

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Д. Є. Петрукович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з навчальної дисципліни

“Методи та засоби вимірювань”

для студентів галузь знань 15 “Автоматизація та приладобудування”
напрямок підготовки 152 “Метрологія та інформаційно – вимірювальна
техніка”

Частина II

Харків 2019

ТЕМА №2

АНАЛОГОВІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

ЛЕКЦІЯ № 1

Електромеханічні вимірювальні прилади.

1. Загальні відомості про методи та засоби вимірювань

1.1 Визначення і різновиди засобів вимірювальної техніки

Вимірювальна техніка - це величезний парк різноманітних ЗВТ з різними технічними і метрологічними характеристиками. Особливо важливими для процесу вимірювання є метрологічні характеристики, тому що вони впливають на результат і похибку вимірювання.

Засіб вимірювальної техніки - це технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики.

Засоби вимірювальної техніки розподіляють на типи.

Тип засобу вимірювальної техніки - сукупність засобів вимірювальної техніки однакового призначення, які мають однаковий принцип дії, однакову конструкцію та виготовлені за однією технологічною документацією.

Вимоги до ЗВТ регламентуються нормативною документацією. Такі ЗВТ називають **стандартизованими**. ЗВТ вимоги до яких не регламентуються відповідно до нормативної документації, називають **нестандартизованими**.

Залежно від області застосування відрізняють ЗВТ загального застосування і спеціальні. До **ЗВТ загального застосування** належать ЗВТ, які розробляються і випускаються для загальнодержавного і відомчого застосування. **Спеціальні (сервісні) ЗВТ** мають вузькоцільове призначення, розробляються і використовуються в системі технічного обслуговування конкретного об'єкта.

1.2. Загальні відомості про аналогові засоби вимірювальної техніки

Аналогові засоби вимірювальної техніки поділяють на електромеханічні та електронні.

Для засобів вимірювальної техніки прийнята єдина система найменувань і позначень. Позначення електромеханічних вимірювальних

приладів складається з літери алфавіту, яка вказує на тип вимірювального перетворювача (механізму), і номера моделі (табл.1.1

В основу системи позначень електронних (аналогових і цифрових) вимірювальних приладів покладено вид вимірюваної величини. Всі прилади поділені на 22 підгрупи. Кожна підгрупа об'єднує прилади одного призначення і їй присвоюється велика літера (наприклад, А – прилади для вимірювання струму; В – прилади для вимірювання напруги; Ч – прилади для вимірювання частоти і часу і т.д.).

При випуску з виробництва до кожного ЗВТ додається технічний опис, де містяться вказівки про призначення приладу, відомості про технічні характеристики, електричні схеми, опис конструкції, методики вимірювань і повірки, інструкція щодо обслуговування та ремонту. На шкалах електромеханічних вимірювальних приладів наносяться умовні позначення, які дозволяють установити принцип дії, границі допустимої похибки, можливість його роботи за тих чи інших умов.

Таблиця 1.1 - Тип вимірювального перетворювача

Тип перетворювача	Умове позначення перетворювача	Приклад позначення приладу
Магнітоелектричний	М*	Міліамперметр М4262
Електромагнітний	Э	Амперметр Э514
Електродинамічний, феродинамічний	Д	Міліамперметр Д590
Індукційний	И	Трансформатор струму И106
Електростатичний	С	Вольтметр С5021
Термоелектричний	Т	Мілівольтметр Т131
Фотоелектричний, фото компенсаційний електронний	Ф	Вольтметр Ф5053
Випрямний	Ц	Комбінований прилад Ц4320
Самописний прилад, світло-променевий осцилограф	Н	Осцилограф Н125

Міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювачі параметрів електричних кіл	Р	Міст для вимірювання параметрів R, L, C P5016
---	---	--

* - використовуються літери російського алфавіту

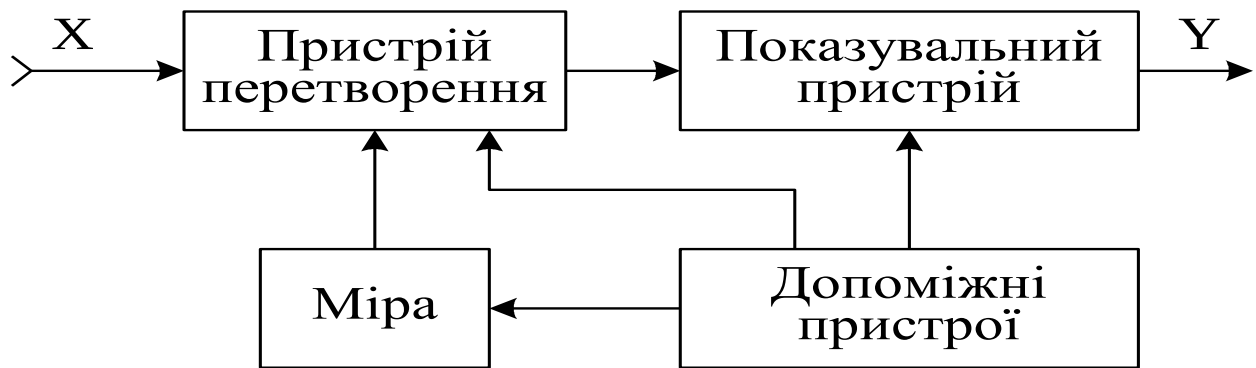


Рисунок 1.1 -Струрна схема аналогового вимірювального приладу

Структурні схеми сучасних аналогових вимірювальних приладів досить різноманітні, але їх можна зобразити узагальненою структурною схемою рис. 1, на якій X – вимірювана (вхідна) фізична величина, Y - показ приладу. Пристрій перетворення і показувальний пристрій – невід’ємні вузли будь-якого приладу, міри і допоміжні пристрої не є обов’язковими для ряду вимірювальних приладів. Міри використовуються в тих приладах, під час експлуатації яких необхідно проводити налаштування і калібрування, або в приладах порівняння. До числа мір належать, наприклад, калібратор амплітуди і часових інтервалів у осцилографах. Допоміжними пристроями є джерела живлення, комутаційні, освітлювальні й інші вузли, які не беруть безпосередньої участі в перетвореннях вимірюваної величини, але забезпечують нормальні умови роботи приладу.

Пристрій перетворення містить масштабні та функціональні вимірювальні перетворювачі. Основні вимоги до вимірювальних перетворювачів зводяться до забезпечення високої лінійності функції перетворення та стабільності коефіцієнта передачі в заданих межах вимірювання.

2. Електромеханічні вимірювальні прилади

Аналоговий електромеханічний прилад складається з:

- первинного вимірювального перетворювача,

- вимірювального механізму
- показувального пристрою.

Первинний перетворювач служить для масштабного перетворення вимірюваної електричної величини X або перетворення її в іншу електричну величину Y , функціонально зв'язану з величиною X . Величина Y безпосередньо впливає на вимірювальний механізм, який складається з нерухомої і рухомої частин і перетворює електричну енергію в переміщення рухомої частини та жорстко зв'язаного з нею вказівника показувального пристрою.

Рухому частину вимірювального механізму (катушку, феромагнітний сердечник, алюмінієвий диск) розміщують в електромагнітному полі нерухомої частини і закріплюють на осі, розтяжках або підвісі. На рис. 1а, показана рухома частина на півосях. До катушки 6, зробленої з тонкого мідного ізолюваного дроту, прикріплюються дві півосі 7. До півосей прикріплюються пружини (пружні елементи) 4, 8 та стрілка 5. Кінці півосей закінчуються кернами 3, 9 і розташовуються на опорах – підп'ятниках. Для опор застосовують твердий камінь (агат, корунд, рубін та ін.) діаметром 2...3 мм, який завальцьовують у латунний гвинт. Вістря керна має радіус закруглення, узгоджений з радіусом кратера каменя, щоб забезпечити найменший момент тертя. Для приладів підвищеної чутливості рухому частину установлюють на розтяжках (рис. 1б). Розтяжки 11 являють собою тонкі стрічки з бронзи, що закріплені на пружинах 10 і утворюють вісь обертання рухомої частини. До катушки 6 прикріплюється дзеркальце 12, яке повертається з катушкою і є частиною показувального пристрою. В особливо чутливих механізмах рухома частина підвішується на бронзовій нитці 13 – підвісі (рис. 1в). Коректор 1 і коригувальний гвинт 2 призначені для встановлення вказівника на нульову позначку.

Рухома частина вимірювального механізму обертається під дією обертального моменту, створеного механічними силами взаємодії магнітних або електричних полів рухомої і нерухомої частин механізму. **Загальним виразом для обертального моменту будь-якого вимірювального механізму є рівняння Лагранжа другого роду:**

$$M_{об} = dW_{ем} / d\alpha , \quad (2.1)$$

де $W_{ем}$ – енергія електромагнітного, електричного або магнітного поля, яка зосереджена у вимірювальному механізмі;

α – кут повороту рухомої частини механізму.

У загальному випадку обертальний момент є функцією не тільки вимірюваної величини X , але й кута повороту рухомої частини α :

$$M_{об} = F(X, \alpha). \quad (2.2)$$

Під дією обертального моменту рухома частина повертається, доки $M_{об}$ не буде зрівноважений протидійним моментом $M_{пр}$, що створюється пружними елементами (пружинами 4 і 8, розтяжками 11, підвісом 13), і за напрямом є протилежним обертальному моменту. Він не залежить від вимірюваної величини і є пропорційним куту закручування пружного елемента

$$M_{об} = W\alpha, \quad (2.3)$$

де W – питомий протидійний момент, який залежить від властивостей матеріалу пружного елемента.

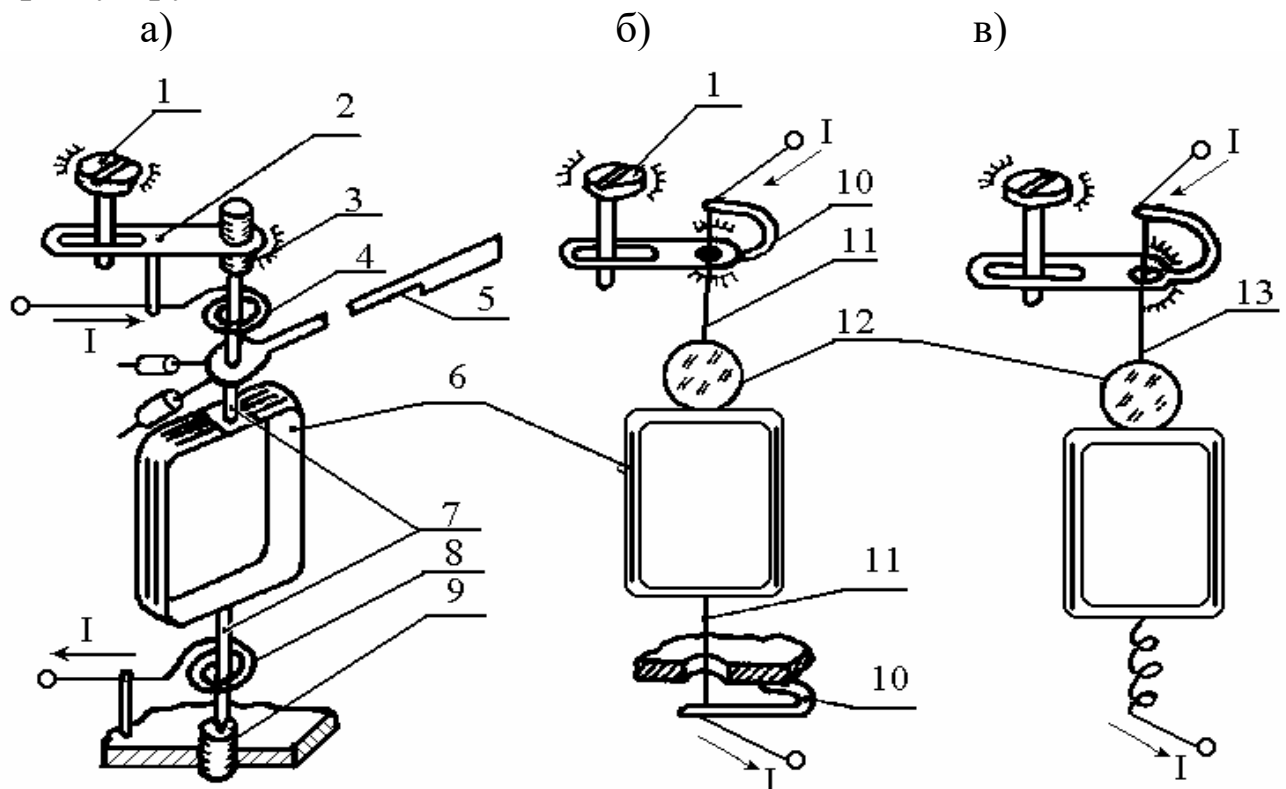


Рисунок 2.1 - Рухомі частини магнітоелектричного приладу: а) - на півосях; б) - на розтяжках; в) - на підвісі

З рівняння $M_{об} = M_{пр}$ витікає функція перетворення вимірювального механізму, що виражає залежність кута повороту його рухомої частини від значення вимірюваної величини

$$\alpha = F(X, \alpha) / W . \quad (4)$$

При зміні вимірюваної величини X рухома частина переходить у нове положення рівноваги не миттєво, а, як правило, після кількох коливань навколо нього. Для зменшення часу заспокоєння рухомої частини застосовують заспокоювачі: повітряні, магнітоіндукційні та рідинні. На рис. 2.2 показано будову повітряного, магнітоіндукційного та рідинного заспокоювачів.

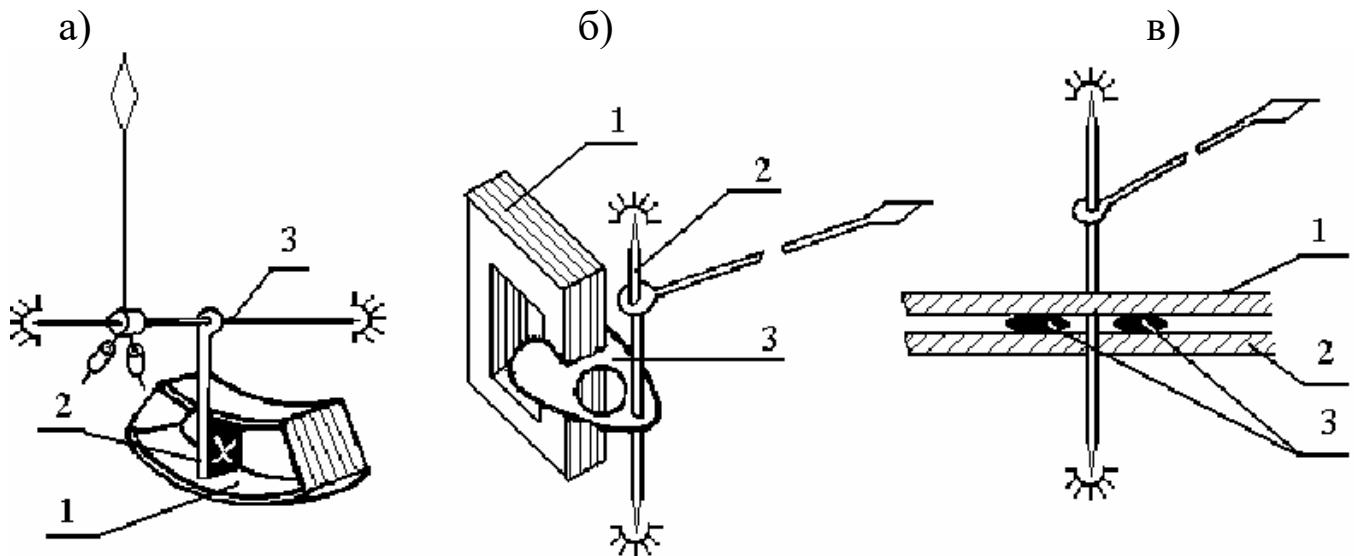


Рисунок 2.2 - Заспокоювачі: а) - повітряний; б) - магнітоіндукційний; в) - рідинний

Крило 2 повітряного заспокоювача (рис. 2,а) закріплюється на осі 3 рухомої частини. Під час руху в закритій камері 1 крило переборює зустрічний потік повітря і по обидва боки крила створюється різниця тиску повітря, що приводить до гальмування крила. Магнітоіндукційний заспокоювач (рис.2,б) являє собою постійний магніт 1, у зазорі якого може переміщуватися алюмінієвий сектор 3, закріплений на осі 2. При коливаннях рухомої частини в секторі індукується струм, який, взаємодіючи з магнітним полем постійного магніту, створює гальмівний момент. Рідинний заспокоювач (рис.2,в) складається з двох дисків. Диск 1 закріплюється на рухомій частині приладу, а диск 2 – на його нерухомій частині. Зазор між дисками складає 0,1...0,15 мм. Між дисками заливається спеціальна маловисихаюча кремнійорганічна рідина 3, яка в зазорі утримується поверхневим натягом. Для запобігання витіканню рідини із зазору поверхні дисків, які стикаються з рідиною, поліруються.

Момент, створений заспокоювачем, описується виразом

$$M_p = P d\alpha / dt ,$$

де P – коефіцієнт заспокоєння.

На рухому частину вимірювального механізму діє також і момент тертя, яке виникає в опорах. Воно залежить від якості матеріалів і обробки поверхні кернів і підп'ятника, забруднення цих поверхонь, маси рухомої частини, вологості й ряду інших випадкових факторів. Наявність тертя, з одного боку, сприяє більш швидкому заспокоєнню рухомої частини, а з іншого – вносить похибку в результат вимірювання.

Для одержання числового значення вимірюваної величини вимірювальний механізм забезпечується показувальним пристроєм, який складається зі шкали та вказівника. Вказівник буває двох типів: стрілковий та світловий. Останній використовують у високочутливих приладах (гальванометрах) та у приладах високих класів точності.

3. Магнітоелектричні механізми та прилади

Магнітоелектричні прилади використовують як амперметри, вольтметри, гальванометри постійного струму, балістичні гальванометри та осцилографи, омметри.

Магнітоелектричні механізми бувають з рухомою котушкою і нерухомим постійним магнітом і, навпаки, з рухомим постійним магнітом і нерухомою котушкою.

Конструкція такого механізму показана на рис. 3.1. Нерухому частину механізму створює магнітна система: постійний магніт 1, полюсні наконечники 2 і сердечник 3. У рівномірному кільцевому зазорі між наконечниками і сердечником розміщена котушка 4 рухомої частини. Котушка виконується з ізольованого переважно мідного дроту і закріплюється на осях або розтяжках (рис.3). Постійний магніт виготовляється з магнітотвердих матеріалів, а всі інші елементи магнітної системи – з магнітом'яких матеріалів.

Вимірюваний постійний струм I у котушці взаємодіє з магнітним полем постійного магніту і створює обертальний момент. Його можна визначити за формулою $M_{об} = dW_{ем} / d\alpha$, підставивши в неї значення енергії системи “котушка з струмом – постійний магніт”:

$$W_{ем} = \Psi I + I^2 L / 2 ,$$

де $\Psi = B S_a n \alpha$ – потокозчеплення котушки з магнітним полем магніту;

B – магнітна індукція в зазорі між наконечниками і сердечником;
 $n, S_a = S \cos \alpha$ – число витків і активна площа котушки, S – площа котушки;

$\Psi_0 = BS_a n$ – зміна потокозчеплення котушки при повороті її на кут α , який дорівнює 1 рад;

L – індуктивність котушки.

З урахуванням наведених рівностей для обертового моменту дістаємо

$$M_{об} = BS_a n I + \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (3.1)$$

Друга складова в (3.1) практично дорівнює нулю, бо зазор, де переміщується котушка, рівномірний і тому в будь-якому положенні котушки її індуктивність залишається величиною незмінною.

Протидійний момент створюється пружинами 4 і 8 (рис. 2.1). Вони також використовуються для підведення струму до котушки. У положенні рівноваги $M_{об} = M_{пр}$, тобто $\Psi_0 I = W \alpha$, а отже, відхилення рухомої частини прямо пропорційне вимірюваному струму I .

$$\alpha = \Psi_0 I / W = S_i I \quad (3.2)$$

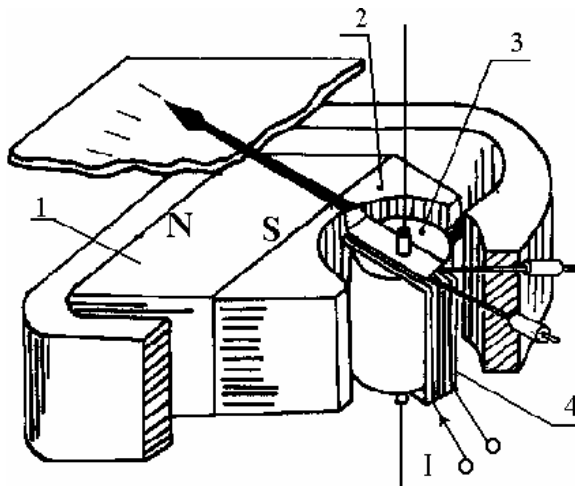


Рисунок 3.1 - Магнітоелектричний механізм

Величина

$$S_i = \Psi_0 / W \quad (3.3)$$

– це чутливість магнітоелектричного приладу до струму. Вона не залежить від кута відхилення котушки і є сталою вздовж усієї шкали, тому шкала магнітоелектричного приладу рівномірна.

Магнітоелектричний прилад можна використовувати і для вимірювання напруги, оскільки струм у котушці прямо пропорційний напрузі на її затискачах $I = U/R_0$, де R_0 – опір котушки. Тоді рівняння (3.2) набере вигляду

$$\alpha = S_i U / R_0 = S_u U, \quad (3.4)$$

де $S_u = S_i / R_0$ – чутливість магнітоелектричного приладу до напруги.

При зміні напрямку струму в котушці змінюється знак оберտального моменту і напрямок відхилення рухомої частини механізму. Тому, якщо по котушці механізму проходитиме змінний струм (без постійної складової), то рухома частина повинна відхилятися в обидва боки від нульової позначки шкали з частотою струму. Але це буде спостерігатися лише у випадку, коли частота струму f менша або близька до частоти власних коливань рухомої частини f_0 . При $f/f_0 > 3$ рухома частина завдяки значному моменту інерції не буде встигати за миттєвими змінами оберտального моменту. Відхилення рухомої частини спостерігатиметься тільки в тому разі, якщо середнє значення оберտального моменту за період змінного струму не дорівнює нулю, тобто при наявності постійної складової у вхідному змінному струмі.

