виведіть рівняння перетворення для цифрового тахометра середніх значень із фотоелектричним тахометричним перетворювачем.
12. Які дві основні складові мають цифрові тахометри миттєвих значень?
13. Виведіть рівняння перетворення для цифрового тахометра миттєвих значень із фотоелектричним тахометричним перетворювачем.
14. Поясніть фізичну суть стробоефекту.
15. Наведіть структурну схему строботахометра і поясніть принцип дії.
16. Що таке статична характеристика аналогового тахометра?
17. Наведіть методику отримання експериментальної статичної характеристики аналогового тахометра.
18. Наведіть методику отримання емпіричної статичної характеристики аналогового тахометра в середовищі програмного забезпечення NUMERI.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учеб. пособие / В.А.Поджаренко, А.Д.Азаров, В.А.Власенко, И.И.Коваленко.-К.: Выща шк., 1990.
2. Измерение угловых скоростей / Лассан В.Л. М.: изд-во «Машиностроение», 1969.
3. Способы и устройства получения и обработки тахометрической информации / Казанцев Е.М., Напираев Л.Б., Павлович Н.В. М.: Информэлектро, 1985.

## Лабораторна робота №5

### Індуктивні перетворювачі лінійних переміщень

Мета роботи: вивчити принцип дії, вимірювальні схеми індуктивних вимірювальних перетворювачів лінійних переміщень і дослідити їх.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Індуктивні перетворювачі знайшли широке застосування для перетворення механічних величин, які попередньо перетворюються в переміщення. Індуктивні перетворювачі переміщень за своєю конструкцією дуже різні. Основними їх типами є перетворювачі з змінною довжиною повітряного зазору, перетворювачі з змінною площиною магнітного потоку, перетворювачі плунжерного типу, взаємоіндуктивні перетворювачі.

**Перетворювач з змінною довжиною повітряного зазору.** Найпростіший індуктивний перетворювач малих переміщень з змінною довжиною повітряного зазору наведено на рис. 1. Він складається з котушки індуктивності з феромагнітним осердям і рухомого якоря. Між якорем та осердям є повітряний зазор, при зміні якого змінюється повний електричний опір намагнічувального кола.

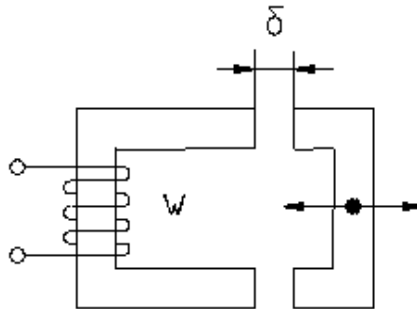


Рисунок 1 - Індуктивний перетворювач переміщень з змінною довжиною повітряного зазору

Такий перетворювач має високу чутливість до вхідної величини (мається на увазі велика відносна зміна індуктивності, яка зумовлена відповідним переміщенням), незначну чутливість до зовнішніх магнітних полів, порівняно невелику ємність (отримання необхідної індуктивності досягається при порівняно невеликій кількості витків, що зумовлює малу паразитну ємність).

Інформативним параметром індуктивного перетворювача з змінним повітряним зазором є повний електричний опір  $Z$  намагнічувального кола, який в першому наближенні визначається

$$Z = R_0 + \omega \frac{X_M W^2}{\left( \rho_M \frac{l_M}{S_M} + \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta} \right)^2} + j\omega \frac{W^2}{\rho_M \frac{l_M}{S_M} + \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta}}, \quad (1)$$

де  $\omega$  - циклічна частота намагнічувального струму;  $X_M$  - складова опору, що

відображає втрати на гістерезис та вихорові струми у феромагнетику;  $W$  - кількість витків;  $R_0$  - електричний опір обмотки постійному струму;  $S_M, S_\delta$  - площа магнітопроводу та повітряного зазору;  $\delta$  - початкова довжина повітряного зазору;  $\mu_0$  - магнітна постійна;  $l_M$  - середня довжина магнітопроводу;  $\rho_M$  - питомий магнітний активний опір магнітопроводу.

$$\text{Якщо ввести позначення } L_E = W^2 / \left( \rho_M \frac{l_M}{S_M} + \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta} \right) \text{ та } k = X_M / \left( \rho_M \frac{l_M}{S_M} + \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta} \right),$$

то рівняння (1) матиме вигляд

$$Z = R_0 + k\omega L_E + j\omega L_E. \quad (2)$$

Параметр  $L_E$  називається еквівалентною індуктивністю перетворювача. При рівності площини перерізу магнітопроводу і повітряного зазору, тобто коли  $S_M = S_\delta = S$ , еквівалентна індуктивність визначається

$$L_E = \frac{W^2 \mu_0 S}{\rho_M \mu_0 l_M + \delta}. \quad (3)$$

При зміні повітряного зазору на  $\Delta\delta$  еквівалентна індуктивність змінюється на величину

$$\Delta L = \frac{W^2 \mu_0 S}{\rho_M \mu_0 l_M + \delta} \left( 1 - \frac{\rho_M \mu_0 l_M + \delta}{\rho_M \mu_0 l_M + \delta + \Delta\delta} \right). \quad (4)$$

Відносна зміна еквівалентної індуктивності при зміні повітряного зазору на  $\Delta\delta$  :

$$\frac{\Delta L}{L_E} \approx \frac{\Delta\delta}{\delta} S_{\text{НОМ}} \left( 1 - \frac{\Delta\delta}{\delta} S_{\text{НОМ}} \right), \quad (5)$$

де  $S_{\text{НОМ}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_M \mu_0 l_M}{\delta}}$  - номінальна чутливість перетворювача переміщення.

Вимірявши зміну індуктивності перетворювача можна визначити лінійне переміщення досліджуваного об'єкта

$$\Delta\delta = \frac{\rho_M \mu_0 l_M + \delta}{1 - \frac{\Delta L (\rho_M \mu_0 l_M + \delta)}{W^2 \mu_0 S}} - \rho_M \mu_0 l_M - \delta. \quad (6)$$

**Диференційний перетворювач з змінним повітряним зазором.** Значного підвищення лінійності перетворення при одночасному збільшенні чутливості досягається за допомогою диференційних перетворювачів. На практиці, як правило, використовують саме такі перетворювачі. Диференційний перетворювач наведено на рис. 2.

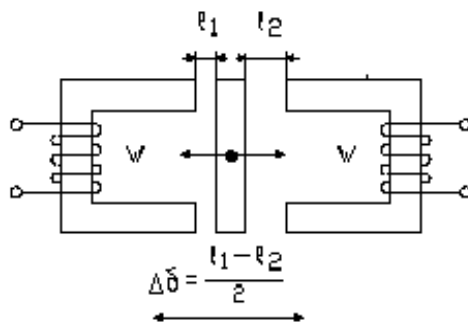


Рисунок 2 - Диференційний індуктивний перетворювач

Диференційний перетворювач складається з двох однакових індуктивних перетворювачів. Під дією вхідної величини  $\Delta\delta$  повний опір обох перетворювачів змінюється дзеркально, тобто на одну і ту саму величину, але з протилежним знаком. Диференційний перетворювач включають в таку вимірювальну схему, яка реагує на алгебричну різницю повних опорів перетворювачів, що входять до складу диференційного перетворювача. За рахунок цього чутливість диференційного перетворювача підвищується в два рази у порівнянні з одинарним. На рис. 3 наведено залежність індуктивності одинарного (крива 1) і диференційного вимірювального перетворювача (крива 2) від лінійного переміщення.

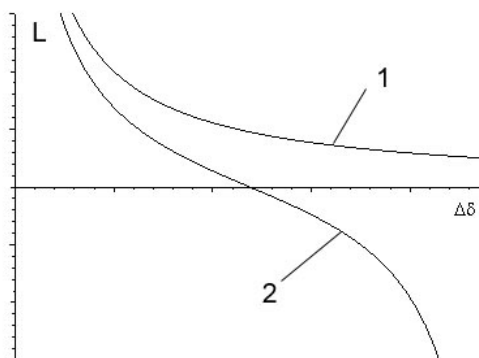


Рисунок 3 - Залежність індуктивності одинарного та диференційного перетворювача від лінійного переміщення

**Перетворювач з змінною площиною магнітного потоку.** На рис. 4 наведено найпростіший індуктивний перетворювач з змінною площиною магнітного потоку.

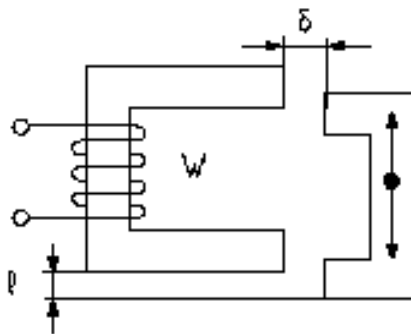


Рисунок 4 - Індуктивний перетворювач з змінною площиною магнітного потоку

Принцип дії індуктивного перетворювача з змінною площиною магнітного потоку заснований на зміні індуктивності перетворювача при зміні площини повітряного зазору  $s$  яка функціонально пов'язана з лінійним переміщенням  $l$  і довжиною повітряного зазору  $\delta$ . При зміні площини зазору змінюється і магнітний потік через переріз магнітопроводу, що зумовлює зміну індуктивності. Залежність індуктивності від площини зазору дуже складна і залежить від конфігурації перерізу магнітопроводу, неоднорідності його матеріалу і багатьох інших факторів. Наближено ця залежність описується такою формулою

$$L = \frac{\mu_0 W^2}{\sum \frac{l_3}{s_3 \mu_3} + \frac{\delta}{s}}, \quad (7)$$

де  $l_3$ ,  $s_3$ ,  $\mu_3$  - відповідно довжина, площа, магнітна проникливість ділянок магнітного осердя.

**Перетворювач плунжерного типу.** Принцип дії індуктивних перетворювачів плунжерного типу заснований на зміні магнітного опору ділянок розсіювання магнітного потоку при переміщенні плунжера. Схематичне креслення найпростішого плунжерного перетворювача наведено на рис.5.

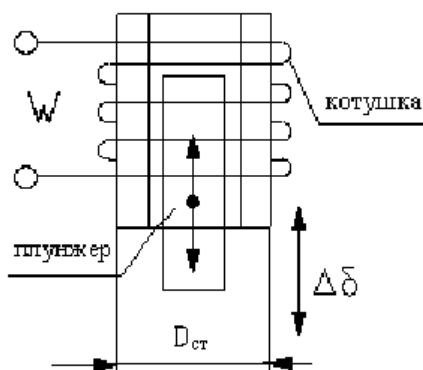


Рисунок 5 - Індуктивний перетворювач плунжерного типу

У цього перетворювача індуктивність є функцією глибини введення плунжера у котушку. Точне теоретичне описання функції перетворення такого перетворювача дуже складне. Однак, якщо знехтувати нерівномірністю розподілу поля у котушці обмеженої довжини, можна записати наближену функцію перетворення

$$\Delta L = \frac{W^2}{4l_k} D_{ст} (\mu_E - 1) \Delta \delta, \quad (8)$$

де  $l_k$  - середня довжина котушки;  $D_{ст}$  - середній діаметр котушки;  $\mu_E$  - ефективна магнітна проникливість кола перетворювача.

Перетворювачі плунжерного типу, внаслідок того, що магнітний потік замикається через повітря, мають відносно нижчу чутливість, ніж перетворювачі зі змінним повітряним зазором.

**Взаємоіндуктивні перетворювачі.** Принцип дії взаємоіндуктивних перетворювачів заснований на явищі зміни наведеної у вторинному колі ЕРС

при зміні повітряного зазору. Взаємоіндуктивні перетворювачі виконують головним чином диференційними, що дозволяє отримати нульовий вихідний сигнал при нульовому переміщенні. Взаємоіндуктивний одинарний перетворювач лінійних переміщень наведено на рис. 6 а, взаємоіндуктивний диференційний перетворювач – на рис. 6 б.

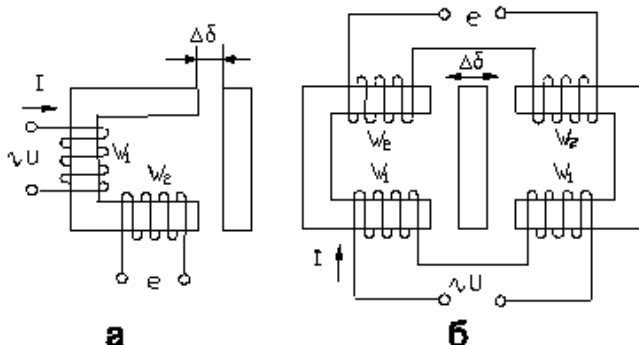


Рисунок 6 - Взаємоіндуктивні перетворювачі

Для одинарного взаємоіндуктивного перетворювача залежність вихідної ЕРС від довжини повітряного зазору наближено визначається

$$e \approx \frac{\omega W_1 W_2 I}{\rho_M \frac{1_M}{S_M} + \frac{\Delta \delta}{\mu_0 S_\delta}}, \quad (9)$$

де  $W_1$ ,  $W_2$  - кількість витків відповідно у первинних та вторинних обмотках;  $I$  - струм у первинній обмотці.

Функція перетворення диференційного взаємоіндуктивного перетворювача в першому наближенні має вигляд:

$$e \approx \frac{2\omega W_1 W_2 I \Delta \delta}{\mu_0 S_\delta \left( \rho_M \frac{1_M}{S_M} + \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta} \right)^2}, \quad (10)$$

Для того, щоб обробити вихідний сигнал індуктивного перетворювача, як правило проводять вторинне перетворення індуктивності в струм або напругу. Для цього застосовуються такі способи включення індуктивних перетворювачів : просте послідовне включення; включення в міст змінного струму; включення в коливальну систему. На рис. 7 наведено просте послідовне включення індуктивного перетворювача з змінною довжиною повітряного зазору.

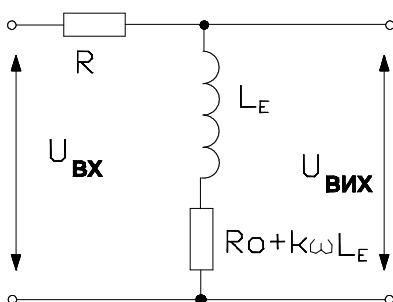


Рисунок 7 - Просте послідовне включення індуктивного перетворювача



На вхід послідовного кола, яке складається з активного опору  $R$  та комплексного опору індуктивного перетворювача подається змінна синусоїдальна напруга  $U_{\text{вх}}$ . При початковому повітряному зазорі

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{Z}{Z+R}. \quad (11)$$

Зміна цієї напруги, що зумовлена зміною комплексного повного опору перетворювача  $\Delta Z$ , визначається

$$\Delta U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{Z}{Z+R} \cdot \frac{\Delta Z}{1 + \frac{R+\Delta Z}{Z}}. \quad (12)$$

Якщо виконується умова  $R \gg Z$ , то ця залежність стає практично лінійною

$$\Delta U_{\text{вих}} \approx U_{\text{вх}} \frac{\Delta Z}{R}. \quad (13)$$

Найбільш розповсюдженим вимірювальним колом індуктивних перетворювачів є включення в мостове коло, що дозволяє досить ефективно використовувати диференційні перетворювачі. Включення одинарного перетворювача в мостове коло наведено на рис. 8 а, включення диференційного перетворювача на рис. 8 б.

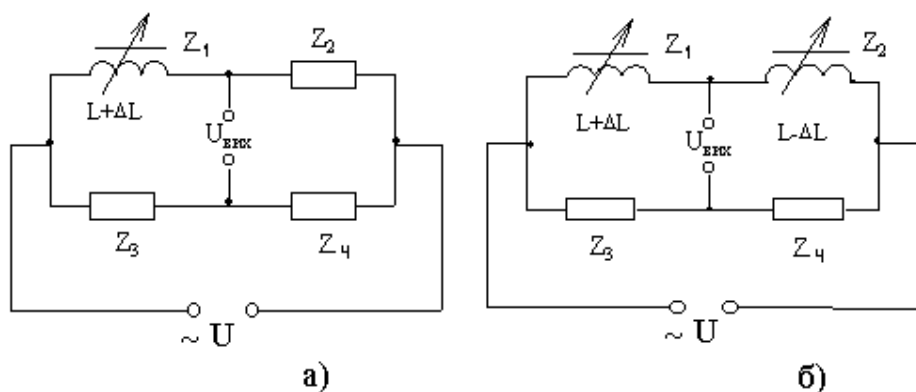


Рисунок 8 - Включення індуктивних перетворювачів в мостове коло

При нульовому зміщенні міст є зрівноваженим і його вихідна напруга дорівнює нулю. При наявності лінійного переміщення і відповідно при зміні еквівалентної індуктивності перетворювача, відбувається розбалансування моста і його вихідна напруга відрізняється від нуля. За величиною приросту вихідної напруги знаходять лінійне переміщення.

Індуктивні перетворювачі також вмикають в коливальну систему автогенератора. У цьому випадку при зміні вхідної величини індуктивного перетворювача змінюється частота або амплітуда коливань, що генеруються. Зміна частоти або амплітуди фіксується частотним або амплітудним детектором, а вихідна напруга детектора, що характеризує значення перетвореної неелектричної величини, вимірюється електричним приладом, шкала якого може градуюватися в одиницях вхідної величини перетворювача.

Лабораторна установка призначена для дослідження двох індуктивних перетворювачів – плунжерного перетворювача, який включений в вимірю-

вальний міст (схема 1), і одинарного взаєміндуктивного перетворювача, який ввімкнено в коливальну систему генератора (схема 2). На рис. 9 наведено розташування тумблерів, затискачів та вимірювальних приладів лабораторної установки.

