НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА ЛІТЕРАТУРА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Кафедра електричної інженерії

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

З КУРСУ

«ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ»

для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка першого рівня вищої освіти

ID 1743

Тернопіль 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Кафедра електричної інженерії

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

З КУРСУ

«ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ»

для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка першого рівня вищої освіти

ID 1743

Тернопіль 2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Основи метрології та електричних вимірювань» для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Уклад.: к.т.н., доцент Сергій БАБЮК – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. – 103 с.

Укладач: к.т.н., доцент Сергій БАБЮК

Рецензент: д.т.н., професор Анатолій ЛУПЕНКО

Методичні вказівки розглянуто і затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії
Протокол № 7 від 15.01.2024 р.

Схвалено методичною радою ФПТ Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 5 від 08.02.2024 р.

ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Необхідно дотримуватись наступної послідовність: підготовка до роботи, її виконання, оформлення звіту та його захист.

Підготовка до роботи

Студент повинен підготуватись до лабораторної роботи завчасно, до початку заняття в лабораторії. Під час підготовки необхідно ознайомитись з метою роботи, методичними рекомендаціями до виконання, порядком виконання роботи.

Рівень підготовки студента до виконання лабораторної роботи перевіряє викладач на початку заняття. Студенти, які не змогли відповісти на контрольні питання майбутньої роботи або ті які не оформили звіт з попередньої роботи, до виконання лабораторної роботи на допускаються, але під час заняття вони повинні виконати те що не встигли зробити: підготувати відповіді на контрольні запитання або оформити звіт по передній роботі. Такі студенти виконують пропущену лабораторну роботи в додатковий, погоджений з викладачем час.

Порядок виконання

1. В лабораторії необхідно дотримуватись правил внутрішнього розпорядку та техніки безпеки, вказівок викладача.

2. Під час виконання роботи кожному студенту бажано мати калькулятор та протокол (чернетку) експерименту. При виконанні роботи необхідно ретельно провести всі передбачені завданням вимірювання та розрахунки. Результати експерименту необхідно записувати акуратно, вказувати умови експерименту та одиниці вимірювання.

3. На початку вимірювань рекомендовано по черзі встановити всі можливі значення аргументу, відзначаючи межі та характер зміни функції. При побудові графіків слід проводити усереднені плавні криві, а не з’єднувати відрізками прямих експериментальні точки, координати яких будуються за даними таблиць експериментів.

4. Після проведення всіх передбачених завданням вимірювань та розрахунків результати аналізуються, порівнюються з очікуваними та пред'являються викладачу.

5. Завдання вважається виконаним тільки після приведення робочого місця в порядок.

Оформлення звіту

Звіт кожен студент оформлює самостійно до початку наступної роботи. Звіт повинен містити титульний аркуш, на якому вказано номер та тему роботи, список виконавців (бригади), дати виконання та прізвище студента, який підготував звіт.

Зміст звіту визначається відповідним розділом в методичних вказівках до виконання роботи. В звіті обов'язково відображаються: мета роботи, схеми що використовуються в роботі, список використаного обладнання та інструменту, результати експерименту з необхідними розрахунками.

В кінці роботи зробити висновки, в яких наводиться аналіз результатів експерименту, розкрита фізична сутність результатів роботи.

Захист лабораторної роботи

Лабораторні роботи студенти захищають індивідуально у встановлений термін, як правило, на наступному занятті.

При захисті лабораторної роботи слід знати мету та хід виконання роботи, фізичну сутність процесів дослідження та їх теоретичне обґрунтування, вміти пояснювати та аналізувати результати, отримані під час виконання роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1
ВИВЧЕННЯ АНАЛОГОВИХ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ТА ЇХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1 МЕТА

1 Вивчити принцип дії, будову, електричну схему, конструктивні особливості та метрологічні характеристики електровимірювальних приладів наступних систем:

- магнітоелектричної;
- електростатичної;
- електромагнітної;
- індукційної;
- електродинамічної;
- термоелектричної.

2 Вивчити яким чином технічні і метрологічні характеристики можна визначити маючи перед собою прилад, освоїти визначення основної похибки приладів.

3 Вивчити графічні позначення що наносяться на шкали приладів.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Для вимірювання струму, напруги і потужності використовують прилади різних систем, які задовольняють умови і вимоги конкретної вимірювальної схеми.

Електровимірювальні прилади у відповідності з методами вимірювання діляться на прилади порівняння та прилади безпосередньої оцінки (показуючі), які по системі відліку показів ділять на прилади з неперервним відліком (наприклад, стрілкові прилади) і прилади з дискретним відліком (цифрові).

Прилади безпосередньої оцінки використовуються частіше, оскільки вони більш прості, дешеві і потребують небагато часу для виміру.

В аналогових електровимірних приладах відбувається перетворення електромагнітної енергії, яка підводиться до приладу, в механічну енергію переміщення рухомої частини приладу. По способу цього перетворення, а також по конструктивних особливостях прилади діляться на магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, феромагнітні, електростатичні та інші.

Для аналогових електровимірювальних приладів стандартом установлено вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 (зразкові і точні) та 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 (робочі прилади). Для розширення границь вимірювання приладів використовують шунти і додаткові резистори, а на змінному струмі також вимірювальні трансформатори струму та напруги.

3 ВИМІРЮВАЛЬНІ МЕХАНІЗМИ ПРИЛАДІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Магнітоелектричні прилади

Магнітоелектричні прилади мають механізм, який складається з постійного магніту з полюсними наконечниками, в який входить легка алюмінієва рамка, на яку намотаний тонкий ізольований провідник. До рамки прикріплений стрілкотримач (див. рис. 1).

Робота приладу базується на взаємодії магнітного поля постійного магніту та магнітного поля рамки, якою протікає струм. У результаті рамка повертається в напрямку, обумовленому напрямком струму. Обертовий момент:

$$M_{об} = B_o SwI = \Psi_o I,$$

де B_o -індукція магнітного поля в зазорі;

S -площа рамки;

w –кількість витків рамки приладу;

I – струм який протікає по рамці;

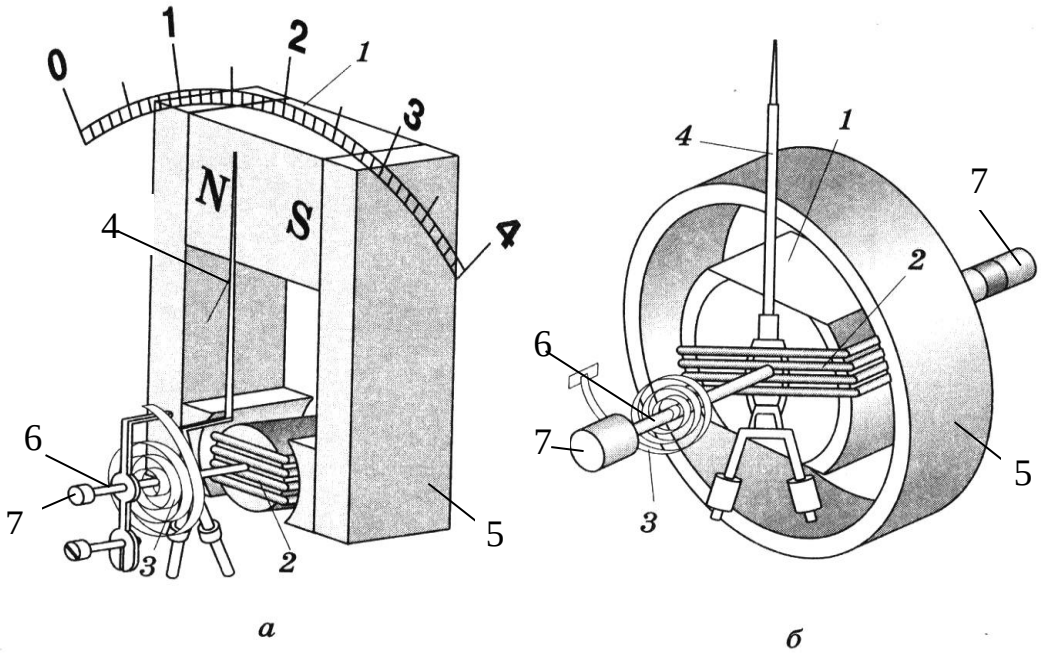
Ψ - магнітне потокозчеплення.

На затискачах приладів завжди є позначки, які показують, як треба включати прилад, щоб стрілка відхилялась вздовж шкали.

Основні властивості магнітоелектричних приладів: висока точність, рівномірність шкали, мале власне споживання потужності, незалежність показів від впливу зовнішніх магнітних полів, непридатність для безпосереднього вимірювання змінного струму, чутливість до перевантажень, висока вартість.

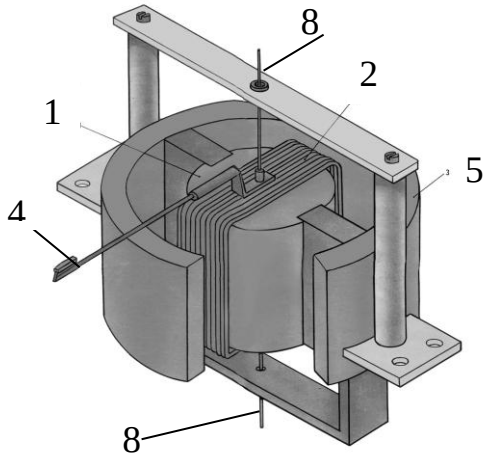
Магнітоелектричні прилади з випрямлячем являють собою сполучення магнітоелектричного вимірювального механізму і випрямляча на напівпровідникових діодах. Шкала приладів рівномірна, однак внаслідок нелінійності вольт-амперної характеристики діодів у початковій частині трохи стиснута.