Роль заспокоювача в магнітоелектричному механізмі виконує котушка рухомої частини. У котушці при її переміщенні в зазорі між полюсними наконечниками і сердечником індукується змінна ЕРС, яка викликає змінний струм i у колі котушки. Цей струм, взаємодіючи з магнітним полем постійного магніту, створює момент заспокоєння

$$M_p = \Psi_0 i = - \frac{\Psi_0^2}{R_0 + R} \frac{d\alpha}{dt} = P \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3.5)$$

де R_0, R – опори котушки і зовнішнього кола приладу відповідно.

Момент заспокоєння залежить від коефіцієнта заспокоєння $P = -\Psi_0^2 / (R_0 + R)$ та швидкості переміщення $d\alpha/dt$ рухомої частини. Час заспокоєння рухомої частини магнітоелектричного приладу звичайно не перевищує 2...4 с.

ЛЕКЦІЯ № 2

"

ВИМІРЮВАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ ТА ЕЛЕКТРОННІ ВОЛЬТМЕТРИ

1. Електронні вольтметри

Електронні вольтметри складають найбільш численну групу серед радіовимірювальних приладів.

Електронні вольтметри за родом вимірюваної напруги поділяють на види: В2 – вольтметри постійної напруги; В3 – вольтметри змінної напруги; В4 – вольтметри імпульсної напруги; В6 – селективні вольтметри; В7 – універсальні вольтметри; В8 – вимірювачі відношення напруг та їх різниці.

1.1. Електронні вольтметри постійної напруги

Електронні вольтметри постійної напруги дозволяють вимірювати постійні напруги від мікрвольт до 1В, а з зовнішнім подільником напруги – до 300В. Будова вольтметрів досить проста, вони містять подільник напруги (ПН), емітерний повторювач (ЕП), підсилювач постійного струму (ППС), магнітоелектричний мікроамперметр на 50...500 мкА та джерело живлення (ДЖ) (рис. 1). Часто на вході вольтметра вмикають фільтр нижніх частот (ФНЧ), який дозволяє ослаблювати змінну складову завади.

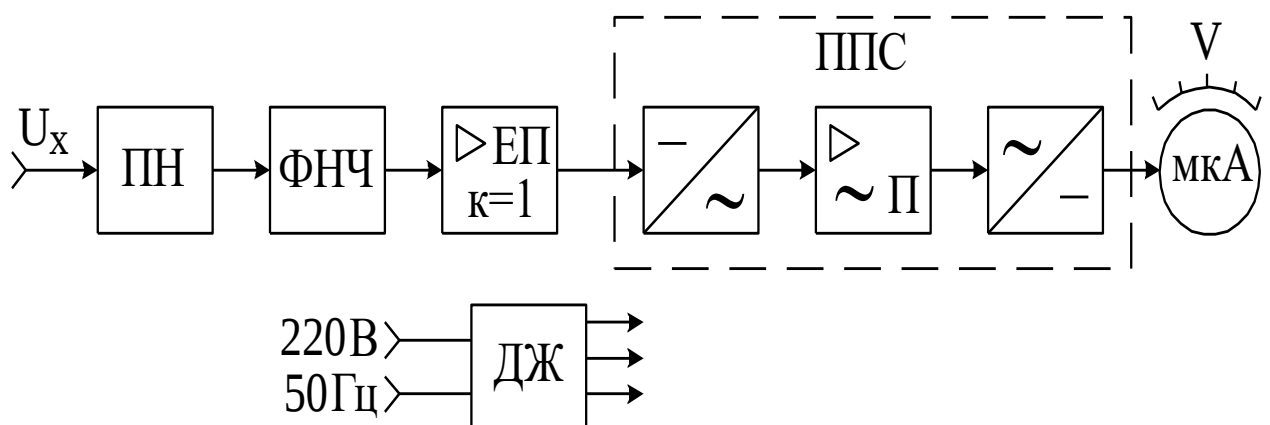


Рисунок 1.1 - Структурна схема електронного вольтметра постійного струму

Подільник напруги ПН, призначений для розширення межі вимірювань, повинен мати високий вхідний опір і стабільний коефіцієнт передачі. В сучасних вольтметрах використовують ППС, побудовані за схемою модулятор – підсилювач змінного струму П – демодулятор (рис. 1), дрейф нуля яких практично відсутній.

Відносна основна похибка вольтметрів залежно від рівня вимірюваної напруги знаходиться в границях $\pm 0,5...6 \%$. Складовою основної похибки є нестабільність коефіцієнтів передачі ПН і ФНЧ, коефіцієнта підсилення ППС, а також похибка магнітоелектричного мікроамперметра.

1.2. Електронні вольтметри змінної напруги

Структурно електронний вольтметр змінної напруги відрізняється від вольтметрів постійної напруги наявністю вимірювального перетворювача змінної напруги в пропорційну постійну напругу. Залежно від місця вмикання перетворювача (до або після підсилювача) відрізняють вольтметри типу перетворювач-підсилювач і типу підсилювач-перетворювач. У першому випадку вимірювана напруга спочатку перетворюється в постійну, а потім підсилюється підсилювачем постійного струму. У другому випадку змінна напруга підсилюється підсилювачем змінного струму, а після цього перетворюється в постійну напругу. Вольтметри типу перетворювач-підсилювач характеризуються широким частотним діапазоном – від 20 Гц до 1000 МГц, але обмеженою чутливістю; вольтметри типу підсилювач-перетворювач є більш чутливими і дозволяють вимірювати напругу від 3 мкВ до 300 В, проте в дещо обмеженій смузі частот.

Перетворювач є найважливішим елементом вольтметра, який в основному визначає його метрологічні характеристики. Вихідна напруга перетворювача може бути пропорційною максимальному, середньому випрямному або середньому квадратичному значенню вхідної напруги.

Електронні вольтметри максимальних значень виконуються за схемою перетворювач-підсилювач (рис. 1.2,а). Функції перетворювача змінної напруги в постійну виконують амплітудні детектори з відкритим входом, закритим входом та їх комбінації.

Детектор з відкритим входом (рис. 2,б) працює так. Конденсатор С через діод Д заряджається практично до максимального значення $U_{\max}$ вхідної напруги $u_{\text{вх}}$. У моменти часу $t_2, t_4, \dots$ діод Д закривається і конденсатор С розряджається через резистор R. В інтервалах часу $t_2 - t_1, t_4 - t_3, \dots$ конденсатор під заряджується до напруги $U_{\max}$. Ємність С

конденсатора і опір R резистора вибирають такими, щоб стала часу кола розряджання $\tau = RC$ була набагато більшою максимального періоду зміни вхідної напруги. При виконанні цієї умови за час закритого стану діода конденсатор не встигає помітно розрядитися і вихідна напруга детектора $U_{\text{вих}}$ залишається практично постійною та рівною і приблизно дорівнює U_{max} , тобто $U_{\text{вих}} \approx U_{\text{max}}$.

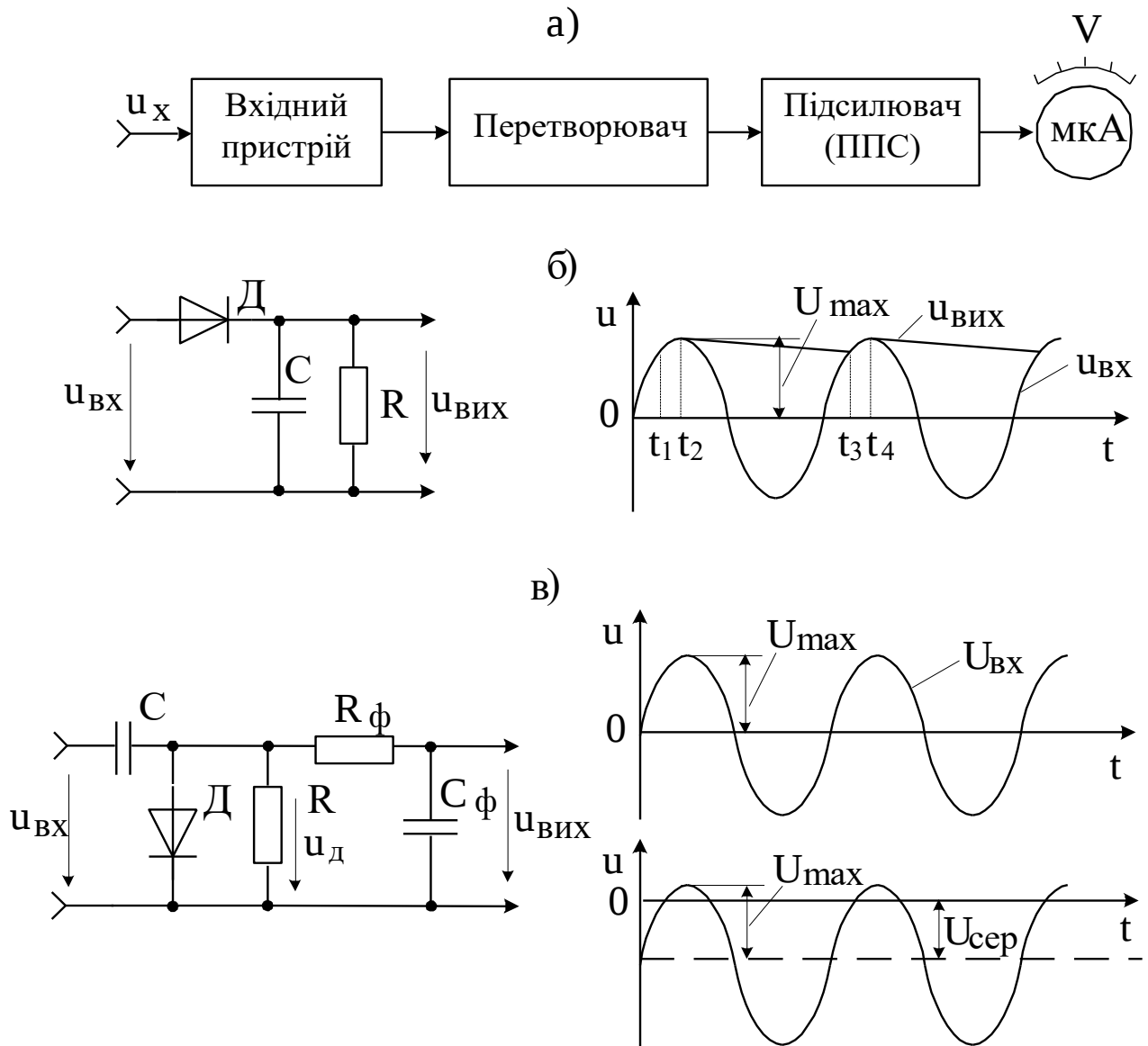


Рисунок 1.2 - Електронний вольтметр максимальних значень: а – структурна схема; б, в – принципові схеми і часові діаграми детекторів з відкритим і закритим входом відповідно

У детектора з закритим входом (рис. 2,в) конденсатор C заряджається майже до максимального значення: $U_{\text{сеп}} \approx U_{\text{max}}$.

Вихідна напруга детектора визначається як різниця напруги на конденсаторі C та вхідного синусоїдного сигналу $u_{\text{BX}} = U_{\text{max}} \sin \omega t$:

$$u_d = -U_{\text{сер}} + U_{\text{max}} \sin \omega t.$$

Отже, напруга на виході детектора є пульсуючою, тому між детектором та підсилювачем постійного струму вмикається ФНЧ $R_{\phi} C_{\phi}$, який пропускає лише сталу складову $U_{\text{сер}} \approx U_{\text{max}}$.

Вхідним елементом електронного вольтметра є подільник напруги. Коефіцієнти передачі подільника вибирають такими, щоб відношення номінальних напруг двох суміжних меж вимірювання дорівнювало $\sqrt{10}$, що відповідає 10дБ.

Основна похибка вольтметрів максимальних значень обумовлена неточністю коефіцієнтів передачі подільника напруги, детектора, неточністю і нестабільністю коефіцієнта підсилення ППС, похибкою вихідного магнітоелектричного приладу.

Додаткові похибки обумовлені двома причинами: зміною температури навколишнього середовища та зміною частоти вимірюваної напруги. Зміна температури викликає зміну параметрів елементів схеми, що призводить до зміни режиму роботи приладу.

Частотна похибка вольтметрів максимальних значень в області низьких і високих частот визначається різними факторами. На низьких частотах похибка виникає за рахунок значного розрядження конденсатора C детектора у ті півперіоди вимірюваної напруги, коли діод закритий.

В області високих частот на результат вимірювання впливають індуктивність L_k і ємність C_k підвідного кабелю та вхідна ємність $C_{\text{вх}}$ вольтметра. Ці параметри утворюють коливальний контур, резонансна (власна) частота якого визначається формулою

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_k \left(\frac{C_k}{2} + C_{\text{вх}} \right)}}.$$

При частотах вимірюваної напруги ω , близьких до резонансної частоти ω_p контуру, напруга на вході приладу (в кінці підвідного кабелю) може істотно перевищувати вимірювану напругу. При цьому відносна похибка вимірювання складатиме

$$\delta_{\text{вч}} = \frac{1}{\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 - 1}.$$

Звідси випливає, що при необхідності одержати $\delta_{\text{вч}} \leq 1\%$ повинна виконуватися нерівність $\omega/\omega_p < 0,1$.

Для зменшення частотної похибки необхідно резонансну частоту вхідного кола вольтметра зсунути в область більш високих частот так, щоб вона в 10...12 разів перевищувала верхню межу його робочого частотного діапазону.

При вимірюванні СКЗ змінної напруги, форма якої відрізняється від синусоїдної, треба враховувати, що результат вимірювання може бути викривленим. Це пояснюється тим, що вихідна напруга амплітудного детектора пропорційна максимальному значенню вимірюваної напруги, а шкала вихідного приладу проградуєвана в СКЗ синусоїдної напруги, тобто позначки на циферблаті відповідають значенням $U = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$, де $k_a = \sqrt{2}$ – коефіцієнт амплітуди синусоїди. Коефіцієнт амплітуди k_a несинусоїдних напруг відрізняється від $\sqrt{2}$ і відносна похибка визначення СКЗ напруги на шкалі приладу, що дорівнює

$$\delta_a = \frac{k_a - \sqrt{2}}{\sqrt{2}} 100, \%,$$

може стати значною. Так, наприклад, при вимірюванні напруги прямокутної форми, для якої $k_a = 1$, похибка складатиме мінус 29 %. Це треба мати на увазі при вимірюваннях універсальними вольтметрами виду В7, структурна схема яких наведена на рис. 1.3. Схема каналу вимірювання постійної напруги збігається зі схемою вольтметра постійної напруги, а схема каналу вимірювання змінної напруги – зі схемою вольтметра змінної напруги. Залежно від вхідної напруги (постійна чи змінна) перемикач S установлюється у відповідний стан.

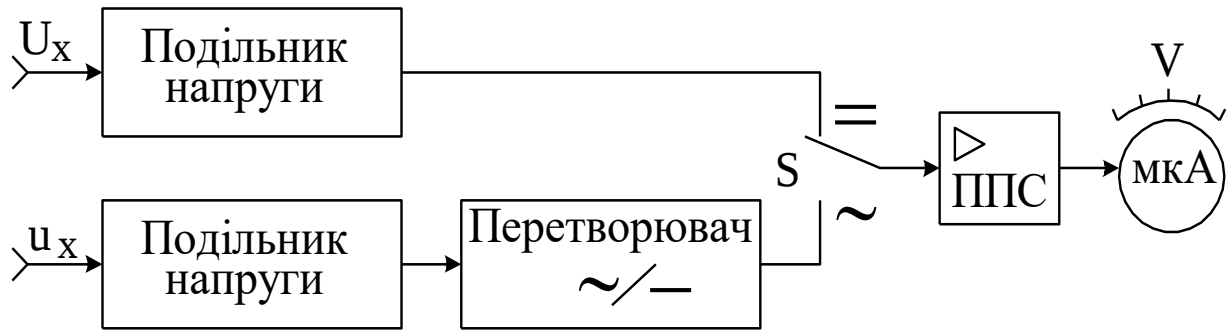


Рисунок 1.3 - Структурна схема універсального електронного вольтметра

Вольтметри забезпечують вимірювання постійних напруг у межах 30 мВ...300 В та змінних напруг у межах СКЗ 200 мВ...300 В у діапазоні частот від 20 Гц до 800...1000 МГц. Основна відносна похибка при вимірюванні постійних напруг $\pm 2,5...4\%$ і при вимірюванні СКЗ змінних напруг $\pm 4...6\%$.

Вольтметри середніх випрямних значень будуються за схемою підсилювач-перетворювач (рис. 1.4,а), яка містить вхідний пристрій (два подільники напруги і перетворювач імпедансу П), підсилювач П і детектор середньовипрямних значень.

Детектор (або перетворювач) являє собою двопівперіодну схему випрямлення, охоплену глибоким негативним зворотним зв'язком. Напруга зворотного зв'язку знімається з резистора R_4 і подається на вхід підсилювача П. Завдяки зворотному зв'язку виключається вплив діодів на коефіцієнт перетворення, покращуються характеристики підсилювача, зменшується нестабільність і нелінійність його амплітудної характеристики. В діагональ діодного мосту вмикається магнітоелектричний механізм (мікроамперметр), який реагує на середнє випрямне значення напруги $U_{\text{срв}}$, проте його шкалу градуують не в середніх випрямних значеннях напруги, а в СКЗ напруги синусоїдної форми U , тобто на шкалу наносять позначки, що відповідають середнім випрямним значенням напруги, помноженим на коефіцієнт форми синусоїди $k_f = 1,11$: $U = k_f U_{\text{срв}}$. Тому при вимірюванні несинусоїдної напруги покази вольтметра не відповідають її дійсному СКЗ. Вхідний пристрій вольтметра складається з компенсованого подільника напруги $R_1 C_1 = R_2 C_2$, перетворювача імпедансу П (підсилювача з безпосереднім зв'язком) та атенюатора (рис. 4,б). Атенюатор разом з перемикачем S2 задає межі вимірювань 3, 10, 30, 100, 300, 1000 мВ. Компенсований подільник вмикається перемикачем S1 на межах вимірювання 3...300 В і здійснює ослаблення сигналу в 1000 разів.

Розглянута структура вольтметра забезпечує вимірювання синусоїдних напруг, починаючи з одиниць мілівольт.

Вольтметри середніх випрямних значень, наприклад, типів ВЗ-38, ВЗ-39 забезпечують вимірювання СКЗ синусоїдних напруг у діапазоні частот від 20 Гц до 5...10 МГц, їх основна відносна похибка складає 2,5 % у межах вимірювання 3...1000 мВ і 4 % в інших межах вимірювання, вхідний опір не менше 4...5 МОм.

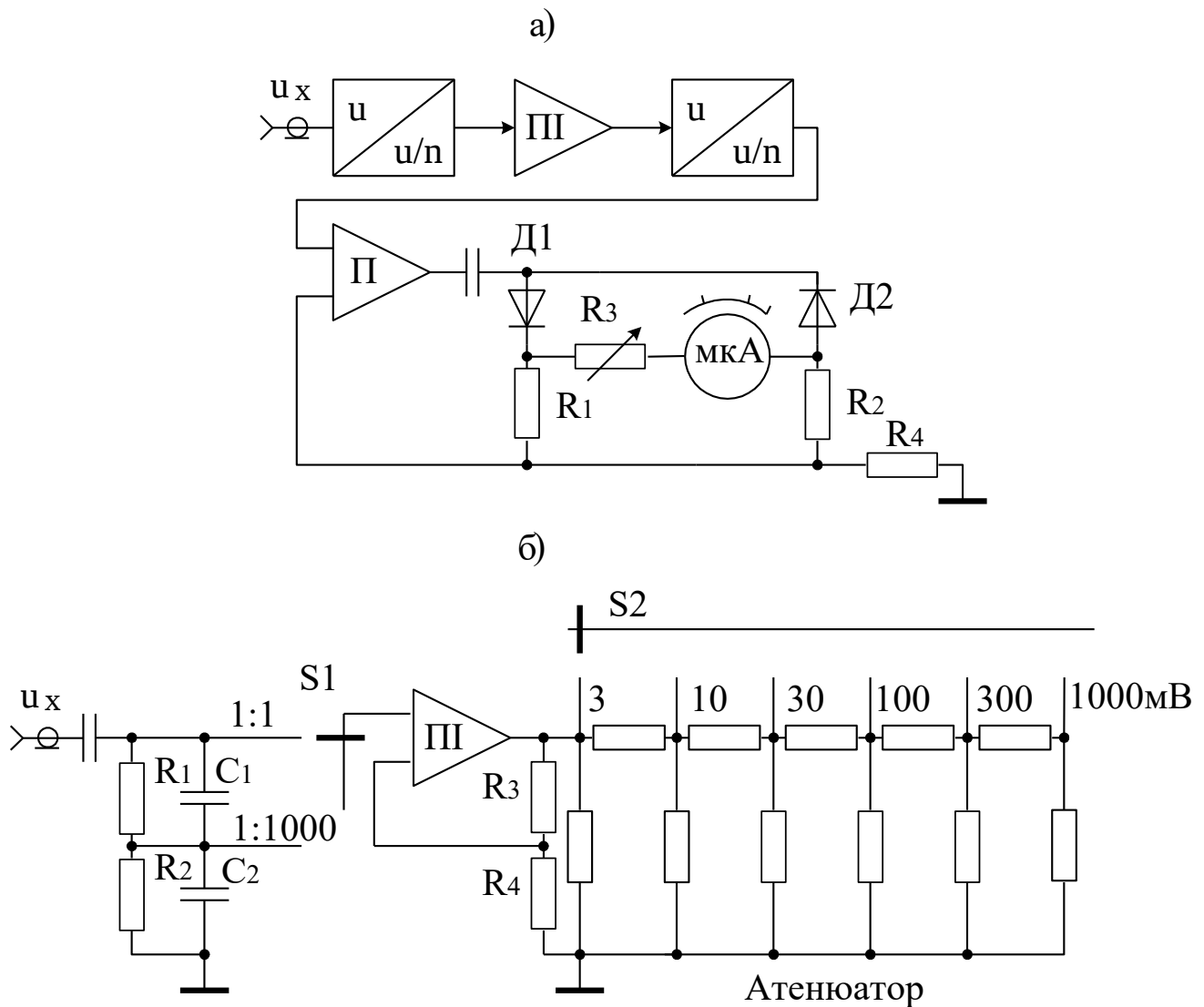


Рисунок 1.4. Вольтметр середньовипрямних значень: а – структурна схема; б – принципова схема вхідного пристрою

Вольтметри середніх квадратичних значень будуються за схемою підсилювач-перетворювач і призначаються для вимірювання СКЗ напруг довільної форми. Перетворювачі змінної напруги в постійну (або в постійний струм) цих вольтметрів мають квадратичну характеристику. У вимірювальній техніці здебільшого використовують термоелектричні перетворювачі.