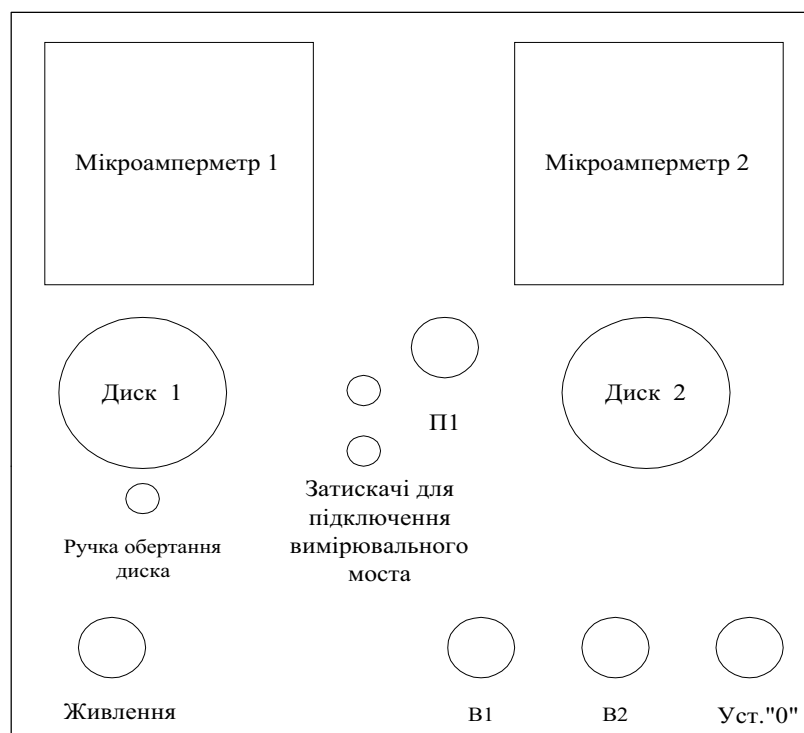


Рисунок 9 - Лабораторна установка

На рис. 10 наведено схему електричну принципову лабораторної установки. Для ввімкнення схеми 1 тумблер В1 необхідно встановити в верхнє положення, тумблер В2 в нижнє, а для ввімкнення схеми 2 В1 встановлюється в нижнє положення, а В2 – в верхнє.

Принцип роботи схеми 1 полягає у наступному. Плунжерний індуктивний перетворювач  $L_x$  ввімкнено в плече мостової схеми, яка побудована на елементах  $R_1, R_2, R_3, C_1$ . Напряга генератора  $G$  подається в одну з діагоналей моста. В іншу діагональ підключено мікроамперметр 1. Переміщення плунжера здійснюється шляхом обертання диску 1 з мітками. При обертанні диску 1 переміщується плунжер, змінюється індуктивність перетворювача  $i$ , відповідно, змінюється струм у вимірювальній діагоналі. При відповідному градуюванні мікроамперметра схема може використовуватися для визначення лінійного переміщення плунжера. Перемикач П1 в положенні 1 підключає індуктивний перетворювач до вимірювального моста, за допомогою якого вимірюється його індуктивність. В положенні 2 перемикача П1, індуктивний перетворювач вмикається в вимірювальне мостове коло.

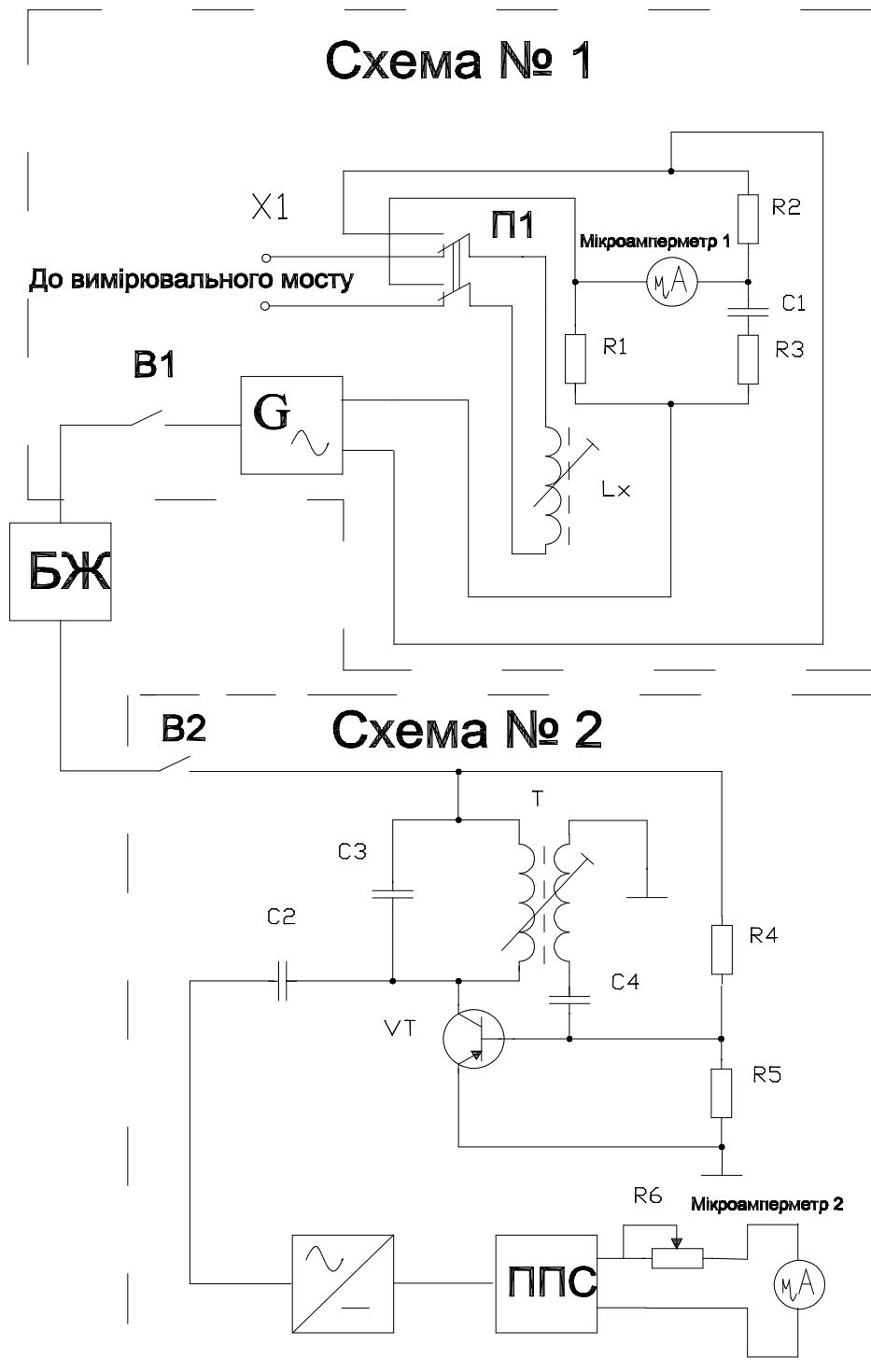


Рисунок 10 - Схема лабораторної установки

На рис. 11 наведена графік залежності лінійного переміщення плунжера від поділок диска 1, а в таблиці 1 представлено числові значення цієї залежності.

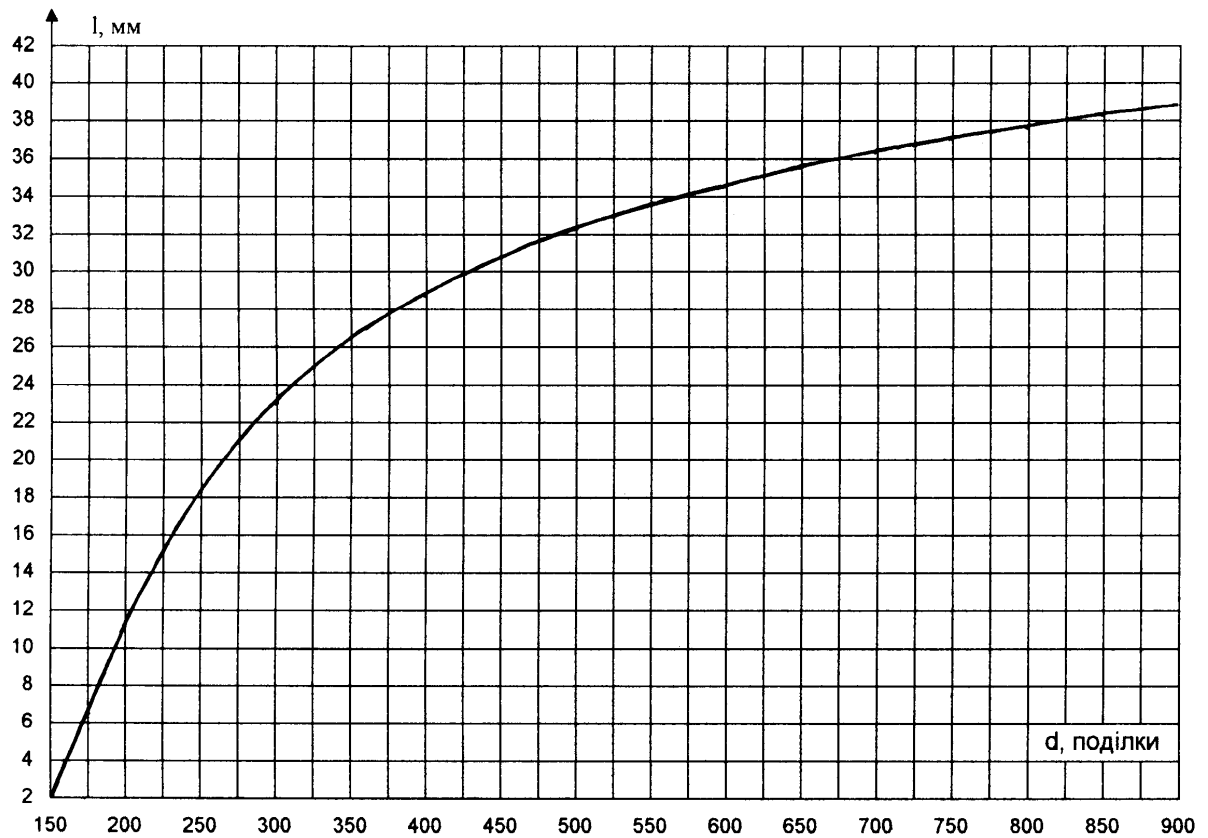


Рисунок 11 - Графік залежності переміщення плунжера від поділок диска 1 для схеми № 1

Таблиця 1

Поділка диска, d	Переміщення l (мм)	Поділка диска, d	Переміщення l (мм)
150	0	340	25.9
155	1.5	350	26.3
160	2.8	360	26.9
165	4.1	370	27.6
170	5.3	380	27.8
175	6.6	390	28.2
180	7.7	400	28.7
185	8.8	420	29.6
190	9.6	440	30.3
195	10.4	460	31.0
200	11.2	480	31.6
210	12.0	500	32.2
220	14.6	520	32.7
230	15.9	540	33.2
240	17.1	560	33.7
250	18.2	580	34.2
260	19.4	600	34.6
270	20.3	650	35.6
280	21.2	700	36.2
290	22.1	750	37.0
300	23.0	800	37.5
310	23.6	850	38.1
320	24.3	900	38.6
330	25.0		

В схемі 2 взаємоіндуктивний перетворювач Т включено в коло зворотного зв'язку автогенератора, який побудовано на елементах С2, С3, С4, R4, R5, VT. При обертанні диска 2 змінюється повітряний зазор взаємоіндуктивного перетворювача і відповідно змінюється коефіцієнт зворотного зв'язку автогенератора. При зміні повітряного зазору перетворювача змінюється індуктивність коливального контуру, його резонансна частота і резонансний опір. Внаслідок цього змінюється частота генерації і амплітуда коливань. Ці параметри знаходяться в певному зв'язку з величиною повітряного зазору перетворювача. Вихідна напруга генератора детектується амплітудним детектором, підсилюється підсилювачем постійного струму ППС і вимірюється за допомогою мікроамперметра 2. Показання мікроамперметра 2 залежать від лінійного переміщення, що зумовлює зміну повітряного зазору перетворювача. На рис. 12 наведено графік залежності лінійного переміщення від поділок диска 2, а в таблиці 2 представлено числові значення цієї залежності.

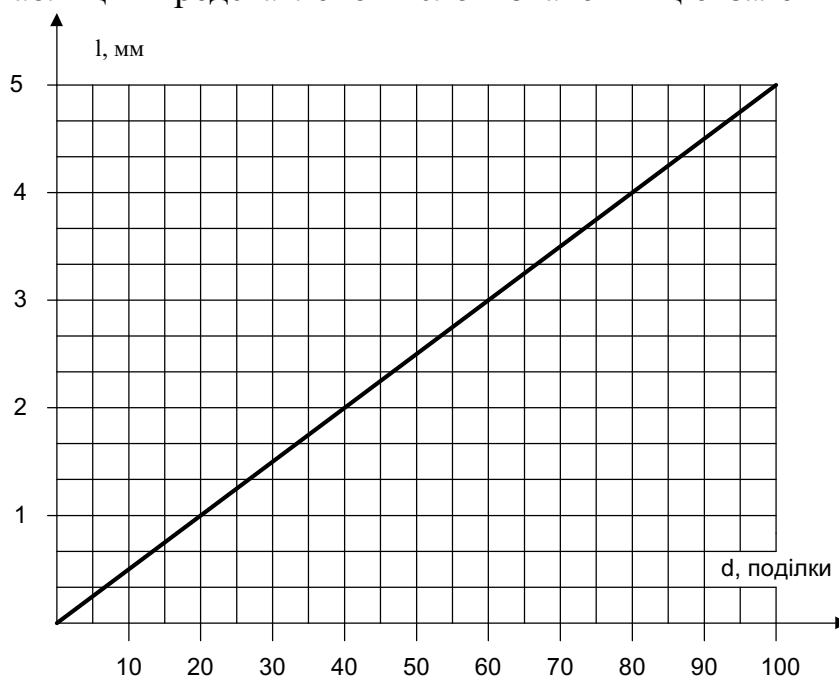


Рисунок 12 - Графік залежності повітряного зазору взаємоіндуктивного перетворювача від поділок диска для схеми №2

Таблиця 2

Поділка диска, d	Переміщення l (мм)
0	0
10	0.5
20	1.0
30	1.5
40	2.0
50	2.5
60	3.0
70	3.5
80	4.0
90	4.5
100	5.0

## ХІД РОБОТИ

1. Дослідити мостову схему з плунжерним індуктивним перетворювачем лінійних переміщень.

1.1. Включити міст змінного струму P591, заздалегідь встановивши перемикач "Запуск" в положення "Ручний", а перемикач "Рід роботи" в положення "L".

1.2. Індуктивний перетворювач підключити до моста змінного струму P591 (перемикач "П1" в положення 1).

1.3. Включити тумблер "Мережа" на лабораторному макеті. Подати живлення на схему 1, для цього тумблер В1 встановити в верхнє положення, тумблер В2 – в нижнє.

1.4. Встановивши на диску 1 поділки від 150 до 900 з кроком 50 поділок виміряти залежність індуктивності перетворювача від поділок диска за допомогою моста P591. Запуск вимірювального моста відбувається після натискання кнопки «Пуск». Результати вимірювань занести в табл. 3.

Таблиця 3

Поділки диска 1	150	200	...	900
Лінійне переміщення плунжеру, мм				
Індуктивність перетворювача, мГн				
Струм мікроамперметра 1, мкА				

1.5. За допомогою графіка на рис. 11 або таблиці 1 визначити лінійне переміщення плунжера відповідне поділкам диска, в яких проводилися вимірювання. Результати занести в табл. 3.

1.6. Індуктивний перетворювач ввімкнути в плече мостової схеми (перемикач П1 в положення 2).

1.7. Зняти показання мікроамперметра 1 в тих самих точках, в яких було проведено вимірювання у попередньому пункті. Результати занести в табл. 3.

1.8. За результатами табл. 3. побудувати залежність індуктивності перетворювача від лінійного переміщення плунжера  $L_E = f(l)$ .

1.9. Знайти чутливість індуктивного перетворювача на початку, всередині і в кінці отриманої статичної характеристики

$$S_L = \frac{\Delta L_E}{\Delta l}, \quad (14)$$

де  $S_L$  – чутливість;  $\Delta l$  - приріст лінійного переміщення;  $\Delta L_E$  - приріст індуктивності перетворювача, відповідний  $\Delta l$ . При розрахунку чутливості необхідно  $\Delta l$  обирати таким малим, наскільки дозволяє масштаб побудованої кривої.

2. Дослідити взаємоіндуктивний перетворювач лінійних переміщень, ввімкнений в коло зворотного зв'язку автогенератора.

2.1. Подати живлення на схему 2, для цього тумблер В1 встановити в нижнє

положення, тумблер В2 – в верхнє.

2.2. Диск 2 встановити на 0. Потенціометром "Уст. 0" встановити стрілку мікроамперметра 2 на 0.

2.3. Встановлюючи диск 2 на оцифровані поділки знімати показання мікроамперметра 2. Результати вимірювань занести в табл. 4.

Таблиця 4

Поділка диска 2	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Лінійне переміщення, мм										
Струм мікроамперметра 2, мкА										

2.4. За допомогою графіка на рис. 12 або табл. 2 знайти лінійне переміщення осердя взаємоіндуктивного перетворювача для кожної точки, в якій знімалися показання мікроамперметра. Результати занести в табл. 4.