Ці прилади реагують на *середнє за півперіод* значення змінного струму. Однак шкалу приладів градують у діючих значеннях при синусоїдній формі, тобто з урахуванням коефіцієнта форми $k_\phi = 1{,}11$. Таким чином випрямляючі прилади правильно вимірюють діюче значення *тільки при синусоїдній формі кривої.*



Обертовий момент

$M_{об} = B_o SwI$

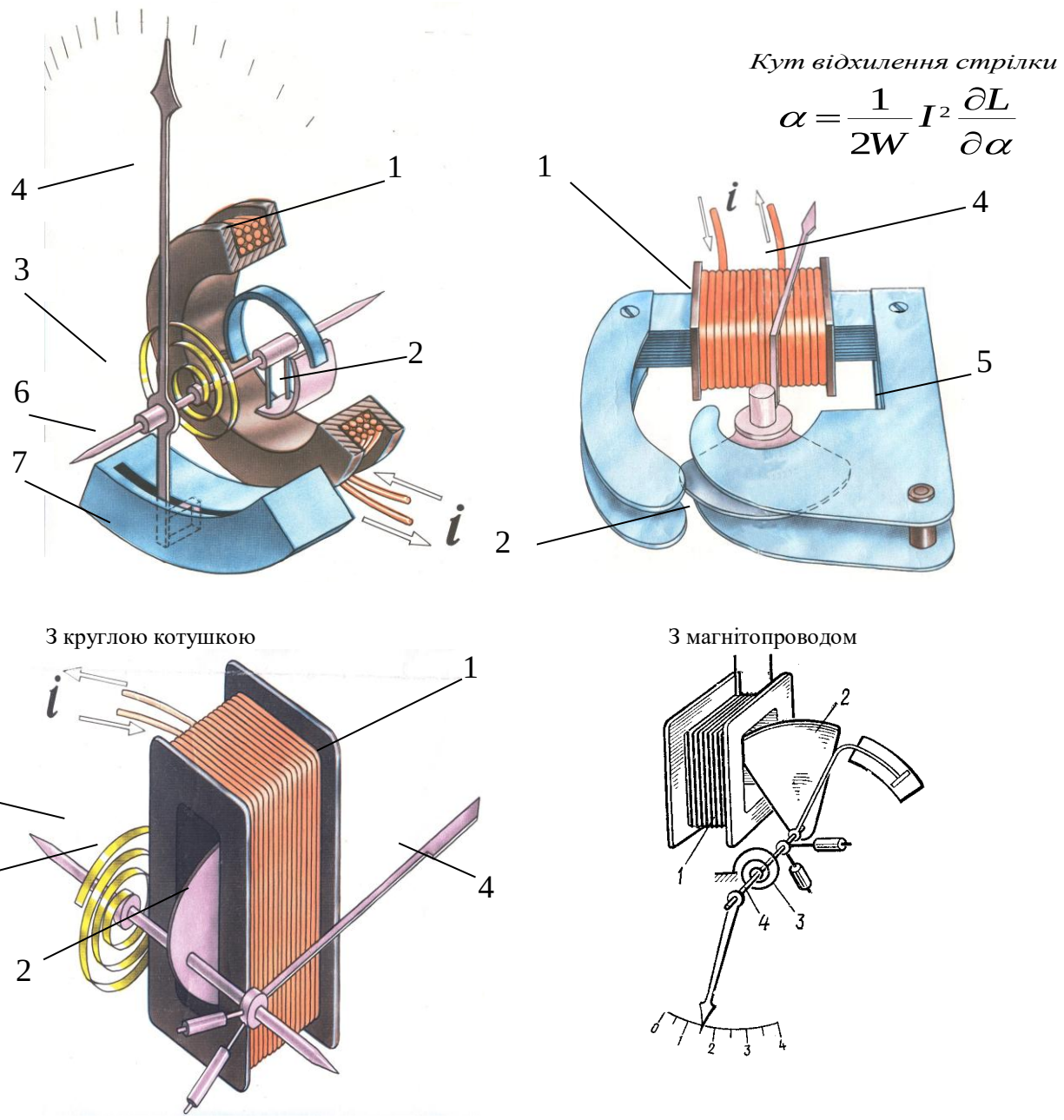


1 - постійний магніт;
2 - рухома котушка;
3 - моментні пружини-струмопідводи;
4 – стрілка;
5 – магніто провід;
6 – вісь;
7 - підп'ятник;
8 –розтяжки- струмопідводи;

Рис. 1. Магнітоелектричні вимірювальні механізми

3.2 Електромагнітні прилади

Електромагнітні прилади мають механізм, який складається з нерухомої котушки і закріпленої на осі рухомої пластинки з магнітом′якого матеріалу. Коли через котушку проходить струм, створюється магнітне поле, яке намагнічує феромагнітну пластинку і вона втягується всередину котушки. Виникаючий при цьому обертовий момент пропорційний квадрату струму $M_{об} = CI^2$, що обумовлює нерівномірність (квадратичність) шкали. Тут *С*- коефіцієнт який визначається конструктивними особливостями системи. Часто квадратичну шкалу вирівнюють, підбираючи відповідну форму феромагнітної пластинки (рис. 2 і додаток 4).

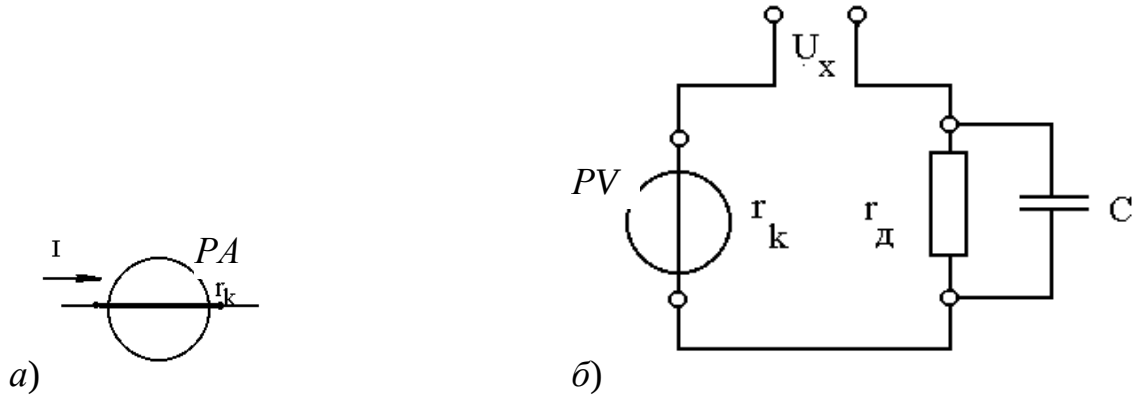


1 - котушка
2 - рухомий сердечник
3 - спіральні пружини
4 – стрілка;
5 – магнітопровід;
6 – вісь;
7- заспокоювач.

Рис. 2. Вимірювальні механізми електромагнітної системи.

Електромагнітні прилади мають найпростіше електричне коло (рис. 3*а*). Увесь струм, який вимірюється (у вольтметрів пропорційний напрузі), протікає по котушці механізму. Амперметри роблять на струми від 1,5 мА до 200 А.

У вольтметрах послідовно з котушкою (обмотка з мідного провідника) вмикають додатковий резистор $r_д$ (рис. 3*б*), що дозволяє випускати вольтметри на напруги від 0,5 до 600 В і зменшувати температурну похибку.



а) *б*)

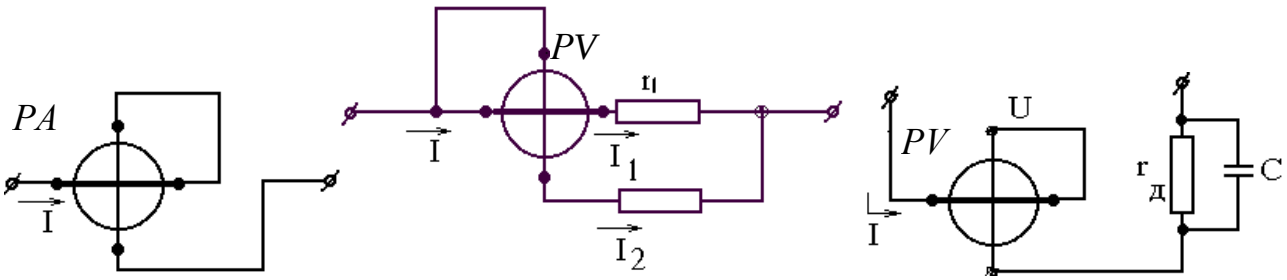
Рис. 3

Зовнішня температура на покази цих приладів не впливає. Вплив зміни частоти на покази амперметрів відносно невеликий, а на покази вольтметрів значно більший. Із зростанням частоти зростає реактивна складова опору котушки і покази приладу зменшуються. Для зменшення частотної залежності роблять компенсацію індуктивності котушки шляхом включення ємності *C* (рис. 3*б*). Щитові амперметри і вольтметри випускають на фіксовані частоти до 2400 Гц, переносні – на діапазон частот до 3000 Гц.

Основні властивості електромагнітних приладів: придатність для постійного і змінного струмів; стійкість до перевантажень; незалежність показів від форми кривої; простота і дешевизна.

3.3 Електродинамічні прилади

Електродинамічні прилади мають механізм, який складається з нерухомої (з двох секцій) і рухомої котушок (рис. 5). При наявності в котушках струмів I_1 та I_2 виникають електромагнітні сили взаємодії, які повертають рухому котушку. В результаті виникає обертовий момент $M_{об} = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}$ або $M_{об} = CI_1 I_2$ пропорційний добутку діючих значень струмів у котушках. На рис. 4 зображені спрощені схеми амперметрів і вольтметрів.



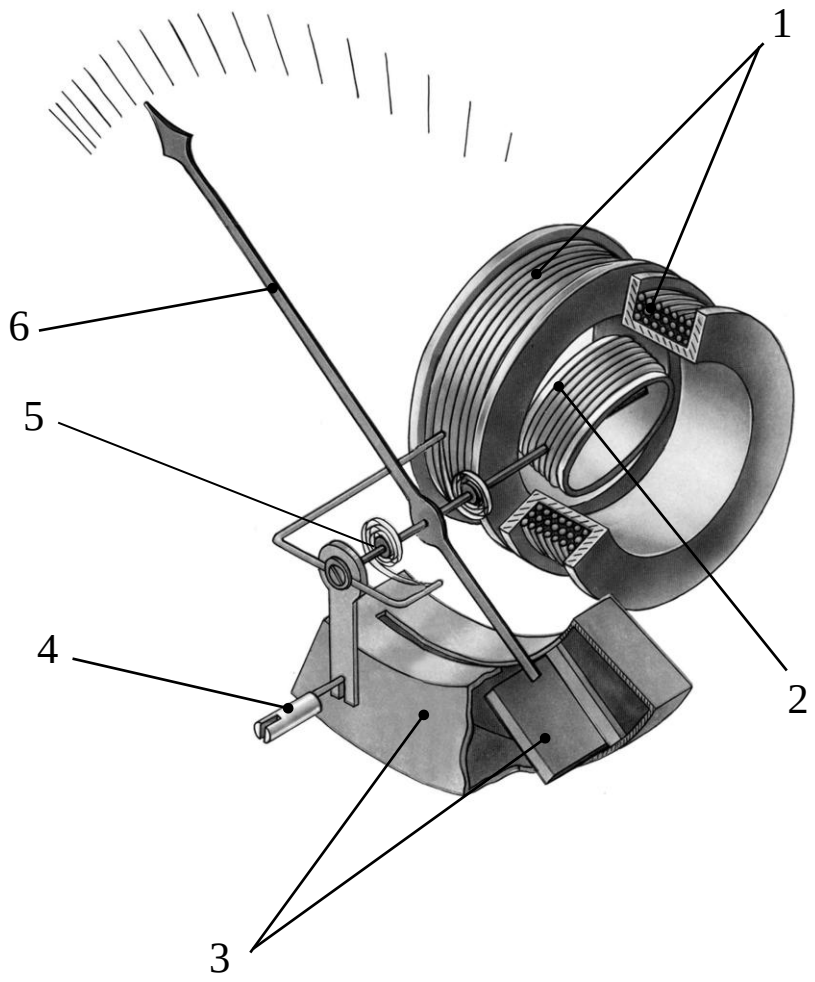
а) *б*) *в*)

Рис. 4.

У міліамперметрів (рис. 4*а*) котушки з′єднані послідовно, тобто $I_1 = I_2$. В

амперметрах на струм більше 0,5 А котушки з′єднані паралельно (рис.4*б*). У вольтметрах (рис. 4*в*) обидві котушки з′єднані послідовно з додатковим опором $r_д$, який виготовлений з манганіну. Ці прилади мають практично рівномірну шкалу, за винятком початкової частини. Емність *С* служить для зменшення частотної похибки.