У вольтметрах ВЗ-40, ВЗ-42, ВЗ-48 і деяких інших застосовані компенсаційні схеми вмикання термоперетворювачів, які забезпечують

лінійність функції перетворення і широкий частотний діапазон. Структурна схема такого вольтметра наведена на рис.5, його перетворювач містить два термоперетворювачі T1, T2 та підсилювач постійного струму ППС за схемою модулятор-демодулятор (МДМ). Нагрівач термоперетворювача T1 вмикається на вихід широкопasmового підсилювача ШП, а нагрівач термоперетворювача T2 – на вихід ППС через подільник зворотного зв'язку. Термопари увімкнуті назустріч одна одній.

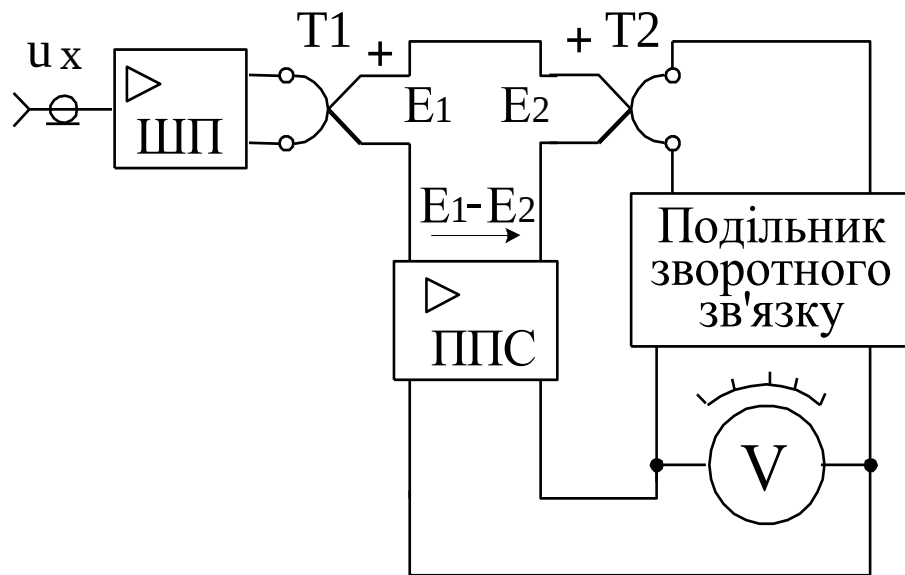


Рисунок 1.5 - Структурна схема термоелектричного вольтметра

Градувальна характеристика (і шкала) такого вольтметра є лінійною, тобто його покази пропорційні СКЗ вхідної напруги U_x .

Для прикладу наведемо технічні характеристики вольтметра ВЗ-57: він забезпечує вимірювання в діапазоні частот від 5 Гц до 5 МГц, його найменша і найбільша межі вимірювань СКЗ 30 мкВ і 300 В, основна відносна похибка $\pm 1...6\%$.

2. Селективні вольтметри

Селективні вольтметри призначаються для вимірювання дуже малих значень синусоїдних напруг і гармонічних складових несинусоїдних сигналів. Селективні мікровольтметри виконуються за схемою прямого перетворення, їх поділяють на низькочастотні та високочастотні.

Низькочастотний селективний мікровольтметр являє собою калібрований приймач прямого підсилення з двома широкопasmовими підсилювачами ШП1, ШП2, селективним підсилювачем СП і

підсилювачем змінного струму П (рис.2.1а). Про настроювання на потрібну частоту судять за максимальним показом вихідного магнітоелектричного вольтметра V.

Високочастотний селективний мікровольтметр (рис. 6,б) являє собою супергетеродинний приймач з подвійним перетворенням частоти. Такий мікровольтметр забезпечує вимірювання гармонік вхідної напруги в межах частот від 1 до 30 МГц.

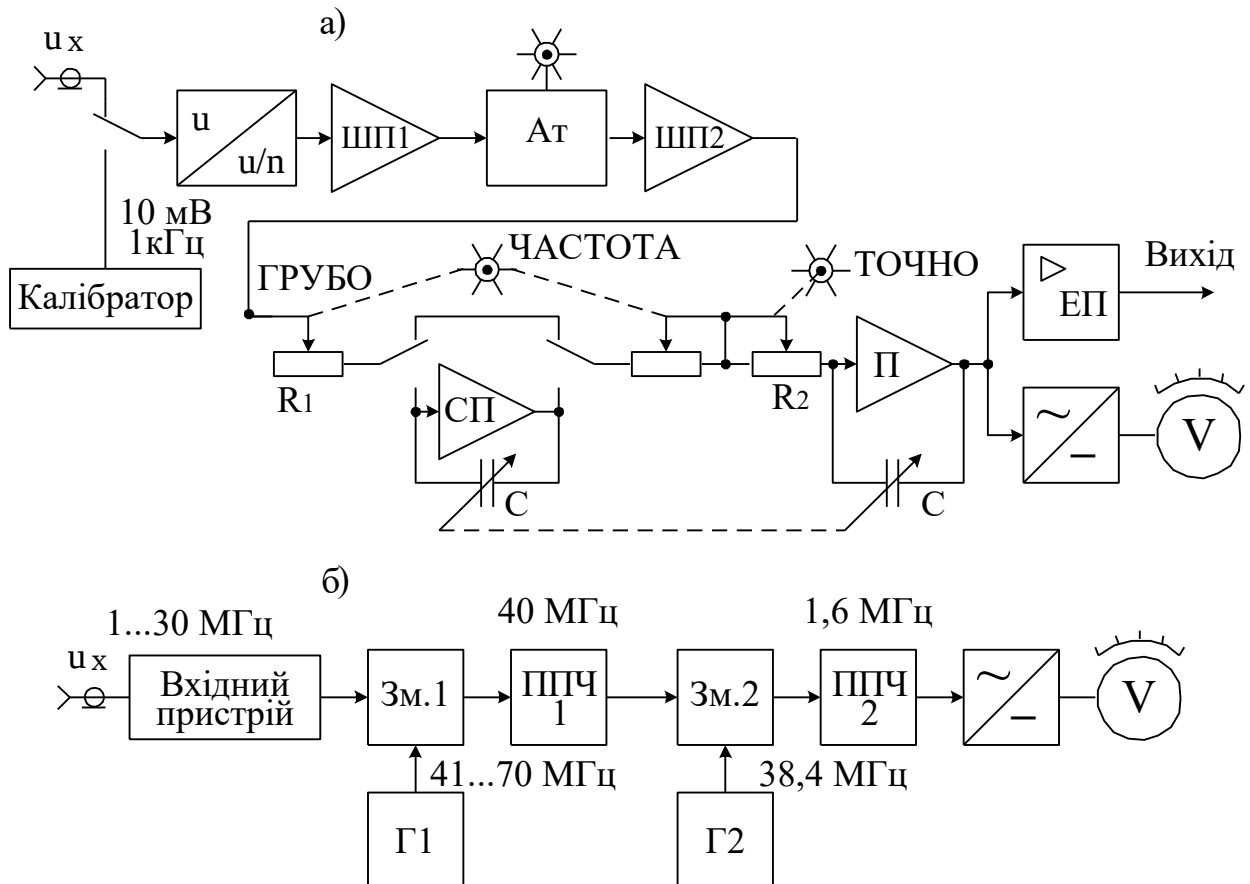


Рисунок 2.1 - Структурні схеми селективних вольтметрів: а – низькочастотного; б – високочастотного

За наявності двох і більше проміжних частот вдається створити вузько смугові підсилювачі проміжної частоти з великим і досить стабільним коефіцієнтом підсилення, значною мірою зменшити частотну похибку селективного вольтметра в робочому діапазоні його частот. Основна відносна похибка високочастотних мікровольтметрів досягає $\pm 10...15\%$.

Головними причинами основної похибки селективних мікровольтметрів є неточність настроювання підсилювачів проміжної частоти, нелінійність перетворення вимірюваної напруги, нестабільність коефіцієнта підсилення вузькосмугових підсилювачів, нестабільність рівня напруги гетеродинів і електричних шумів.

3. Імпульсні вольтметри

Імпульсні вольтметри призначаються для вимірювання максимальних значень періодичних відео- і радіоімпульсів. Широко використовуються діодно-конденсаторні та автокомпенсаційні вольтметри імпульсної напруги.

Діодно-конденсаторні вольтметри виконуються за схемою перетворювач-підсилювач і відрізняються від вольтметрів змінної напруги тим, що їх шкали градууються не в СКЗ, а в максимальних значеннях вимірюваної напруги. Точність показів вольтметрів цього типу значною мірою залежить від шпаруватості імпульсної напруги $Q = T/\tau$, де T – період імпульсів; τ – тривалість імпульсів. Це пояснюється тим, що вихідна напруга амплітудного детектора з закритим входом, який використовується як перетворювач імпульсної напруги в постійну, пропорційна не амплітуді $U_{\max}$, а величині $U'_{\max} = U_{\max} - \bar{U}$, де $\bar{U}$ – постійна складова (середнє значення) імпульсної напруги. Чим більша шпаруватість, тим менша постійна складова U_0 , тим ближче значення $U'_{\max}$ до амплітуди $U_{\max}$ і тим точніше результат вимірювання. Відносна методична похибка вимірювання може бути оцінена за формулою

$$\delta U_{\max} = \frac{U'_{\max} - U_{\max}}{U_{\max}} = -\frac{\bar{U}}{U_{\max}} = -\frac{\tau}{T} = -\frac{1}{Q}.$$

На рис. 3.1 наведена схема авто компенсаційного імпульсного вольтметра зі статичним перетворювачем. Вольтметр містить у собі емітерний повторювач ЕП, змонтований у виносному пробнику, подільник напруги, відеопідсилювач П1, статичний авто компенсаційний перетворювач, вихідний диференціальний авто компенсаційний підсилювач ДП та магнітоелектричний вольтметр V. Вимірюваний сигнал u_x через емітерний повторювач ЕП, призначений для узгодження високого входного опору з низькоомним опором подільника напруги, та відеопідсилювач П1 подається на вхід статичного авто компенсаційного перетворювача.

У процесі надходження вимірюваних імпульсів конденсатор C_1 заряджається, а в інтервалі між двома сусідніми імпульсами повільно розряджається через резистор R_1 , створюючи на вході підсилювача П2 розширені імпульси. Ці імпульси підсилюються, детектуються, згладжуються фільтром $R_\phi C_\phi$ і через резистор зворотного зв'язку $R_{\zeta\zeta}$

надходять на катод діода Д1 як компенсуюча напруга. В усталеному режимі, як тільки компенсуюча постійна напруга, сформована на конденсаторі C_ϕ , досягне рівня амплітуди імпульсної напруги, діод Д1 закривається і надходження імпульсів на автокомпенсаційний перетворювач припиняється. Крім того, компенсаційна напруга підсилюється диференціальним підсилювачем ДП і вимірюється магнітоелектричним вольтметром.

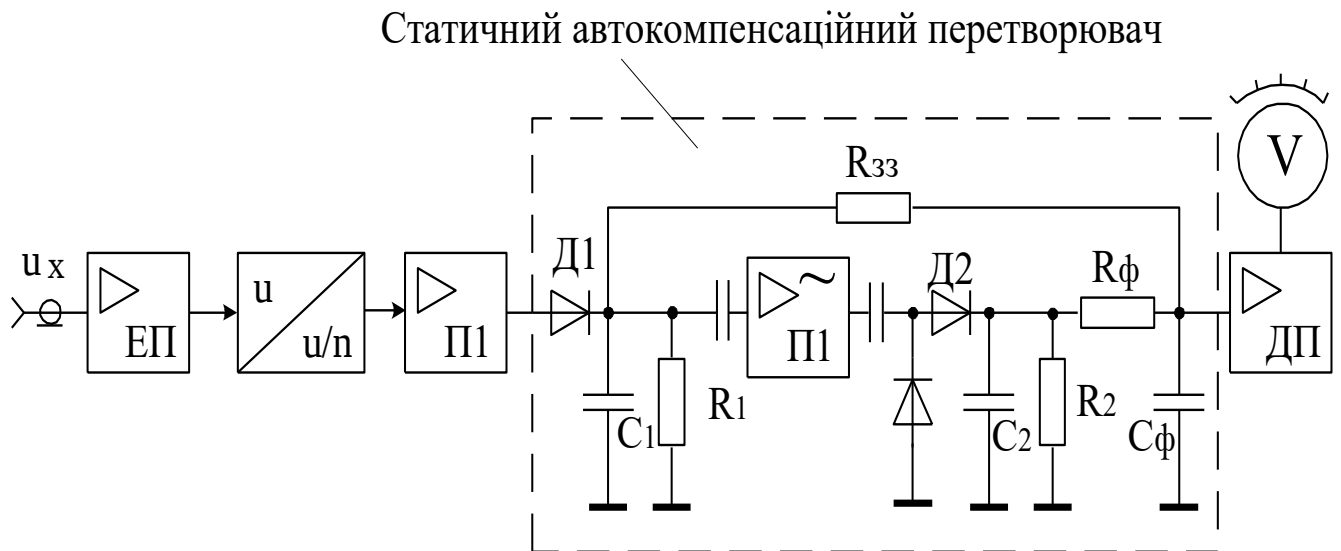


Рисунок 3.1 - Структурна схема імпульсного вольтметра з статичним авто компенсаційним перетворювачем

Сучасні автокомпенсаційні імпульсні вольтметри дозволяють вимірювати відео- та радіоімпульсні сигнали від 3 мВ до 1000 мВ, а вольтметри з зовнішнім подільником – до 100 В тривалістю від 3 нс до 100 мкс. Основна відносна похибка вимірювання максимальних значень імпульсних напруг складає $\pm 4...5\%$.

4. Вимірювальні генератори

Вимірювальні генератори є джерелом стабільних сигналів заданої форми, частоту і амплітуду яких можна змінювати у визначених межах. Вони використовуються при дослідженнях, налаштуванні і перевірках різноманітних радіотехнічних пристроїв.

За діапазоном частот вимірювальні генератори розділяють на низькочастотні (від 20 Гц до 300 кГц), високочастотні (від 30 кГц до 300 МГц) та надвисокочастотні (понад 300 МГц).

За призначенням і формою вихідних сигналів виділяють такі види вимірювальних генераторів: ГЗ – генератори синусоїдних сигналів низької частоти; Г4 – генератори синусоїдних сигналів високої частоти; Г5 – генератори імпульсних сигналів; Г6 – генератори сигналів спеціальної форми.

Генератори сигналів низької частоти. Більшість низькочастотних генераторів перекривають діапазони звукових 20 Гц...20 кГц і ультразвукових 20...200 кГц частот, а деякі з них (ГЗ-105, ГЗ-110) – і діапазон відео частот 20 кГц ... 10 МГц.

Узагальнена структурна схема генератора (рис. 4.1) включає в себе задавальний генератор, вихідний підсилювач потужності, вихідний атенюатор, електронний вольтметр, а інколи узгоджувальний трансформатор з перемикачем навантаження.

Задавальний генератор є основним вузлом, що визначає стабільність частоти і амплітуди вихідної синусоїдної напруги, виконується за схемою RC-генератора.

Атенюатор забезпечує схидаче ослаблення СКЗ вихідної напруги в межах від 0 до 60...160 дБ через 10 дБ.

Під час застосування вимірювальних генераторів особлива увага приділяється узгодженню вхідного опору навантаження з вихідним опором генератора. Для забезпечення режиму роботи генератора, близького до узгодженого, паралельно зовнішньому навантаженню вмикається внутрішнє навантаження (звичайно дорівнює 600 Ом) за допомогою перемикача S, розміщеного на передній панелі генератора.

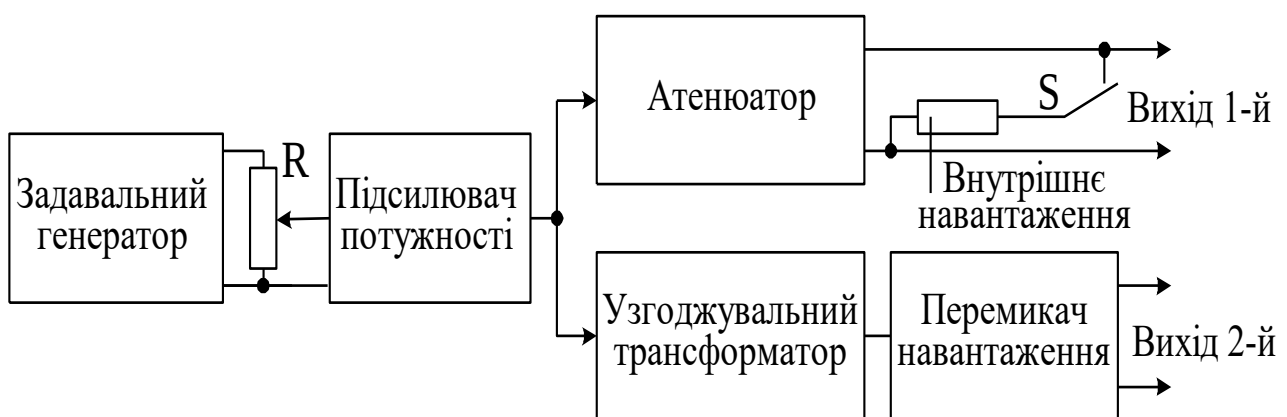


Рисунок 4.1 - Структурна схема генератора сигналів низької частоти

Інколи виникає потреба в забезпеченні симетричного відносно корпусу (землі) виходу генератора. Це досягається застосуванням симетрувального трансформатора T_r , первинна обмотка якого

вмикається до виходу підсилювача (рис. 4.2) і тим самим один з її затискачів опиняється з'єднаним з корпусом. Обидва затискачі вторинної обмотки ізолювані від корпусу (землі) і створюють симетричний вихід.

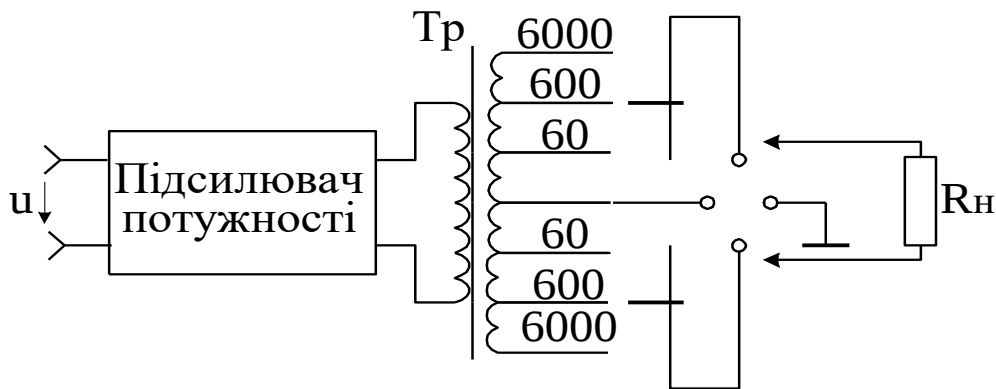


Рисунок 4.2 - Схема вмикання симетрувального трансформатора

За допомогою симетрувального трансформатора вирішується й інша задача – узгодження опорів навантаження R_n і генератора.

Вимірювач вихідної напруги генератора являє собою випрямний або електронний вольтметр, шкала якого проградуєрована в СКЗ синусоїдної напруги.

Генератори сигналів високої частоти генерують синусоїдні напруги в діапазоні частот до 300 МГц. При необхідності вихідна напруга таких генераторів може бути промодульована за амплітудою або частотою.

На рис. 4.3 наведена узагальнена структурна схема високочастотного генератора, основними функціональними блоками якого є задавальний генератор, основний і допоміжний канали (останній не обов'язково), вимірювальні пристрої і джерело живлення.

Задавальний генератор виконується, як правило, за LC-схемою з багатьма межами вимірювання (6–8 піддіапазонів). Частотні піддіапазони устанавлюються зміною котушок, а в середині кожного піддіапазону перестроювання частоти здійснюється зміною ємності конденсатора.

З виходу задавального генератора синусоїдна напруга подається одночасно в основний і допоміжний канали. Допоміжний канал складається із широкосмугового підсилювача ШПІ і призначається для вмикання до “Виходу 1В”, наприклад, частотоміра з метою контролю частоти генератора.

Основний канал включає модулятор, широкосмуговий підсилювач ШП2, високочастотний атенюатор Ат.ВЧ, систему автоматичного регулювання рівня напруги АРР, канал здійснення зовнішньої або внутрішньої амплітудної модуляції вихідного сигналу (атенюатор низької частоти Ат.НЧ, регулятор опорної напруги, генератор НЧ, перемикач S1), пристрій контролю параметрів вихідної напруги (вольтметр V, детектор 2, перемикач S2) і джерело живлення.