2.5. За результатами табл. 4 побудувати залежність струму мікроамперметра 2 від лінійного переміщення осердя взаємоіндуктивного перетворювача.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Основні види індуктивних вимірювальних перетворювачів переміщень.
2. Принцип дії індуктивного перетворювача з змінним повітряним зазором.
3. Диференційний індуктивний перетворювач.
4. Індуктивні перетворювачі плунжерного типу.
5. Взаємоіндуктивні перетворювачі.
6. Мостове ввімкнення індуктивних перетворювачів.
7. Ввімкнення індуктивних перетворювачів в коливальну систему.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Е.С. Полищук. «Измерительные преобразователи» - К.: Вища школа, 1981.
2. Д. И. Агейкин, Е. Н. Костина, Н. И. Кузнецова. «Датчики контроля и регулирования».- М.: Госэнергоиздат, 1965г.
3. Л. Ф. Куликовский, «Индуктивные измерители перемещений». -М.: Госэнергоиздат, 1961г.
4. «Проектирование датчиков» Под ред. Е. П. Осадчего. -М.: Машиностроение, 1979г.
5. В. Н. Логинов. «Электрические измерения механических величин». -М.: Энергия, 1976г.
5. Л. А. Осипович. «Датчики физических величин». -М.: Машиностроение, 1979г.

## Лабораторна робота № 6

### Цифрові вимірювальні прилади

Мета роботи - вивчити елементну базу та структурні схеми цифрових вимірювальних приладів і практично засвоїти принципи їх побудови на лабораторному стенді.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У зв'язку з широким розвитком комплексної автоматизації виробничих процесів і експериментальних досліджень із застосуванням ЕОМ зростають відповідні вимоги до вимірювальної техніки:

- підвищення точності, швидкодії, чутливості при вимірюванні величин, які змінюються;
- здійснення повної автоматизації складних процедур прямих, непрямих, сукупних і сумісних вимірювань;
- видача результатів вимірювань у кодованій формі безпосередньо інформаційно-вимірювальній системі;

Ці завдання вирішують цифрові вимірювальні прилади, поширення яких зумовлене такими перевагами цих засобів вимірювання порівняно з аналоговими вимірювальними приладами. Швидкодія до сотень, мільйонів вимірювань у секунду. Висока інформаційна спроможність цифрових відлікових пристроїв значно підвищує здатність оператора до сприйняття інформації. ЦВП мають вихід у вигляді коду для зв'язку з ЕОМ, пристроями пам'яті або принтерами. Висока точність, яка перевищує при наявності автоматичної обробки результатів вимірювань точність цифрових приладів ручного зрівноважування. Відсутність суб'єктивної похибки результату вимірювання, наявність якої (при обмеженій довжині шкали) лімітує максимально досягнутою точністю аналогових приладів. Наявність виходу у вигляді кодового сигналу, зручного для цифрової обробки, а також для запам'ятовування і передачі. Можливість автоматичного калібрування і автоматичного введення поправки для зменшення систематичної похибки. Можливість усереднення результатів вимірювання для зменшення випадкових похибок.

Цифровими називаються такі вимірювальні прилади, в яких вимірювана величина автоматично в результаті квантування, дискретизації, порівняння, цифрового кодування і відповідних обчислень постає у вигляді коду, що виражає значення цієї величини.

Принцип роботи ЦВП ґрунтується на дискретному відображенні неперервних величин. Неперервна величина  $X(t)$  -це величина, яка може мати в заданому діапазоні  $D$  нескінченно велике число значень в інтервалі часу  $T$  при нескінченно великому числі моментів часу (рис. 1, а). Величина може бути неперервною або за значенням, або у часі. Величина, неперервна за значенням і перервна у часі, називається дискретизованою (рис. 1, б). Значення дискретизованої величини відрізняється від нуля тільки в певні моменти ча-



су. Процес перетворення неперервної в часі величини в дискретизовану шляхом збереження її миттєвих значень тільки в детерміновані моменти часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$  називається дискретизацією. Кроком дискретизації  $T_d$  називається проміжок часу між двома сусідніми моментами видання миттєвих значень сигналу.

Величина, неперервна в часі і перервна за значенням, називається квантованою (рис. 1, в). Вимірювальне перетворення аналогової величини в ступінчасту змінювану із заданими розмірами квантів називається квантуванням. Кроком квантування  $h$  називається різниця між двома сусідніми заданими значеннями квантованої величини. Крок квантування може бути змінним або постійним.

Неперервна величина може бути дискретизованою в часі і квантованою за значенням (рис. 1, г). Аналогова величина  $X(t)$  після квантування за рівнем і дискретизацією у часі в ЦВП обмежується кількістю значень цифрового показувального пристрою. Як наслідок, у результаті квантування і дискретизації втрачається інформація, що є причиною виникнення похибок квантування і дискретизації.

Основні похибки цифрових вимірювальних приладів складаються з похибки квантування  $\Delta X_k$ , дискретизації  $\Delta X_d$  і інструментальної  $\Delta X_i$  :

$$\Delta X_{\text{ЦВП}} = F(\Delta X_k, \Delta X_d, \Delta X_i).$$

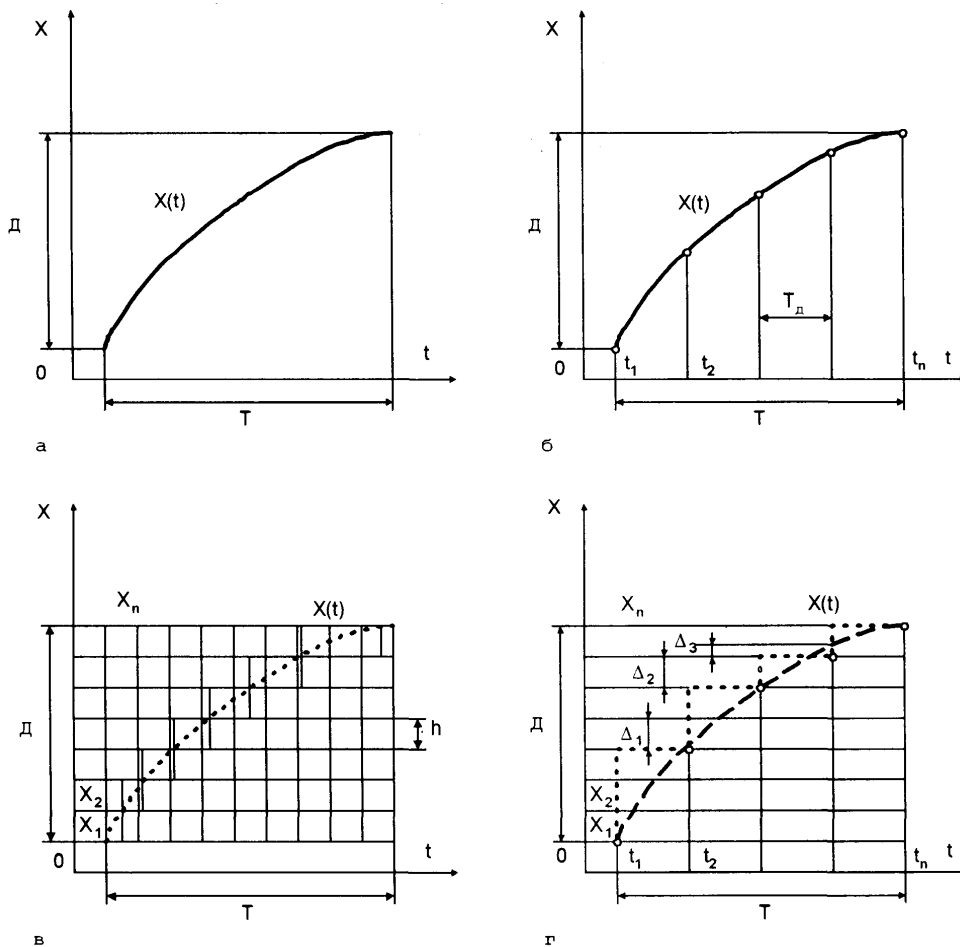


Рисунок 1 - Дискретне подання неперервної величини  $X(t)$ . а – неперервна; б - дискретизована; в - квантована; г - дискретизована і квантована

Похибка квантування  $\Delta X_k$  - це методична похибка, що виникає через обмежене число рівнів квантування  $h$  внаслідок заміни неперервної величини квантованою:

$$\Delta X_k = \frac{1}{2} h.$$

Похибка  $\Delta X_k$  належить до статичних. У процесі вимірювання фізичної величини виникає динамічна похибка, що дорівнює різниці між вихідним кодом приладу і дійсним значенням вимірюваної величини в момент часу, який розглядається (за умови, що статична похибка дорівнює нулю). Динамічна похибка зумовлена скінченим часом вимірювання  $T_{\text{вим}} = T_d$ , протягом якого вимірювана величина може значно змінюватися.

Динамічна похибка – це похибка, що виникає внаслідок зміни вимірюваної величини під час вимірювань:

$$\Delta X_d = \frac{1}{2} T_d \frac{dX}{dt},$$

де  $T_d$  - крок дискретизації;  $\frac{dX}{dt}$  - швидкість зміни вихідної величини.

Із цього виразу випливає, що динамічна похибка обмежує швидкість зміни вимірюваної величини.

Похибки, пов'язані або викликані порогом чутливості пристрою порівняння або його нестабільністю, похибки від впливу перешкод на елементи цифрових вимірювальних приладів складають інструментальні похибки  $\Delta X_i$ .

Узагальнена структурна схема ЦВП (рис. 2) складається з вимірювального перетворювача з вихідною величиною  $X_i$ , зручною для автоматичного квантування, аналого-цифрового перетворювача А/D, перетворювачів код-код D/D і цифрового показувального пристрою ВП.

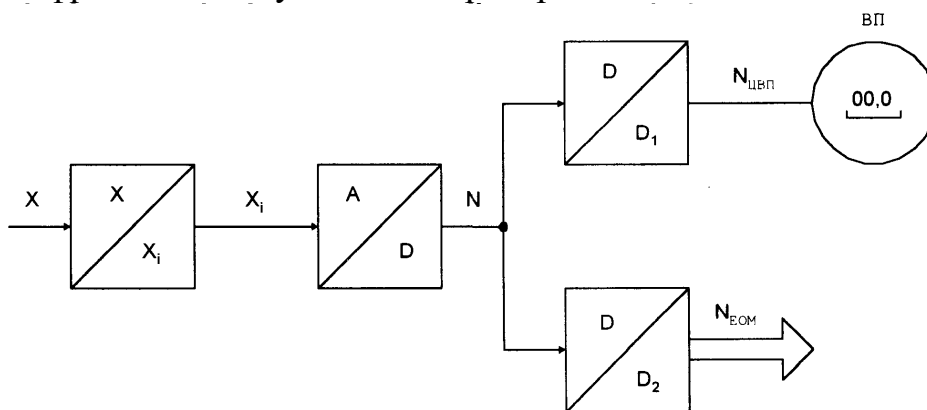


Рисунок 2 - Узагальнена структурна схема ЦВП

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює аналогову (вимірювану) величину в цифровий двійковий код, а ЦВП відображає це значення в десятковій системі числення. Аналого-цифрові перетворювачі - не тільки складова частина ЦВП, вони можуть і самостійно використовуватись у вимірювальних, інформаційних, керуючих та інших системах. АЦП випускається промисловістю як автономні пристрої, котрі на відміну від ЦВП не мають

цифрового показувального пристрою; вони видають на виході тільки двійковий код. Порівняно з цифровими вимірювальними приладами АЦП виконуються більш швидкодіючими, але менш точними, найчастіше вони мають один діапазон для однієї вимірюваної величини. Крім АЦП до цифрових перетворювачів відносяться цифро-аналогові перетворювачі ЦАП, призначені для перетворення двійкового коду в аналогову квантовану величину. Такі перетворювачі застосовуються не лише як вузол ЦВП і АЦП, а й як автономні пристрої. Необхідність перетворювачів код-код D/D пояснюється тим, що код, потрібний для роботи цифрового показувального пристрою, може не відповідати вихідному коду A/D. На виході A/D найчастіше формується двійковий код, а оператору для сприйняття найбільш зручний десятковий. У цьому зв'язку перетворювач код-код D/D<sub>1</sub> перетворює двійковий код N на двійково-десятковий N<sub>ЦВП</sub>, який потім подається на цифровому показувальному пристрої в десятковій системі числення. Другий перетворювач код-код D/D<sub>2</sub> необхідний для уніфікації коду для подальшого спряження ЦВП, аналого-цифрових перетворювачів з ЕОМ, введення їх у склад комп'ютерно-вимірювальних систем і комплексів. Класифікація ЦВП аналогічна класифікації методів прямих вимірювань (рис. 3), які розподіляються на методи зіставлення і зрівноважування.



Рисунок 3 - Класифікація цифрових вимірювальних приладів

Відповідно, залежно від методу вимірювання, який реалізується, ЦВП розподіляються на прилади зіставлення і зрівноважування. Структурні схеми ЦВП зіставлення розімкнені, а ЦВН зрівноважування - замкнені. Структурна схема ЦВП розімкненого типу містить ряд послідовно ввімкнених вимірювальних перетворювачів, кожний з яких може бути охоплений власним зворотним зв'язком.

Характерною особливістю структури таких вимірювальних пристроїв є відсутність загального зворотного зв'язку з виходу на вхід. Засоби вимірювання цього типу характеризуються більш високою швидкістю і більшою похибкою порівняно з ЦВП зрівноважування. Характерною рисою структури замкненого типу є наявність загального зворотного зв'язку з виходу на вхід, тобто вхідна величина у процесі перетворення зрівноважується вихідною величиною. Цифрові прилади зрівноважування розподіляються на прилади стежного і розгортувального зрівноважування. У цифрових стежних приладах компенсуюча величина змінюється за сигналом пристрою порівняння в бік зменшення чи збільшення. У цифрових приладах розгортувального зрівноважування компенсуюча величина змінюється примусово циклами, які повторюються за раніше заданою програмою в бік збільшення чи зменшення керуючим автоматом і мірою.

В інформаційно-вимірювальній техніці переважного значення набув розвиток засобів вимірювань електричних величин (напруги, частоти, фази, параметрів електричних кіл), оскільки більшість фізичних величин у процесі вимірювання перетворюються на електричні як найбільш зручні для передавання, порівняння, точного відтворення і вимірювання). Отже, за виглядом вхідної (вимірюваної) величини ЦВП розподіляються на цифрові частотоміри, фазометри та вимірювачі параметрів електричних кіл. Якщо  $X$  є аналоговою величиною, зручною для квантування, тобто інтервалом часу  $T_x$ , частотою  $f_x$ , фазою  $\varphi_x$ , або напругою  $U_x$ , то застосовують розімкнену схему цифрового приладу зіставлення з перетворювачем  $T_x$ -код,  $f_x$  - код,  $\varphi_x$  - код або  $U_x$  - код.

Лабораторний стенд «Цифрові вимірювальні прилади» (рис. 4) призначений для вивчення принципів дії й архітектури побудови цифрових частотомірів, періодомірів, фазометрів і вольтметрів. Схема електрична принципова стенда реалізована у вигляді друкованої плати, на якій знаходяться такі конструктивно закінчені елементи: два компаратора (=) 1 і 2; два формувачі імпульсів F1 і F2; подільник частоти  $f / f/n$  з трьома коефіцієнтами ділення; Два D – тригери (Т) з RS- входами; два інвертори; три схеми збігу SW1, SW2 і SW3; реверсивний двійково-десятковий лічильник СТ2/10; реверсивний двійковий лічильник СТ2; цифро-аналоговий перетворювач ЦАП; дешифрактор DC; цифровий індикатор ЦІ; аналоговий комутатор АК; два інвертори; формувачі імпульсів за переднім фронтом F3, F5; формувачі імпульсів за заднім фронтом F4, F6; генератор прямокутних імпульсів  $G_{\Pi}$ ; генератор лінійно-змінної напруги  $G_{\Delta}$ ; формувач логічного рівня FLn; регульоване джерело постійної напруги  $U_{-}$ ; генератор синусоїдального сигналу  $G_{\sim}$  з вбудованим

фазозсувним КОЛОМ.

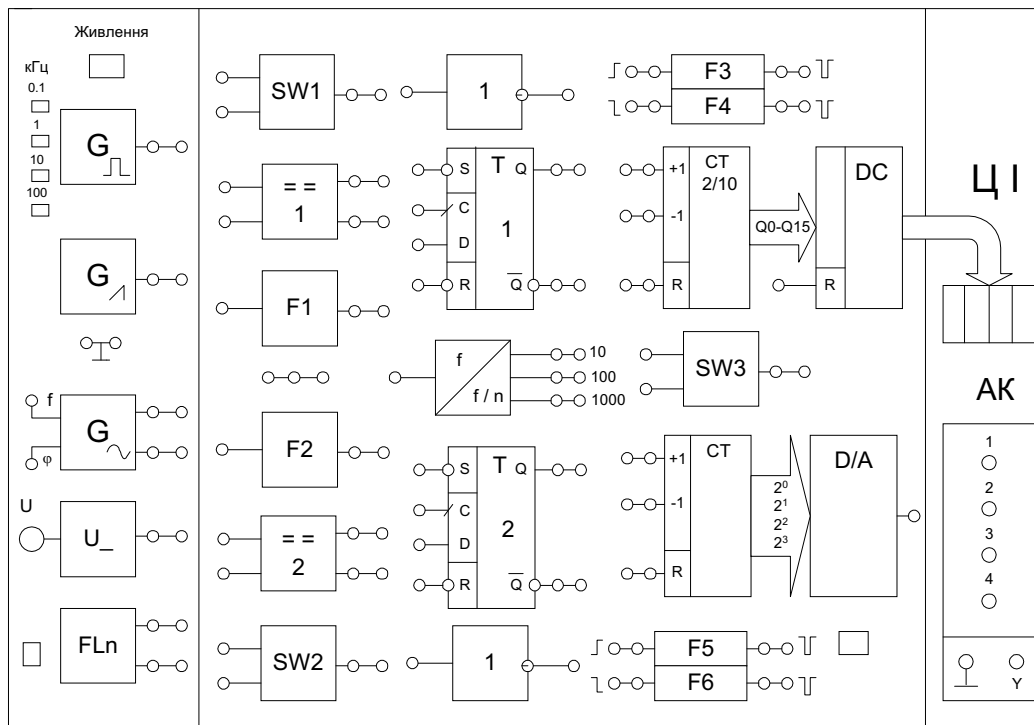


Рисунок 4 - Передня панель лабораторного стенда

Входи і виходи перерахованих елементів виведені на клемні поля передньої панелі стенда. За допомогою комутації відповідних входів і виходів елементів представляється можливість реалізувати структурні схеми різних цифрових вимірювальних приладів.