Вплив зовнішніх магнітних полів на механізм значний, для захисту використовують екранування магнітомягким залізом. Зовнішня температура на покази впливає незначно. Частотний діапазон до 5000 Гц.



1 – нерухомі котушки;
2 – рухома котушка;
3 – повітряний заспокоювач;
4 – коректор нуля;
5 – вісь;
6 – стрілка.

Рис. 5. Прилад електродинамічної системи

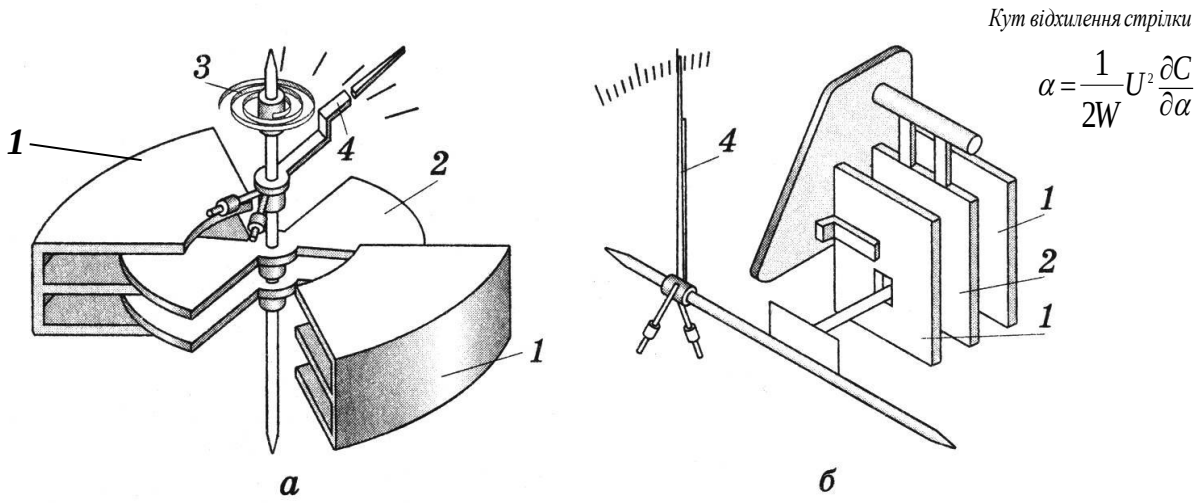
Основні властивості електродинамічних приладів: висока точність, незалежність показів від форми кривої; придатність для постійного і змінного струмів; велике власне споживання (від долей Вт); чутливість до перевантажень, досить висока вартість.

3.4 Електростатичні прилади

В цих приладах обертовий момент утворюється внаслідок взаємодії двох або і більше заряджених електродів, розділених діелектриком, як правило – повітрям. Шкала приладів рівномірна за винятком початкової частини (рис. 6 і додаток 3).

Обертовий момент: $M_{об} = K_M U^2$.

K_M – коефіцієнт який визначається конструкцією вимірювального механізму.



1- нерухомі електроди, 2- рухомі електроди, 3- спіральні пружини;
4 – стрілка.

Рис. 6. Прилад електростатичної системи.

Вимірювальна напруга підводиться до рухомих та не рухомих електродів. На постійній напрузі вхідний опір надзвичайно великий (практично можна вважати безмежним), а при змінній – визначається емністю вимірювального механізму (як правило, кілька пікофарад) і частотою напруги.

Основні властивості: придатність як для постійної так і для змінної напруг, незалежність показів від форми кривої, зовнішньої температури і зовнішніх магнітних полів; широкий частотний діапазон (до 5...14 МГц); дуже мале власне споживання; мала чутливість. Використовуються в переносних і щитових вольтметрах діючого значення напруги.

3.5 Термоелектричні прилади

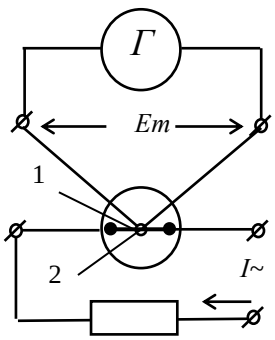


Рис. 7.

Термоелектричні прилади мають механізм, який являє собою сполучення гальванометра магнітоелектричної системи з термоперетворювачем, який складається з нагрівача і термопари (рис. 7), змінний струм I протікає по нагрівачу 1, який виділяє тепло. Це тепло нагріває місце спаю 2 термопари. На холодних кінцях термопари утворюється термо-ЕРС E_T і в гальванометрі

виникає струм.

Ці прилади використовують переважно для вимірювань змінних струмів високої частоти до 25 МГц і їх покази не залежать від форми кривої струму. Основний недолік – висока чутливість до перевантаження. Вони витримують перевантаження по струму приблизно в 1,5 рази.

3.6 Характеристики приладів

Для отримання необхідної інформації про метрологічні та технічні характеристики приладів на їх шкалах наносять відповідні графічні, буквенні та цифрові позначення (див. табл.1).

Переваги, недоліки та основні характеристики приладів різних систем наведені в додатках 1 і 2, а в додатках 3 і 4 наведені технічні характеристики вольтметрів типу С50 та амперметрів типу Э514.

Метрологічними характеристиками вимірювальних приладів називають ті, які впливають на похибки результатів вимірювань, виконаних цими засобами.

До основних метрологічних характеристик належать:

- номінальне значення вимірюване приладом;
- ціна поділки шкали;
- кількість розрядів, ціна найменшого розряду для цифрових приладів;
- характеристики сумарної або систематичної і випадкової складових похибки ЗВ;
- варіація показів ЗВ;
- вхідний імпеданс ЗВ;
- динамічні характеристики ЗВ;
- характеристики додаткових похибок ЗВ.

Для визначення похибок ЗВ при вимірюваннях користуються формулами:

- для визначення основної похибки Δ:

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

де γ – клас точності приладу (приведена похибка).

X_N –діапазон вимірювання даним ЗВ (в основному – кінцеве значення робочої частини шкали, якщо нульова позначка з краю шкали);

- для визначення відносної похибки δ:

у відносних одиницях -

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{вим}};$$

або в відсотках

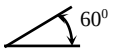
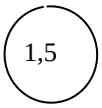
$$\delta = \frac{\Delta}{X_{вим}} 100.,$$

де $X_{вим}$ – виміряне значення (показ приладу).

Таблиця 1.Умовні графічні і буквенні позначення які наносять на шкали електровимірювальних приладів

Символ на шкалі приладу	Значення символу		Символ на шкалі приладу	Значення символу	
A	Ампер	Вимірювальна величина	*б* *а*	*а*-магнітоелектрична *б* - логометрична	Система приладу
V	Вольт			Магнітоелектрична з рухомим магнітом	
W	Ват			Електромагнітна	
Hz	Герц		б	Електродинамічна б - логометрична	
Ω	Ом			*Феродинамічна*	
T	Тесла			*Індукційна*	
—	Постійний	Рід струму		Теплова з нагріваючою ниткою	
⎓	Постійний та змінний			Термоелектрична з неізольованою термопарою	
~	Змінний *однофазний*			Термоелектрична з ізольованою термопарою	
≋	Змінний трифазний			Електростатична	
≋	Змінний трифазний з асиметричним навантаженням			Вібраційна	
☆	500 В	Напруга випробування ізоляції приладу		Випрямляч	Наявність елементів в приладі
☆ 2	2 кВ			Електронні елементи	
0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5: 4,0	Клас точності приладу в відсотках від номінального значення			Шунт	
⚠	Увага! Необхідно ознайомитись з додатковими вказівками , наведеними в паспорті приладу			Додатковий опір	

продовження таблиці 1.

<table>
<tr><td>0,02 Ом
0,005 mH</td><td colspan="2">Номінальний активний опір та індуктивність послідовного кола приладів</td><td></td><td colspan="2">Прилад магнітоелектричної системи з випрямлячем</td></tr>
<tr><td></td><td>Вертикальне</td><td rowspan="3">Робоче положення шкали приладу</td><td>А</td><td>Для закритих сухих опалювальних приміщень</td><td rowspan="4">Захист від впливу зовнішнього середовища</td></tr>
<tr><td></td><td>Горизонтальне</td><td>Б</td><td>Для закритих сухих не опалювальних приміщень</td></tr>
<tr><td></td><td>Похиле, нахил 60°</td><td>В</td><td>Для польових і морських умов та рухомих установок</td></tr>
<tr><td></td><td>Захист від зовнішніх магнітних полів</td><td rowspan="3">Захист від дії зовнішнього поля</td><td>Т</td><td>Для умов сухого і вологого тропічного клімату</td></tr>
<tr><td></td><td>Захист від зовнішніх електричних полів</td><td></td><td colspan="2">Коректор нуля</td></tr>
<tr><td>ast</td><td>Астатичний прилад</td><td>1,5</td><td>Від діапазону вимірювання по шкалі</td><td rowspan="3">Позначення класу точності (значення основної похибки в відсотках)</td></tr>
<tr><td>Fe</td><td>На щиті з сталі любої товщини</td><td rowspan="3">Встановлення приладу</td><td></td><td>Від довжини шкали</td></tr>
<tr><td>Fe5</td><td>На щиті з сталі товщиною 5 мм</td><td></td><td>Від виміряного дійсного значення</td></tr>
<tr><td>NFe</td><td>На не стальному щиті любої товщини</td><td></td><td colspan="2">Небезпека дотику до приладу</td></tr>
<tr><td>Fe*NFe</td><td>На любому щиті любої товщини</td><td></td><td colspan="2">Захисна ізоляція</td></tr>
<tr><td>ТТ $\frac{100}{5}$</td><td colspan="2">Приміняти з трансформатором струму 100 А на 5 А</td><td>ТН $\frac{3000}{100}$</td><td colspan="2">Приміняти з трансформатором напруги 3000 В на 100 В</td></tr>
<tr><td>НШ 75 мВ</td><td colspan="2">Приміняти з зовнішнім шунтом на 75 мВ</td><td>•</td><td colspan="2">Означає початок чи кінець робочої частини шкали</td></tr>
</table>

4 Самостійна робота

(Виконується при підготовці до лабораторної роботи)

Кожен студент в якого № залікової книжки закінчується на 1, 3, 5, 7, вибирає шкалу з додатку 3, а в кого на 4, 6, 8, – з додатку 4 на 1 А, а в кого на 2, 9, 0 – з додатку 4 на 2 А і виконує наступне:

1 Зарисовує в заготовці "Звіт по лабораторній роботі" шкалу в натуральному розмірі з усіма написами та позначками.

2 Розписує розшифровку всіх написів та позначок шкали.

3 Вичислює абсолютну та відносну похибки для **оцифрованих** поділок робочої частини шкали, отримані дані заносить в таблицю 2.

Таблиця 2

Оцифровані поділки	1	2	3	…	Остання поділка
Показ приладу, А*					
Абсолютна похибка Δ, А*					
Відносна похибка δ,					
Відношення похибок, δ/δ_{min}					

*- поставити значення відповідно з вибраною шкалою.

4 Будує графіки залежності абсолютних і відносних похибок від показів.

5 Робить аналіз і записує висновок по отриманих результатах.

5 ОПИС ДОСЛІДНОІ УСТАНОВКИ

Лабораторна робота виконується на учбових зразках аналогових електровимірювальних приладах та їх шкалах з приміненням монтажного інструменту.