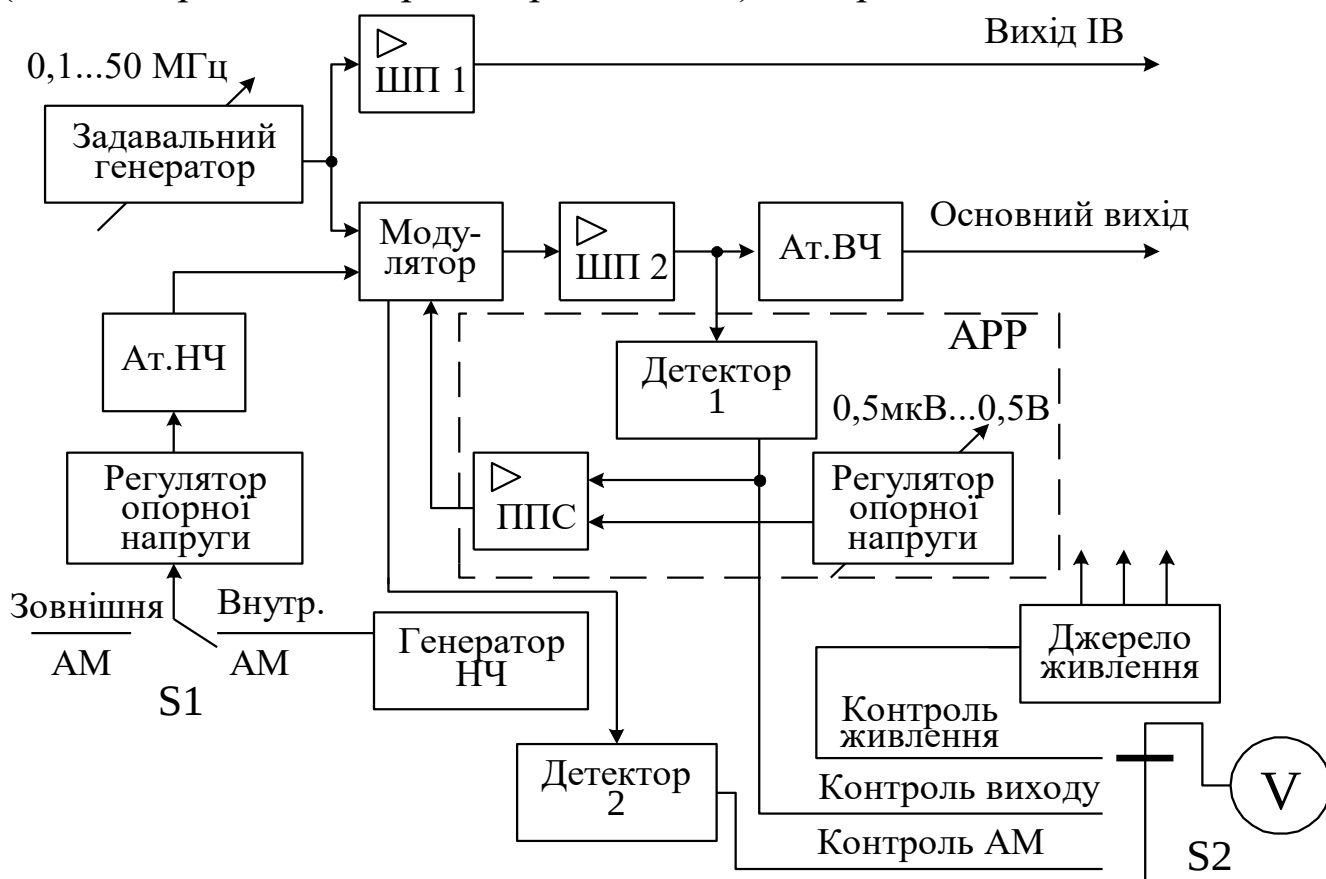


Рисунок 4.3 - Структурна схема генератора сигналів високої частоти

Частоту вихідної напруги генератора визначає задавальний генератор, а установлення потрібного значення амплітуди напруги генератора здійснюється за допомогою системи АРР. Система АРР складається з регулятора опорної напруги, детектора 1, диференціального підсилювача постійного струму ППС. Вихідний сигнал основного каналу детектується і подається на один із входів ППС, на його другий вхід надходить сигнал з регулятора опорної напруги.

Вихідна напруга ППС, пропорційна різниці вхідних напруг, подається на модулятор і змінює його коефіцієнт передачі так, що вхідна напруга модулятора стає рівною опорній напрузі. СКЗ напруги на виході основного каналу можна змінювати за допомогою атенюатора Ат.ВЧ у межах від 0,8 мкВ до 0,5 В. Відносна похибка установлення вихідної

напруги складає $\pm 0,5 \dots 1,5 \%$, відносна похибка установлення частоти – $\pm 0,1 \dots 2 \%$. Схема (рис. 11) покладена в основу будови генераторів Г4-102, Г4-102А, Г4-106 тощо.

Ряд сучасних **генераторів ультрависокої частоти** (Г4-107, Г4-116, Г4-129 та ін.) побудовані за принципом ділення частоти. Вони відрізняються від розглянутих вище тільки принципом роботи задавального генератора. Типова схема такого генератора наведена на рис. 4.4.

Задавальний LC-генератор виробляє електричний сигнал основного піддіапазону з частотою $200 \dots 400$ МГц. Для одержання інших піддіапазонів $100 \dots 200$; $50 \dots 100$; $25 \dots 50$; $12,5 \dots 25$ МГц використовують ланцюг подільників частоти на 2. При зміні частоти задавального генератора відповідно змінюється і частота сигналів на виходах усіх подільників. Вихідні сигнали подільників частоти несинусоїдні, тому після кожного подільника увімкнуті смугові фільтри. Вибір потрібного піддіапазону частоти здійснюється за допомогою перемикача S. Наявність у схемі ланцюга подільників частоти покращує стабільність частоти, виключає необхідність додаткового часу на прогрівання при перемиканнях піддіапазонів, спрощує підгонку шкал усіх піддіапазонів.

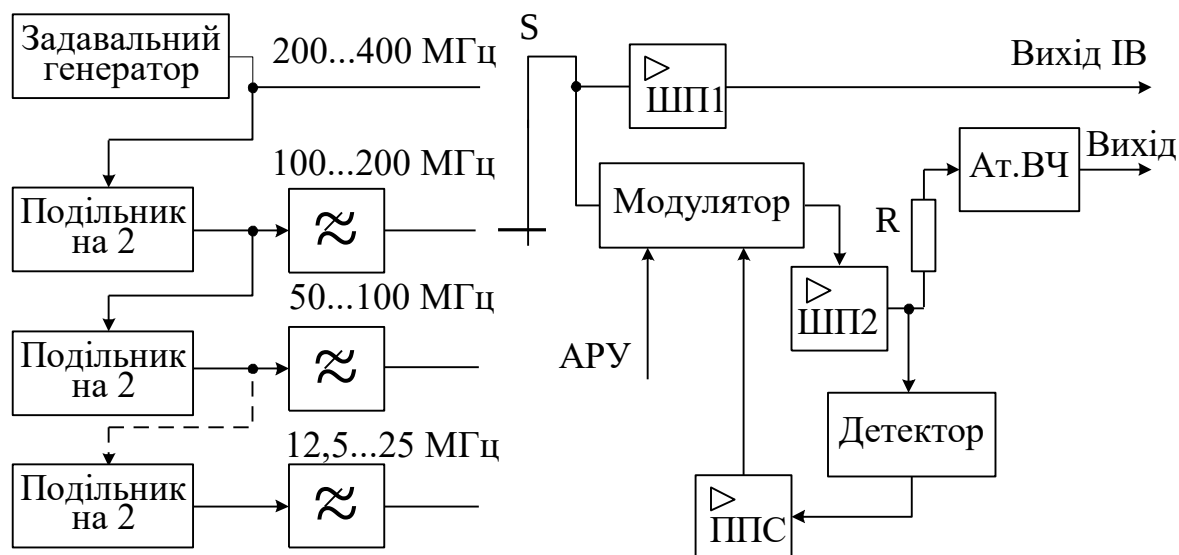


Рисунок 4.4 - Структурна схема генератора сигналів ультрависокої частоти

Генератори імпульсних сигналів виробляють електричні сигнали прямокутної форми з нормованими параметрами. Розрізняють: генератори безперервних послідовностей імпульсів з однаковими параметрами; генератори серій однакових імпульсів, у тому числі й

парних імпульсів; генератори кодових груп (пакетів) імпульсів, кожен з яких може відрізнятися від інших одним або кількома параметрами. Поряд з переліченими сигналами, які називають основними, генератори виробляють синхронізуючі імпульси тієї самої частоти, які використовуються для запуску різних схем.

Основну абсолютну похибку задання часових параметрів імпульсів подають сумою мультиплікативної і адитивної складових. Наприклад, похибка задання основних імпульсів генератора Г5-54 складає $\Delta\tau = \pm(0,1\tau + 0,03)$ мкс. Залежно від значення допустимих основних похибок задання амплітуди, тривалості, частоти і часового зсуву основних імпульсів затверджені такі класи точності імпульсних генераторів: 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 0,3; 1; 3; 5; 10 і 20. При цьому клас точності належить до одного параметра вихідного сигналу.

На рис. 4.5 наведена узагальнена структурна схема імпульсного генератора, яка містить задавальний генератор, блок формування основних імпульсів, формувач синхроімпульсів, вимірювальні пристрої.

Блок задавального генератора, крім власне генератора, може мати перетворювач і пристрій зовнішнього запуску. Задавальний генератор створює імпульсну або синусоїдну напругу потрібної частоти. Перетворювач формує з вихідних сигналів задавального генератора послідовність допоміжних коротких імпульсів, призначених для запуску блока формування основних імпульсів, які можуть служити для примусового запуску різноманітних зовнішніх пристроїв.

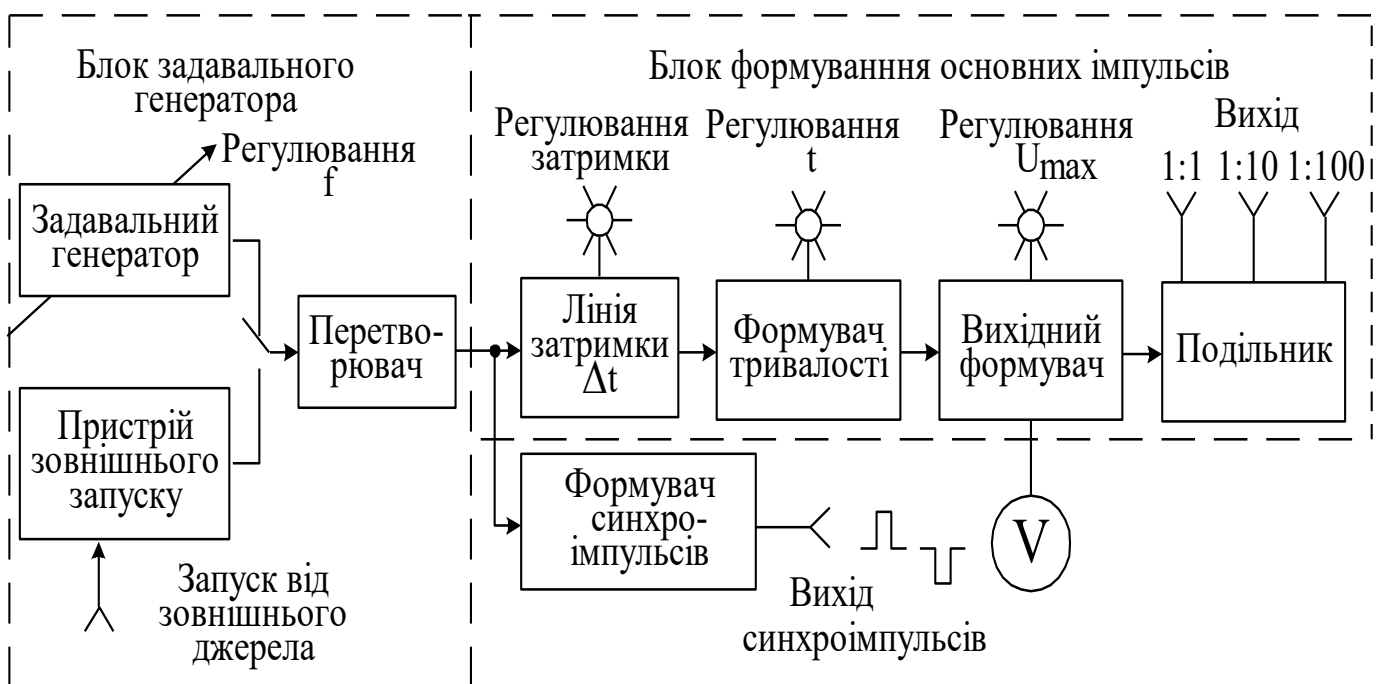


Рисунок 4.5 - Структурна схема генератора імпульсних сигналів

Вхідним елементом блока формування основних імпульсів є лінія затримки, за допомогою якої створюється регульована затримка Δt основних імпульсів відносно синхроімпульсів. Час затримки регулюється в межах від 0,1 до 1000 мкс, іноді й більше.

Формувач тривалості основних імпульсів створює пари імпульсів Старт і Стоп, часовий зсув τ між якими установлюють рівним потрібній тривалості основних імпульсів.

Основні імпульси створюються у вихідному формувачі. При цьому імпульс Старт визначає фронт основного імпульсу, а імпульс Стоп – його зріз. У цьому блоці формується також максимальний рівень основних імпульсів $U_{\max}$. На виході блока установлюється подільник напруги, який додатково зменшує амплітуду імпульсів у 10 і 100 разів.

Індикація максимального значення, тривалості, частоти і часового зсуву імпульсів здійснюється за положеннями органів керування на передній панелі генератора.

Генератори імпульсів забезпечують основну відносну похибку задання частоти, тривалості і часової затримки $\pm 3 \dots 10 \%$, а нестабільність цих параметрів за годину роботи складає $\pm 1 \dots 3 \%$. Для створення прецизійних генераторів імпульсів за частотою і часовою затримкою використовують кварцовий задавальний генератор.

ЛЕКЦІЯ № 3

ОСЦИЛОГРАФІЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ.

1.1. Електронні аналогові осцилографи

Електронний осцилограф є універсальним приладом, який призначається для спостереження, дослідження й фотографування форми електричних сигналів з екрана електронно-променевої трубки (ЕПТ). Окрім якісної оцінки досліджуваних процесів, осцилографи дозволяють вимірювати ряд величин: напругу, інтервал часу, частоту, фазовий зсув, коефіцієнт амплітудної модуляції та ін. Широке розповсюдження електронних осцилографів обумовлено великим вхідним опором, без інерційністю до дуже високих частот, високою чутливістю та широкими межами значень вимірюваних параметрів.

Аналізатори спектра - прилади, що дозволяють одержувати залежність амплітуд або потужностей гармонічних коливань, які входять до складу складного сигналу, від частоти.

Розрізняють три види аналогових осцилографів:

- до виду **С1** належать найбільш розповсюджені осцилографи реального часу, тобто осцилографи, в яких зображення сигналу на екрані ЕПТ виникає одночасно з дією сигналу на вході. Більшість з них низькочастотні зі смугою пропускання до 10...35 МГц. Ряд осцилографів, наприклад С1-120 та С1-121, мають смугу пропускання 0...100 МГц. Найбільш швидкодіючий осцилограф С1-75 дозволяє проводити дослідження одного або двох сигналів у діапазоні частот до 250 МГц;

- до виду **С3** - вимірювачі модуляції;

- до виду **С4** - аналізатори спектра;

- до виду **С6** - вимірювачі коефіцієнтів гармонік,

- швидкісні та стробоскопічні осцилографи належать до виду **С7**. Перші з них зі смугою пропускання 0...5 ГГц призначаються для дослідження в реальному часі періодичних СВЧ коливань та імпульсних сигналів наносекундної тривалості. Стробоскопічні осцилографи мають властивість досліджувати сигнали наносекундної тривалості завдяки застосуванню стробоскопічного методу трансформації масштабу часу. Цим осцилографам притаманні висока чутливість (мілівольти) та широка смуга пропускання (до 10 ГГц і вище);

- до виду С8 належать запам'ятовуючі осцилографи, які здатні зберігати і відтворювати довгий час зображення сигналу на екрані ЕПТ після його зникнення на вході осцилографа. Ці осцилографи призначаються для дослідження поодиноких імпульсів та сигналів, що змінюються дуже повільно.

1.2. Електронно-променеві осцилографи реального часу

Структурні схеми електронно-променевих осцилографів (ЕПО) реального часу досить різноманітні. Проте всі вони мають однакові за призначенням функціональні блоки, до числа яких належать ЕПТ, канал вертикального відхилення променя (канал Y), канал горизонтального відхилення променя (канал X), канал керування яскравістю (канал Z), калібратор та блок живлення.

Блок ЕПТ складається з ЕПТ та схеми керування електронним променем (рис. 1.1). ЕПТ являє собою скляну колбу, в якій розміщена так звана електронна гармата, створена групою електродів: катодом 2 з ниткою розжарювання 1, анодами 4 і 5, модулятором 3 (керуючим електродом). Живлення електронної гармати здійснюється від джерела високої напруги 1...3 кВ. Емісія електронів відбувається з торцевої поверхні катода, в центральній частині якого нанесений оксидний шар.

Модулятор виконується у вигляді металевого циліндра з невеликим отвором у центрі основи і розміщується навколо катода. На модулятор подається від'ємна відносно катода напруга (кілька десятків вольт), під дією якої електрони концентруються поблизу осі трубки, тобто модулятор здійснює первинне фокусування потоку електронів. Частина електронів, перемагаючи протидію з боку модулятора, проскакує через центральний отвір і потрапляє в прискорювальне поле анодів 4 і 5. Змінюючи потенціометром R_2 (ЯСКРАВИСТЬ) потенціал модулятора, можна регулювати кількість електронів, що створюють електронний промінь, а отже, і викликають яскравість світіння зображення сигналу на екрані ЕПТ.

У багатьох осцилографах передбачається можливість подачі на модулятор (Вхід Z) напруги від зовнішнього джерела. За допомогою двох анодів, на які подаються додатні відносно катода напруги, здійснюється розгін і фокусування пучка електронів. Екран ЕПТ створюється тонким шаром люмінофору 9 – речовини, здатної світитися під ударами електронів, яка наноситься на внутрішню поверхню торцевої частини скляної колби. Електрони променя, бомбардуючи екран, вибивають з

нього вторинні електрони, від яких виникає небезпека накопичення на екрані негативних зарядів. Для відведення вторинних електронів на внутрішню поверхню трубки наносять провідний шар графіту, так званий аквадаг 8, який електрично з'єднується з анодом 5. Графітове покриття, крім того, екранує електронний промінь від електричних і магнітних полів, існуючих поза трубкою.

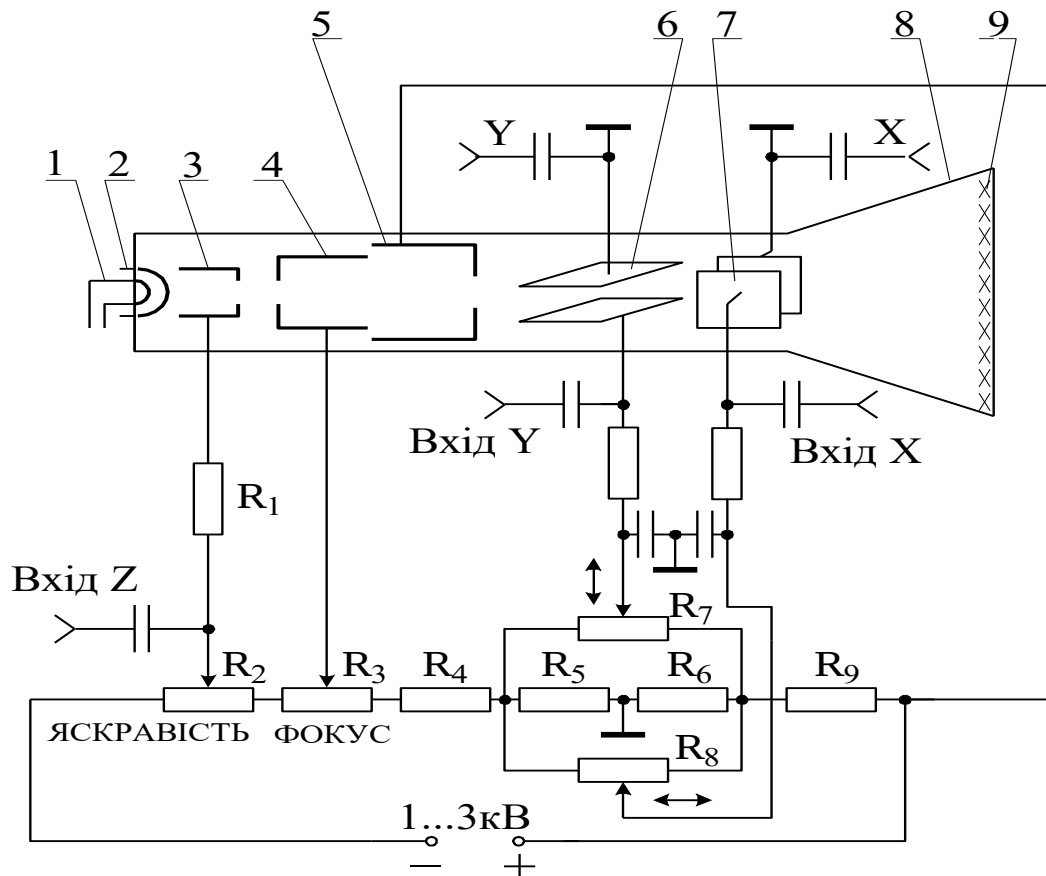


Рисунок 1.1 - Схема блока ЕПТ

Відхильна система ЕПТ складається з двох пар пластин 6, 7, які розміщуються у взаємоперпендикулярних площинах. При подачі на будь-яку пару пластин напруги електронний промінь відхиляється у бік позитивно зарядженої пластини. Тому, змінюючи за допомогою потенціометрів R_7 ($\updownarrow$) і R_8 ($\leftrightarrow$) постійні напруги, які подаються на вертикально та горизонтально відхильні пластини, можна переміщувати світлову пляму в будь-яку точку екрана.

Зміщенням електронного променя по вертикалі на величину y від початкового положення під дією постійної напруги U_y , яка прикладається до вертикально відхильних пластин, визначають чутливість ЕПТ до відхилення по вертикалі (мм/В): $h_y = y/U_y$.

Аналогічно чутливість трубки по горизонталі (мм/В) визначається відхиленням x від початкового положення під дією напруги U_x , яка прикладається до горизонтально відхильних пластин: $h_x = x/U_x$.

Чутливість ЕПТ, що використовуються в універсальних осцилографах, складає 0,2...0,5 мм/В. Тому СКЗ напруги, яка подається на пластини, повинна бути не менше ніж 100...250 В, щоб викликати переміщення плями на екрані на 50 мм.

Канал вертикального відхилення (канал Y) призначається для підсилення або ослаблення досліджуваного сигналу, затримки його на якийсь час та перетворення в симетричну напругу. Канал Y включає в себе вхідний атенюатор, широкосмуговий підсилювач ШП, лінію затримки і підсилювач вертикального відхилення ПВВ, вихід якого під'єднується до пластин Y ЕПТ (рис. 1.2).