## ВУЗЛИ ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

**Компаратор.** Компаратор – це найпростіший перетворювач безперервного сигналу в дискретний. Напряга на виході компаратора може знаходитись в одному із двох фіксованих рівнів: на верхньому (напряга логічної одиниці), якщо напряга на його неінвертуючому вході більше напруги на інвертуючому вході, і на нижньому (напряга логічного нуля) - при протилежному співвідношенні цих напруг. Компаратор, що використовується у лабораторному стенді, має два входи – інвертуючий і неінвертуючий (інвертуючий вхід позначається  $\ominus$ ) і два виходи – прямий та інверсний (інверсний вихід позначається знаком  $\oplus$ ). Коли на неінвертуючому вході рівень напруги більше, ніж на інвертуючому, на прямому виході компаратора з'являється рівень логічної одиниці, в протилежному випадку – рівень логічного нуля. На інверсному виході компаратора у будь-якому випадку сигнал інверсний по відношенню до сигналу на прямому виході.

**Формувачі імпульсів F1 і F2.** Формувачі мають один вхід і один вихід. Призначення цих формувачів – перетворювати напругу синусоїдального сигналу в послідовність прямокутних імпульсів.

Формувач реалізований на тригері Шмідта, який реалізований на інтегральній мікросхемі KI55ТЛ2.

**Подільник частоти.** Подільник частоти, вбудований в лабораторний стенд, має один вхід і три виходи, кожен з яких відповідає певному коефіцієнту ділення. Призначення подільника – ділення частоти вхідної послідовності прямокутних імпульсів з одним з трьох можливих коефіцієнтів ділення 10, 100, 1000. На виході подільника частоти формується послідовність прямокутних імпульсів, частота якої менша частоти вхідної послідовності в 10, 100, або 1000 разів.

**Генератори прямокутних імпульсів та лінійно-змінної напруги.** Генератори прямокутних імпульсів та лінійно-змінної напруги побудовані на інтегральному таймері КР1006ВИ1.

Генератор прямокутних імпульсів реалізовано за схемою автоколивального мультівібратора. При ввімкненні живлення відбувається збудження схеми мультівібратора і на його виході формуються послідовність прямокутних імпульсів, частота і тривалість яких залежить від постійної часу кола заряду - розряду мультівібратора.

Генератор лінійно-змінної напруги складається з автоколивального мультівібратора та інтегруючого RC – кола. При певному співвідношенні між тривалістю імпульсів та постійної часу RC – кола, за допомогою якого здійснюється їх інтегрування, на виході інтегруючого кола формується напруга, що мало відрізняється від ідеальної лінійно – змінної.

**Схема збігу.** Схема збігу SW реалізує операцію логічного множення (операцію I) вхідних сигналів. Двовходові елементи I (які використовуються в лабораторній роботі) часто називають ще вентилями або ключами. Якщо X1 і X2 - вхідні сигнали, що надходять на 2-входовий елемент I, то значення вихідного сигналу Y визначається як  $Y=X1 \& X2$ . Сигнал на виході елемента I (схеми збігу) приймає значення логічної 1, якщо усі вхідні сигнали одночасно приймають значення логічної 1. У протилежному випадку вихідний сигнал має значення логічного 0.

**Тригери.** У лабораторному стенді використовується D-тригер (мікросхема К555ТМ2), який має R- та S- входи і може працювати як RS-тригер.

D-тригер при сигналі на тактовому вході С встановлюється в стан, що відповідає потенціалу на вході D. Якщо позначити вихідний сигнал тригера буквою Q, то для D-тригера можна записати таку рівність:  $Q_n = D_{n-1}$ . Індеси n і n-1 вказують на те, що вихідний сигнал Q змінюється не відразу після зміни вхідного сигналу D, а тільки з приходом тактового сигналу С. Тактування D-тригера може здійснюватися потенціалом або фронтом. В тактуючому фронті D-тригері зміна потенціалу на вході D, яка синхронна з тактовими імпульсами, повторюється на виході Q із затримкою на один період тактових імпульсів (звідси і назва - тригер затримки).

Якщо інверсний вихід D – тригера з'єднати з його D – входом, то з приходом кожного тактового імпульсу на вхід С, тригер буде змінювати свій стан на протилежний. Такий тригер називається лічильним або Т-тригером.

RS-тригер має два керуючі входи, S і R: потенціал «нуль» на вході S (при R = 1) встановлює тригер в одиницю ( $Q = 1; \bar{Q} = 0$ ), потенціал «нуль»

на вході R (при  $S=1$ ) встановлює тригер в нуль ( $Q = 0$ ;  $\bar{Q} = 1$ ). Для тригера RS комбінація  $S = 0$  і  $R = 0$  є забороненою. Після такої комбінації керуючих сигналів стан тригера буде невизначеним: він може виявитися або в нулі або у одиниці.

**Лічильники.** У роботі досліджуються двійковий СТ 2 і двійково-десятковий реверсивний лічильники СТ 2/10. Лічильниками називаються послідовні цифрові пристрої, які призначені для підрахунку та запам'ятовування кількості імпульсів, що поступили на його лічильний вхід за певний часовий інтервал. Двійково-десятковий лічильник (рачує від нуля до дев'яти, а потім відлік починається з нульового значення) реалізовано на мікросхемах К155ІЕ2, двійковий лічильник – на мікросхемах К555ІЕ7.

Коли на вхід +1 мікросхем поступає послідовність імпульсів, цифровий код на виходах лічильника збільшується на одиницю з приходом кожного нового імпульсу. У випадку, коли послідовність імпульсів поступає на вхід – 1, цифровий код на виходах лічильника зменшується на одиницю з приходом кожного імпульсу. Вхід R лічильників призначений для встановлення всіх розрядів лічильника в нульовий стан.

**Дешифратор та цифровий індикатор.** З виходу двійково-десятьового лічильника цифровий код подається на вхід дешифратора, який перетворює цей код в код для керування семи сегментним цифровим індикатором АЛС333Б. Дешифратор реалізовано на мікросхемі КР5І4ПР1, яка має чотири інформаційних входи А0-А3, призначених для прийому 4-розрядного двійкового слова.

**Цифро-аналоговий перетворювач.** Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) призначені для перетворення цифрового коду N в пропорційні аналогові рівні напруги  $U(N)$ .

В лабораторній роботі використовується мікросхема ЦАП К572ПА1. Десятирозрядний двійковий код, що надходить від двійкового лічильника СТ2, перетворюється ЦАП у постійний рівень вихідної напруги, який прямо пропорційний коду на виході лічильника.

**Аналоговий комутатор.** Аналоговий комутатор забезпечує можливість спостерігати на екрані однопроменевого осцилографа одразу чотири сигнали в різних точках схеми. Для цього сигнали з досліджуваних точок подаються на входи 1, 2, 3, 4 комутатора, а його вихід Y з'єднується зі входом осцилографа.

**Генератор синусоїдального сигналу з фазозсувним колом.** Генератор формує напругу синусоїдального сигналу фіксованої амплітуди, частоту якої можна змінювати ручкою f. Генератор має також інший вихід, сигнал на якому зсунутий за фазою відносно сигналу на першому виході. Зсув фаз змінюється ручкою  $\phi$ .

**Регульоване джерело постійної напруги  $U_0$ .** На виході формується постійна напруга в діапазоні від 0 до 5 В. Регулювання здійснюється ручкою змінного резистора.

**Інвертор.** Інвертор виконує логічну функцію НІ. Коли на його вході присутній рівень логічної одиниці, на виході формується рівень логічного нуля, і навпаки.

**Формувач логічного рівня FLn.** На верхньому (рис. 4) виході формувача при ввімкненні живлення формується рівень логічної одиниці, а на нижньому виході – рівень логічного нуля. При натиснутій кнопці рівні сигналів змінюються на протилежні.

**Формувачі імпульсів за переднім фронтом F3, F5.** При ввімкненні живлення на виході формувачів присутній рівень логічної одиниці. Коли на вхід формувача поступає прямокутний імпульс, в момент дії його переднього фронту на виході формувача формується рівень логічного нуля. Тривалість знаходження формувача в цьому стані дуже мала (десятки нс), після чого він встановлюється в попередній стан.

**Формувачі імпульсів за заднім фронтом F4, F6.** Ці формувачі працюють аналогічно формувачам F3 і F5 з тією різницею, що рівень логічного нуля формується в момент дії заднього фронту.

## ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ

### Цифровий частотомір середніх значень

Частота  $f$  періодичного сигналу - це фізична величина, значення якої визначають як кількість коливань в одиницю часу.

Принцип дії цифрового частотоміра середніх значень засновано на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий часовий інтервал часу  $t_0$ .

Структурну схему цифрового частотоміра середніх значень наведено на рис.5, а часові діаграми його роботи – на рис.6.

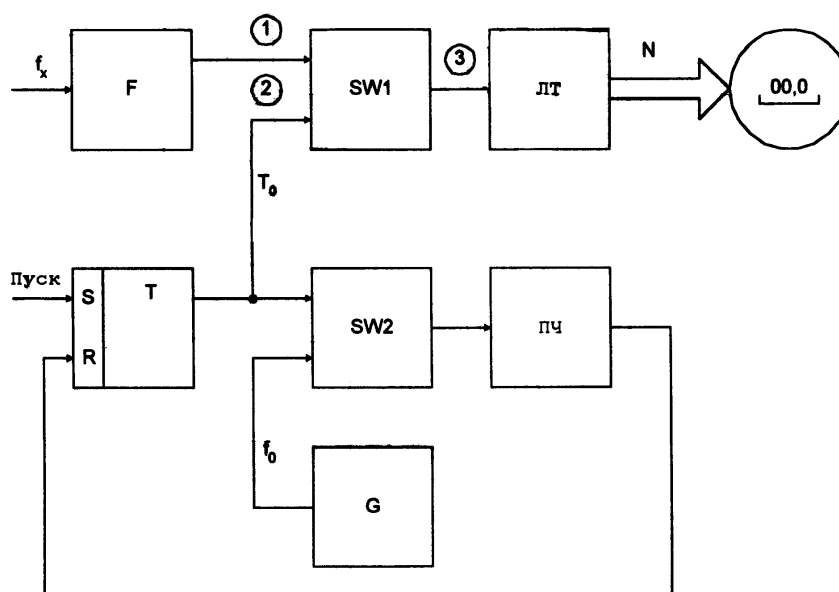


Рисунок 5 - Структурна схема частотоміра середніх значень



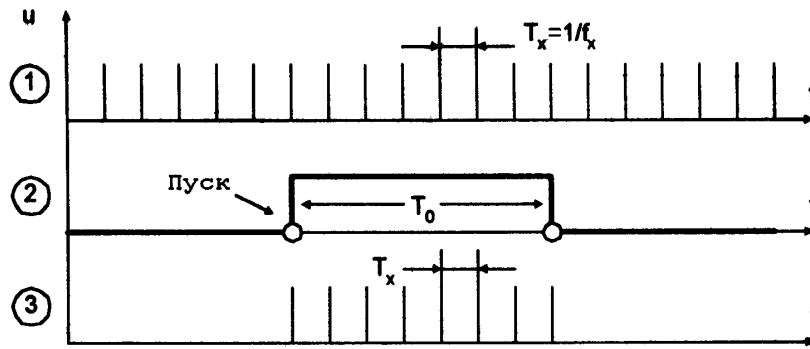


Рисунок 6 - Часові діаграми роботи частотоміра середніх значень

Структурна схема частотоміра містить такі основні блоки. Зразкову міру часу ЗМЧ / Т – RS – тригер, SW2 – схема збігу, G – генератор стабільної частоти, ПЧ – подільник частоти, що формує зразковий часовий інтервал  $T_0$ ; Лічильник ЛТ, який підраховує кількість імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий інтервал часу  $t_0$ ; Схему збігу SW1, де здійснюється квантування зразкового часового інтервалу імпульсами невідомої частоти. Формувач імпульсів F, який із вхідних сигналів формує прямокутні імпульси, калібровані за амплітудою і тривалістю.

За командою "Пуск" тригер Т встановлюється у стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу SW1 і SW2. Імпульси, які слідуєть із частотою  $f_x$  через формувач F і відкриту схему збігу SW1, надходять на вхід двійкового лічильника ЛТ, який здійснює їх підрахунок. В цей самий момент часу через відкриту схему збігу SW2 імпульси  $f_0$  з виходу генератора G стабільної частоти надходять на вхід подільника частоти ПЧ, коефіцієнт розділення якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу  $t_0$ . Після закінчення зразкового часового інтервалу заднім фронтом імпульсу  $t_0$  тригер Т встановлюється у стан логічного нуля, схеми збігу SW1 і SW2 закриваються і в лічильнику ЛТ фіксується код N. Кількість імпульсів невідомої частоти, які підраховує двійковий лічильник за час  $t_0$  визначається

$$N_i = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{t_0}{T_x} = t_0 f_x,$$

де  $t_1, t_2$  - моменти часу початку та закінчення зразкового часового інтервалу.

Зразковий часовий інтервал формується в подільнику частоти і визначається

$$t_0 = k \cdot T_0,$$

де k - коефіцієнт переліку подільника частоти;

$T_0$  - період імпульсів зразкової частоти  $f_0$ .

Тоді рівняння перетворення цифрового частотоміра середніх значень має вигляд

$$N_F = k \cdot T_0 \cdot f_x = \frac{k \cdot f_x}{f_0}.$$

Подане співвідношення є рівнянням перетворення частотоміра, оскільки воно характеризує, яким чином зв'язані між собою вихідна  $N_F$  і вхі-

дна  $f_x$  величини. Статична характеристика цифрового частотоміра середніх значень лінійна (рис.7).

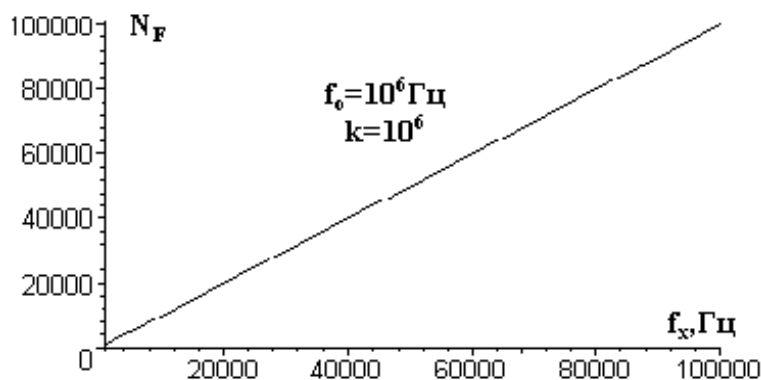


Рисунок 7 - Статична характеристика цифрового частотоміра середніх значень

У цифровому вимірювальному приладі за умови постійної абсолютної похибки в діапазоні зміни вимірюваної величини межа допуску основної похибки нормується у вигляді максимальної зведеної похибки

$$\delta = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100\% = \frac{1}{N} \cdot 100\%.$$

З урахуванням цього, рівняння похибки квантування цифрового частотоміра середніх значень подамо у вигляді

$$\delta_{kF} = \frac{1}{N_F} \cdot 100\% = \frac{f_0}{k \cdot f_x} \cdot 100\%.$$

Аналіз наведеного рівняння показує, що похибка квантування суттєво залежить від вимірюваної величини (рис.8). Під час вимірювання великих частот похибка велика. Крім того, похибка квантування залежить також від величини зразкового часового інтервалу, який визначається коефіцієнтом переліку  $k$  подільника частоти.

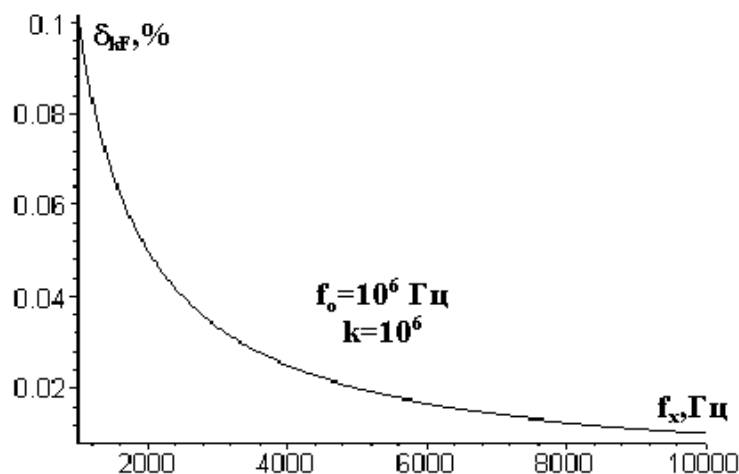


Рисунок 8 - Залежність похибки квантування від вимірюваної величини

Визначимо нижню межу вимірювання  $f_{x \min}$ . Для цього задамося нормованим значенням похибки квантування  $\delta_k = \delta_{\text{кн}}$

$$\delta_{\text{кн}} = \frac{100 \cdot f_0}{k \cdot f_{x \min}} \Rightarrow f_{x \min} = \frac{100 \cdot f_0}{k \cdot \delta_{\text{кн}}}.$$

Знайдемо верхню межу вимірювання частотоміра середніх значень. Дана характеристика обмежена ємністю двійкового лічильника

$$N_{\max} = 2^n,$$

де  $n$  – розрядність двійкового лічильника.