6 ХІД ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

6.1 Розібрати прилад: - зняти корпус, зняти інші деталі, які заважають детальному огляду і вивченню будови приладу.

6.2 Вивчити будову, конструктивні особливості та уяснити зв'язок метрологічних характеристик з конструкцією приладу і його вузлів.

6.3 Прослідкувати шлях продження струму по деталях приладу від входу в одну клему до виходу з другої, Зарисувати електричну схему приладу зпозначенням всіх елементів через які пролходить струм. В приладах з оптичним відліком зарисувати хід променів.

6.4 Вивчити яким чином технічні і метрологічні характеристики можна визначити маючи перед собою прилад.

6.5 Зібрати прилад і здати лаборанту.

7 ЗВІТ

1 Описати принцип дії вимірювальної системи заданого приладу.

2 Нарисувати включення приладу в вимірювальні схеми як пряме так і за допомогою вимірювальних перетворювачів (шунтів, вимірювальних трансформаторів, дільників напруги, випрямляючих елементів та інших).

3 Описати переваги і недоліки вимірювальої системи.

4 Намалювати шкалу в натуральну величину з усіма написами і позначками. Подати розшифровку всіх позначок і написів на шкалі приладу.

5 Визначити основні метрологічні характеристики приладу і умови його експлуатації. Вичислити абсолютну та відносну похибки для оцифрованих поділок, дані занести в таблицю аналогічну табл. 2.

6. Побудувати графіки залежності абсолютної та відносної похибок від показів приладу. Проаналізувати отримані графіки похибок.

7 Підвести підсумок виконання роботи у **висновку** пояснити:

- позитивні і негативні властивості досліджуваних систем приладів;
- розподіл абсолютної і відносної похибок по шкалі приладу;
- в якій частині діапазону вимірювань необхідно використовувати даний прилад і чому;
- чим викликана необхідність виробляти прилади на різні діапазони вимірювань і різних класів точності.

8 Запитання для самоперевірки

1 Які є похибки електровимірювальних приладів і як вони визначаються?

2 Системи електровимірювальних приладів та принцип їх роботи.

3 Яким основним вимогам повинні задовільняти вимірювальні прилади?

4 Поясніть принцип дії вимірвальної системи заданого приладу і намалювати її, знати обертові моменти різних вимірювальних систем.

5 Нарисувати включення приладу в вимірювальні схеми як пряме так і з перетворювачами.

6 Подати розшифровку всіх позначок і написів на шкалі приладу.

7 Дати визначення класу точності приладу, як його визначають і як позначають.

8 Визначити основні метрологічні характеристики приладу (в тому числі абсолюту, відносну і зведену похибки для заданого значення показів) і умови його експлуатації.

9 Вказати обертові моменти для різних вимірювальних систем.

10 Пояснити позитивні і негативні властивості різних систем приладів.

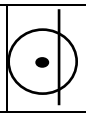
11 Пояснити в якій частині діапазону вимірювань необхідно використовувати даний прилад і чому.

12 Пояснити чим викликана необхідність виробляти прилади на різні діапазони вимірювань і різних класів точності.

13 Як захищають вимірювальні механізми від впливів зовнішніх магнітних та електричних полів?

Додаток 1

Переваги і недоліки вимірювальних механізмів

	Параметри					
ПЕРЕВАГИ	1. Висока точність	+		+		
	2. Висока чутливість	+				
	3. Рівномірна шкала	+		+		
	4. Відсутність впливу зовнішніх магнітних полів	+				
	5. Мале споживання енергії	+				+
	6. Простота будови і міцність конструкції		+		+	
	7. Допускає короткочасне перевантаження		+		+	
	8. Відсутність втрат в сердечнику			+		+
	9. Вимірювання великих струмів		+			
	10. Вимірювання високих напруг					+
	11. Низька вартість		+		+	
НЕДОЛІКИ	1. Значна температурна залежність				+	
	2. Велика залежність показів від частоти		+		+	
	3. Вплив зовнішніх магнітних полів		+		+	
	4. Нерівномірна шкала		+		+	+
	5. Низька чутливість		+	+	+	+
	6. Невисока точність		+		+	
	7. Не витримує перевантажень	+		+		
	8. Не міряє безпосередньо змінний струм	+				

Додаток 2

Характеристика приладів різних систем

Система приладу	Рід струму	Величина, що вимірюється	Діапазон частот	Форма сигналу
Електро-магнітна	≂	діючі значення I, U	до 3000 Гц	довільна
Електро-динамічна	≂	діючі значення I, U	до 5000 Гц	довільна
Термо-електрична	≂	діючі значення I, U	до 25 МГц	довільна
Електро-статична	≂	діючі значення U	до 14 МГц	довільна
Електронно-вимірювальні з магнітоелект-ричним приладом	≂	діючі значення I, U	до 1000 МГц	довільна
Амплітудні електронні вольтметри	~	максимальне значення $I^{\max}$, $U^{\max}$	до 1000 кГц	довільна
Цифрові	≂	діючі значення I, U	до 1000 МГц	довільна
Магніто-електрична	—	постійна складова (середнє зна-чення за період)	-	довільна
Магніто-електрична з випрямлячем	~	середнє зна-чення по модулю $\lvert I^{\text{ср}}\rvert, \lvert U^{\text{ср}}\rvert$	до 20 кГц	синусоїдна

Додаток 3

Вольтметри типу С50

Переносні вольтметри електростатичної системи призначені для вимірювання напруги змінного і постійного струмів.

Прилади використовують при температурі навколишнього середовища від плюс 15 до плюс 35 °С і відносної вологості до 80 % (при плюс 30 °С). По стійкості до механічних впливів прилади належить до звичайних. По ступені захищеності від зовнішніх електричних полів належать до категорії І,для цього вимірювальний механізм поміщають в мідний екран. Прилади класу точності 1,0. Кінцеві значення діапазону вимірів і вхідна ємність одногранічних вольтметрів різних модифікацій приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Модифікація вольтметра	Кінцеве значення діапазону вимірів, В	Вхідна ємність, пФ	Модифікація вольтметра	Кінцеве значення діапазону вимірів, кВ	Вхідна ємність, пФ
С50/1	30	10	С50/6	1	4
С50/2	75	7	С50/7	1 5	4
С50/3	150	7	С50/8	3	4
С50/4	300	7	С50/9	0,45	7
С50/5	600	4			

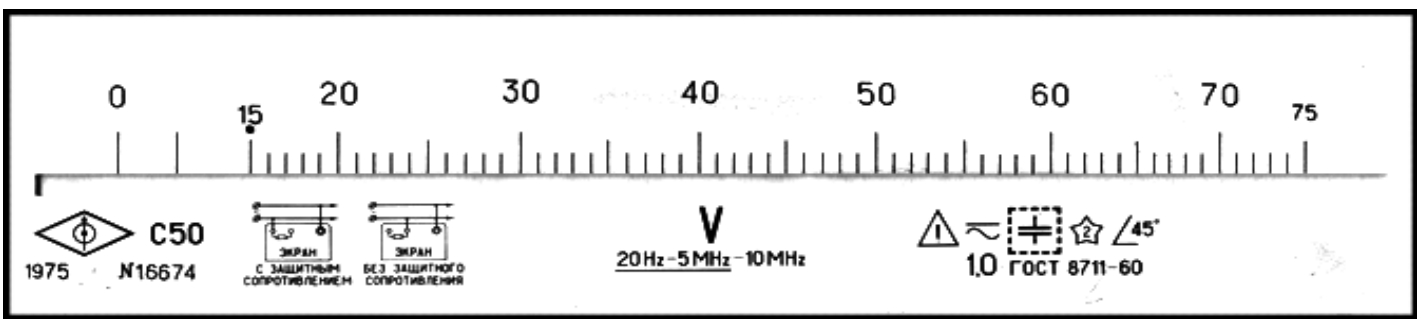
Номінальна область частот від 20 Гц до 2,5 МГц. Розширена область частот для всіх модифікацій вольтметрів (крім приладу типу С50/8) - від 2,5 до 6 МГц; розширена область частот для вольтметра типу С50/8-від 2,5 до 5 МГц.

Час заспокоєння рухомої частини приладу на межі виміру 30 В не перевищує 10 с, на інших межах виміру — 6 с. Корпус вольтметра пластмасовий. Рухома частина приладу укріплена на разтяжках. Відліковий пристрій — світловий покажчик. Довжина шкали 130— 140 мм.

Габаритні розміри приладів 205×270×133 мм, маса 3,5 кг.

Прилади відповідають ГОСТ 8711-60 і ТУ 25-04-687-70.

Шкала приладу С50



Додаток 4

Амперметри типу Э514

Переносні амперметри призначений для виміру змінного і постійного струмів.

Амперметри типів Э514/1 — Э514/3 використовуються при температурі навколишнього повітря від плюс 10 до плюс 35 °С і відносної вологості до 80 % (при 30 °С)— група А, ГОСТ 1854-59. Амперметри типів Э514/4 і Э514/5 використовуються при температурі від плюс 15 до плюс 35 °С і відносної вологості до 80 % (при 30 °С).

По стійкості до механічних впливів прилади відносяться до звичайних.

По ступені захищеності від зовнішніх магнітних впливів прилади відносяться до категорії II, для цього вимірювальний механізм поміщають в екран з магнітомягкого заліза типу Армко.

Клас точності приладів 0,5 і 1,0.

Основні параметри приладів приведені в табл. 1.

Час заспокоєння рухомої частини приладу 4 с.

Габаритні розміри приладу типу Э514 140×195×105 мм, маса 1,6 кг.