Досліджуваний сигнал $u_x(t)$ через Вхід Y подається на атенюатор або безпосередньо (відкритий вхід), або через розділювальний конденсатор С (закритий вхід). Якщо вхід відкритий, то в канал вертикального відхилення проходять як змінна, так і постійна складові сигналу. В протилежному разі через конденсатор С проходить тільки змінна складова сигналу. Вихідний сигнал атенюатора підсилюється широкосмуговим підсилювачем ШП і подається, по-перше, через лінію затримки і підсилювач вертикального відхилення ПВВ на вертикально відхильні пластини ЕПТ, і по-друге, – в канал горизонтального відхилення променя для синхронізації генератора розгортки. Лінія затримки затримує досліджуваний сигнал на час, необхідний для спрацювання каналу горизонтального відхилення, щоб рух променя уздовж горизонтальної осі починався раніше, ніж досліджуваний сигнал потрапить на вертикально відхильні пластини ЕПТ.

Канал горизонтального відхилення (канал X) складається зі схем синхронізації та запуску, генератора розгортки і підсилювача горизонтального відхилення ПГВ.

Генератор розгортки виробляє напругу пилкоподібної форми, яка після підсилення подається на горизонтально відхильні пластини X ЕПТ. За час прямого ходу розгортки напруга генератора зростає лінійно і електронний промінь з постійною швидкістю рухається по горизонталі на екрані ЕПТ. За час зворотного ходу напруга генератора змінюється від максимального до мінімального значення, і промінь дуже швидко перекидається до протилежного боку екрана ЕПТ. Після деякого часу блокування починається наступний такт прямого ходу розгортки. При необхідності генератор розгортки може бути відімкнутий і через Вхід X

на горизонтально відхильні пластини ЕПТ може бути подана розгортальна напруга від зовнішнього джерела.

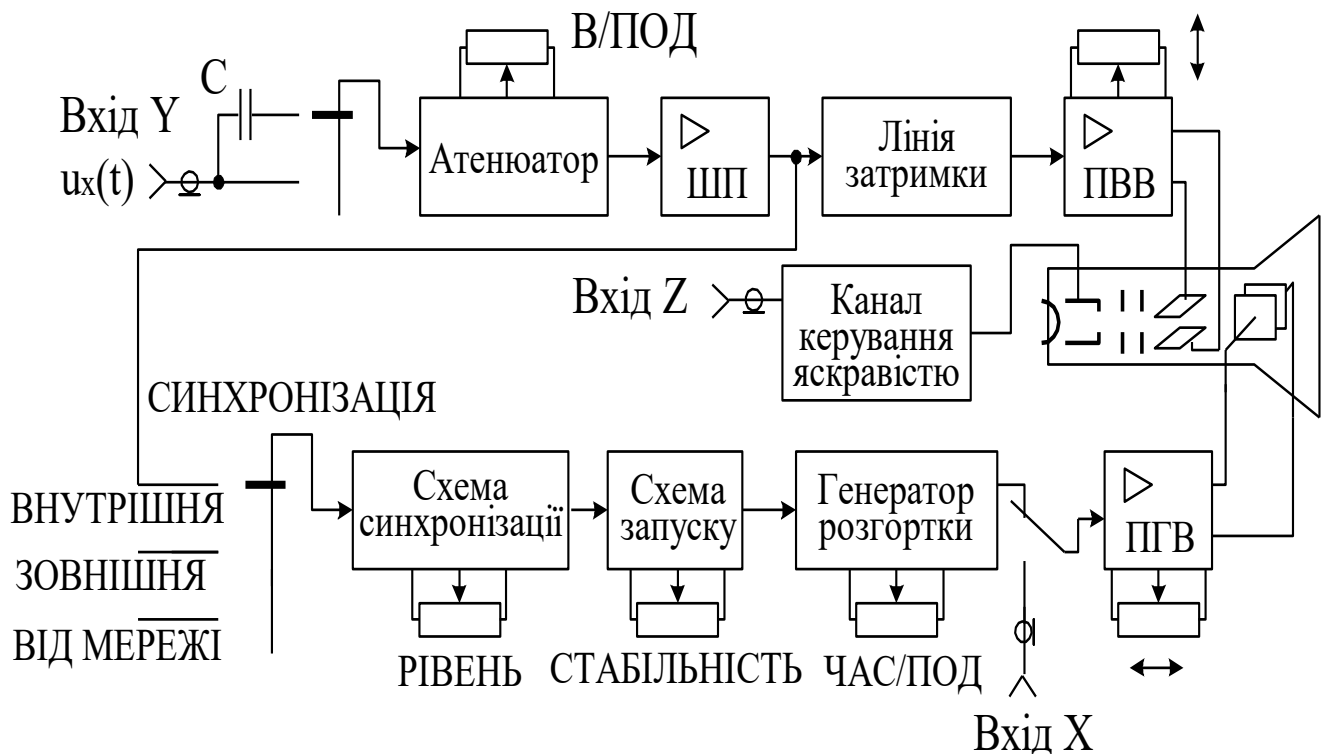


Рисунок 1.2 - Структурна схема електронного осцилографа

При наявності лінійної розгортки горизонтальна вісь екрана ЕПТ є віссю часу, а вертикальна вісь – віссю напруги. Задача вимірювання інтервалу часу t_x або амплітуди $U_{x \max}$ сигналу зводиться до вимірювання лінійного розміру в якійсь частині осцилограми (по горизонталі $l_{\text{гор}}$ або вертикалі $l_{\text{верт}}$) та помноженню його на коефіцієнт розгортки k_p або коефіцієнт відхилення k_v : $t_x = k_p l_{\text{гор}}$; $U_{\text{max}} = k_v l_{\text{верт}}$.

Коефіцієнт розгортки k_p – це масштаб по горизонтальній осі, коефіцієнт відхилення k_v – масштаб по вертикальній осі екрана ЕПТ. Перший з них подають в одиницях часу, віднесених до поділок шкали (с/под; мкс/под), а другий – в одиницях напруги, віднесених до поділок шкали (В/под; мВ/под). У сучасних осцилографах зміна коефіцієнтів розгортки і відхилення здійснюється східчасто за допомогою перемикачів: коефіцієнта відхилення з кратністю зміни 1; 2; 5; коефіцієнта розгортки – з кратністю зміни 0,25; 0,5; 1; 2; 5.

У процесі експлуатації осцилографа перевіряється, чи не відрізняються дійсні значення коефіцієнтів відхилення та розгортки від їх номінальних значень, указаних на передній панелі приладу. Перевірка

виконується за допомогою вмонтованого в осцилограф калібратора (на рис. 1.2 не показано). Калібратор являє собою генератор напруги прямокутної форми типу меандр, амплітуда та частота якої відомі із заданою точністю.

Вихідний сигнал калібратора подається на Вхід Y осцилографа. Зображення амплітуди та періоду каліброваного сигналу на екрані ЕПТ повинно мати певні розміри. В противному випадку цього домагаються зміною коефіцієнтів відхилення та розгортки пристроями перестроювання.

Синхронізація розгортки осцилографа. Для одержання на екрані ЕПТ стійкого зображення досліджуваного сигналу необхідно, щоб частота розгортки дорівнювала частоті досліджуваного сигналу або була б у ціле число разів меншою за неї. З цією метою генератор розгортки запускається (синхронізується) або імпульсами, сформованими з досліджуваного сигналу u_x (ВНУТРІШНЯ СИНХРОНІЗАЦІЯ), або зовнішніми сигналами. Останні подаються на вхід ЗОВНІШНЯ СИНХРОНІЗАЦІЯ. Для синхронізації запуску генератора може бути використана напруга мережі живлення, якщо частота досліджуваного сигналу кратна частоті мережі (СИНХРОНІЗАЦІЯ ВІД МЕРЕЖІ).

Чіткий запуск генератора розгортки гарантується в тому разі, якщо амплітуда синхронізуючого імпульсу досить велика. Рівень синхронізуючого імпульсу плавно регулюється рукоятками РІВЕНЬ та СТАБІЛЬНІСТЬ, розташованими на передній панелі осцилографа.

Режими роботи генератора розгортки. Генератор розгортки має два основних режими роботи: безперервної (періодичної) і очікувальної розгортки. Режим періодичної розгортки є автоколивальним. Він використовується при дослідженнях безперервних або імпульсних періодичних сигналів малої шпаруватості. Очікувальний режим генератора розгортки застосовується при дослідженнях неперіодичних сигналів, імпульсної напруги великої або змінної шпаруватості, імпульсів малої тривалості тощо. В цьому режимі генератор розгортки знаходиться у стані готовності до робочого ходу. При появі імпульсу синхронізації генератор формує тільки один період напруги розгортки і знову переходить у стан очікування, на екрані ЕПТ спостерігається зображення тільки одного імпульсу.

Більшість осцилографів можуть працювати ще в режимі поодинокого запуску. В цьому режимі в колі синхронізації формується тільки один імпульс (при натисканні спеціальної кнопки), який викликає однократне формування пилкоподібної напруги генератором розгортки.

Осцилографічні розгортки. У вимірювальній практиці широко застосовуються лінійна, синусоїдна і кругова розгортки.

Лінійна розгортка здійснюється за допомогою генератора пилкоподібної напруги. Її перевагою є те, що осцилограма досліджуваного процесу спостерігається в прямокутній системі координат.

Для одержання синусоїдної розгортки генератор розгортки від'єднується і на горизонтально відхильні пластини (через Вхід Х) подають синусоїдну напругу від зовнішнього генератора f_2 (рис. 1.3,а). Якщо до вертикально відхильних пластин також підвести синусоїдну напругу від генератора f_1 , то на екрані ЕПТ з'явиться фігура Ліссажу (рис.1.3,б): замкнена, якщо відношення частот напруг, які підведені до відхильних пластин, є цілим числом, або незамкнена, якщо відношення частот вхідних напруг є дробовим числом.

Кругова розгортка є окремим випадком синусоїдної розгортки і може бути одержана, якщо до вертикально та горизонтально відхильних пластин ЕПТ підвести дві однакові за амплітудою і частотою синусоїдні напруги, але зсунуті за фазою на 90° . Зсув фаз на 90° може бути одержаний за допомогою фазорозщеплювального ланцюжка RC (рис. 1.3,в).

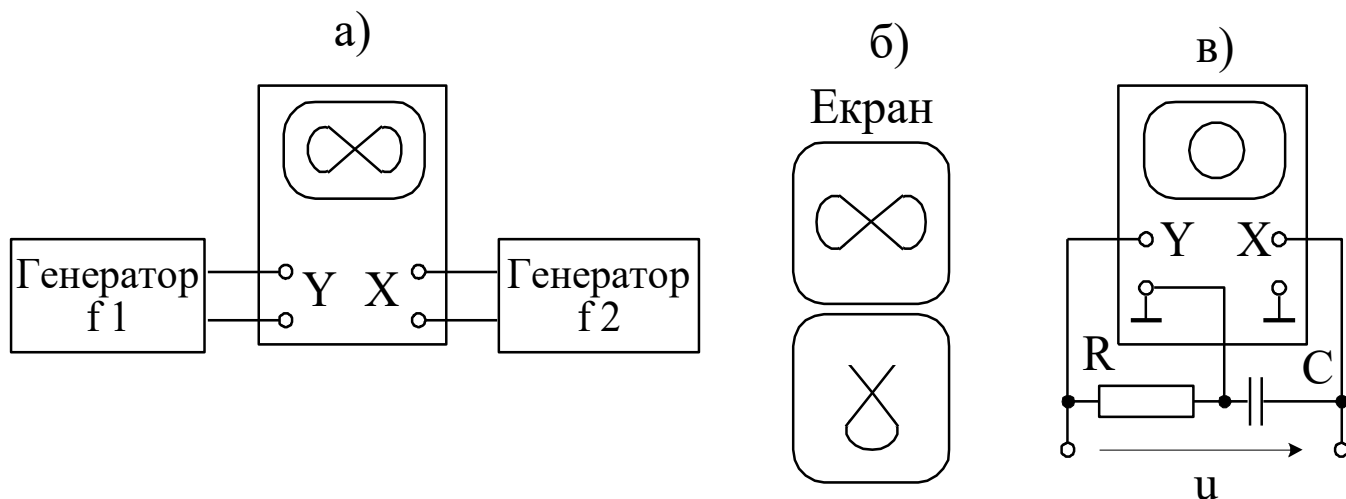


Рисунок 1.3 - До пояснення розгортки: а, б – синусоїдної; в – кругової

Синусоїдна та кругова розгортки застосовуються частіше за все при вимірюванні частоти методом порівняння та при дослідженні характеристик деяких пристроїв.

Канал керування яскравістю виробляє імпульси позитивної полярності. Тривалість цих імпульсів підсвічування дорівнює тривалості прямого ходу розгортки. Впродовж їх на екрані ЕПТ спостерігається

яскраве зображення осцилограми. В інтервалі між імпульсами підсвічування потенціал модулятора знижується, внаслідок чого яскравість променя різко зменшується. Завдяки цьому зворотного ходу променя не видно. В усіх осцилографах передбачається також ручне регулювання яскравості променя.

Характеристики осцилографів. Головна вимога, яка пред'являється до електронного осцилографа, зводиться до отримання на екрані ЕПТ невикривленого зображення форми досліджуваних сигналів у широкій частотній смузі пропускання.

Універсальні осцилографи мають різні за шириною смуги пропускання з верхньою межею до 5...300 МГц і дозволяють досліджувати сигнали з амплітудою від одиниць мілівольт до сотень вольт. Залежно від призначення і галузі застосування універсальні осцилографи поділяють на багатофункціональні зі змінними блоками (С1-70, С1-74, С1-91), широкосмугові (С1-75, С1-92, С1-97), низькочастотні (С1-76, С1-94), двопроменеві (С1-55, С1-69, С1-96, С1-102, С1-115/1), двоканальні (С1-92, С1-97, С1-116, С1-118), сервісні (С1-94).

Для осцилографічних вимірювань напруги (амплітуд сигналів) широко використовуються такі основні методи:

- метод безпосереднього відліку (метод каліброваної шкали);
- метод звірення;
- компенсаційний метод.

При методі безпосереднього відліку перед вимірюванням проводять калібрування шкали на екрані ЕПТ. Для цього на вхід осцилографа з калібратора подається напруга відомої амплітуди (звичайно послідовності прямокутних імпульсів типу "меандр"). Шляхом регулювання коефіцієнта підсилення каналу Y за допомогою органів регулювання, звичайно виведених під шліц, встановлюється визначений розмах калібрувального сигналу.

При вимірюваннях напруги на вхід Y осцилографа подається досліджуваний сигнал і відраховуються його лінійні розміри вздовж вертикалі (рис. 1.4).

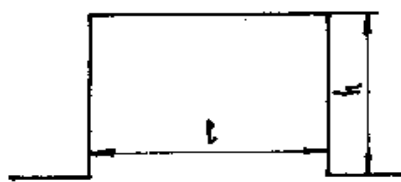


Рисунок 1.4 - Досліджуваний сигнал з його лінійними розмірами

У цьому випадку вимірювана напруга

$$U_{\text{вип}} = h k_{\text{В}}, \quad (1.1)$$

де h - лінійний розмір зображення в одиницях довжини (наприклад, в міліметрах або поділках шкали);

$k_{\text{В}}$ - коефіцієнт відхилення, що виражається в одиницях напруги, віднесених до одиниці довжини, наприклад, в мілівольтах на поділку.

Похибка вимірювання амплітуди сигналу складається з похибки визначення лінійного розміру зображення та похибки коефіцієнта відхилення:

$$\delta_U = \delta_h + \delta_{k_{\text{В}}}. \quad (1.2)$$

Розглянутий метод є основним для більшості осцилографів завдяки його зручності і простоті. Саме для цього методу і нормовані похибки осцилографічних вимірювань. Однак даний метод не дозволяє одержати достатньо високу точність вимірювань. Похибка вимірювань при цьому методі складає 1...10 %.

При методі звірення на вхід підсилювача Y по чергово подають досліджуваний сигнал і зразковий сигнал (останній звичайно у вигляді двох калібрувальних ліній), значення якого відоме і може бути плавно змінено. Шляхом регулювання зразкової напруги добиваються рівності лінійних розмірів зображень досліджуваного і зразкового сигналів на екрані ЕПТ (рис. 1.5); про значення вимірюваної напруги судять по значенню зразкової напруги.

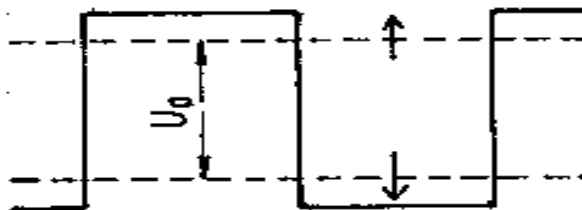


Рисунок 1.5 - Досліджуваний сигнал і зразковий сигнал

При наявності в осцилографі диференційних входів досліджуваний і зразковий (калібрувальний) сигнали подаються одночасно на обидва входи диференційного каналу, а вимірювання здійснюють компенсаційним методом. При цьому напруга калібрувального сигналу постійного струму може плавно регулюватися. Значення цієї напруги

вимірюють, наприклад, цифровим вольтметром. Під час вимірювання цієї напруги сполучають основу вимірюваного сигналу з однією з горизонтальних ліній шкали екрана ЕПТ (рис. 1.6) і фіксують значення калібрувальної напруги U_1 . Потім, змінюючи значення калібрувальної напруги, здійснюють сполучення вершини (максимального рівня) вимірюваного сигналу з тією ж горизонтальною лінією шкали екрана ЕПТ і вимірюють нове значення калібрувальної напруги U_2 . Різниця показів вольтметра $U_2 - U_1$ являє собою амплітуду вимірюваного сигналу. В такий же спосіб можна вимірювати значення напруги між двома будь-якими рівнями сигналу.

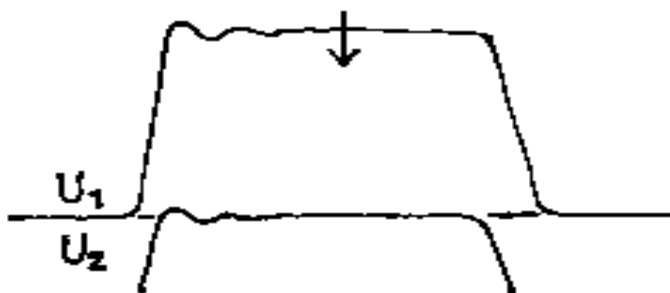


Рисунок 1.6 - Вимірювання компенсаційним методом.

Точність вимірювань таким методом залежить від точності встановлення значень калібрувальної напруги і точності сполучення зображення з горизонтальною лінією шкали і складає 1,5...2 %.

Для вимірювання інтервалів часу за допомогою осцилографів використовуються такі основні методи:

- метод каліброваного коефіцієнта розгортки;
- метод каліброваної за часом затримки розгортки.

При методі каліброваного коефіцієнта розгортки вимірювання інтервалів часу T здійснюють шляхом безпосереднього відліку лінійних розмірів осцилограми l з подальшим множенням цього значення на коефіцієнт розгортки k_p (рис. 1.4):

$$T = l \cdot k_p. \quad (1.2)$$

Під коефіцієнтом розгортки k_p розуміють характеристику каналу X , що показує відношення часу до довжини переміщення променя на екрані ЕПТ вздовж горизонталі за цей час. Коефіцієнт розгортки виражається в одиницях часу, що приходяться на одиницю довжини (наприклад, у мікросекундах на поділку). Недоліком даного методу, як і при

вимірюванні напруги, є недостатньо висока точність. Похибка вимірювання інтервалів часу складає

$$\delta_T = \delta_\ell + \delta_{кр}, \quad (1.3)$$

де δ_ℓ - похибка визначення лінійного розміру зображення;

$\delta_{кр}$ - похибка коефіцієнта розгортки.

Більш висока точність вимірювання інтервалів часу може бути одержана при використанні методу вимірювань з каліброваною за часом затримкою розгортки (метод затриманої розгортки). Цей метод базується на вимірюванні зміщення зображення вздовж лінії розгортки відносно обраної вертикальної лінії шкали ЕПТ (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 - методу вимірювань з каліброваною за часом затримкою розгортки

Для цього використовується пристрій каліброваної затримки часу, що здійснює затримку запуску розгортки. Шляхом регулювання моменту запуску розгортки здійснюють переміщення зображення досліджуваного сигналу і сполучення передньої границі цього зображення з обраною вертикальною лінією шкали. Потім, змінюючи затримку, домагаються сполучення з цією ж вертикальною лінією шкали іншої границі зображення досліджуваного сигналу. Різниця затримок, що були введені, визначає значення вимірюваного інтервалу, наприклад, $\tau_\phi = \tau_{32} - \tau_{31}$.

Даний метод вимірювання може бути реалізований як у осцилографах, що мають затриману і затримуючу розгортки, так і у звичайних осцилографах з використанням зовнішнього пристрою каліброваної затримки (наприклад, генератора імпульсів). Похибка вимірювань при використанні даного методу звичайно складає 1,5 ... 2 %.

При вимірюванні параметрів електричних сигналів за допомогою осцилографів виникає дві групи похибок. Перша обумовлена неточним відтворенням на екрані ЕПТ форми досліджуваної напруги, а друга - похибками вимірювань за осцилограмою.

Похибки першої групи (похибки відтворення сигналу) виникають через нерівномірності амплітудно-частотної характеристики каналу вертикального відхилення осцилографа і ЕПТ, нелінійності їх амплітудних характеристик, нелінійності розгортки, а також залежать від параметру перехідної характеристики каналу вертикального відхилення і узгодження входу осцилографа з джерелом досліджуваного сигналу. До похибок першої групи слід також віднести похибки, що були припущені при калібровці.

Похибки першої групи приводять до того, що спотворюється форма сигналу, яка відтворюється на екрані ЕПТ, внаслідок чого лінійні розміри зображення стають непропорційними вимірюваним значенням напруг і інтервалів часу.

Похибки вимірювань за осцилограмою обумовлені, в основному, електронно-променевою трубкою і залежать від використаного методу вимірювань. До похибок цієї групи відносять похибку відліку за рахунок ширини лінії променя, похибку відліку за рахунок сферичності екрану ЕПТ, похибки за рахунок паралакса, похибки, що обумовлені особливостями вимірювальної сітки-шкали.

Таким чином, розглянуті основні ЗВТ, призначені для вимірювань параметрів сигналів, вимірювальні генератори та електронні осцилографи.

1.3. Швидкісні, стробоскопічні та запам'ятовуючі осцилографи

Для спостереження і вимірювання коротких за часом сигналів використовують спеціальні типи осцилографів: швидкісні та стробоскопічні.