Підставимо  $N_{\max}$  в рівняння перетворення частотоміра і отримаємо верхню межу вимірювання

$$f_{x \max} = \frac{2^n \cdot f_0}{k}.$$

Аналіз рівняння похибки квантування частотоміра показує, що його похибка квантування зменшується при збільшенні зразкового часового інтервалу  $t_0$  і вимірюваної величини  $f_x$ . Однак, збільшення  $t_0$  приводить до зростання часу вимірювання, а отже до зниження швидкодії. Оскільки,  $\delta_k$  зменшується при збільшенні  $f_x$ , то такі частотоміри ефективні в області середніх і високих частот (від одиниць кілогерц до десятків мегагерц).

Другою складовою похибки вимірювання частоти є похибка зразкової міри часу  $\delta_{\text{ЗМЧ}}$ , яка зумовлена неточністю первинної установки значення  $t_0$  і його наступними часовими та температурними змінами.

Цифрові частотоміри цього типу вимірюють за час  $t_0$  середнє значення частоти  $f_x$ . Тому їх називають частотомірами середніх значень.

В області низьких і інфранизьких частот більш ефективні частотоміри, які базуються на квантуванні періоду сигналу, що вимірюється.

### **Цифровий періодомір (частотомір миттєвих значень)**

У частотовимірювальній техніці основною характеристикою періодичного сигналу є період.

Періодом  $T$  періодичного сигналу називається найменший інтервал часу, через який регулярно послідовно повторюється довільно вибране миттєве значення періодичного сигналу  $u(t)$ . З математичної точки зору це інтерпретується так : період  $T$  - це найменший інтервал часу, що відповідає рівнянню  $u(t+iT) = u(t)$ , де  $i$  - будь-яке ціле число.

**Принцип дії цифрового періодоміра заснований на квантуванні невідомого періоду сигналу  $T_x$  імпульсами зразкової частоти  $f_0$ , що формує зразкова міра частоти ЗМЧ.**

Структурна схема цифрового періодоміра наведена на рис.9, часові діаграми, що пояснюють принцип його роботи, наведені на рис.10.

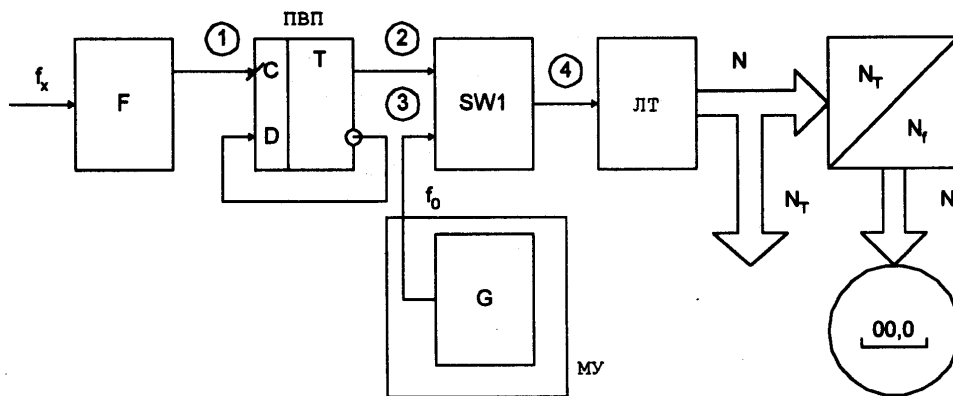


Рисунок 9 - Структурна схема частотоміра миттєвих значень (періодоміра)

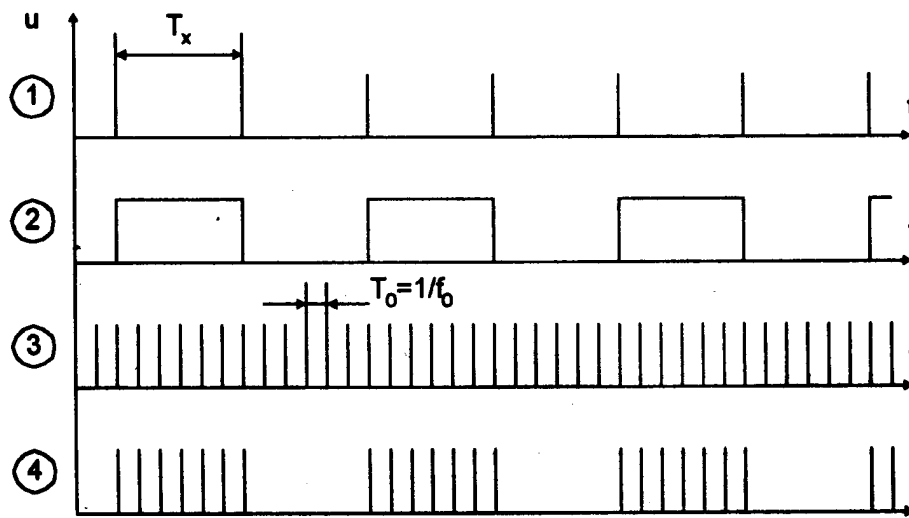


Рисунок 10 - Часові діаграми роботи частотоміра миттєвих значень (періодоміра)

Основними елементами приведеної структури є формувач F, пристрій виділення періоду ПВП, генератор зразкової частоти G, схема збігу SW, двійковий лічильник СТ, перетворювач коду  $N_T/N_f$  і цифровий показувальний пристрій. Калібровані за амплітудою і тривалістю імпульси з виходу формувача F надходять на вхід пристрою виділення періоду. ПВП - це лічильний тригер T, на прямому виході якого з імпульсів із частотою  $f_x$  формується період  $T_x$ , що вимірюється. Період  $T_x$  у схемі збігу SW квантується імпульсами опорної частоти  $f_0$ . Схема збігу SW порівнює між собою значення періоду  $T_x$  і відрізок часу  $N \cdot T_0$ , який утворюється в процесі підрахунку імпульсів квантування (виконує функцію елемента порівняння). Протягом кожного періоду  $T_x$  схема збігу SW відкрита. Імпульси  $f_0$  з виходу генератора  $G_0$  через відкриту схему збігу SW надходять на вхід лічильника ЛТ. У лічильнику ЛТ після кожного періоду  $T_x$  формується код

$$N_T = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0 = \frac{f_0}{f_x}.$$

Останнє співвідношення є рівнянням перетворення цифрового періодоміра (цифрового частотоміра миттєвих значень), графічне представлення якого наведено на рис. 11.

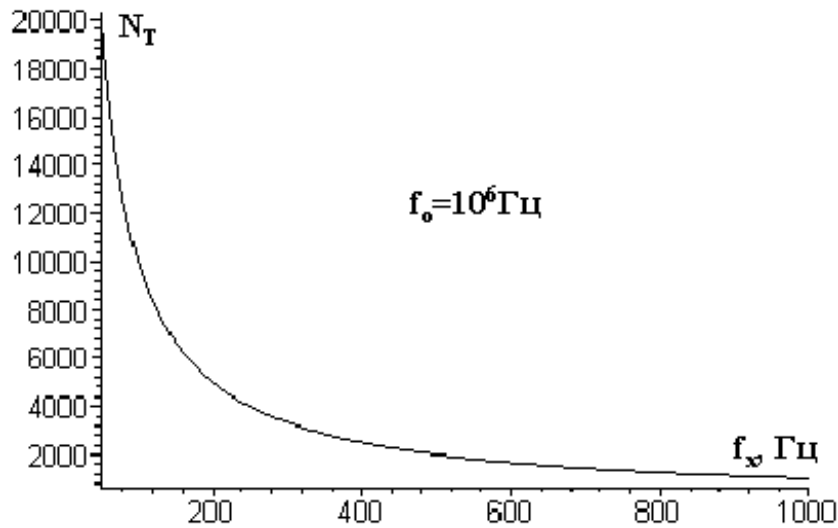


Рисунок 11 - Статична характеристика цифрового частотоміра миттєвих значень

Значення похибки квантування цифрового періодоміра визначається

$$\delta_{кТ} = \frac{1}{N_T} \cdot 100\% = \frac{1}{T_x f_0} \cdot 100\% = \frac{f_x}{f_0} \cdot 100\%.$$

Аналіз (рис.12) рівняння похибки квантування показує, що можливим шляхом зменшення  $\delta_{кТ}$  є збільшення частоти квантування  $f_0$  і вимірюваної величини  $T_x$ . Збільшення частоти  $f_0$  обмежене швидкодією елементної бази, на якій реалізується частотомір. Тому для зменшення цієї складової похибки для фіксованих  $T_0$  і  $T_x$  квантують не один, а декілька періодів невідомої частоти.

Крім похибки квантування в частотомірі миттєвих значень виникає похибка  $\delta_{змч}$ , яка зумовлена неточністю первинної установки частоти генератора  $G$ , її часовою і температурною нестабільністю, а також похибкою виділення періоду.

Доповнивши структуру періодоміра перетворювачем  $N_T/N_F$ , в якому виконується операція  $1/T_x$ , одержують схему цифрового частотоміра миттєвих значень.

Знайдемо нижню і верхню межу вимірювань для даного засобу. Нижня межа вимірювання обмежена максимальною ємністю двійкового лічильника і визначається

$$N_{\max} = \frac{f_0}{f_x} \Rightarrow 2^n = \frac{f_0}{f_{x \min}} \Rightarrow f_{x \min} = \frac{f_0}{2^n}.$$

Для визначення верхньої межі вимірювання задамося нормованим значенням похибки квантування  $\delta_k = \delta_{кн}$  і знайдемо  $f_{x \max}$

$$\delta_{кн} = \frac{f_{x \max}}{f_0} \cdot 100\% \Rightarrow f_{x \max} = \frac{\delta_{кн} \cdot f_0}{100\%}.$$

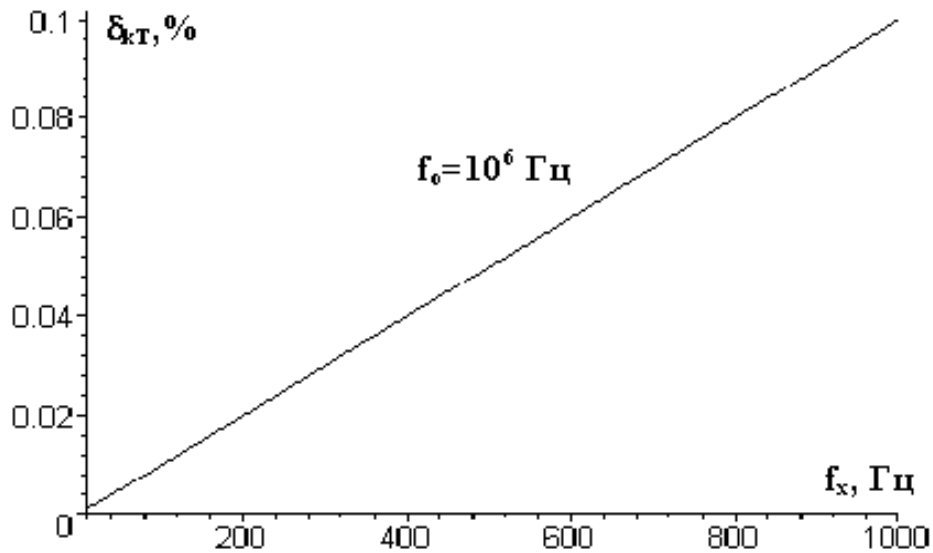


Рисунок 12 - Залежність похибки квантування від вимірюваної величини

Галузь застосування цифрового частотоміра миттєвих значень – вимірювання низьких та інфранизьких частот (до одиниць кілогерц).

### Цифровий фазометр миттєвих значень

Принцип дії цифрових фазометрів засновано на перетворенні різниці фаз двох електричних сигналів однакової частоти у часовий інтервал  $t_x$  із наступним його квантуванням імпульсами опорної частоти  $f_0$ .

Структурну схему цифрового фазометра миттєвих значень наведено на рис.13, часові діаграми його роботи - на рис.14.

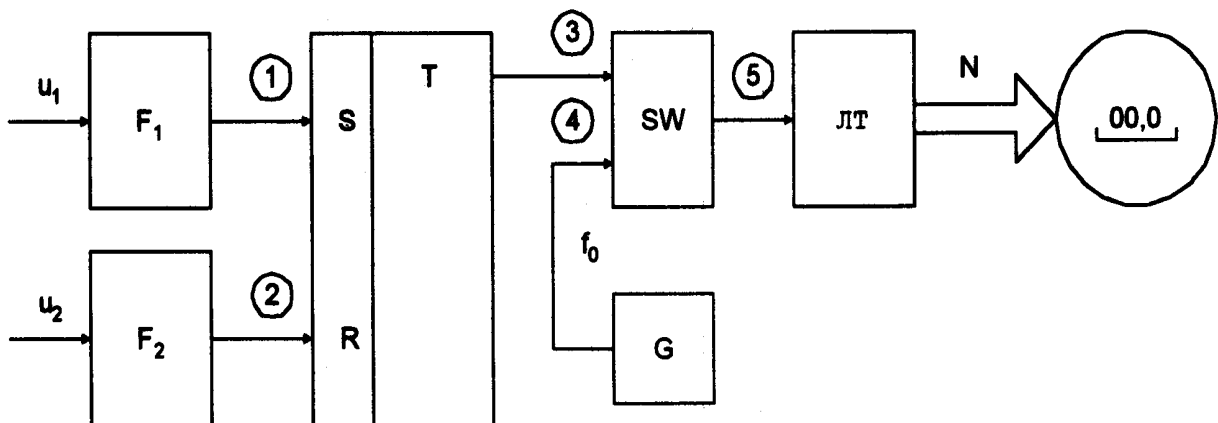


Рисунок 13 - Структурна схема цифрового фазометра миттєвих значень

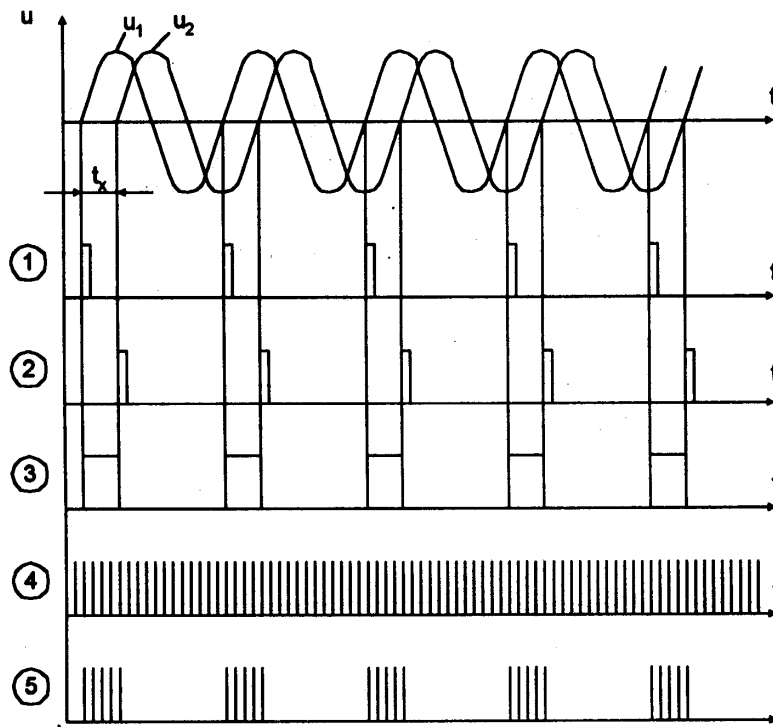


Рисунок 14 - Часові діаграми цифрового фазометра миттєвих значень

Основними елементами фазометра є два формувача F1 і F2, RS - тригери, схема збігу SW, генератор G, двійковий лічильник ЛТ і цифровий показувальний пристрій. Перетворення різниці фаз двох електричних сигналів U1 і U2 з частотою  $f_x$  у часовий інтервал  $t_x$  здійснюють відповідні формувачі F1, F2 і RS-тригер. Квантування часового інтервалу  $t_x$  імпульсами опорної частоти  $f_0$  відбувається за допомогою схеми збігу SW.

У момент переходу напруги U1 через рівень нуля на виході формувача F1 формується короткий імпульс, що встановлює тригер T в стан логічної одиниці. Цим рівнем відкривається схема збігу SW і імпульси опорної частоти  $f_0$  із виходу генератора G через відкриту SW надходять на вхід лічильника ЛТ. У лічильнику ЛТ відбувається підрахунок імпульсів  $f_0$ . Цей процес відбувається, поки напруга U2 не перейде рівень нуля. При переході U2 через нуль на виході формувача F2 формується короткий імпульс, що встановлює тригер T в стан логічного нуля. Цим рівнем закривається схема SW і припиняється надходження імпульсів з частотою  $f_0$  на вхід лічильника ЛТ. Кількість імпульсів з частотою  $f_0$ , що надійшли на лічильник ЛТ за часовий інтервал  $t_x$ , визначається виразом

$$N_{\text{фМ}} = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{t_x}{T_0} = t_x f_0.$$

Оскільки різниця фаз, що вимірюється як різниця їх початкових фаз

$$\varphi_x = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega t_x = 2\pi f_x t_x,$$

то рівняння перетворення цифрового фазометра миттєвих значень матиме вигляд (статична характеристика наведена на рис.15)

$$N_{\text{фМ}} = t_x \cdot f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{f_0}{f_x} \varphi_x.$$

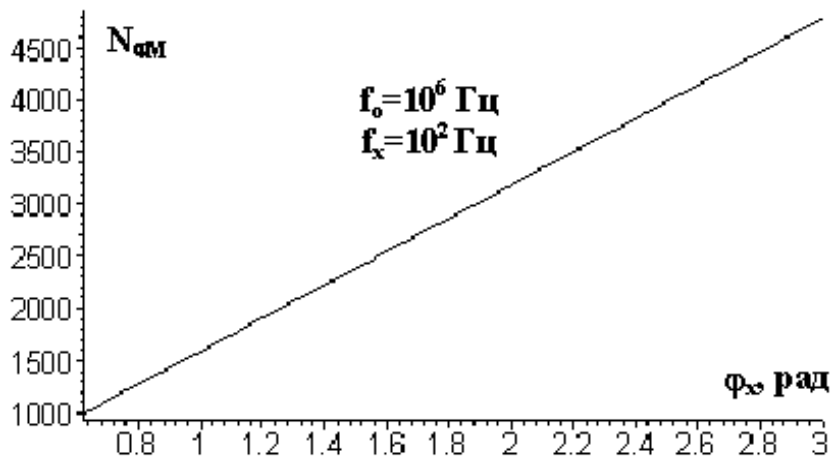


Рисунок 15 - Статична характеристика цифрового фазометра миттєвих значень

Рівняння похибки квантування цифрового фазометра миттєвих значень подається співвідношенням

$$\delta_{\varphi_M} = \frac{1}{N_{\varphi_M}} \cdot 100\% = \frac{2\pi \cdot f_x}{\varphi_x \cdot f_0} \cdot 100\%.$$

Аналіз рівняння похибки квантування (рис.16) показує, що результати вимірювань залежать від частоти вхідних сигналів  $f_x$  при постійних  $f_0 = \text{const}$  та  $\varphi_x = \text{const}$ .