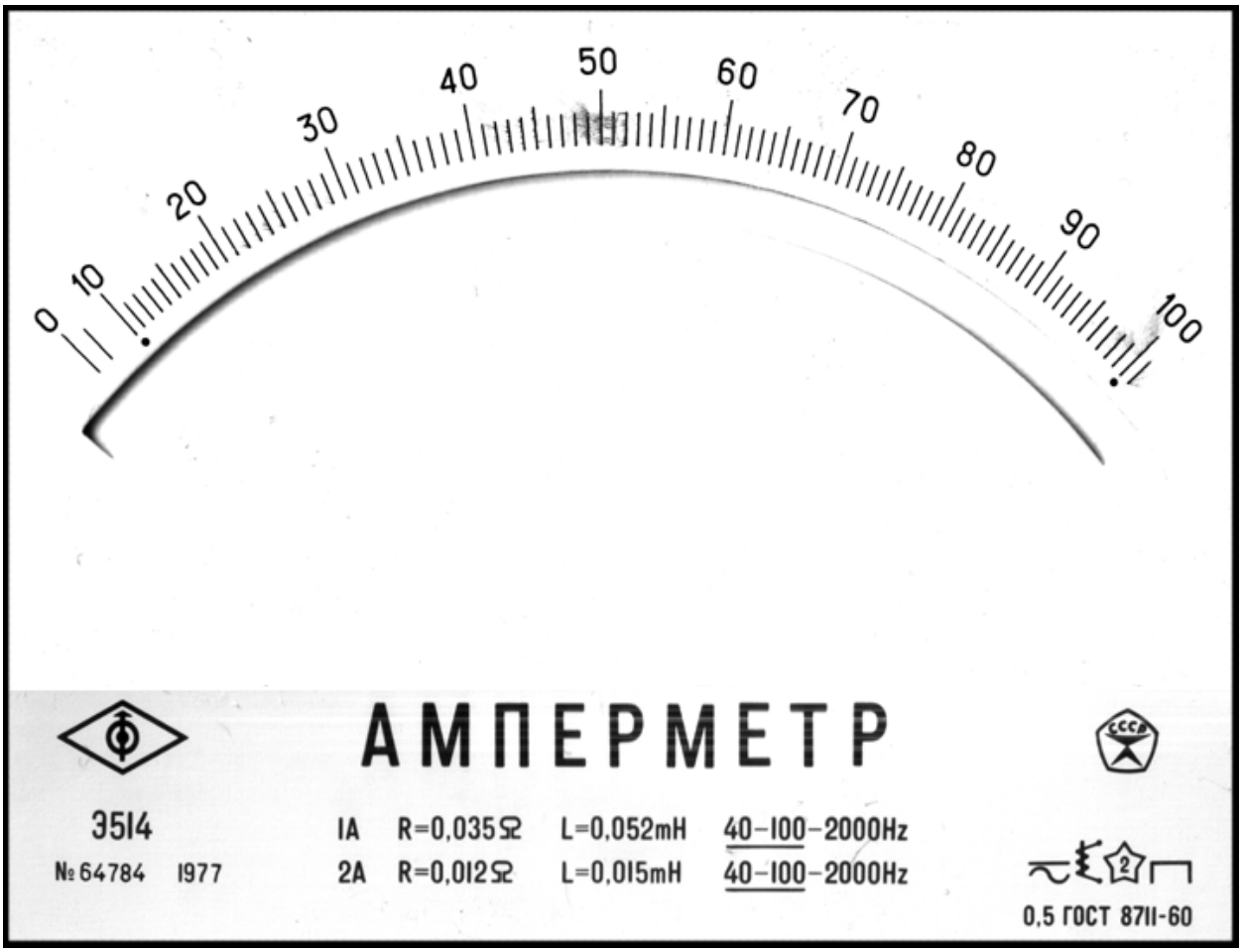
Корпус приладу пластмасовий. Рухома частина приладів укріплена на розтяжках. Відліковий пристрій — стрілочний покажчик з дзеркальним відліком показів. Довжина шкали 113мм.

Прилади відповідають ГОСТ 8711-60 і ТУ 25-04-1370-73.

Таблиця 1

Модифікація амперметра	Клас точності	Кінцеве значення діапазону вимірювань	Область частот		Номінальний опір, Ом	Номінальна індуктивність, мГ
			номінальна	розширена		
Э514/1	0,5	1 А	40-100	100-2000	0,035	0,052
		2 А			0,012	0,015
Э514/2		2,5 А	40-60	60-1500	0,012	0,014
		5 А			0,005	0,003
Э514/3		5 А	40-100	100-2000	0,008	0,0028
		10 А	40-60	60-1500	0,004	0,008
Э514/4	1,0	2,5 А	40-1500	1500-3000	0,012	0,014
		5 А			0,005	0,005
Э514/5		5 А			0,008	0,0028
		10 А			0,004	0,008

Шкала приладу Э514



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2
ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ, НАПРУГИ, ПОТУЖНОСТІ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМІВ

Мета роботи

1 Освоїти вимірювання струму, напруги, потужності в колах постійного та змінного струмів.

2 Навчитись складати схеми з амперметрами, вольтметрами, ватметрами, шунтами і додатковими резисторами.

3 Вивчити способи розширення границь вимірювання приладів за допомогою шунтів, додаткових резисторів, трансформаторів струму та напруги.

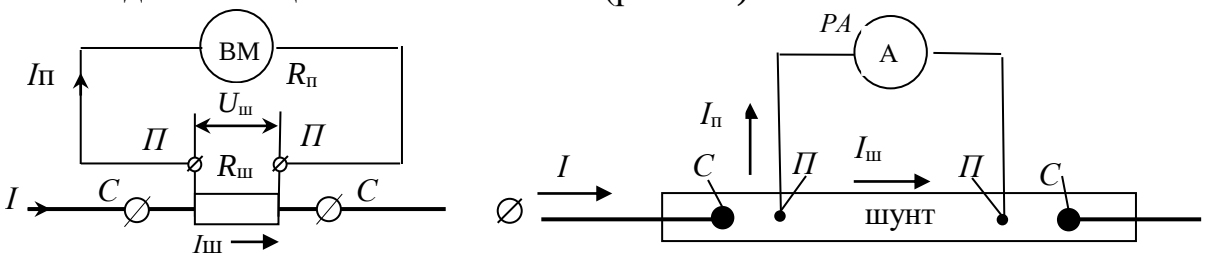
4 Освоїти розрахунок шунтів і додаткових резисторів.

5 Перевірити нове градуювання електровимірювального приладу із розрахованими шунтом і додатковим резистором, вирішити до якого класу точності можна віднести модернізований прилад.

1 Стислі теоретичні положення

1.1 Шунти

Шунт використовується для розширення границі виміру приладу по струму і являє собою ввімкнений у коло вимірюваного струму резистор, паралельно якому під'єднано прилад. При цьому через прилад протікає лише частина вимірюваного струму, і тим менша, чим менше опір шунта $R_ш$ порівняно з внутрішнім опором приладу $R_п$. Для усунення впливу опорів контактних з'єднань шунти мають два струмові *С* і два потенціальні *П* затискачі (рис. 1.1).



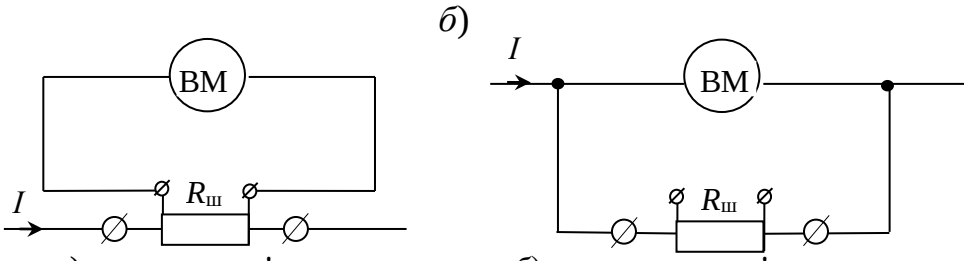
а) Зображення на схемах; *б*) Загальний вид.

Рис. 1.1.

ВМ - вимірний механізм; $I_п$ - струм, який протікає через прилад; *I* - струм, який вимірюють; $I_ш$ - струм шунта; $U_ш$ – напруга яка падає на шунті; *П*- потенційні затискачі; *С* – струмові затискачі.

Шунти можуть монтуватися в середині приладу або окремо від нього. З'єднують прилад з виносним шунтом короткими провідниками достатньо великого січення, щоб опір їх був значно менший опору шунта.

I



а) правильне з'єднання; *б*) неправильне з'єднання.

Рис. 1.2.

Провідники електричного кола повинні під'єднуватися до шунта, а не до приладу (рис. 1.2*а*).

Якщо провідники кола під'єднати до приладу, то при випадковому від'єднанні шунта весь струм кола пройде через прилад, що спричинить вихід його з ладу.

Якщо граничне значення вимірюваного струму дорівнює I, а струм повного відхилення приладу $I_п$, то опір шунта $R_ш$ визначають виходячи з того, що

$$I_п R_п = (I - I_п) R_ш.$$

Звідки

$$R_ш = \frac{R_п}{I/I_п - 1}, \quad \text{або} \quad R_ш = \frac{R_п}{n-1},$$

де $n = I/I_п$ - коефіцієнт, який показує в скільки раз розширюємо діапазон вимірювання приладу.

Наприклад, при необхідності розширення діапазону вимірювання мікроамперметру М26ОМ ($I_п$=100 мкА і $R_п$=2000 Ом) до значення I=10 мА необхідно використати шунт опором

$$R_ш = R_п/((I/I_п)-1) = 2000/((0{,}01/0{,}0001)-1) = 2000/(100-1) = 20{,}2 \text{ Ом}.$$

В результаті розширення границі вимірювання приладу за рахунок шунта, змінюється його ціна поділки, що необхідно врахувати при відліку.

Наприклад, в приведеному випадку шкала мікроамперметра М26ОМ має N=20 поділок і, отже, його постійна (ціна поділки) $C_п$ має значення:

$C_п = I_п/N = 100/20 = 5$ мкА/поділку - при відсутності шунта;

$C_{пш} = I/N = 10/20 = 0{,}5$ мА/поділку - при під'єднанні шунта.

Переносні прилади часто комплектуються багатограничними шунтами, які складаються з декількох резисторів і які перемикаються в певній послідовності, в залежності від необхідної границі вимірювання. Як і багатограничні, часто використовуються так звані універсальні шунти. Схеми шунтів на п'ять і три границь вимірювання зображена на рис. 1.3.

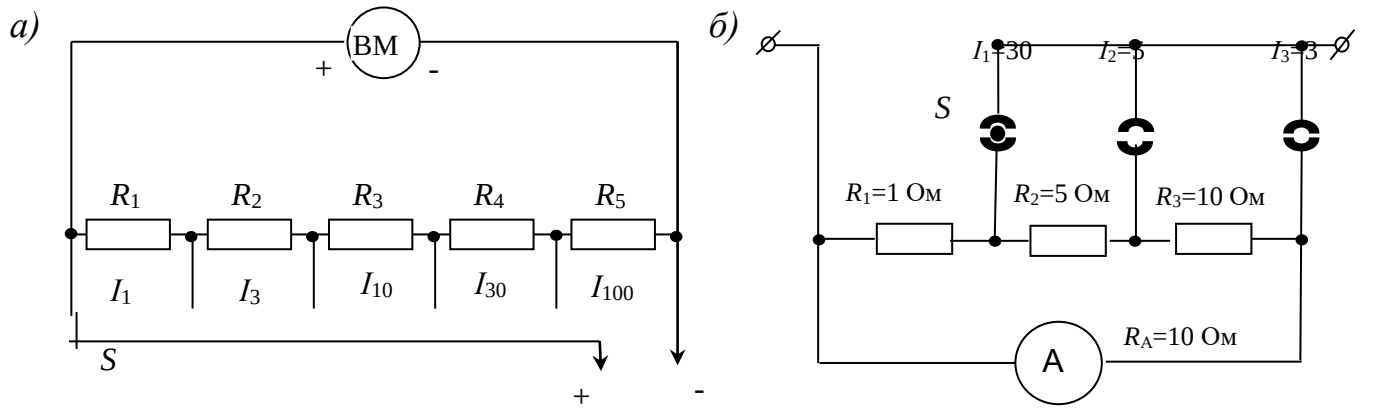


Рис. 1.3. Багатомежовий шунт з ричажним а) і штапсельним *б*) перемикачами.

Порядок розрахунку таких шунтів наступний. Маємо мікроамперметр, у якого $I_п$=200 мкА і $R_п$=800 Ом. Необхідно розширити його границі виміру до 1, 3, 10, 30, 100 мА, тобто, прилад буде мати п’ять діапазонів виміру.

Для цього спочатку визначаємо опір всього шунта- $R_ш$, тобто, шунта найменшого діапазону вимірювань.

$R_ш=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5$, який відповідає найменшій границі виміру (1мА);

$R_ш=R_п/((I/I_п)-1)=800/((0,001/0,0002)-1)=200$ Ом.