Швидкісні осцилографи за загальним принципом побудови аналогічні універсальним, але відрізняються тим, що в них застосовуються спеціальні ЕПТ біжучої хвилі. Вони забезпечують підсилення досліджуваних сигналів і відхилення променя уздовж вертикалі під дією підсилених сигналів. За допомогою швидкісної розгортки забезпечується переміщення променя уздовж горизонталі, тим самим створюється умова спостереження досліджуваного сигналу в реальному часі, як і в універсальних осцилографах.

Принцип дії **стробоскопічних осцилографів** ґрунтується на ефекті, який дозволяє послідовно накопичувати інформацію про характер досліджуваного безперервного сигналу. Інформацію про форму

електричного сигналу одержують шляхом відображення його дискретних миттєвих значень на екрані ЕПТ у моменти часу, які вибирають у визначеному послідовному порядку. Так, протягом якогось окремого періоду існування сигналу фіксується одне його миттєве значення, в наступному вибраному періоді вибирається сусіднє значення сигналу і т.д. Внаслідок такої послідовної вибірки накопичується інформація про форму періодичного сигналу.

Ці операції виконуються так (рис. 1.8). Досліджувані періодичні імпульси u_x , наприклад, трикутної форми, період яких T_x (рис. 4,а), використовуються для модуляції дуже коротких строб-імпульсів u_c (рис. 1.8б). Період строб-імпульсів $T_c = T_x + \Delta t$. Якщо перший строб-імпульс збігається з початком імпульсу u_x (момент часу t_1), то другий строб-імпульс буде зсунутий відповідно до початку імпульсу на Δt , третій строб-імпульс – на $2\Delta t$ і т.д. Внаслідок амплітудної модуляції строб-імпульсів виникає послідовність імпульсів u , амплітуда кожного з яких пропорційна миттєвому значенню напруги сигналу в точці стробування (рис. 1.8в).

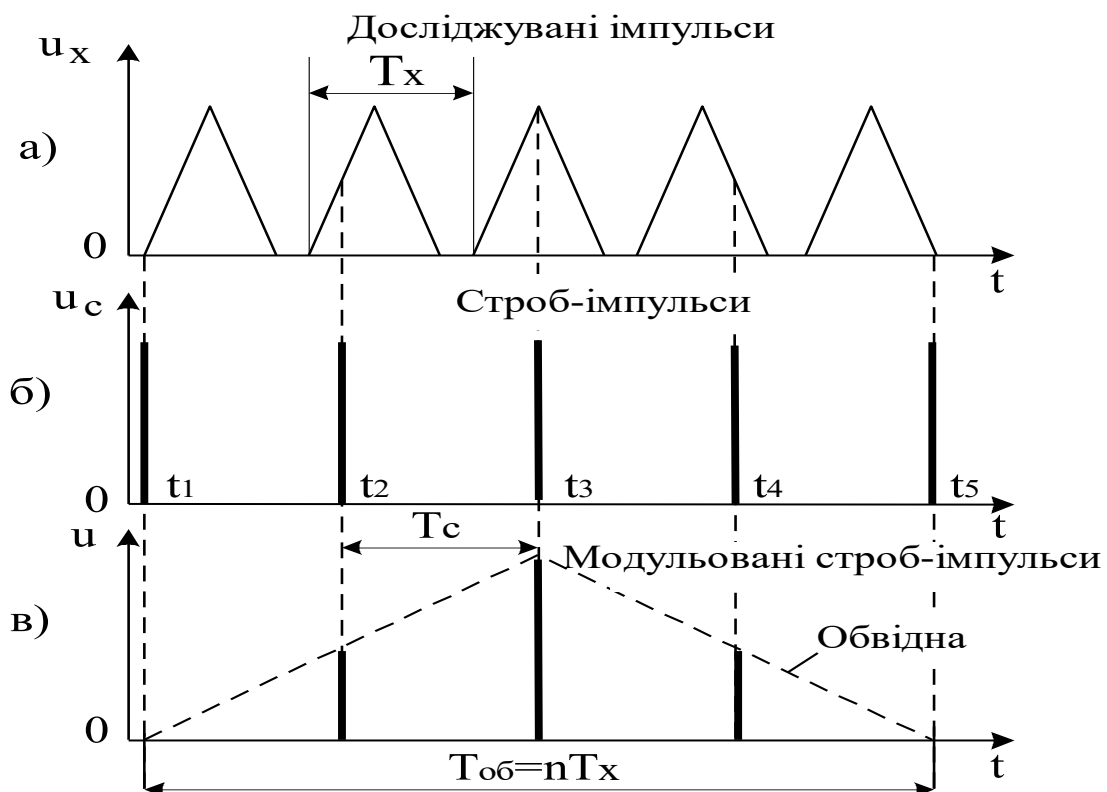


Рисунок 1.8 - Діаграми для пояснення стробоскопічного осцилографування

Обвідна, проведена через вершини модульованих імпульсів, повторює форму досліджуваного сигналу, а її період в n разів більша ніж період досліджуваних (вхідних) імпульсів T_x , тобто $T_{об} = nT_x$ де $n = T_x / \Delta t$. Таким чином, відбувається трансформація сигналу в часі. При цьому, чим менший часовий зсув Δt , тим більше циклів необхідно для перетворення одного періоду досліджуваного сигналу і тим сильніше він розтягується в часі.

Як приклад наведемо відомості про стробоскопічний осцилограф С7-13, який разом з блоком 13ПС1 має смугу пропускання від постійного струму до 10 ГГц. Осцилограф дозволяє досліджувати сигнали тривалістю від 0,1 до 5 мкс, напругою від 20 мВ до 1 В, з основною відносною похибкою $\pm 5...10\%$.

Запам'ятовуючі осцилографи мають здатність тривалий час відтворювати зображення сигналу після його зникнення на вході. Ці осцилографи застосовуються для дослідження поодиноких імпульсів і сигналів з частотою, меншою ніж 1 Гц. Основу запам'ятовуючого осцилографа складає запам'ятовуюча ЕПТ (ЗЕПТ).

Запам'ятовуючі осцилографи характеризуються швидкістю запису, часом відтворення і часом зберігання.

Під швидкістю запису розуміють максимальну швидкість переміщення променя вздовж екрана (швидкість запису осцилографів С8-13, С8-17 складає 5...40 км/с), при якій забезпечується запам'ятовування зображення.

Часом відтворення називають інтервал часу, протягом якого забезпечується безперервне відтворення записаного процесу при максимальній швидкості без втрати якості зображення.

Час зберігання – інтервал часу, впродовж якого при вимкненому приладі зберігається записане зображення до наступного вмикання приладу або відтворення.

Осцилограф С8-9А, наприклад, характеризується такими даними: швидкість запису не менш як 100 км/с, час відтворення – 1 хв, час зберігання – 16 год, смуга пропускання – 0...2 МГц.

ЛЕКЦІЯ № 4

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ.

1. Методи і засоби вимірювань електричної потужності

Вимірювання електричної потужності виконується, як правило, методами безпосередньої оцінки: прямі вимірювання здійснюються за допомогою ватметрів, а опосередковані вимірювання потужності ґрунтуються на прямому вимірюванні струму, напруги та зсуву фаз. Прямі вимірювання можуть бути реалізовані в будь-якому діапазоні частот, а опосередковані вимірювання – тільки на частотах, на яких засоби вимірювання і електричні кола ще можна розглядати як кола з зосередженими сталими. В діапазоні промислових і підвищених (до 5000 Гц) частот застосовуються електродинамічні ватметри, феродинамічні ватметри можуть використовуватися на частотах до 400...500 Гц, на високих і надвисоких частотах – ватметри, що ґрунтуються на перетворенні електромагнітної енергії в інші види енергії (теплову, світлову тощо).

1.1 Вимірювання потужності постійного струму

Вимірювання потужності постійного струму може бути виконано методом двох приладів (вольтметра і амперметра) або за допомогою ватметра.

Опосередкований метод двох приладів простий і може забезпечити достатню точність, але застосовується рідко. Це пояснюється тим, що він потребує одночасного відліку показів двох приладів (вольтметра і амперметра) і подальшого обчислення потужності за формулою $P = UI$.

Для прямих вимірювань частіш за все застосовуються електродинамічні ватметри, нерухома котушка яких вмикається послідовно з навантаженням R_n , а рухома котушка – паралельно до нього (рис. 1). При такому вмиканні відхилення рухомої частини приладу пропорційне потужності.

Напрямок відхилення рухомої частини ватметра залежить від взаємного напрямку струмів у колах вимірювального механізму. Тому вмикання ватметра необхідно здійснювати з дотриманням правила з'єднання генераторних затискачів послідовної і паралельної котушок:

генераторні затискачі завжди вмикаються з боку джерела живлення. Неправильне вмикання однієї з котушок ватметра призводить до зміни напрямку обертового моменту і виходу вказівника за межі шкали.

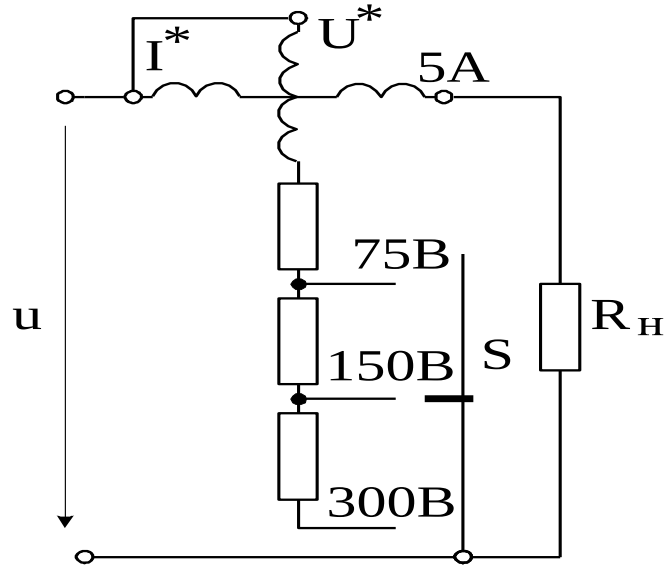


Рисунок 1.1 - Схема вимірювання потужності постійного струму електродинамічним ватметром

Лабораторні електродинамічні ватметри класів точності 0,1; 0,2; 0,5 виготовляються з кількома межами вимірювань і мають неіменовану шкалу.

Результат вимірювання визначається множенням числа поділок на ціну поділки шкали (Вт/под), яка обчислюється за формулою

$$C = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} / \alpha_{\text{ном}},$$

де $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ – номінальні значення напруги і струму ватметра;

$\alpha_{\text{ном}}$ – номінальне число поділок його шкали.

1.2. Вимірювання потужності однофазного струму

Вимірювання потужності однофазного струму може бути виконано переносним електродинамічним або щитковим феродинамічним ватметром. Схема вмикання ватметра в коло змінного струму аналогічна схемі (рис. 1.1).

При вимірюваннях у високовольтих колах ватметр вмикається через вимірювальні трансформатори (рис. 1.2). При цьому необхідно дотримуватися правила: генераторний затискач I^* послідовної котушки ватметра повинен

приєднуватися до затискача И1 трансформатора струму, а затискач U^* паралельної котушки – до затискача а трансформатора напруги. Первинні затискачі Л1 і А вимірювальних трансформаторів приєднуються до однієї точки кола.

Якщо шкала ватметра іменована, то результат вимірювання потужності P визначають множенням показу ватметра P_w на номінальні коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів $k_{i\text{ ном}}$ та $k_{u\text{ ном}}$:

$$P = P_w \cdot k_{i\text{ ном}} \cdot k_{u\text{ ном}}.$$

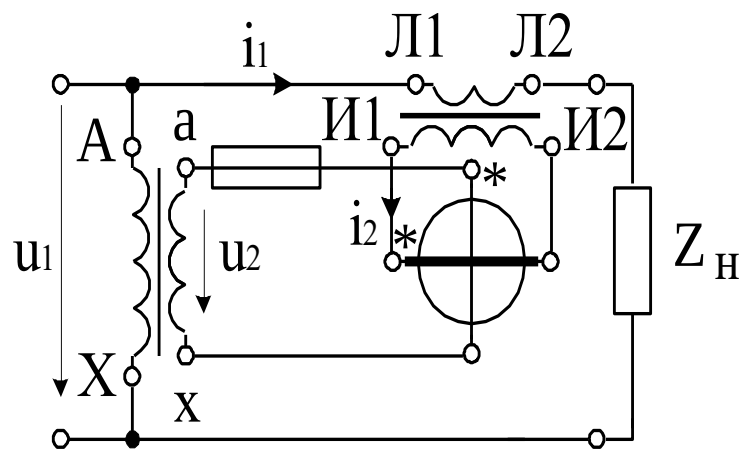


Рисунок 1.2 - Схема вмикання ватметра до вимірювальних трансформаторів

1.3. Вимірювання активної потужності в трифазних колах

Вимірювання активної потужності в трифазних колах може бути здійснено одним, двома або трьома ватметрами. Метод одного ватметра застосовується для вимірювання потужності в симетричних трифазних системах, з'єднаних зіркою або трикутником. Ватметр вмикають так, щоб він вимірював потужність однієї фази (рис. 1.3,а,б). Для цього струмове коло ватметра вмикається послідовно з опором Z_ϕ будь-якої фази приймача, а паралельне коло – на напругу цієї ж фази. Потужність трифазного приймача визначається множенням показу ватметра P_w на 3: $P = 3P_w$.

Якщо напруга мережі перевищує номінальну напругу ватметра, то послідовно з котушкою напруги вмикається додатковий резистор R_d , опір якого вибирають таким, щоб струм у колі рухомої котушки ватметра не перевищував би його номінального значення.

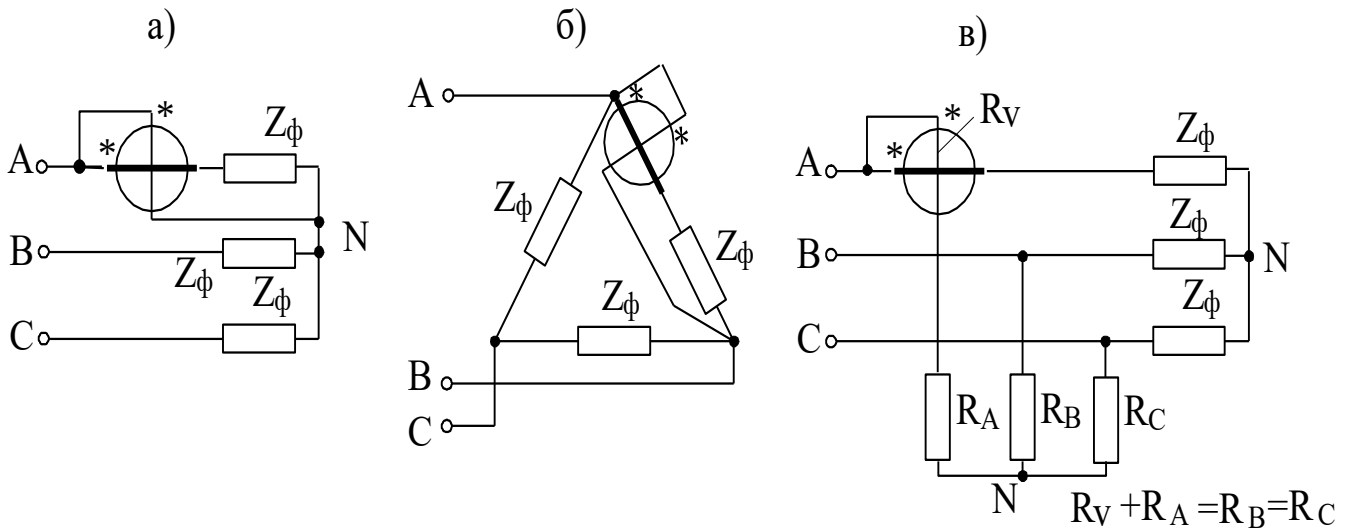


Рисунок 1.3 - Схеми вимірювання потужності симетричної трифазної системи одним ватметром

Якщо нейтральна точка трифазного кола недоступна або неможливе вмикання у фазу трикутника, то створюється штучна нейтральна точка N (рис. 1.3, в). Опори R_A, R_B, R_C вибирають такими, щоб виконувалася рівність $R_v + R_A = R_B = R_C$.

Метод двох ватметрів застосовується для вимірювання активної потужності симетричних і несиметричних трифазних кіл (без нейтрального проводу). Три можливих варіанти схем вмикання ватметрів показані на рис. 1.4.

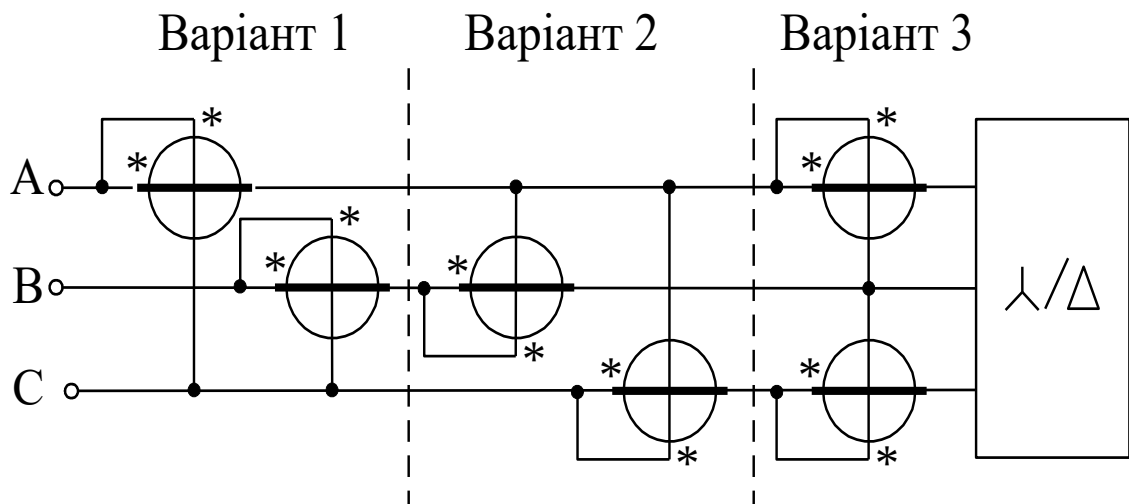


Рисунок 1.4 - Схеми вимірювання потужності трифазної системи двома ватметрами

Активна потужність трифазного кола визначається як алгебраїчна сума показів двох ватметрів: $P = P_{w1} + P_{w2}$.

Метод трьох ватметрів застосовується для вимірювання активної потужності трифазних чотирипроводових кіл. Ватметри вмикають так, щоб кожен з них вимірював потужність однієї фази приймача (рис.1.5). Потужність трифазного приймача визначається як сума показів усіх ватметрів:

$$P = P_{wA} + P_{wB} + P_{wC} .$$

Вимірювання реактивної потужності має практичне значення лише для енергетичних систем при передаванні та споживанні великих потоків електричної енергії. Енергетичні трифазні системи, як правило, симетричні. Тому найчастіше реактивну потужність обчислюють за показами двох ватметрів, увімкнутих за однією з трьох схем (рис. 1.4):

$$Q = \sqrt{3}(P_{w1} - P_{w2}) .$$

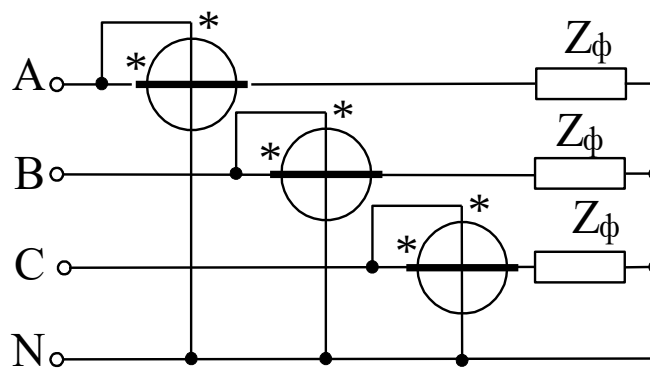


Рисунок 1.5 - Схеми вимірювання потужності несиметричної трифазної системи трьома ватметрами

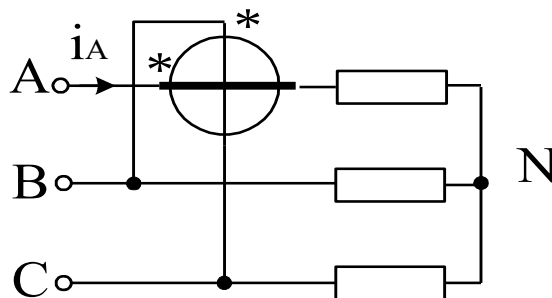


Рисунок 1.6 - Схема вимірювання реактивної потужності симетричної трифазної системи одним ватметром

Реактивну потужність симетричної трифазної системи можна виміряти одним електродинамічним ватметром, увімкнутим, наприклад, за схемою (рис. 1.6). По нерухомій котушці ватметра проходить струм i_A , а до рухомої котушки прикладена лінійна напруга u_{BC} , яка зсунута відносно струму i_A на кут $(90^\circ - \varphi)$.

Реактивну потужність визначають множенням показу ватметра на $\sqrt{3}$: $Q = \sqrt{3}P_w$. Можливі ще дві аналогічні схеми вмикання ватметра.

Вимірювання потужності на високих і надвисоких частотах (НВЧ) виконується завжди з попереднім перетворенням електричної енергії в інші види енергії, переважно в теплову. Відрізняють ватметри поглинюваної і прохідної потужності.

Ватметри поглинюваної потужності застосовують у тому разі, коли необхідно виміряти потужність навантаження, узгодженого з лінією електропередачі, тобто в тих випадках, коли вхідний опір навантаження дорівнює хвильовому опору лінії. Ватметр під'єднується до лінії замість навантаження і, будучи узгодженим з нею, виступає в ролі навантаження. В узгодженому режимі вся потужність, яка надходить від генератора, повністю поглинається в приладі, і його показ відповідає вхідній потужності генератора.

Серед ватметрів поглинюваної потужності широкого застосування набули термісторні, термоелектричні та калориметричні.

Термісторні ватметри складаються з коаксіальної або хвилевідної вимірювальної головки і мосту постійного струму. На рис. 1.7а зображена схема коаксіальної вимірювальної головки, що являє собою відрізок коаксіальної лінії, у внутрішній провід якої вмикається термістор R_T , що служить навантаженням. Термістор нагрівається високочастотною енергією і його опір змінюється. Опір термістора вимірюється незрівноваженим мостом постійного струму, який створюють опори термістора R_T і резисторів R_1, R_2, R_3 . Показувальний пристрій мосту градується в одиницях потужності.