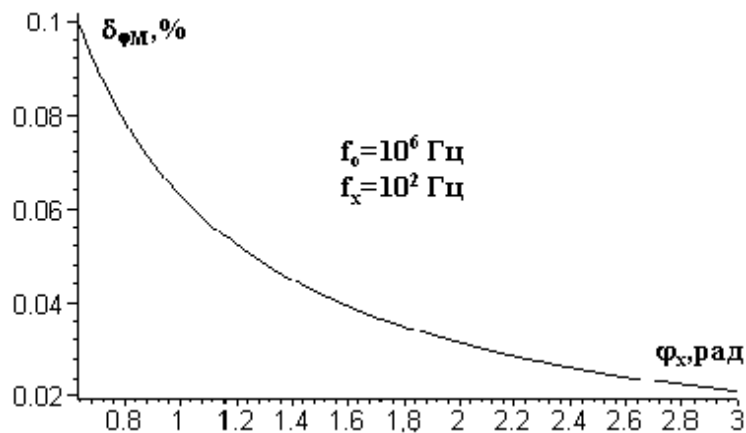


Рисунок 16 - Залежність похибки квантування від вимірюваної величини

Для усунення цього недоліку застосовують усереднення вимірюваних інтервалів  $t_x$  протягом часу вимірювання  $t_b$ .

### Цифровий вольтметр час-імпульсного перетворення

Принцип дії засновано на перетворенні вимірюваної напруги  $U_x$  в часовий інтервал  $t_x$ , з наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти  $f_0$ .

Структурна схема цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення наведена на рис.17, часові діаграми його роботи наведені на рис.18.



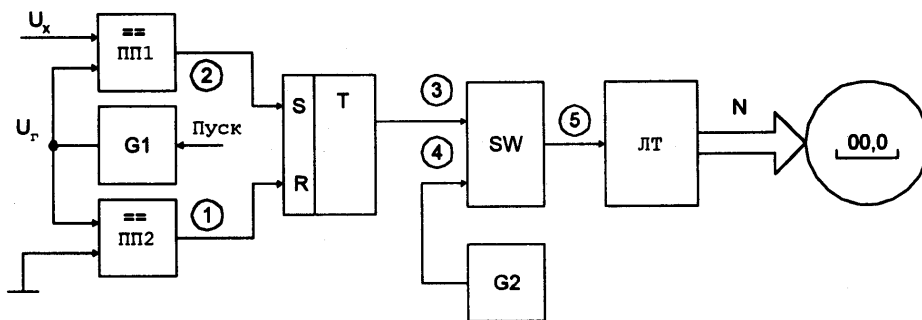


Рисунок 17 - Структурна схема цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

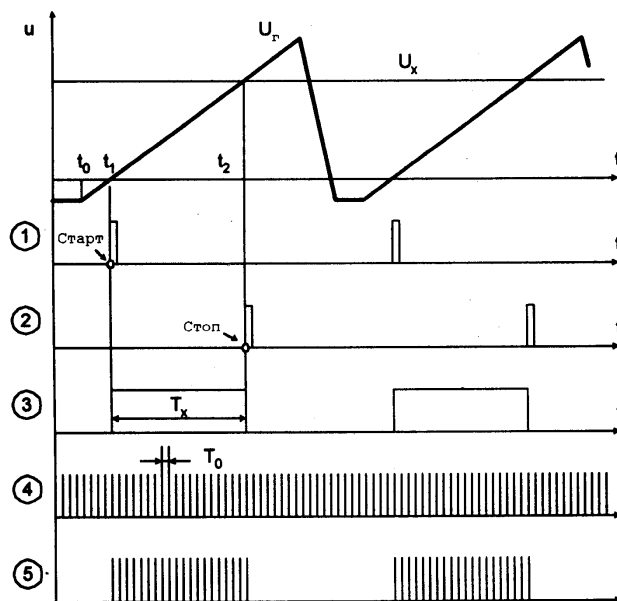


Рисунок 18 - Часові діаграми роботи цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

Основним елементом структури вольтметра є перетворювач вимірної напруги  $U_x$  у часовий інтервал  $T_x$ , що реалізований на двох компараторах ПП1 і ПП2, генераторі напруги, що лінійно-змінюється, G1 і RS-тригері T. Квантування часового інтервалу  $T_x$  імпульсами опорної частоти  $f_0$ , формованими на виході генератора G2, здійснюється в схемі збігу SW. Двійковий лічильник ЛТ підраховує кількість імпульсів  $f_0$  за час  $T_x$ . Результат вимірювання відображається на цифровому індикаторі. У момент часу  $t_0$  сигналом «Пуск» запускається генератор напруги G1, що лінійно-змінюється, виробляє сигнал  $U_r$ , який подається на входи компараторів ПП1 і ПП2, що по черзі спрацьовують у моменти часу  $t_1$  і  $t_2$ . При переході напруги  $U_r$  через рівень нуля (момент часу  $t_1$ ) спрацьовує компаратор ПП2 і на його виході формується імпульс «Старт», що по S-входу встановлює в одиничний стан тригер T. Рівнем логічної одиниці відкривається схема збігу SW і імпульси опорної частоти  $f_0$  з виходу генератора G2 надходять на вхід лічильника ЛТ. Напруга  $U_r$  на виході генератора G1 зростає, поки не стане рівною  $U_x$ . Момент рівності  $U_r = U_x$  в момент часу  $t_2$  фіксує компаратор ПП1 шляхом формування на своєму виході сигналу «Стоп». Сигналом «Стоп» по R - входу ком-

паратор встановлює тригер Т в нульовий стан і закриває схему збігу SW. На цьому процес вимірювання  $U_x$  закінчується. Таким чином, на виході тригера Т формується часовий інтервал  $T_x$  пропорційний вимірювальній напрузі  $U_x$ , під час якого формується одиничний імпульс, що відкриває схему збігу SW, і імпульси опорної частоти  $f_0$  із виходу G2 надходять на вхід лічильника. Кількість імпульсів з частотою  $f_0$ , що надходять на лічильник ЛТ за час  $T_x$ , визначається

$$N_B = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0.$$

Оскільки  $T_x = k \cdot U_x$  ( $k$ -коефіцієнт пропорційності, що залежить від крутизни напруги, що лінійно-змінюється), то рівняння перетворення  $N_B = F(U_x)$  цифрового вольтметра (рис.19) набуває вигляду

$$N_B = k \cdot U_x \cdot f_0,$$

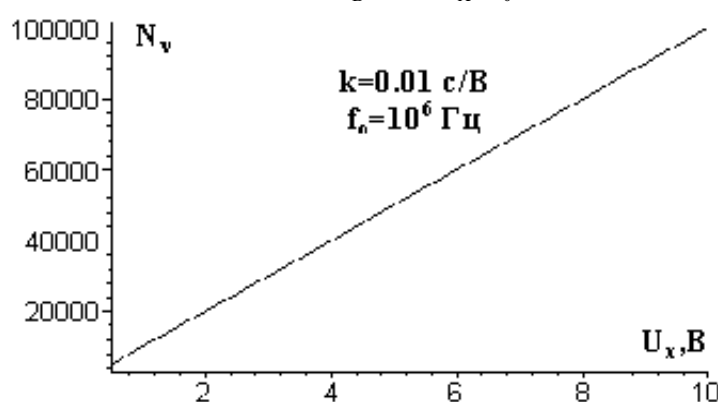


Рисунок 19 - Статична характеристика цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

а рівняння похибки квантування визначається співвідношенням

$$\delta_v = \frac{1}{N_B} \cdot 100\% = \frac{1}{k \cdot U_x \cdot f_0} \cdot 100\%.$$

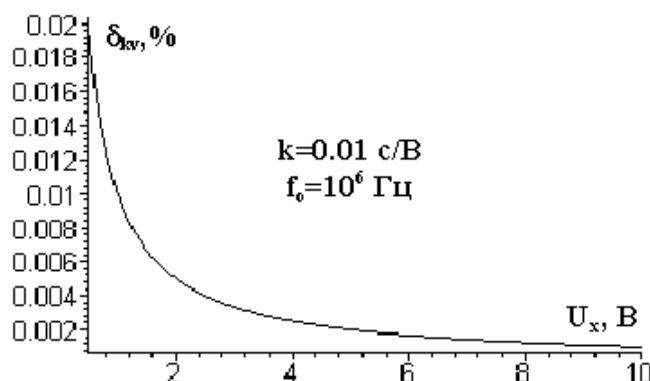


Рисунок 20 - Залежність похибки квантування від вимірюваної величини

Залежність похибки квантування від вимірюваної напруги та крутизни лінійно-змінюваної напруги наведена на рис.20.

Крім того, похибка таких засобів вимірювань в основному зумовлена нелінійністю та нестабільністю лінійно-змінюваної напруги  $U_r$ , нестабільніс-

тю порогу чутливості компаратора і нестабільністю частоти зразкового генератора. Суттєвим недоліком цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення є низька завадостійкість. Для підвищення завадостійкості застосовують аналогове та цифрове інтегрування.

### Цифровий вольтметр послідовного наближення

Суть алгоритму послідовного наближення полягає у зрівноваженні вимірюваної напруги  $U_x$  напругою компенсування  $U_k$ , що змінюється рівномірними ступенями. Даний алгоритм називають ще «молодшими розрядами вперед».

Відлік результату вимірювання здійснюється в момент рівності (з заданою точністю) цих величин. Для циклічного одержання вимірювальної інформації необхідно повторювати вимірювальний цикл. На рис.21 наведено структурну схему цифрового вольтметра послідовного наближення, часові діаграми його роботи на рис. 22.

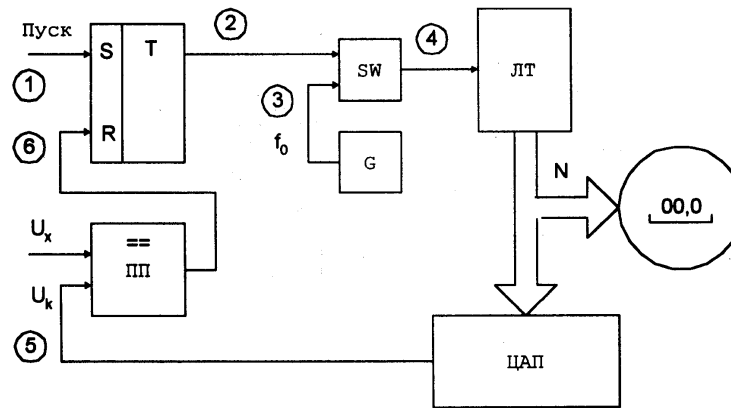


Рисунок 21 - Структурна схема вольтметра послідовного наближення

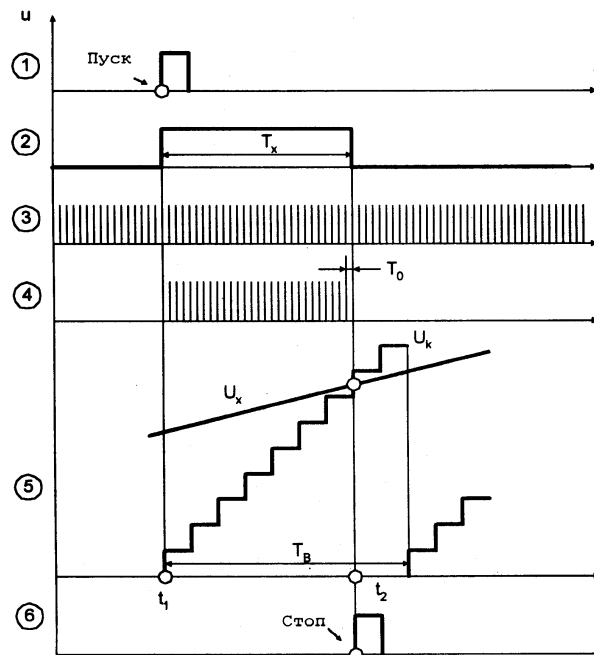


Рисунок 22 - Часові діаграми роботи цифрового вольтметра послідовного наближення

Основними елементами приладу є компаратор ПП, RS-тригер Т, схема збігу SW, генератор опорної частоти G, двійковий лічильник ЛТ, цифро-аналоговий перетворювач ЦАП і цифровий показувальний пристрій. За командою «Пуск» (момент часу  $t_1$ ) тригер Т встановлюється в одиничний стан і відкриває схему збігу SW. Імпульси опорної частоти  $f_0$  з виходу генератора G надходять на вхід двійкового лічильника ЛТ, змінюючи тим самим код на його виходах. З виходів ЛТ двійковий код надходить на входи ЦАП і перетворюється там в аналоговий сигнал  $U_k$ . Прихід кожного імпульсу  $f_0$  від генератора G формує нову сходинку компенсуючої напруги  $U_k$  на виході цифро-аналогового перетворювача. У момент часу  $t_2$ , коли  $U_x = U_k$ , тригер Т сигналом «Стоп», який формується на виході компаратора, встановлюється в нульовий стан і закриває схему збігу SW. Таким чином, у лічильнику СТ сформується двійковий код N, що визначається співвідношенням (рис.23)

$$N_v = \frac{U_x}{h} = \frac{U_x}{U_0} \cdot 2^n,$$

де  $h = U_0 / 2^n$  - крок квантування;  $n$  - розрядність двійкового лічильника;  $U_0$  - напруга опорного джерела живлення ЦАП.

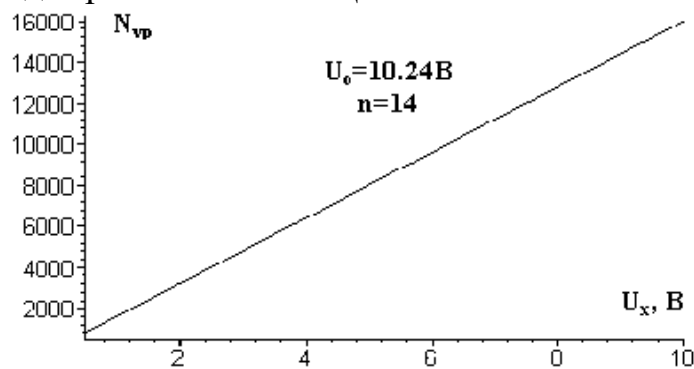


Рисунок 23 - Статична характеристика цифрового вольтметра послідовного наближення

Похибка квантування (рис.24) вольтметра послідовного наближення визначається

$$\delta_{kv} = \frac{U_0}{U_x \cdot 2^n} \cdot 100\%.$$

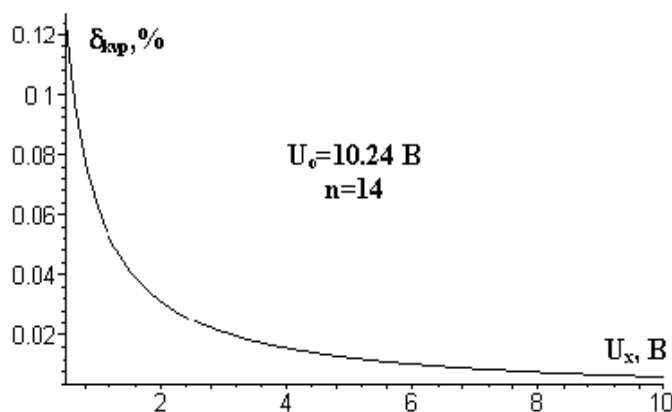


Рисунок 24 - Залежність похибки квантування від вимірюваної величини

Час перетворення та похибка квантування вольтметрів послідовного наближення залежать від вимірюваної величини, а значення  $\delta_{kv}$  в основному визначається розрядністю ЦАП і зоною нечутливості компаратора.

### Цифровий вольтметр стежного зрівноважування

Алгоритм стежного зрівноваження полягає в постійному слідуванні компенсуючої напруги за змінами вимірюваної (інформативного параметра).

Цифрові вольтметри стежного зрівноважування працюють в режимі слідування за змінами вимірюваної напруги. На рис.25 наведено структурну схему вольтметра стежного зрівноваження, а на рис.26 – часові діаграми його роботи.