Потім розраховуємо опори окремих резисторів, починаючи з R5:

$R_5=(I_п/I_{100})(R_ш+R_п)=(0,0002/0,1)(200+800)=2$ Ом;

$R_4=(I_п/I_{30})(R_ш+R_п)-R_5=(0,0002/0.03)(200+800)-2=4,67$ Ом;

$R_3=(I_п/I_{10})(R_ш+R_п)-(R_4+R_5)=(0.0002/0.01)1000-(2+4,67)=13,33$ Ом;

$R_2=(I_п/I_3)(R_ш+R_п)-(R_3+R_4+R_5)=(0,0002/0,003)1000-(2+4,67+13,33)=46,67$ Ом;

$R_1=(I_п/I_1)(R_ш+R_п)-(R_2+R_3+R_4+R_5)=$

$=(0,0002/0,001)1000-(2+4,67+13,33+46,67)=133,33$ Ом.

Шунти виготовляють з манганіну і інших матеріалів з високим питомим опором і малим температурним коефіцієнтом та обладнують двома парами затискачів П та С (див. рис. 1.1). Індивідуальний шунт використовують лише з тим приладом, який градуювався з даним шунтом. Стандартні шунти випускаються на напруги: 45; 75; 100 або 150 мВ їх можна використовувати з приладам, номінальна напруга якого відповідає зазначеній на шунті. По точності шунти діляться на п'ять класів: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 1,0. Клас точності визначає в відсотках допустиме відхилення опору, а, відповідно, і напруги на шунті, від їх номінальних значень.

Шунти переважно використовуються в колах постійного струму, оскільки при змінному струмі на розподіл струмів впливають частота і індуктивність елементів. Шунти широко використовуються разом з приладами магнітоелектричної системи. В разі використання приладу з зовнішнім шунтом, на його шкалі наноситься напис наприклад, “НШ 75 мВ”, що означає, що даний прилад включається в коло з зовнішнім шунтом на напругу 75 мВ і шкала приладу градуйована з його врахуванням.

Додаткові резистори

Додатковий резистор використовують для розширення границь виміру напруги і, одночасно, для зменшення впливу температури на опір вольтметра, тобто для зменшення температурної похибки. Додатковий резистор $R_Д$ виготовляють з манганіну і вмикають послідовно з вимірним приладом (рис. 1.4). Використовують точні малогабаритні провідникові і мікропровідникові резистори, а також непровідникові резистори підвищеної стабільності (прицезійні) та високочастотні, які виготовляються з допусками до ±0,1 % і мають мінімальний температурний коефіцієнт опору в робочому інтервалі температур.

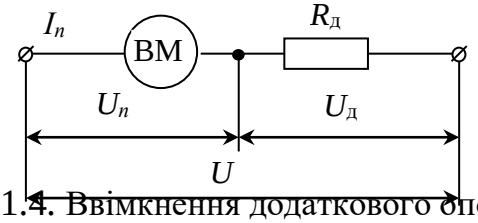


Рис. 1.4. Ввімкнення додаткового опору $R_д$.

В наслідок ввімкнення додаткового резистора вхідний опір кола вольтметра $R_{вх}$ підвищується і стає рівним

$$R_{вх} = R_п+R_д,$$

де $R_п$ – внутрішній опір вимірного механізму.

Опір додаткового резистора визначають по формулі

$$R_д=R_п(p\text{-}1),$$

де p – число, яке вказує, в скільки разів необхідно збільшити границю виміру вольтметра;

$R_п$ - внутрішній опір приладу.

Приклад. Мілівольтметр М24 має границю виміру $U_п$ = 100 мВ і струм повного відхилення $I_п$=6 мА, що відповідає $R_п$=16,7 Ом. Якщо необхідно розширити границю виміру цього приладу до U = 1000 мВ (тобто $p=U/U_п$=10), то послідовно з приладом необхідно приєднати резистор з опором

$$R_д=R_в(p\text{-}1)=16{,}7(10\text{-}1)=150{,}3 \text{ Ом}.$$

Внаслідок приєднання резистора $R_д$ постійна приладу збільшилася з 1 мВ на поділку до 10 мВ на поділку (прилад має 100 ділень), що необхідно врахувати при відліку показів по приладу, а вхідний опір кола збільшився до значення

$$R_{вх}=R_п+R_д=16{,}7+150{,}3=167 \text{ Ом}.$$

Незважаючи на значне збільшення, вхідний опір залишається низьким і такий вольтметр є непридатним для виміру режимів в радіоелектронній апаратурі, де переважно використовують вольтметри, які виконані на базі високочутливих мікроамперметрів з струмом відхилення 50 – 100 мкА. Для подібних приладів в паспорті часто вказують струм повного відхилення і внутрішній опір.

По цих даних можна визначити падіння напруги $U_п$ на приладі

$$U_п=I_пR_{вх},$$

яке відповідає повному відхиленню стрілки ВМ. Для високочутливих мікроамперметрів це значення складає десятки і сотні мілівольт.

Опір додаткового резистора для такого вольтметра можна визначити по формулі

$$R_д = \frac{U_п}{I_п} - R_п,$$

де $U_п$ - гранична напруга, яку можна виміряти приладом при новому значенні $R_д$.

Наприклад. На базі мікроамперметра М94 ($I_п$=100 мкА; $R_п$=850 Ом, $U_п$=85 мВ) виготовити вольтметр з границями виміру: 1; 10 і 20 В (рис. 1.5).

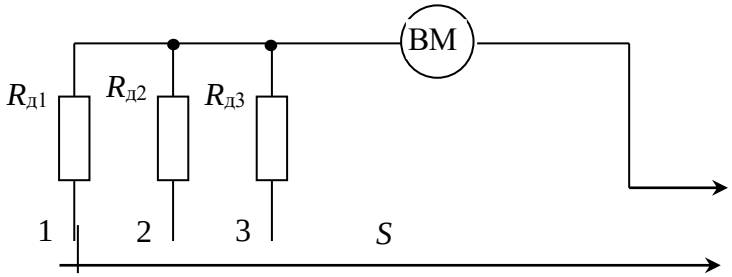


Рис. 1.5.

Опори додаткових резисторів для цих границь відповідно будуть:

для діапазону 1 В:

$$R_{д1}=(U_{п1}/I_п)-R_п=(1/0{,}0001)-850=9150 \text{ Ом};$$

для діапазону 10 В:

$$R_{д2}=(10/0{,}0001)-850=99150 \text{ Ом};$$

для діапазону 20 В:

$$R_{д3}=(20/0{,}0001)-850=199150 \text{ Ом}.$$

Вхідні опори кіл вольтметру при цьому будуть:

для діапазону 1 В:

$$R_{вх1}=R_п+R_{д1}=850+9150=10 \text{ кОм};$$

для діапазону 10 В:

$$R_{вх2}=R_п+R_{д2}=850+9{,}9150=100 \text{ кОм};$$

для діапазону 20 В:

$$R_{вх3}=R_п+R_{д3}=850+1{,}9950=200 \text{ кОм}.$$

Результати розрахунку показують, що на різних границях виміру вольтметр має різні вхідні опори. Для зручності порівняння багатограничних вольтметрів і оцінки їх впливу на режим вимірного кола, використовують значення не вхідного, а так званого - відносного вхідного опору $R_{вх.в}$, який чисельно дорівнює опору, що припадає на напругу 1 В. Цей опір визначають наступним чином:

$$R_{вх.в}=1/I_п.$$

В розглянутому прикладі

$$R_{вх.в}=10 \text{ кОм}.$$

Калібровані додаткові резистори діляться на шість класів точності: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 і виготовляються на номінальні струми 0,5; 1; 3; 5; 7,5; 15; 30 мА.

Калібрований резистор може використовуватися з довільним приладом, номінальний струм якого дорівнює номінальному струмові додаткового резистора.

Індивідуальний резистор використовують лише з тим приладом, який з ним градуювався.

1.3 Вимірювальні трансформатори змінного струму

Вимірювальні трансформатори струму (ТС) і напруги (ТН) використовують як перетворювачі з певною точністю великих змінних струмів і напруг у відносно малі струми і напруги, допустимі для вимірювань приладами з невеликими стандартними границями вимірювань (як правило, амперметри на 5 А, вольтметри на 100 В).

За принципом дії вимірювальні трансформатори подібні до силових і складаються із двох ізольованих одна від одної обмоток, намотаних на феромагнітному осерді: первинної з числом витків w_1 і вторинної з числом витків w_2. В трансформаторах струму, як правило, первинний струм I_1 більший за вторинний I_2, то і $w_1 < w_2$. В трансформаторах напруги первинна напруга U_1 більша вторинної U_2, тому в них $w_1 > w_2$.

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}; \qquad K_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2};$$

Первинну обмотку трансформатора струму включають у вимірювальне коло послідовно, а трансформатора напруги – паралельно. Вимірювальні прилади включають у вторинну обмотку (рис. 1.6 і 1.11).

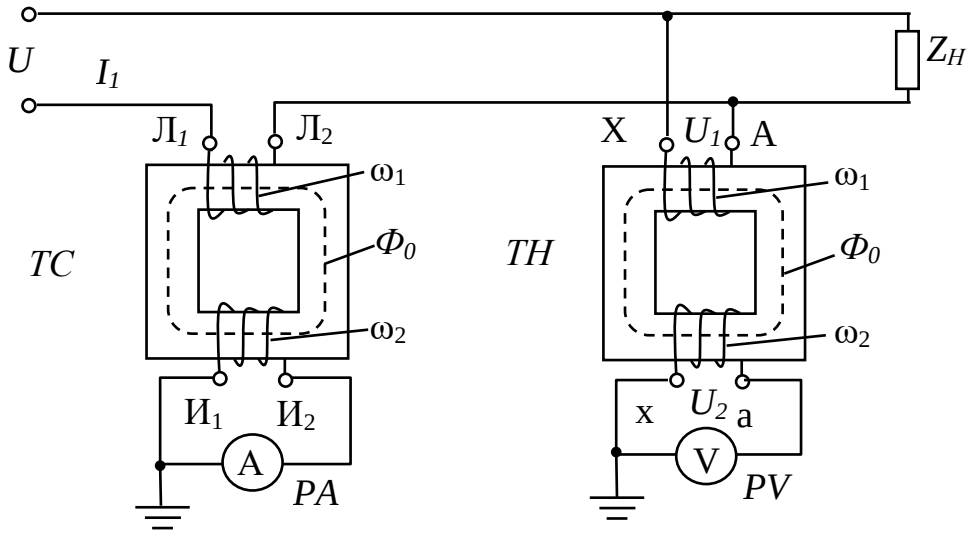


Рис 1.6. Монтажна схема включення трансформаторів струму і напруги

За показами приладів визначають значення вимірювальних величин. Для цього необхідно покази приладів помножити на коефіцієнти трансформації K_I або K_U. Для трансформаторів струму $K_I = I_1 / I_2$, а для трансформаторів напруги $K_U = U_1 / U_2$. Коефіцієнти K_I і K_U *називають дійсними коефіцієнтами трансформації*, але в зв'язку з тим, що вони залежать від значень струмів і напруг, характеру і значення навантаження вторинного кола, частоти струму і конструкції

трансформатора, то покази приладів множать не на дійсні, а на *постійні номінальні коефіцієнти трансформації:*

$$K_{Iн} = I_{1н} / I_{2н}; \quad K_{Uн} = U_{1н} / U_{2н}.$$

Номінальні коефіцієнти трансформації вказують в паспортах трансформаторів. Дійсні коефіцієнти трансформації K_{I} і K_{u} залежать від значень опору вторинного кола, напруги і струму в первинному колі. Із-за чого виникають відносні похибки коефіцієнтів трансформації:

$$\delta_I = \frac{K_{Iн} - K_I}{K_I} 100\,\% \quad ; \quad \delta_U = \frac{K_{Uн} - K_U}{K_U} 100\,\% \quad .$$

Числові значення найбільших допустимих похибок δ_u і δ_I при установлених експлуатаційних нормах визначають класи точності трансформаторів. Крім того, трансформатори характеризуються ще і кутовою похибкою, яка визначається як кут зсуву між вектором первинного і повернутим на 180° вектором вторинного струму (рис. 1.7). Якщо повернутий вектор випереджує первинний похибка рахується позитивною. *Кутова похибка відображається на результатах вимірів тільки фазочутливими приладами таких як ватметри, лічильники і ін*.