На рис. 1.7б подана еквівалентна схема вимірювальної головки. Термістор R_T одночасно вмикається в коло НВЧ тракту і в коло постійного струму. Для розв'язування кіл передбачається дросель L і розрив у зовнішній лінії. У повітряному зазорі установлюється слюдяна прокладка. Тим самим створюється конструктивний конденсатор C_k , через який змінний струм проходить безперешкодно, не попадаючи в мостову схему. Дросель L уберігає джерело високочастотної енергії від проникнення в нього постійного струму.

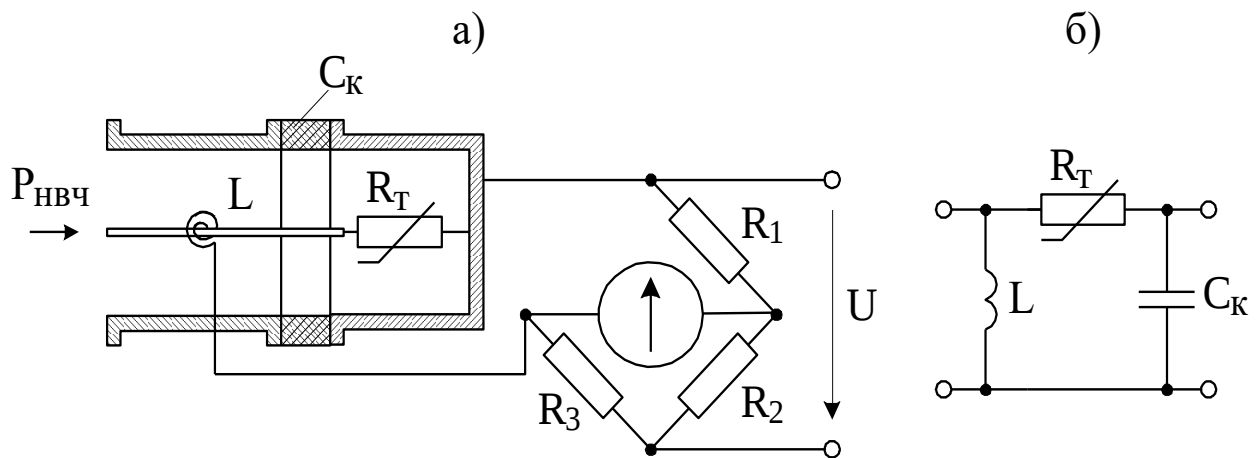


Рисунок 1.7 - Термісторний ватметр: а – будова; б – еквівалентна схема вимірювальної головки

Термісторні ватметри призначаються для вимірювання малих рівнів потужності (від одиниць мікроват до 1 Вт) у діапазоні від 20 МГц до 38,3 ГГц. Основна відносна похибка вимірювання складає $\pm 4...15\%$.

Термоелектричні ватметри ґрунтуються на вимірюванні термо ЕРС термопар прямого або опосередкованого нагрівання, що виникає в результаті поглинання в них НВЧ потужності (рис. 1.8).

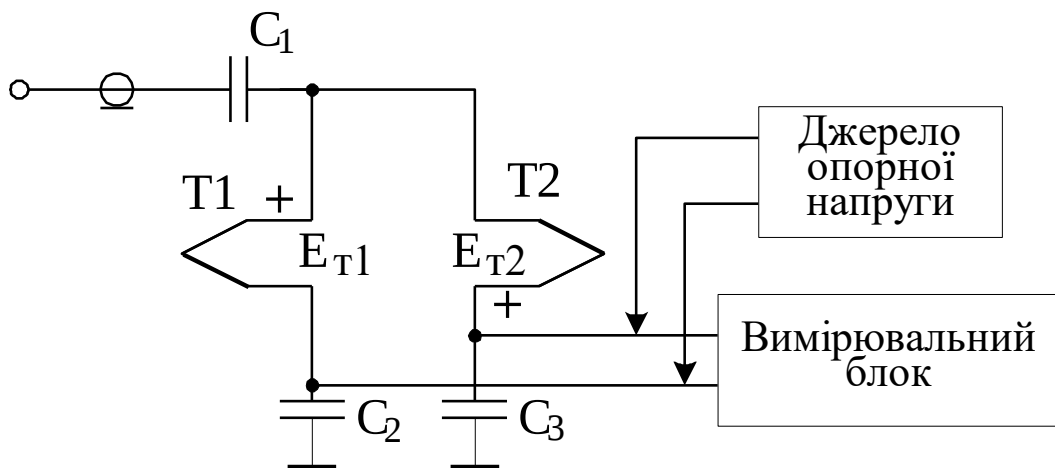


Рисунок 1.8 - Структурна схема термоелектричного ватметра

Термопари Т1, Т2 одночасно виконують функції узгодженого навантаження. Конденсатори C_1 , C_2 , C_3 призначаються для розв'язання кіл змінного і постійного струму. Термоперетворювачі перед вимірюванням калібруються відомою потужністю 800 мкВт від джерела опорної напруги. Мінімальна основна відносна похибка ватметрів може

бути одержана порядку $\pm 1,5 \dots 4,0$ % без урахування похибки неузгодженості.

Калориметричні ватметри випускають з різними межами вимірювання потужності (від часток вата до сотень кіловат). Спрощена схема такого ватметра показана на рис. 9. Він має дві ідентичні камери 1 і 2, в яких розміщуються резистори R_1 і R_2 (їх опори $R_1 = R_2$). Обидва резистори безперервно омиваються рідиною. Резистор R_1 вмикається до джерела потужності НВЧ $P_{\text{НВЧ}}$, а резистор R_2 – до джерела потужності постійного струму $P_{\text{=}}$.

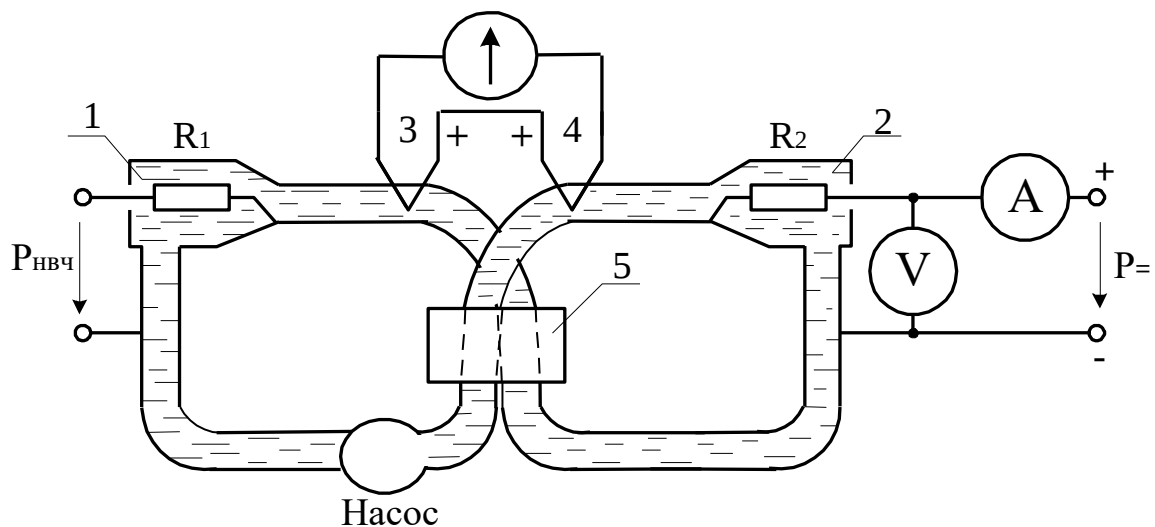


Рисунок 1.9 - Калориметричний ватметр

Процес вимірювання потужності $P_{\text{НВЧ}}$ зводиться до вимірювання потужності $P_{\text{=}}$, значення якої установлюють за показами амперметра А і вольтметра V таким, щоб температура рідини на виходах обох камер була однаковою. Рівність температур визначають за нульовим показом чутливого індикатора, до якого належать термоперетворювачі 3 і 4, що вмикаються назустріч один одному, і високочутливий магнітоелектричний прилад. Теплообмінник 5 вирівнює температуру рідини на входах камер.

Калориметричні ватметри забезпечують вимірювання потужності в діапазоні частот від 30 МГц до 37,5 ГГц з основною відносною похибкою $\pm 4 \dots 15$ %. Похибка лабораторних калориметричних ватметрів не перевищує ± 1 %.

1.4 Вимірювання електричної енергії

Вимірювання електричної енергії має велике народногосподарське значення. В системах промислової частоти 50 Гц електрична енергія вимірюється індукційними лічильниками, але останнім часом все більше застосовуються електронні лічильники енергії.

Індукційний лічильник має два електромагніти (рис. 1.10). Обмотка одного з них вмикається послідовно з приймачем енергії, обмотка іншого електромагніта - паралельно до нього. В зазорі сердечника паралельного електромагніта розміщується алюмінієвий диск, що закріплюється на осі, яка за допомогою черв'ячної пари зв'язана з лічильним механізмом.

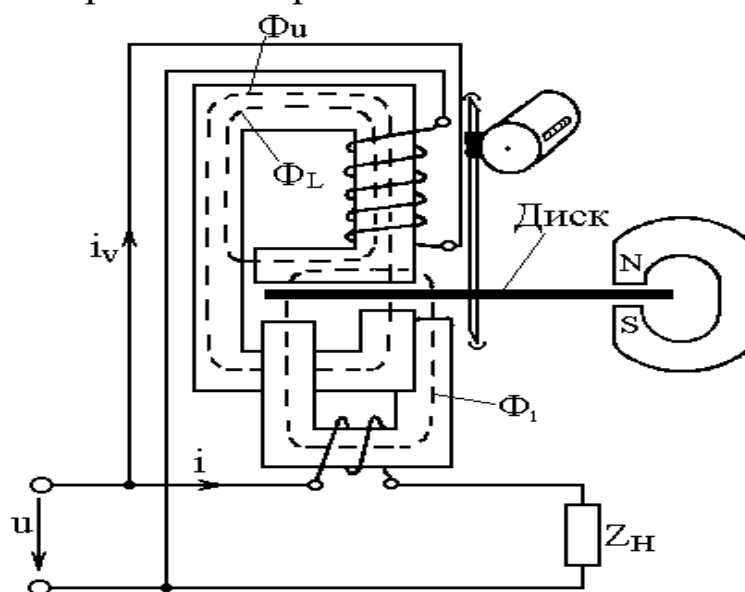


Рисунок 1.10 - Індукційний лічильник електричної енергії

Струми в обмотках електромагнітів створюють два магнітних потоки. Магнітний потік паралельного електромагніта Φ_u пронизує диск один раз, а магнітний потік Φ_i послідовного електромагніта – двічі. Ці потоки індукують у диску струми, які взаємодіють з магнітними потоками Φ_u , Φ_i і створюють обертальний момент. Протидійний момент виникає під час руху диска. Він обумовлений взаємодією постійного магніту із струмом у диску і пропорційний швидкості обертання диска (числу обертів n за одиницю часу). Виміряна лічильником енергія W пропорційна числу обертів N його диска та сталій лічильника A : $A = W/N$. Вона вказується на самому приладі у вигляді напису “1”кВт·година – N обертів диска”. Наприклад, “1”кВт·година – 1800 обертів”, а отже, стала індукційного лічильника (Вт·с/об) складає

$A = 2000 \text{ Вт} \cdot \text{с/об}$. Активну енергію трифазного струму, як і потужність, можна виміряти двома лічильниками (при трипроводній системі) або трьома лічильниками (при чотирипроводній системі).

Схеми вмикання лічильників аналогічні схемам вмикання ватметрів при вимірюванні потужності трифазної системи.

ЛЕКЦІЯ № 5

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ЗОСЕРЕДЖЕНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Зосередженими параметрами електричних кіл є активний опір, індуктивність, взаємна індуктивність, ємність. Їх вимірювання можна здійснити методами безпосередньої оцінки, порівняння, резонансним і деякими іншими. Найвищу точність вимірювання забезпечують методи порівняння. Методи безпосередньої оцінки, поступаючись за точністю вимірювань методам порівняння, відзначаються простотою. Перевагою резонансних методів є можливість вимірювання параметрів кіл на високих частотах.

1. Вимірювання активного опору методом безпосередньої оцінки

Вимірювання активного опору здійснюється на постійному струмі. Найпростішим є метод вольтметра та амперметра, який полягає у вимірюванні напруги U і струму I за схемами (рис. 1.1) та обчисленні опору за формулою

$$R_x = \frac{U}{I}.$$

При цьому має місце систематична складова інструментальної похибки – похибки взаємодії, яка обумовлена власним споживанням потужності вимірювальними приладами. Для її усунення значення опору треба розраховувати за формулами

$$R_x = \frac{U_v}{I - \frac{U_v}{R_v}}; \quad R_x = \frac{U}{I - R_a}$$

при вмиканні приладів за схемами (рис. 1.1а,б) відповідно, де R_v , R_a - опори вольтметра і амперметра. Якщо опори R_v і R_a невідомі, то схемою (рис. 1.1а) слід користуватися в тих випадках, коли вимірюваний опір R_x малий у порівнянні з опором R_v вольтметра, а схемою (рис. 1.1б) – при значеннях опору R_x , значно більших, ніж опір амперметра R_a .

Метод вольтметра і амперметра застосовується, головним чином, при орієнтовних вимірюваннях і тоді, коли опір треба вимірювати при якомусь певному значенні струму чи напруги.

Омметри – це прилади безпосередньої оцінки для вимірювання активного опору. Відрізняють електромеханічні та електронні омметри.

Електромеханічний омметр являє собою сукупність магнітоелектричного вимірювального механізму та джерела постійної напруги (сухого елемента, який розміщується в корпусі приладу, або перетворювача змінної напруги частоти 50 Гц у постійну).

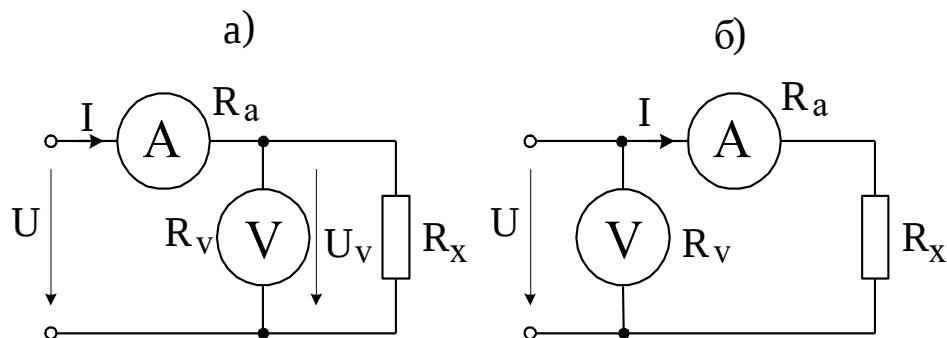


Рисунок 1.1. Схеми вимірювання опорів за методом вольтметра і амперметра: а – для малих опорів; б – для великих опорів

Вимірюваний опір R_x вмикається послідовно з вимірювальним механізмом або паралельно. Послідовна схема (рис. 1.2а) використовується при вимірюванні середніх та великих опорів ($R_x = 10 \dots 10^7 \text{ Ом}$), паралельна схема (рис. 1.2б) – при вимірюванні малих опорів ($R_x < 10 \text{ Ом}$).

Градувальна характеристика омметра при послідовному вмиканні опору R_x дорівнює

$$\alpha = S_i I = \frac{S_i U}{R_x + R_p + R_0},$$

а при паралельному вмиканні опору R_x

$$\alpha = S_i I = \frac{S_i U}{R_p + R_0 + \frac{R_x R_0}{R_p}},$$

де S_i – чутливість магнітоелектричного приладу до струму.

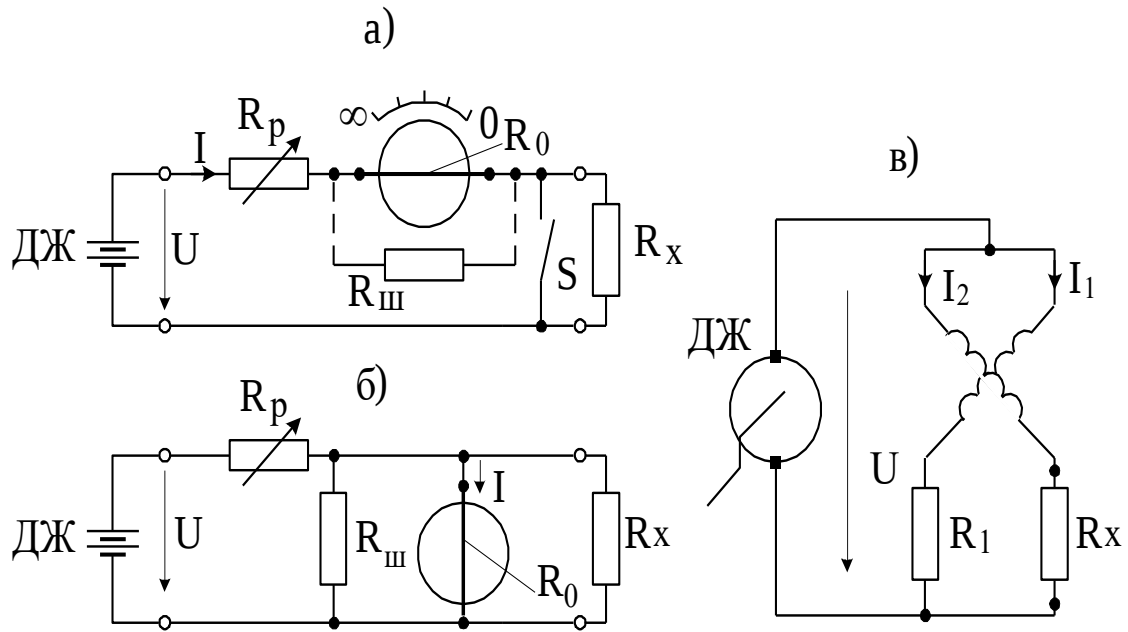


Рисунок 1.2 - Схеми омметрів: а – з послідовним; б – з паралельним вмиканням вимірюваного опору; в – логометричного

Шкали омметрів нерівномірні з межею вимірювання від нуля до нескінченності. Шкала омметра з послідовним вмиканням R_x градується справа наліво, а шкала омметра з паралельним вмиканням R_x – навпаки, зліва направо.

Основна похибка омметра істотно залежить від стабільності напруги U джерела живлення ДЖ, тому перед кожним вимірюванням виконується перевірка та регулювання цієї напруги. У схемі (рис. 6.38,а) вказівник установлюють на позначку “0” шкали при замкнутих затискачах “ R_x ” (за допомогою перемикача S), а в схемі (рис. 6.38,б) вказівник суміщують з позначкою “0” при розімкнутих затискачах “ R_x ”.

Зведену похибку омметра γ визначають як відношення абсолютної похибки Δl , вираженої в одиницях довжини, до довжини шкали l , тобто $\gamma = (\Delta l) \cdot 100 \%$.

Для вимірювання опору ізоляції електротехнічних установок застосовують мегомметри, побудовані на базі магнітоелектричного логометра (рис. 1.2в). У коло однієї обмотки логометра вмикається відомий опір R_1 , а в коло іншої обмотки – опір R_x . Підставляючи

значення струмів $I_1 = \frac{U}{R_1}$ та $I_2 = \frac{U}{R_x}$, для градуувальної характеристики мегомметра маємо

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{R_x}{R_1}\right) = F(R_x),$$

тобто показ мегомметра є функцією вимірюваного опору R_x .

Як джерело живлення використовується електромеханічний генератор постійного струму або генератор змінного струму з перетворювачем змінного струму в постійний, розміщений у корпусі мегомметра. Ротор генератора приводиться в рух уручну з швидкістю 100...120 об/хв. Оскільки логометричні мегаомметри призначаються для вимірювання у високоомних та високовольтних колах, то номінальну напругу живлення вибирають високою: 100, 250, 500, 1000 та 2500 В, наприклад, мегаомметри класу точності 1,0 типів М1102, М4100, М4101 та інші з межами вимірювань до 500 МОм.

Електронні омметри будують на базі операційних підсилювачів (ОП) (рис. 1.3). При вимірюванні малих значень опорів (до 10^6 Ом) на вході підсилювача вмикається зразковий резистор R_0 , а в коло негативного зворотного зв'язку – вимірюваний резистор R_x (рис. 6.39,а). Вихідна напруга U_x ОП у цій схемі залежить від відношення опорів:

$$U_x = U \frac{R_x}{R_0}.$$

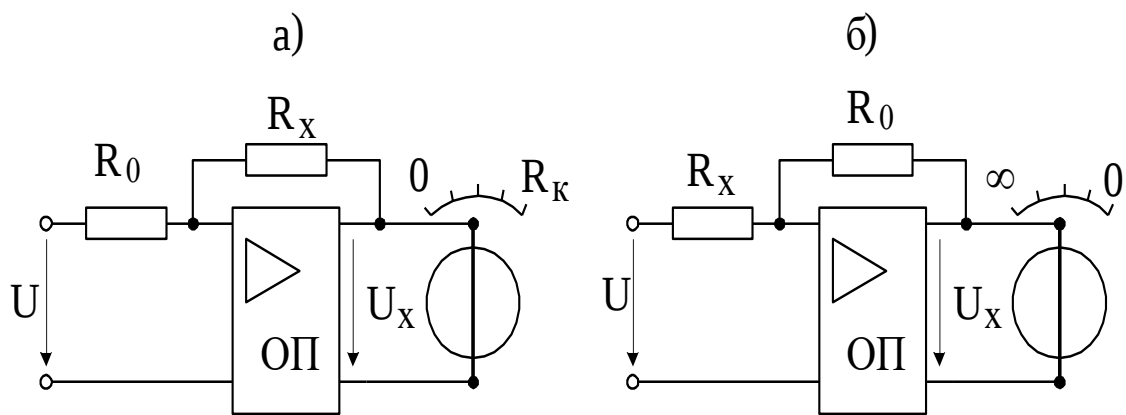


Рисунок 1.3 - Схеми омметрів на операційних підсилювачах: а – для малих опорів; б- для великих опорів

Шкала такого омметра рівномірна зі скінченною межею вимірювань R_k .