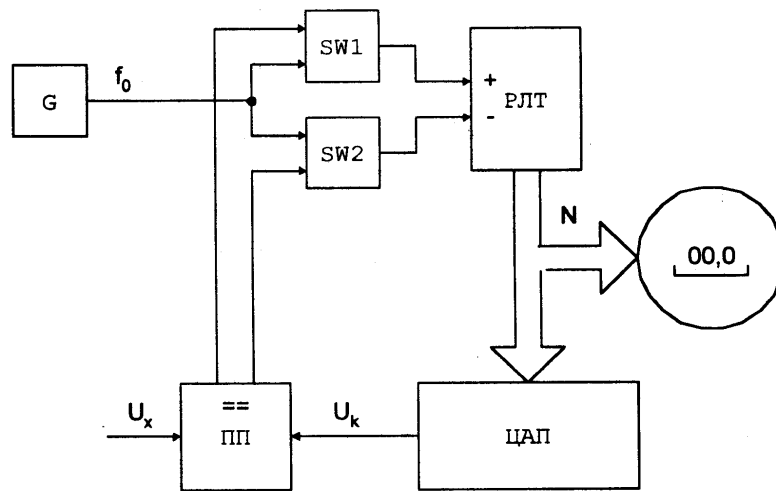


Рисунок 25 - Структурна схема вольтметра стежного зрівноваження

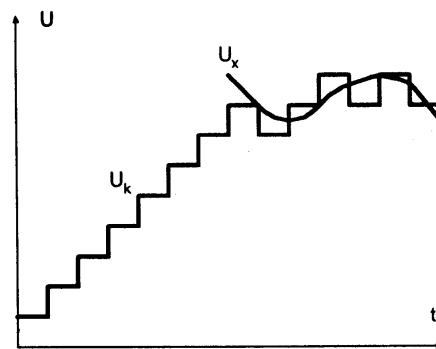


Рисунок 26 - Часові діаграми роботи вольтметра стежного зрівноваження

Цифрові вольтметри стежного зрівноважування містять реверсивний двійковий лічильник РЛТ і дві схеми збігу SW1 і SW2, керовані від компаратора ПП. В залежності від співвідношення напруг  $U_x$  і  $U_k$  у запропонованій структурі компаратор ПП може знаходитися в одному з трьох станів, що визначаються різницею  $U_x - U_k$ .

1. Напряга на обох виходах (1 і 2) компаратора дорівнює нулю при виконанні умови ( $U_x = U_k$ ). В цьому стані обидві схеми збігу закриті і імпульси з виходу генератора G, не надходять на лічильники (рис.27).

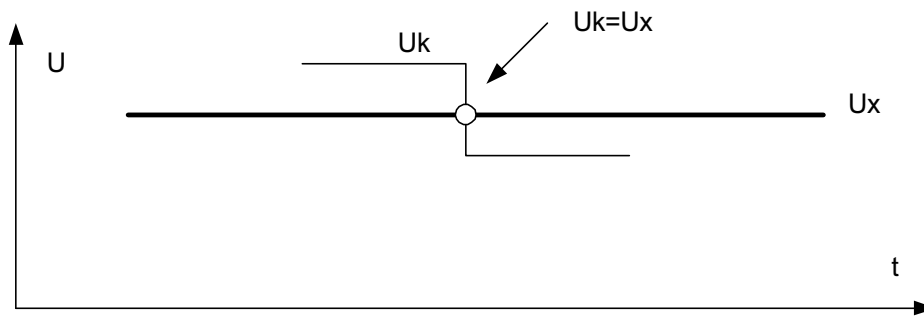


Рисунок 27 - Часові діаграми роботи стежного вольметра за умови  $U_k = U_x$

2. При виконанні умови  $U_x > U_k$  (рис.28) на першому виході компаратора формується одиничний рівень, який відкриває схему збігу SW1 і імпульси зразкової частоти  $f_0$  надходять на інкрементувальний вхід реверсивного лічильника РЛТ. Схема SW2 збігу закрита нульовим рівнем.

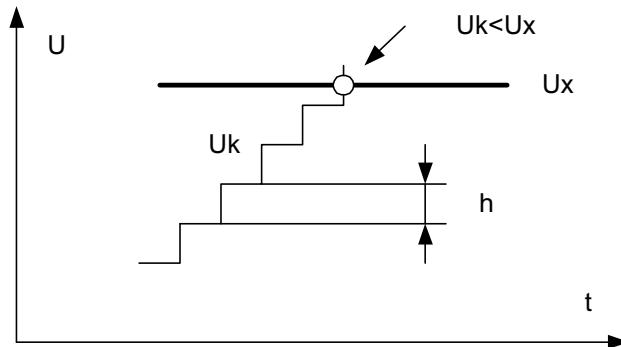


Рисунок 28 - Часові діаграми роботи стежного вольметра за умови  $U_k < U_x$

3. Схема SW2 відкрита одиничним рівнем з другого виходу компаратора при виконанні умови  $U_x < U_k$ . У цьому випадку (рис.29) працює декрементувальний вхід реверсивного лічильника, тому що SW1 закрита.

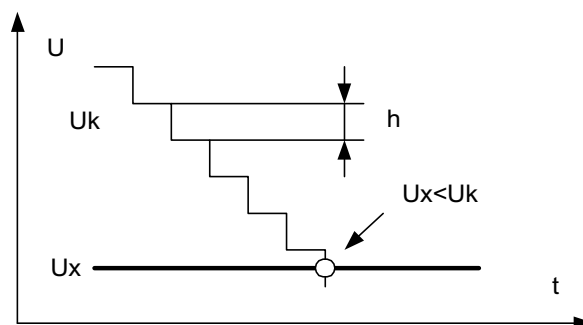


Рисунок 29 - Часові діаграми роботи стежного вольметра за умови  $U_k > U_x$

При роботі реверсивного лічильника в режимі підсумовування або віднімання напруга на виході цифро-аналогового перетворювача ЦАП відповідно збільшується або зменшується так, що різниця напруг  $U_x - U_k$  прямує до деякого мінімального значення, що характеризує похибку квантування  $\Delta_k$ .

Крок квантування вибирається відповідно до ширини зони нечутливості компаратора.

## ХІД РОБОТИ

При виконанні лабораторної роботи використовуються лабораторний стенд, електронний осцилограф і набір з'єднувальних проводів. Досліджувані цифрові схеми збираються на складальному полі лабораторного стенда за допомогою з'єднання гнізд окремих елементів з'єднувальними проводами у відповідності зі схемою. Потім до визначених гнізд підключається електронний осцилограф для спостереження сигналів. Всі з'єднання виконуються при відключеному живленні. Схема може бути приєднана до джерела живлення тільки після перевірки її викладачем і з його дозволу.

### *1. Дослідження елементної бази цифрових вимірювальних приладів*

**1.1. Дослідження схеми збігу.** У лабораторній роботі досліджується схема збігу, реалізована на мікросхемі KI55ЛИ1. Схема збігу виконує логічну функцію І. Дослідження схеми збігу виконується в такому порядку:

1.1.1. Підключити прямий вихід формувача логічного рівня (FLn) до одного з входів схеми збігу (SW1 або SW2);

1.1.2. До другого входу схеми збігу підключити вихід генератора, прямокутних імпульсів  $G_{\Pi}$  ;

1.1.3. Підготувавши до роботи електронний осцилограф, під'єднати його до виходу комутатора:

1.1.4. До першого входу комутатора під'єднати вихід досліджуваної схеми збігу, а до другого входу - вихід формувача FLn;

1.1.5. Ввімкнути стенд і змінюючи рівень вхідного сигналу схеми збігу за допомогою натискання кнопки формувача FLn, простежити за допомогою осцилографа її роботу;

1.1.6. Нарисувати осцилограми що спостерігаються на входах і виході схеми збігу.

**1.2. Дослідження тригерів.** У програму роботи входить дослідження асинхронного RS-тригера і лічильного тригера (Т-тригера), побудованого на основі D-тригера.

1.2.1. Для дослідження RS-тригера під'єднати виходи формувача логічного рівня FLn до його входів S і R, і подаючи комбінації сигналів простежити за допомогою осцилографа його роботу. Одночасна подача сигналів  $R = 0$  і  $S = 0$  забороняється, при цьому стан тригера стає невизначеним;

1.2.2. Представити часові діаграми і таблицю станів RS-тригера;

1.2.3. Для дослідження D-тригера (тригера затримки) виконати зовнішнє з'єднання виходу  $\bar{Q}$  із входом D і подати на вхід C імпульси від генератора прямокутних імпульсів  $G_{\Pi}$  .

1.2.4. Вихід генератора підключити до першого входу комутатора, а прямий

вихід тригера - до другого входу і зарисувати спостережені осцилограми в звіт;

**1.3. Дослідження формувача.** Формувач виконаний на тригері Шмідта разом із діодним обмежувачем. Діодний обмежувач здійснює двостороннє обмеження синусоїдального сигналу. Необхідно дослідити роботу формувача при вхідному синусоїдальному сигналі.

1.3.1. З'єднати вхід і вихід формувача F1 із входами комутатора;

1.3.2. Ввімкнути стенд, осцилограф і генератор синусоїдального сигналу;

1.3.3. З'єднати вхід формувача F1 з виходом генератора;

1.3.4. Зарисувати осцилограму сигналів на вході і виході формувача.

**1.4. Дослідження генераторів прямокутних імпульсів та лінійно-змінної напруги.**

1.4.1. Підключити осцилограф до виходу генератора прямокутних імпульсів  $G_{\Pi}$ ;

1.4.2. Змінюючи частоту вихідних імпульсів, за допомогою натискання кнопок (0,1;1;10;100 kHz), зняти осцилограми і зробити вимірювання тривалості і періоду імпульсів, їх амплітуди і шпаруватості;

1.4.2. Підключити осцилограф до виходу генератора лінійно-змінної напруги  $G_{\Delta}$  зарисувати осцилограму вихідної напруги і визначити її амплітуду і частоту.

**1.5. Дослідження реверсивного двійкового лічильника.** Дослідити реверсивний двійковий лічильника СТ2 (KI55 ІЕ7) у режимах підсумовування і віднімання.

1.5.1. Встановити лічильник у вихідний нульовий стан шляхом подачі рівня логічного нуля на R-вхід лічильника;

1.5.2. Підключити прямий вихід формувача FLN до входу підсумовування +1 лічильника;

1.5.3. Натискаючи і відпускаючи кнопку формувача FLN простежити роботу лічильника в режимі підсумовування по світлодіодах, що підключені до виходу лічильника;

1.5.4.Зробити аналогічне дослідження роботи лічильника в режимі віднімання;

1.5.5. Подаючи послідовність імпульсів від генератора  $G_{\Pi}$  на вхід підсумовування +1 лічильника зняти осцилограми вихідних сигналів на всіх розрядах виходу лічильника. Отримані осцилограми зарисувати, дотримуючи їх часового взаємозв'язку;

**1.6. Дослідження компаратора.** Дослідження компаратора проводиться на прикладі мікросхеми K52ІСА3А.

1.6.1. Подати на один із входів компаратора лінійно-змінну напругу від генератора  $G_{\Delta}$ .

1.6.2. На інший вхід компаратора подати постійну напругу від джерела живлення  $U_{-}$ ;

1.6.3. Дослідити роботу компаратора, змінюючи рівень постійної напруги на його вході, зарисувати часові діаграми ;

**1.7. Дослідження ЦАП.**



1.7.1. Підключити вихід генератора  $G_{\Pi}$ , до входу підсумовування +1 лічильника СТ2, до виходу ЦАП підключити осцилограф;

*Примітка: підключення виходу лічильника СТ2 до входу ЦАП здійснене в лабораторному стенді;*

1.7.2. Ввімкнути стенд і підготувати осцилограф до роботи;

1.7.3. Встановити частоту генератора  $G_{\Pi}$  - 100 Гц

1.7.4. Дослідити осцилограми вихідного сигналу ЦАП.

1.7.5. Підключити вихід генератора  $G_{\Pi}$ , до входу віднімання -1 лічильника СТ2 і дослідити осцилограми вихідного сигналу ЦАП.

## 2. Дослідження цифрових вимірювальних приладів.

За вказівкою викладача скласти та дослідити один з цифрових вимірювальних приладів.

### 2.1. Вивчення цифрового частотоміра середніх значень.

2.1.1. Скласти на лабораторному стенді схему цифрового частотоміра середніх значень (рис.30).

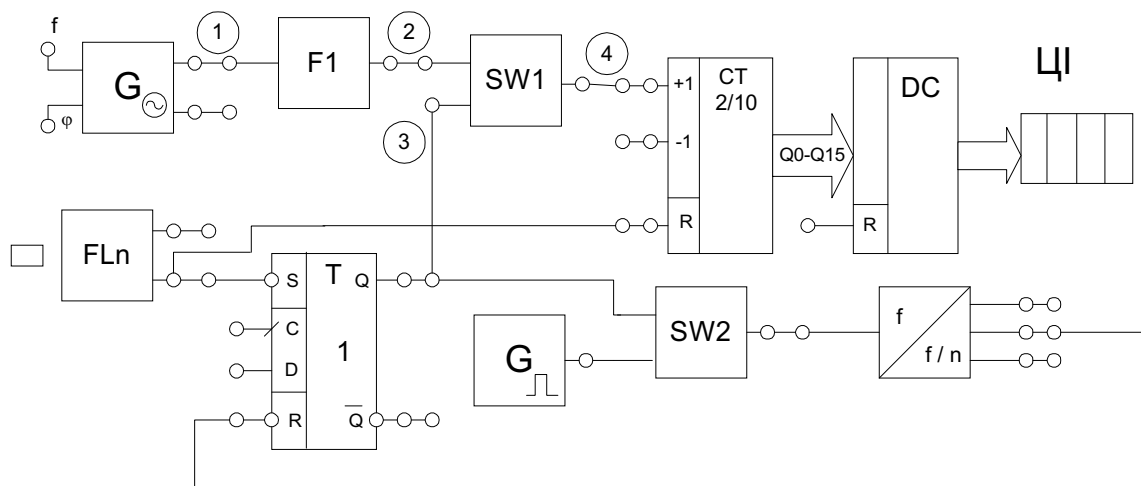


Рисунок 30 - Схема частотоміра середніх значень

2.1.2. Підключити осцилограф до виходу комутатора;

2.1.3. Підключити входи комутатора (1, 2, 3) до відповідних контрольних точок на структурній схемі частотоміра; Після перевірки схеми викладачем ввімкнути стенд і осцилограф;

2.1.4. Встановити частоту генератора  $G_{\Pi}=1$  кГц, на вхід формувача F1 подати частоту, що вимірюється ( $f_{x1} = 100$  Гц), коефіцієнт подільника встановити 1000;

2.1.5. Зняти показання цифрового індикатора і зарисувати часові діаграми в контрольних точках схеми;

2.1.6. Визначити похибку квантування;

### 2.2. Дослідження цифрового періодоміра

2.2.1. Скласти схему цифрового періодоміра відповідно до рис.31.

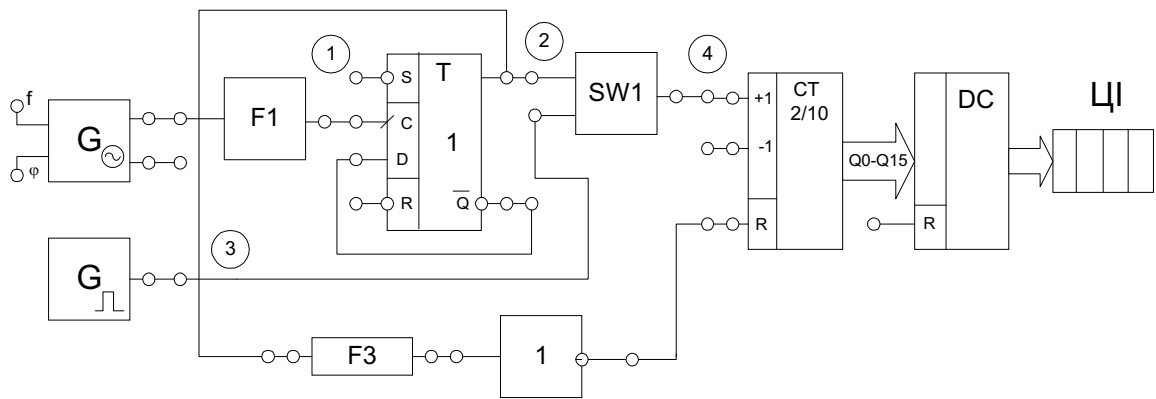


Рисунок 31 - Схема цифрового періодоміра

- 2.2.2. Підключити осцилограф до виходу комутатора, а входи комутатора (1, 2, 3, 4) до відповідних контрольних точок схеми; Після перевірки схеми викладачем ввімкнути стенд і осцилограф;
- 2.2.3. Подати на вхід формувача F1 низькочастотний сигнал  $f_x$  від генератора  $G_{\Pi}$ ;
- 2.2.4. Простежити роботу періодоміра по ЦІ при різних частотах генератора  $G_{\Pi}$ ; замисувати часові діаграми, дотримуючи їхній часовий зв'язок;
- 2.2.5. Визначити похибку квантування.

### 2.3. Дослідження цифрового фазометра миттєвих значень.

- 2.3.1. Скласти схему цифрового фазометра відповідно до рис.32.