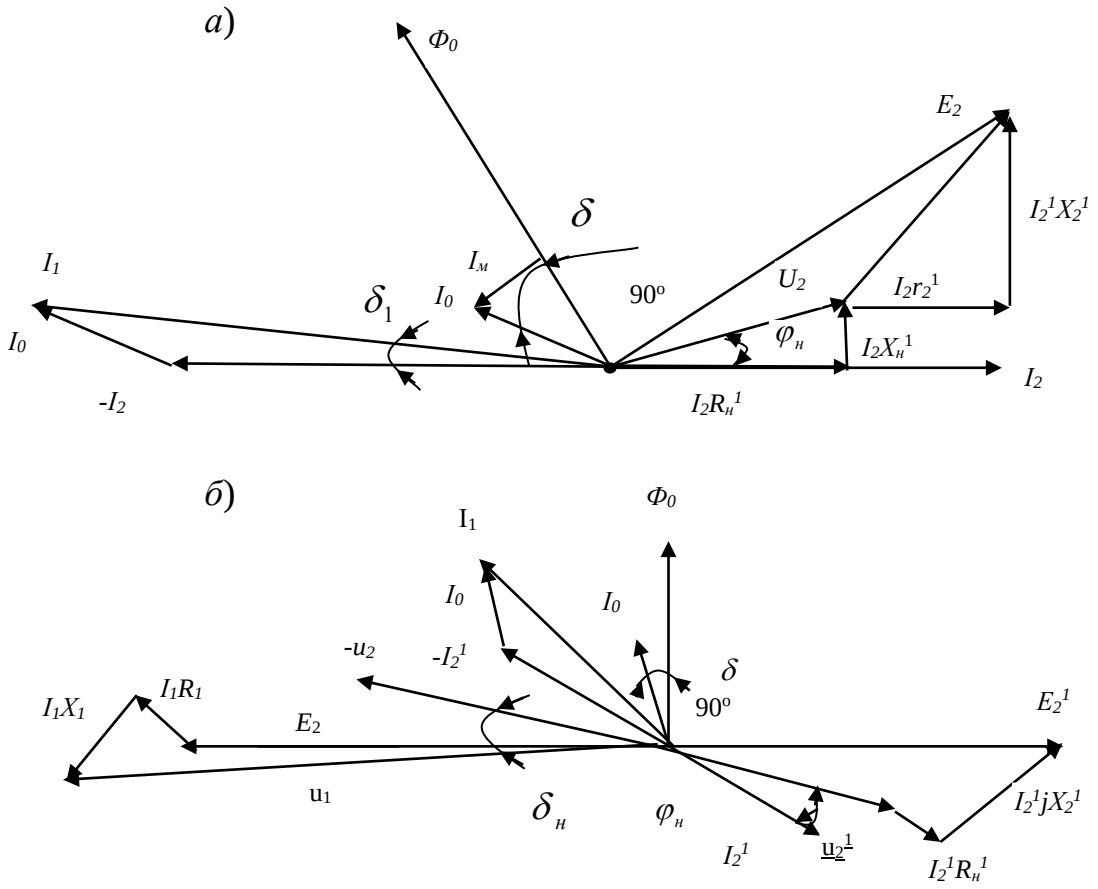


Рис. 1.7. Векторна діаграма трансформатора струму *а* і трансформатора напруги *б*

На рис. 1.7. приведена векторна діаграма трансформатора струму і трансформатора напруги. При побудові векторної діаграми користуються величинами вторинного кола, приведеними до первинної, позначаючи їх буквами зі

штрихами. Число витків первинної і вторинної обмоток через w_1 і w_2, відповідно, для трансформатора струму $w_{1<} w_2$ і для трансформатора напруги $w_{1>} w_2$.

При побутові векторної діаграми трансформатора струму, вектор вторинного струму I_2 відкладений в довільному напрямку (рис. 1.7*а*).

На графіках - I_1 *і* I_2 - відповідно струми в первинній і вторинній обмотках; Φ_0 – магнітний потік в сердечнику; E_2 – ЕРС яка наводиться потоком Φ_0 у вторинній обмотці; U_2 – напруга на вторинних затискачах трансформатора; r і x складові комплексного опору навантаження; r_2 і x_2 - відповідні комплексні опори вторинної обмотки.

Напруга на вторинній обмотці $u'_2 = I'_2 Z'_н$, $Z'_н = R'_п + jx'_н$,

де опір навантаження $R'_п$ і x'.

Падіння напруги на вторинній обмотці рівно $r'_2 I'_2$, де $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$-опір обмотки (вторинний). ЕРС $E'_2 = 4{,}44 w_1 f \Phi_{от}$ індукується в вторинній обмотці потоком $\Phi_{от}$ і вирівнюється u'_2 і $Z'_2 I'_2$. Амплітуда потоку

$$\Phi_{от} = \frac{E'_2}{4{,}44 w_1 f}$$

Знаючи січення осердя, можна визначити амплітуду магнітної індукції, а по кривій намагнічення матеріалу осердя, найти відповідні значення напруженості магнітного поля і намагнічуючий струм (струм холостого ходу):

$$I_0 = \frac{H_{от} l}{\sqrt{2} w_1},$$

де l - середня довжина силової лінії в осерді.

Внаслідок втрат в осерді (на вихрові струми і гістерезис) I_0 буде випереджати вектор потоку на деякий кут δ. Із кривої залежності окремих втрат від індукції для матеріалу осердя можна знайти повні втрати $P_м$ для всієї маси осердя.

Активна складова струму

$$I_{оа} = \frac{P_M}{E'_2}.$$

Звідки

$$\sin\delta = \frac{I_{оа}}{I_о}.$$

Вектор струму в первинному колі позначається як геометрична сума векторів

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 - \bar{I}_2`.$$

Замінюючи $I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1}$, отримаємо рівняння ЕРС трансформатора:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1.$$

При виміряному I_I збільшення $Z_н$ приводить до зменшення I_2 в зв'язку з чим I_0 збільшується. При розриві кола (I_2 =0), збільшується від (0,01; 0,02)I_1 до I_I, що приведе до різкого збільшення потоку і до росту ЕРС, яка може досягати сотень вольт, тобто значення небезпечного для життя обслуговуючого персоналу. Із-за

раптового збільшення втрат в осерді трансформатора він починає нагріватися і може вийти із ладу, якщо своєчасно не прийняти мір і не замкнути накоротко вторинну обмотку. Із векторної діаграми видно, що I_0 вплива не тільки на кутову похибку δ_1, але і на відношення між I_1 і I_2.Чим менше I_0, тим менше кут δ_1 (звичайно I_0 складає 1÷2 % від I_1). Трансформатор струму практично працює в режимі близькому до КЗ.

Випускаються трансформатори струму наступних класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 1; 10. Кутова похибка, в залежності від класу точності знаходиться відповідно в межах від 2 до 120 хв.

Умови роботи трансформатора напруги різко відрізняються від умов роботи трансформатору струму. Трансформатори струму працюють в широкому діапазоні вимірювання первинного струму, а трансформатори напруги нормально працюють при малих коливаннях первинної напруги і практично в режимі близькому до ХХ. На рис.1.7*б* показана векторна діаграма трансформатора напруги, причому, побудова почата з вектора вторинної обмотки, розташованого в довільному напрямку. Струм $I_2' = \frac{u'_2}{Z'_H}$ відстає від напруги на кут $\alpha_u = arctg\left(\frac{X_{2H}}{R_{2H}}\right)$.

На шкалах амперметрів і вольтметрів які використовують вимірювальні трансформатори наносяться відповідні позначення з вказівкою первинних і вторинних параметрів вимірювальних величин. Наприклад $\text{ТС}\frac{100}{5}$ (чи $\text{ТН}\frac{10000}{100}$ для вольтметрів). Це означає, що прилад включається в коло через вимірювальні трансформатори струму з первинним струмом 100 А і вторинним – 5 А. Шкали таких приладів проградуйовані з врахуванням коефіцієнтів трансформації цих вимірювальних трансформаторів.

Побудова векторів падіння напруги в обмотках і інших величин проводиться на основі цих же принципів, які були викладені при побудові діаграми трансформатора струму. З діаграми видно, що напруги u_2 і u_1 не рівні і кут між ними складає $\delta_н$, що визначається, головним чином, подачею напруги на обмотки трансформатора. При постійній u_1 похибка практично змінюється лінійно в залежності від навантаження опору включених приладів і залежить від I_0. Трансформатори напруги випускаються наступних класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 і 3. Кутові похибки складають від 2 до 100 хв в залежності від класу і значення навантаження.

1.4 Вимірювання потужності постійного і змінного однофазного струму

З виразу $P=UI$ для потужності постійного струму видно, що її можна виміряти непрямим методом при допомозі вольтметра і амперметра (рис. 1.8). Але при цьому способі необхідно проводити одночасний відлік по двох приладах і обчислення, що ускладнює вимірювання і знижує його точність.

На практиці для вимірювання потужності постійного і змінного струму використовують прилади - ватметри.

Для ватметрів використовуються електродинамічні, феродинамічні та індукційні вимірні механізми. Електродинамічні ватметри виготовляються переносними, високих класів точності і використовуються для точних вимірів потужності постійного і змінного струмів на низьких і підвищених частотах (до 2000 Гц).

Феродинамічні ватметри найчастіше виготовляються стаціонарними, мають відносно низький клас точності (1,0-1,5). Використовуються головним чином на змінному струмі промислової частоти. На постійному струмі вони мають значну похибку, обумовлену гістерезисом.

Індукційні ватметри по своєму принципу дії можуть працювати лише на змінному струмі, мають низький клас точності (2,5) і тому майже не використовуються.

Для виміру потужності на високих частотах використовують термоелектричні і електронні ватметри.

В даній роботі для виміру потужності використовують електродинамічні ватметри. Ці ватметри переважно мають декілька границь виміру по струму і по напрузі, найчастіше дві границі по струму, наприклад 2,5 і 5 А (або 5 і 10 А) і чотири по напрузі, наприклад, 75; 100; 300 і 600 В. Такі прилади мають неіменовану шкалу, і для того, щоб знайти значення потужності, виміряну ватметром, необхідно число ділень, вказане стрілкою, помножити на постійну C, яка визначається формулою

$$C=U_{ном}I_{ном}/N_{н}, \qquad \text{(Вт/поділку);}$$

де $U_{ном}$, $I_{ном}$ - номінальні значення напруги і струму для тих границь, на які ввімкнено ватметр;

$N_{н}$ - номінальна кількість поділок шкали.