При вимірюванні великих значень опорів (понад 10^6 Ом) резистори R_x і R_0 (рис. 6.39,б) міняють місцями і тоді

$$U_x = U \frac{R_0}{R_x},$$

а шкала омметра стає нерівномірною з нескінченною межею вимірювань.

Межі вимірювань омметрів з рівномірною шкалою – від 100 Ом до 1 МОм, клас точності 1,5; межі вимірювань омметрів з нерівномірною шкалою – від 1 МОм до 10^7 МОм, клас точності 2,5.

2. Вимірювання активного опору методом порівняння

Порівняння вимірюваного опору зі зразковою мірою опору реалізується за допомогою мостів постійного струму, які поділяють на одинарні та подвійні.

Одинарні чотиреплечі мости (рис.2.1а) застосовуються для вимірювання середніх та великих значень опору: від 10 до $10^6 \dots 10^7$ Ом. Резистори R_1 , R_2 , R_3 , R_x створюють плечі мосту, АВ і СД – відповідно діагональ живлення та діагональ індикаторного приладу (гальванометра).

Процес вимірювання мостом зводиться до його зрівноважування. Міст вважається зрівноваженим, якщо струм I_0 у вимірювальній діагоналі, тобто у гальванометрі Г дорівнює нулю, а отже, і напруга між точками С і Д теж дорівнює нулю. Тоді відповідно до другого закону Кірхгофа

$$I_x R_x = I_1 R_1, \quad I_3 R_3 = I_2 R_2.$$

Поділивши перше рівняння на друге і враховуючи, що при зрівноваженні мосту $I_x = I_3$ і $I_2 = I_1$, одержимо $R_x/R_3 = R_1/R_2$ або $R_x R_2 = R_1 R_3$, звідки дістаємо умову зрівноважування мосту

$$R_x = R_1 R_3 / R_2$$

Зрівноважування мосту можна здійснювати або зміною опору R_1 , виконаного у вигляді багатого декадного магазину опорів, або зміною відношення опорів R_3/R_2 . У практичних схемах обидві величини (R_1 і R_3/R_2) виконуються змінними. Відношення R_3/R_2 вибирають кратним 10^n

($n = -3, -2, -1, 0, 1, 2 \dots$), що дозволяє установлювати різні межі вимірювань при постійному значенні опору R_1 .

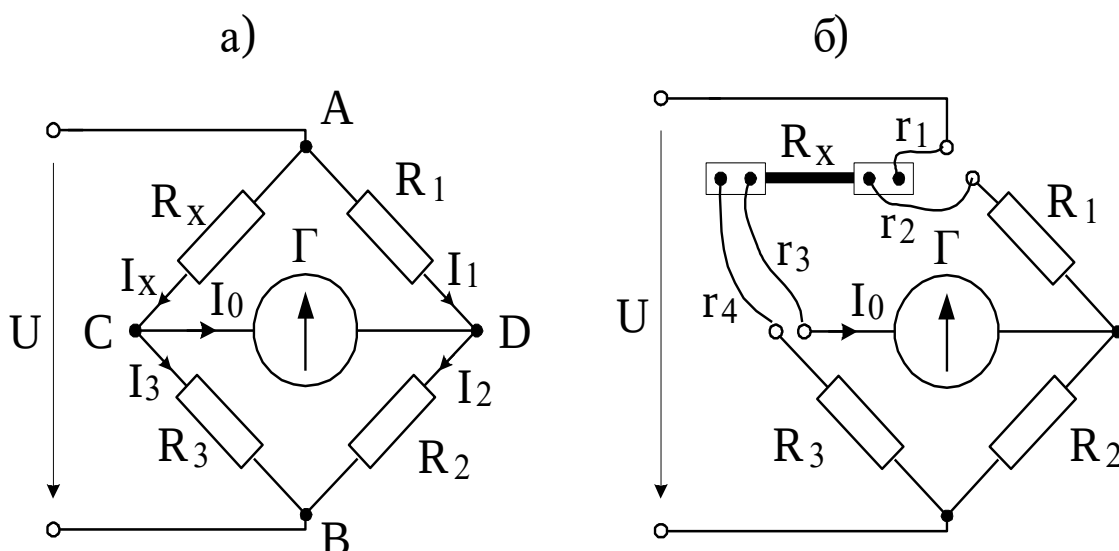


Рисунок 2.1 - Схеми одинарних мостів постійного струму: а – для вимірювання середніх опорів; б – для вимірювання малих опорів

Точність вимірювання опору мостовою схемою залежить від чутливості гальванометра, точності градуювання опору плечей мосту та від значення вимірюваного опору. На крайніх межах вимірювання похибка зростає. Основна відносна похибка кращих зразків одинарних мостів постійного струму досягає сотих і навіть тисячних часток відсотка.

У вимірювальній практиці знаходять застосування не зрівноважені одинарні мости. Вони виконуються чотириплечими за схемою (рис. 6.40,а), але опори R_1 , R_2 , R_3 вибирають такими, щоб міст був зрівноваженим при номінальному значенні опору R_{xn} . При відхиленні дійсного значення опору R_x від номінального в діагоналі гальванометра виникає струм $I_0 = \Delta I$, який функціонально зв'язаний з припущенням опору $\Delta R_x = R_x - R_{xn}$, а отже, за значенням струму ΔI можна судити про значення опору R_x , а шкалу гальванометра можна проградувати в одиницях опору. Точність не зрівноважених мостів невисока, але ці мости прості в експлуатації і високопродуктивні при масових вимірюваннях.

Вимірювання малих значень опорів одинарним мостом обмежується тим, що це значення може стати порівнянним із сумарним значенням опору з'єднувальних проводів і опору контактів у місцях з'єднання проводів з вимірюваним опором та мостом. Для усунення впливу цих небажаних

опорів на похибку вимірюваний опір під'єднується до затискачів мосту не двома, а чотирма проводами (рис. 6.40,б). При цьому з'єднувальні проводи r_2 і r_4 та контактні з'єднання цих проводів з входніми затискачами мосту опиняються ввімкнутими послідовно з великими опорами R_1 і R_3 , а з'єднувальні проводи r_1 і r_3 – відповідно в діагональ живлення та в діагональ гальванометра. Тим самим вплив опорів з'єднувальних проводів та контактних з'єднань буде зведений нанівець.

Подвійні мости призначені для вимірювання дуже малих опорів – від $10^{-6} \dots 10^{-8}$ Ом до $10 \dots 20$ Ом. У їхніх схемах вимірюваний опір R_x під'єднується до затискачів мосту також чотирма проводами (рис. 2.2).

Умову зрівноваження подвійного мосту $I_0 = 0$ можна одержати, склавши для контурів I–III рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$\begin{cases} I_x R_x + I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0; \\ I_x R_x + I_4 R_4 - I_3 R_3 = 0; \\ (I_x - I_1) R_0 - I_1 R_1 - I_4 R_4 = 0. \end{cases}$$

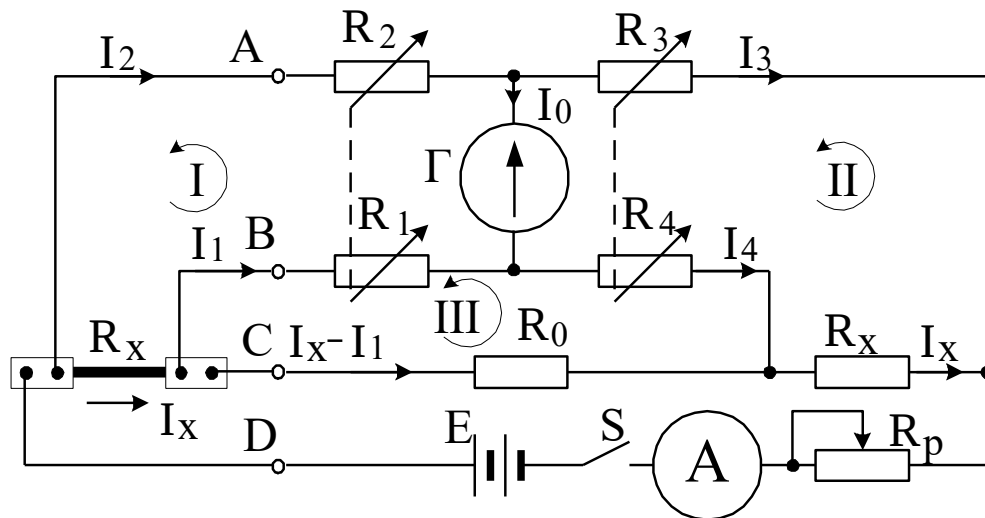


Рисунок 2.2 - Схема подвійного мосту

Розв'язавши їх відносно R_x , вважаючи міст зрівноваженим ($I_0 = 0$, $I_1 = I_4$, $I_2 = I_3$), дістаємо

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3} + \frac{R_0 R_2}{R_0 + R_1 + R_2} \left(\frac{R_4}{R_3} - \frac{R_1}{R_2} \right).$$

Якщо виконати умови $R_3 = R_4$ і $R_1 = R_2$, то останнє рівняння спроститься і набере вигляду

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}.$$

Подвійні мости менш чутливі, ніж одинарні. Сучасні подвійні мости забезпечують вимірювання малих значень опорів з основною відносною похибкою $\pm 0,02 \dots 2 \%$, яка зростає при зменшенні значення вимірюваного опору.

Помітні похибки при вимірюванні малих опорів можуть спричинятися паразитними ЕРС, які виникають у схемі мосту в місцях контакту з'єднувальних проводів із неоднорідних матеріалів. Паразитні ЕРС можуть стати сумірними зі спадом напруги на вимірюваному резисторі, тому при вимірюванні малих значень опорів треба старанно слідкувати за чистотою всіх контактів, застосовувати з'єднувальні проводи тільки з одного металу, не допускати помітної різниці температур між окремими частинами вимірювальної схеми. У багатьох випадках впливом паразитних ЕРС можна знехтувати, якщо провести два вимірювання при різних напрямках струму, який проходить через вимірюваний R_x і зразковий R_1 опори, та прийняти за результат середнє з результатів обох вимірювань.

В експлуатації знаходяться комбіновані мости постійного струму (Р39, Р329, МОЦ-61 тощо), які дозволяють за допомогою спеціальних перемикачів створювати схему одинарного або подвійного мосту і вимірювати опір у межах від 10^{-8} Ом до 10^8 Ом.

3. Мости змінного струму

Для вимірювання параметрів котушок індуктивностей і конденсаторів широко застосовують мости змінного струму. Найпростішим з них є чотириплечий міст. Опори плечей такого мосту (рис. 2.3) в загальному випадку є комплексними величинами:

$$\underline{Z}_x = R_x + jX_x; \quad \underline{Z}_1 = R_1 + jX_1; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + jX_2; \quad \underline{Z}_3 = R_3 + jX_3.$$

У зрівноваженому стані мосту виконується рівність

$$\underline{Z}_x \underline{Z}_2 = \underline{Z}_1 \underline{Z}_3,$$

або

$$(R_x R_2 - X_x X_2) + j(R_x X_2 + R_2 X_x) = (R_1 R_3 - X_1 X_3) + j(R_1 X_3 + R_3 X_1).$$

Звідси умова зрівноваження мосту може бути подана у вигляді двох рівнянь:

$$\begin{cases} R_x R_2 - X_x X_2 = R_1 R_3 - X_1 X_3; \\ R_x X_2 + R_2 X_x = R_1 X_3 + R_3 X_1. \end{cases}$$

Ці рівняння свідчать, що для зрівноважування мостової схеми змінного струму необхідно регулювати два її параметри. Як регулювальні елементи застосовують резистори та ємності. Як нульовий індикатором (НІ), за показами якого фіксують стан зрівноваження мосту, частіше за все використовують або пристрій, що складається з підсилювача змінного струму, перетворювача змінного струму в постійний та магнітоелектричного мікроамперметра, або електронно-променевої трубку. Якщо на одну пару відхильних пластин трубки подати опорну напругу, а на іншу пару відхильних пластин – напругу з діагоналі індикатора, то при регулюванні мосту на екрані електронно-променевої трубки можна спостерігати еліпс, який відбиває змінювання амплітуд і фаз напруг. При зрівноваженні мосту зображення еліпса на екрані перетворюється в пряму лінію.

Живлення мосту змінного струму здійснюється від мережі промислової частоти через розділювальний трансформатор Тр (рис.2.3)

Основна похибка мостових схем включає в себе складові: похибку задання параметрів зразкових елементів мосту; похибку, обумовлену неточністю зрівноваження мосту; похибку, обумовлену паразитними опорами, - ємністю та індуктивністю з'єднувальних проводів, перехідним опором контактів і паразитними зв'язками між елементами мосту.

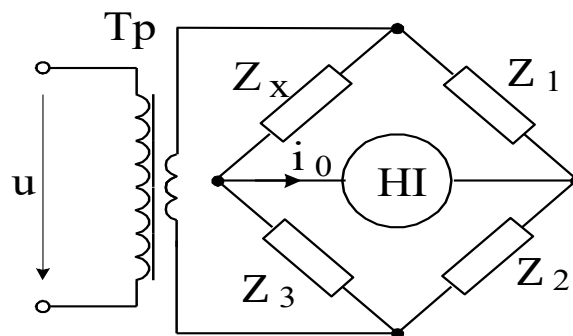


Рисунок 2.3 - Схема мосту змінного струму

Мости для вимірювання ємності та кута втрат. Перш за все нагадаємо, що досліджуваний об'єкт з ємнісним опором можна подати послідовною або паралельною еквівалентними схемами.

Міст з еквівалентною паралельною схемою $R_x C_x$ конденсатора (рис. 2.4а) вимірює ємність C_x і $\operatorname{tg} \delta$ (тангенс кута діелектричних втрат δ конденсатора) об'єктів з великими діелектричними втратами. Якщо міст зрівноважений, то маємо

$$\frac{R_2}{1/R_x + j\omega C_x} = \frac{R_3}{1/R_1 + j\omega C_1},$$

або
$$\frac{R_2}{R_1} + j\omega C_1 R_2 = \frac{R_3}{R_x} + j\omega C_x R_3.$$

Прирівнюючи окремо дійсні і уявні частини цього рівняння, одержимо

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2}; \quad C_x = C_1 \frac{R_2}{R_3}.$$

Тоді тангенс кута діелектричних втрат

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_x R_x} = \frac{1}{\omega C_1 R_1}.$$

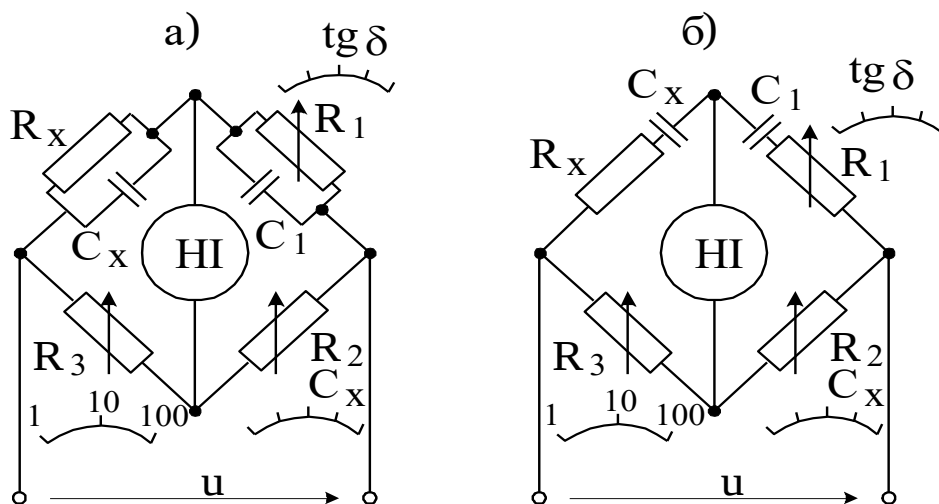


Рисунок 2.4 - Схеми мостів змінного струму для вимірювання параметрів конденсаторів: а – за еквівалентною паралельною схемою; б – за еквівалентною послідовною схемою

$$\frac{R_x + j\omega L_x}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} = R_2 R_3, \quad \text{або} \quad R_x + j\omega L_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} + j\omega C_1 R_2 R_3,$$

звідки знаходимо

$$L_x = C_1 R_2 R_3; \quad R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}; \quad Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_1 R_1.$$

Міст врівноважується зміною опорів R_1 і R_2 . При незмінному значенні ємності C_1 шкалу R_1 градуюють в одиницях тангенса кута діелектричних втрат, а шкалу R_2 – в одиницях ємності. Зміною опору R_3 здійснюється вибір меж вимірювань мосту.

Для вимірювання параметрів послідовної еквівалентної схеми $R_x C_x$ конденсатора використовується міст (рис. 2.4б), для якого з умови зрівноваження маємо

$$C_x = C_1 \frac{R_2}{R_3}; \quad \operatorname{tg} \delta = \omega C_1 R_1.$$

Процес зрівноважування обох мостів відбувається так. Після встановлення максимального значення опору R_2 вибирають межу вимірювання (зміною опору R_3), при якій струм у нуль-індикаторі НІ буде найменший. Змінюючи опір R_2 , домагаються мінімального струму в нуль-індикаторі і переходять до регулювання опору R_1 для подальшого зменшення струму в нуль-індикаторі. Потім знову змінюють опір R_2 і т.д., доки не буде досягнуто приблизно нульового показу НІ, що свідчить про досягнення зрівноваженого стану мосту.

Мости для вимірювання індуктивностей. Одна з можливих схем мосту для вимірювання індуктивностей наведена на рис. 2.5а. Плечі мосту створюють комплексні опори

$$\underline{Z}_x = R_x + j\omega L_x; \quad \underline{Z}_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1}; \quad \underline{Z}_2 = R_2; \quad \underline{Z}_3 = R_3.$$

За відсутності струму у вимірювальній (індикаторній) діагоналі міст зрівноважений і має місце рівність

При незмінних значеннях C_1 і R_3 міст зрівноважується зміною опорів R_1 і R_2 , причому R_2 може бути проградуїований в одиницях

індуктивності, а R_1 – у значеннях добротності Q_x . Зміною опору R_3 розширюють межі вимірювань у 10, 100 і більше разів. Недоліком мосту є погана збіжність при малих значеннях добротності. Добру збіжність має шестиплечий міст (рис. 2.5б), що пояснюється можливістю роздільного зрівноважування реактивної і активної складових опору Z_x (регулюванням опорів R_1 і R_4).

В експлуатації знаходяться універсальні мости для вимірювання ємностей та індуктивностей типів Р577 (основна відносна похибка $\pm 1...2\%$), Р571 (клас точності 0,1), високовольтний міст Р5026 (клас точності 0,5) тощо.

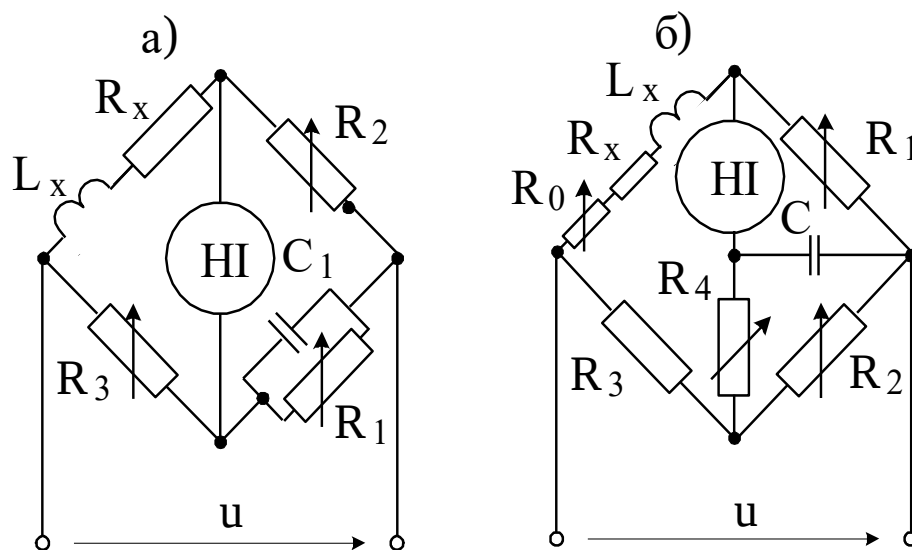


Рисунок 2.5 - Схеми мостів змінного струму для вимірювання індуктивностей: а – чотирিপлеча; б – шестиплеча

Трансформаторні мости. Мости змінного струму, розглянуті вище, застосовуються на невисоких частотах напруги живлення (100 Гц і 1000 Гц). На більш високих частотах зростає вплив паразитних індуктивностей і ємностей, що призводить до зниження точності вимірювань.

Зменшення похибок можна досягти, якщо замість резисторів, які розміщені в суміжних плечах мосту, наприклад у схемах (рис. 6.43), використовувати обмотки трансформатора з тісним індуктивним зв'язком. Такі мости можуть застосовуватися на частотах до 300 МГц.

Для прикладу на рис. 2.6 наведена схема найпростішого мосту з трансформаторними плечима.

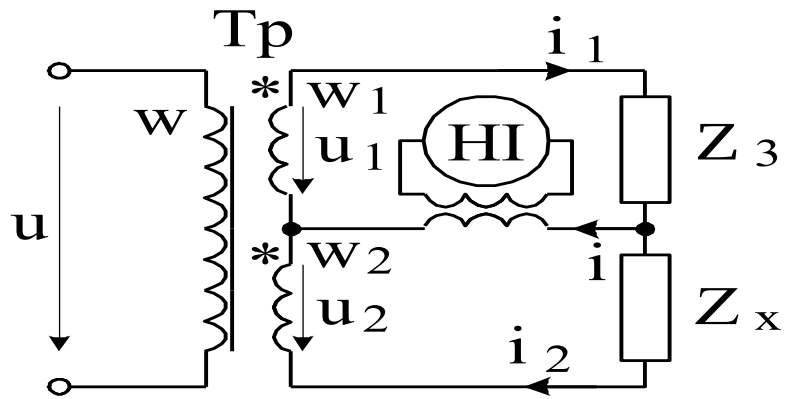


Рисунок 2.6 - Схема трансформаторного мосту

Основними достоїнствами трансформаторних мостів є: широкий частотний діапазон – до 250...300 МГц; висока стабільність і точність – основна відносна похибка складає $\pm 0,001 \dots 0,01\%$; добра захищеність від впливу зовнішніх і внутрішніх паразитних зв'язків.