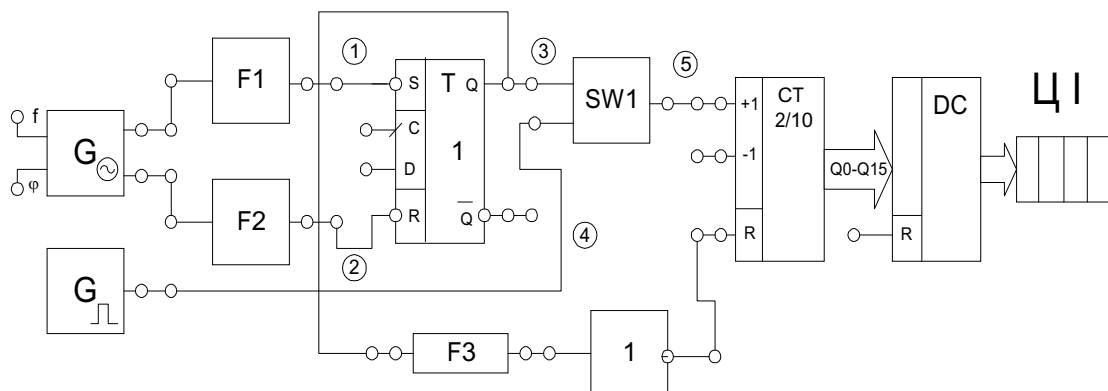


Рисунок 32 - Схема цифрового фазометра

- 2.3.2. Підключити осцилограф до виходу комутатора, а входи комутатора (1, 2, 3, 4) до контрольних точок схеми;
- 2.3.3. Після перевірки схеми викладачем ввімкнути стенд і осцилограф;
- 2.3.4. Подати на вхід формувача F1 низькочастотний сигнал від генератора синусоїдального сигналу;
- 2.3.5. На вхід формувача F2 подати сигнал від другого генератора синусоїдального сигналу, зсунутий по фазі на кут  $\varphi$ ; Регулювання зсуву фаз здійснюється ручкою потенціометра  $\varphi$ .
- 2.3.6. Зарисувати отримані часові діаграми;
- 2.3.7. Визначити похибку квантування цифрового фазометра.

## 2.4. Дослідження цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення.

2.4.1. Скласти схему цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення відповідно до рис.33.

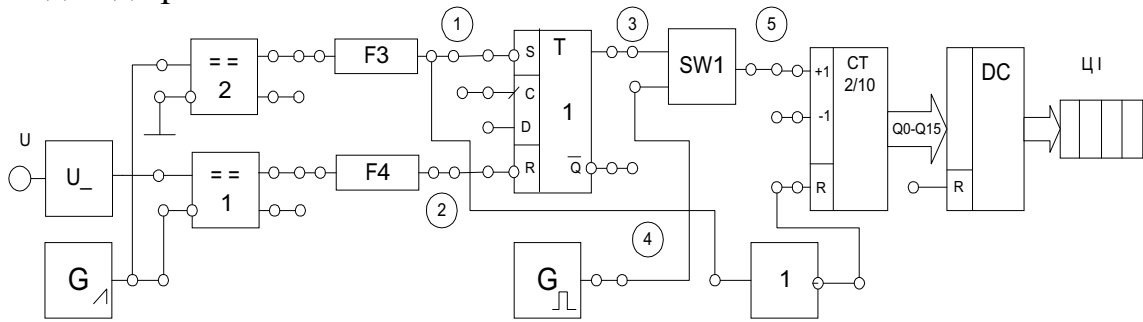


Рисунок 33 - Схема цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

2.4.2. Підключити осцилограф до виходу комутатора, а входи комутатора (1, 2, 3, 4) до контрольних точок схеми;

2.4.3. Після перевірки схеми викладачем ввімкнути стенд і осцилограф;

2.4.5. Змінюючи вхідну напругу  $U_x$  ручкою потенціометра простежити роботу вольтметра за цифровим індикатором;

2.4.6. Зарисувати часові діаграми.

2.4.7. Визначити похибку квантування.

## 2.5. Дослідження цифрового вольтметра послідовного наближення.

2.5.1. Скласти схему цифрового вольтметра послідовного наближення, відповідно до рис. 34.

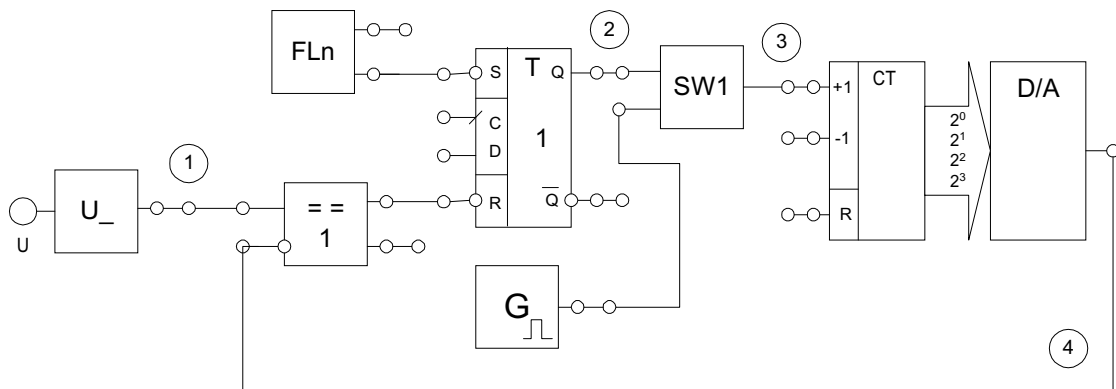


Рисунок 34 - Схема цифрового вольтметра послідовного наближення

2.5.2. Підключити осцилограф до виходу комутатора, а входи комутатора (1, 2, 3, 4,5) до контрольних точок схеми; Після перевірки схеми викладачем ввімкнути стенд і осцилограф;

2.5.3. Змінюючи вхідну напругу  $U_x$  ручкою потенціометра простежити роботу вольтметра за цифровим індикатором;

2.5.4. Зарисувати часові діаграми;

2.5.5. Визначити похибку квантування.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Цифровий частотомір середніх значень. Структурна схема, принцип дії.
2. Цифровий періодомір. Структурна схема, принцип дії.
3. Цифровий фазометр миттєвих значень. Структурна схема, принцип дії.
4. Цифровий вольтметр час-імпульсного перетворення. Структурна схема, принцип дії.
5. Цифровий вольтметр послідовного наближення. Структурна схема, принцип дії.
6. Цифровий вольтметр слідкуючого зрівноважування. Структурна схема, принцип дії.
7. Вузли цифрових вимірювальних приладів. Структурна схема, принцип дії.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка: Навч. посібник / В.О. Поджаренко, В.В.Кухарчук. - К.: УМК ВО, 1991. - 240 с.
2. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. - К.: Вища шк., 1983. - 454 с.
3. Орнатский П.П. Особенности методологии измерения. -Измерительная техника, 1988, с.3-4.
4. Маликов В.Т., Поджаренко В.А. Современные методы и средства измерительной техники. Уч. пос. - К.: УМК В, 1988. - 188 с.

## Методика роботи з програмою Numeri

**Обладнання.** Програмний пакет NUMERI можна використовувати на в ПЕОМ, сумісних з комп'ютерами типу IBM, з операційною системою MS - /PS-DOS версії 2.0 та вище. Для розміщення пакета потрібно близько 500 КБ пам'яті на жорсткому диску або на дискеті. Співпроцесор при цьому не обов'язковий, проте при ініціалізації програма NUMERI автоматично перевіряє його наявність і, якщо він встановлений на ПЕОМ, програма буде використовувати його в математичних розрахунках, а при відсутності будуть використовуватися відповідні математичні програми. Автоматично встановлюється програмою NUMERI і тип графічного адаптера, при цьому допустимими є адаптери типів CGA, Hercules, EGA та VGA. Крім того, для EGA-адаптера з монохромним дисплеєм можна використовувати чорно-біле зображення, якщо запускати програму з ключем m:

NUMERI m

Файли пакета.

NUMERI. EXE—головна програма,

NUMERI. OVR — файл програмних оверлеїв,

NUMERI. HLP — файл текстів допомоги,

NUMERI. DIS, NUMERI. DSC — файл конфігурації для виведення графічних зображень.

! READ. ME — файл з поясненням відносно інсталяції пакета,

Для функціонування програмного пакета обов'язковими є тільки файли з іменами NUMERI; усі інші містять допоміжну інформацію.

Інсталяція пакета NUMERI. Для інсталяції пакета NUMERI на конкретній ПЕОМ необхідно всі файли з іменами NUMERI. скопіювати в один каталог на жорсткому диску або на одну дискету, якщо планується робота з пакетом через дискету.

Для нормальної роботи пакета параметр FILES, який встановлюється через файл системної конфігурації CONFIG. SYS повинен мати значення 10 або вище:

FILES-10

При цьому необхідно пам'ятати, що будь-які зміни у файлі CONFIG.SYS стають активними лише після перезапуску системи.

**Формати файлів даних.** Програма NUMERI дозволяє використовувати файли даних, підготовлені іншими програмами, проте інформація у них повинна бути записана у символному вигляді відповідно до форматів, у яких сама програма NUMERI записує на диск створювані файли даних. формати трьох типів, які використовуються програмою NUMERI , докладно описані в текстах допомоги до розділу «Загрузка даних», де їх можна викликати для перегляду на екран дисплею, натиснувши після переходу в цей розділ клавішу F10. Наявна версія програми NUMERI обмежує об'єм файлів даних до 1024 точок.

**Робота з графічним редактором.** Графіки, створювані програмою NUMERI на екрані дисплея, можна редагувати за допомогою графічного редактора. Після вибору будь-якої команди споживачеві надаються для вибору всі наявні для цієї команди опції. Список команд редагування графічних зображень та відповідних їм літер вибору можна отримати на екрані дисплея натиском клавіші допомоги F10 після побудови графічного зображення. Якщо для вибраної команди потрібно виконати не одну, а декілька опцій, то цю команду необхідно викликати відповідне число разів. Частина клавіш має в графічному режимі загальне призначення:

виділена літера: запуск відповідного пункту меню;

Return або ввід: акцептувати вибрану або введену величину;

F10: активізувати виконання вибраного пункту меню;

F10 (КЛЮЧ): припинення виконання будь-якої дії. Усі команди діють тільки у рамках відповідного вікна графіка або тільки по відношенню до відповідної кривої графіка.

**Файл конфігурації.** У файлі GRAFLIB.CNF записуються параметри апаратного обладнання та характеристики для виводу графічного зображення у файл або безпосередньо на плотер. При ініціалізації програма NUMERI робить спробу ввести файл GRAFLIB.CNF із діючого каталога. Якщо цей файл відсутній, то всі необхідні параметри й характеристики для виведення графічних зображень у файл або на плотер встановлюються стандартним способом у самій програмі. Такі ж стандартні значення параметрів та характеристик містяться і у файлі GRAFLIB.CNF, який записаний на дистрибутивній дискеті. При необхідності їх значення можна легко змінити, скориставшись будь-яким текстовим редактором.

**Виведення на плотер.** Виведення графічного зображення безпосередньо на плотер активізується із графічного редактора введенням команди Ctrl-P. У цьому пункті меню можна вказати відмінні від стандартних параметри, вибираючи потрібні опції:

виведення через паралельний порт <LPT 1...LPT3);

виведення через послідовний порт (COM1 ...COM4);

виведення у файл з наступним виведенням на принтер за допомогою спеціальних програм, які орієнтуються на стандарт HP-CL.

При виведенні на плотер через послідовний порт COM1 ... COM4 потрібно перед цим встановити параметри вибраного порту.

За допомогою пакета NUMERI можна використовувати алгоритми цифрової обробки на ЕОМ сигналів, що об'єднані єдиним інтерфейсом спілкування. Споживач не повинен при цьому зв'язувати окремі підпрограми в єдину робочу програму, а може користуватися вже готовою системою. Для цього не потрібно володіти спеціальними знаннями з програмування. Споживач працює в інтерактивному режимі, користуючись вибором потрібної операції у запропонованому програмою меню. Незалежно від цього у нього достатньо

можливостей, щоб з'ясувати принципи роботи і якість застосування алгоритмів. Зроблено багато зусиль, щоб виключити введення непридатних або неправильних параметрів. Функція допомоги підтримує роботу споживача додатковими роз'ясненнями та вказівками. Окрім цього, у розділі службових програм в розпорядження споживача надаються додатково програми для вільного вибору й розв'язування додаткових завдань.

У коментарях до окремих програм даються пояснення щодо змін у алгоритмах в інтересах підвищення точності обчислення або скорочення часу обчислення.

**Технічні засоби.** Для використання програмного пакета NUMERI необхідно мати в розпорядженні такі технічні засоби;

персональну ЕОМ типу IBM XT, AT (або сумісний комп'ютер, такий, наприклад, як Siemens 16-0,5, HP Vectra, NixdorfV75,CC1841) або комп'ютер типу PS/2, який працює з версіями DOS 2.x або 3-x;

графічний адаптер типу CGA/EGA/VGA/ Hercules або сумісний з ним;

збирач на жорсткому магнітному диску з вільною пам'яттю об'ємом близько 500 Кбайт;

необов'язково: математичний співпроцесор типу 80x87;

необов'язково: принтер з інтерфейсною картою типу Centronics для друкування результатів.

**Діалог із споживачем.** Діалог із споживачем реалізований у програмі виключно через цифрові меню: із запропонованих можливостей споживач вибирає за допомогою цифрової клавіші пункт меню й попадає на відповідну програму.

Параметри для алгоритмів вводяться в зафарбовані поля на екрані монітора: програма чекає введення числових та текстових величин у оптично виділених місцях. Якщо потрібно вибирати один із можливих варіантів (наприклад, функцію вікна), то необхідний параметр задається введенням відповідної цифри. Послідовність введення в рамках зафарбованого поля довільна. Лише після натискання клавіші F10 програма сприймає задану інформацію, перевіряє її коректність і запускає опрацювання, якщо не було зафіксовано помилок. Клавішею ESC (або аналогічною) можна припинити опрацювання і повернутися до пункту меню, з якого воно було викликане.

**Службові програми.** Дані, що надаються програмі для опрацювання (наприклад, для згладжування, перетворення чи фільтрації), можуть мати різні джерела утворення:

а) за допомогою інтерпретатора формул: пари значень можуть обчислюватися на довільно вибраному інтервалі по осі  $x$  за виразом, який задає формулою споживач. У формулі можуть використовуватися функціональні терми ( $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\text{abs}$ ,  $\ln$ ,  $\log$ ...);

б) введення пар значень ручним способом, який застосовується у випадках, коли між значеннями  $x$  та  $y$  неможливо або дуже важко встановити аналітичну залежність, або коли кількість даних не дуже велика;

в) вибір стандартної функції: при цифровій обробці сигналів дуже часто трапляються однакові форми функцій, такі як синус, прямокутник, трикутник. У відповідному меню програми споживач може генерувати значення цих стандартних функцій, задавши перед цим необхідні параметри (амплітуду та частоту);

г) завантаження послідовності даних, які були створені іншими програмами і записані у файли на гнучкому або жорсткому магнітному диску. Незважаючи на те, що програмне забезпечення окремих розділів працює незалежно від інших програмних частин, то якщо записати обчислені в одному розділі результати в зовнішню пам'ять, їх можна потім завантажувати та обробляти у другому розділі програми. Споживач, обізнаний з програмуванням, має можливість за допомогою пакета NUMER1 обробляти дані своїх вимірювань або моделювань. Для цього необхідно лише витримати належний формат записів файла (текстовий формат ASCII). Формат запису числових значень може бути довільним (цілі, десяткові дробі або в експоненціальній формі запису);

д) побудова нових послідовностей даних на основі вже готової послідовності якщо застосувати додатково адитивне накладання шумової складової. У відповідному пункті меню можна встановити форму та параметри шуму.

**Підготовка послідовностей даних.** Часто виникає необхідність дослідити параметри алгоритму за рахунок модифікації заданої послідовності даних. Для цього в одній незалежній програмі можна оперувати з даними послідовності, знищувати чи доповнювати їх. Весь вектор послідовності даних може бути змінений через додавання або перемноження з довільно вибраною сталою. Передбачена також можливість зв'язувати між собою записані у файлі дані: їх можна взаємно підсумовувати або віднімати з тим, щоб, наприклад, отримати інформацію про форму відносної або абсолютної похибки.

Результати цифрових обчислень можна вивести різними способами :

**Графік.** Найбільш наочним зображенням результатів є, звичайно, графічне. Програма формує графічне зображення послідовності даних у зручному масштабі та з відповідним позначенням осей. У залежності від програми можуть формуватися і додаткові графічні зображення (для полегшення споживачеві інтерпретації отриманих результатів). Так, після обчислення згладжування поряд зі згладжувальною кривою зображується множина точок, які потрібно було з її допомогою згладити.

Якщо споживача цікавлять подробиці, то довільні частини кривої можна зобразити у збільшеному масштабі за допомогою простих одноклавішних команд (функції збільшення масштабу). Крім того, в діалоговому режимі можна змінити параметри кожної кривої (форми точок, ліній, вигляд сполучення, фарбу), щоб оптимізувати доступність діаграм. За допомогою висвічування фонового растру та цифрової індикації координат поточної позиції графічного курсора можна проводити обмірювання кривих. Осі коор-



динат можна задавати в лінійному та логарифмічному масштабах.

**Таблиця.** Якщо когось цікавлять точні значення функції з послідовності даних, можна скористатися зображенням результатів у вигляді таблиці. Цей список пар значень можна виводити на екран дисплея або на принтер.

**Запис у файл.** Для подальшої обробки або зберігання даних їх можна записувати в файл на дискеті або жорсткому диску. Кожного разу при виведенні спектрів споживач може мати в розпорядженні для зображення як модуль, так і фазу, тобто дійсну та уявну складові спектра.

**Статистика.** Розділ статистики програмного пакета NUMER1 ділиться на три підрозділи: функції розподілу, оцінювальна статистика, випадкові числа.

У першому підрозділі запрограмовані функції щільності та розподілу. У рамках «оцінювальної статистики» можна обробляти обчислені, виміряні чи записані у файл дані. Визначаються статистичні характеристики та статистичний розподіл відповідної послідовності даних. У цьому разі визначається надійний інтервал для середнього значення чи для щільності умовної ймовірності результату. За допомогою  $\chi^2$ -тесту перевіряється тип розподілу. Запрограмовані генератори випадкових чисел генерують псевдовипадкові числа, розподілені за рівномірним, Пуассоновим, нормальним та експоненціальним законами. Як і інші результати цього розділу, їх можна зображати графічно, виводити як таблиці чи записувати в файл для подальшої обробки.