Ватметри мають дві пари затискачів (послідовного і паралельного кіл), і в залежності від їх ввімкнення в коло, напрям відхилення стрілки може бути різним.

Для правильного ввімкнення ватметра один з кожної пари затискачів позначається знаком "*"(зірочка) і називається "генераторним затискачем".

При живленні ватметра від загального кола, генераторні затискачі необхідно під'єднувати до одного полюса джерела, тобто з'єднувати їх разом (рис. 1.9).

2 План роботи

2.1 Ознайомитися з конструктивними особливостями шунтів, додаткових резисторів, вимірювальних, трансформаторів струму та напруги.

2.2 Скласти схему відповідно до рис. 1.8, 1.9, 1.10 і провести необхідні вимірювання, які звести відповідно в табл.1, 2, 3.

2.3 Виконати розрахунок шунта, скласти схему відповідно до рис.9, як шунт використати магазин опору типу МСР. Провести повірку “нового” приладу, дані звести в табл.4. Визначити похибки і дати заключення до якого класу точності його можна віднести.

2.4 Виконати розрахунок додаткових резисторів, скласти схему відповідно до рис. 1.10 і провести повірку аналогічно п.3, дані звести в табл.5.

3 Дослідні схеми і таблиці експериментальних даних

3.1 Схема безпосереднього (прямого) вимірювання струму і напруги (рис.1.8).

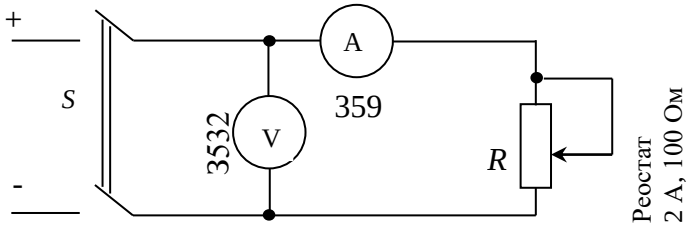


Рис. 1.8.

Таблиця 1

№ досліду	Виміряно		Обчислено	
	I	*U*	*P*	*R*
	А	В	Вт	Ом
1				
2				
3				

Для розрахунку слід скористатися формулами: $P=UI$, та $R=U/I$.

3.2 Схема безпосереднього (прямого) вимірювання струму, напруги і потужності (рис. 1.9).

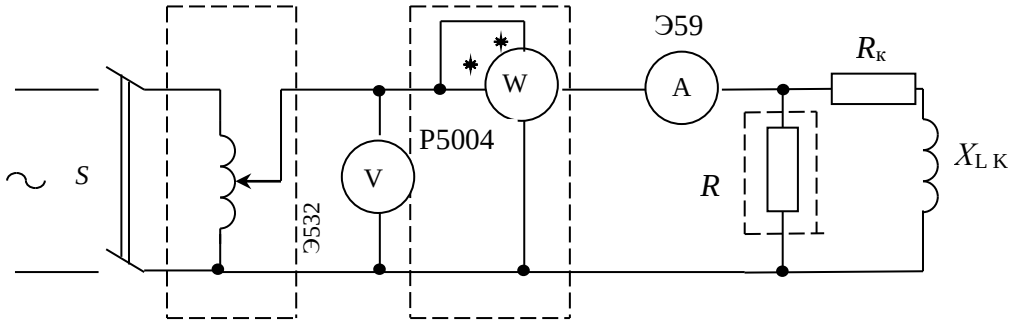


Рис. 1.9.

Таблиця 2

№ досліду	Виміряно			Обчислено				
	P	*I*	*U*	*Z*	*R*	*X*	*Q*	*S*
	Вт	А	В	Ом	Ом	Ом	вар	ВА
1								
2								
3								

Для розрахунків слід скористатися формулами:

$$Z=\frac{U}{I};\quad R=\frac{P}{I^2};\quad X=\sqrt{Z^2-R^2};\quad Q=XI^2;\quad S=\sqrt{P^2+Q^2}.$$

3.3 Схема вимірювання струму та потужності з використанням трансформатора струму (рис. 1.10).

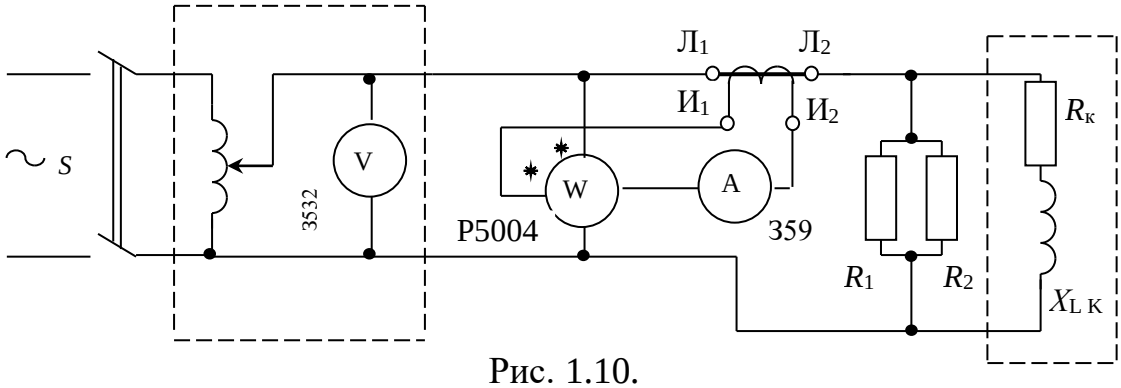


Рис. 1.10.

Таблиця 3

№ дсліду	Виміряно				Обчислено						
	P_a	I_a	K	U	P	I	Z	R	X	Q	S
	Под.	Под.	-	В	Вт	А	Ом	Ом	Ом	ВА	ВА
1											
2											
3											

Для розрахунків слід скористатися формулами:

$$P=P_aK, \qquad I=I_aK;$$

де K- коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

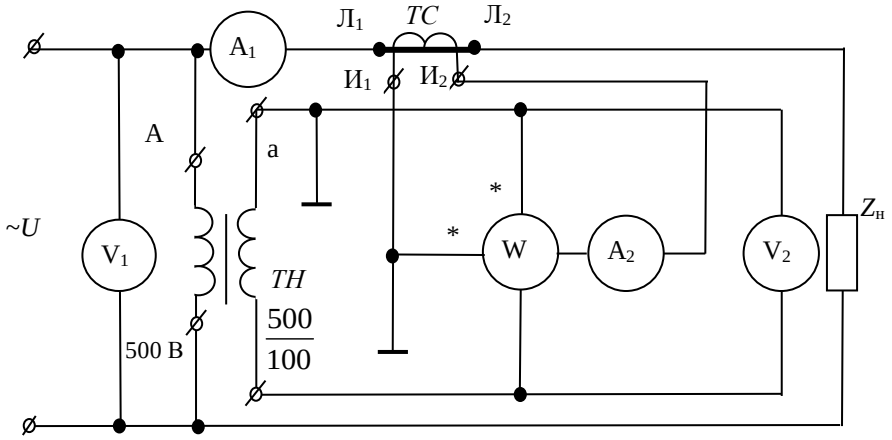


Рис. 1.11. Електрична схема включення вимірювальних трансформатора напруги і струму.

3.4 Схема розширення границь вимірювання електровимірювального приладу по струму (рис. 1.12).

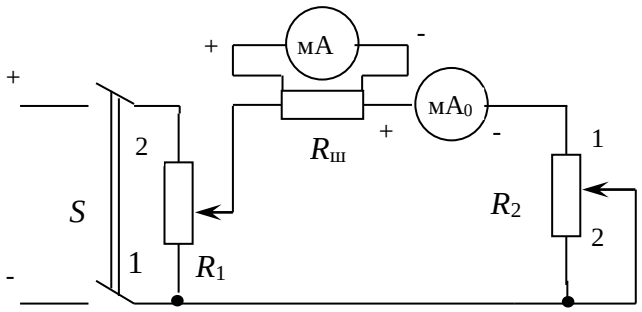


Рис. 1.12.

мА - робочий вимірний прилад, міліамперметр якому розширюють діапазон вимірювань; $мА_о$ - зразковий вимірний прилад класу 0,2 або 0,5; R_1, R_2- потенціометр і реостат для регулювання струму; R_3 - розрахований шунт.

Перед початком роботи, для захисту приладів від перевантажень, повзунки потенціометра R_1 встановити в положення наближене до 1, а повзунок реостата R_2-в положення 2!

Таблиця 4. Дані по розширенню границь вимірювання міліамперметра.

Без шунта Тип приладу: $R_п$ =_____Ом клас точності, $\gamma_{іп}$ =	№ поділки	Виміряно		Обчислено	
		$I_п$	$I_о$	ΔI	$П$
		мА	мА	мА	мА
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
З шунтом $R_{пш}$ =_____Ом клас точності, $\gamma_{нп}$ =	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Для розрахунків слід скористатися формулами:

-абсолютна похибка: $\Delta I=I_п-I_{0.}$;

-поправка: $П=-\Delta I$;

-клас точності: $$\gamma_{нп}=\frac{\Delta I_{max}}{X_н},$$

де - $I_п$, I_0 та ΔI_{max}- відповідно покази модернізованого і зразкового приладів та максимальна абсолютна похибка.

$X_н$ – номінальне значення шкали приладу.

3.5 Схема розширення границь електровимірювального приладу по напрузі (рис. 1.13).

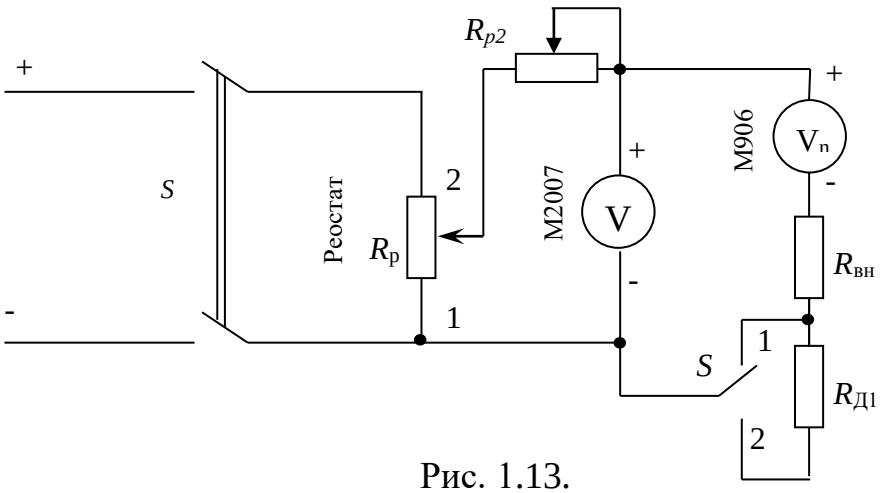


Рис. 1.13.

V - зразковий прилад класу до 0,2 або 0,5
$V_п$ - робочий прилад;
R_p - потенціометр;
$R_{Д1}$ - додатковий резистор;
$R_{вн}$ – внутрішній опір приладу.

Таблиця 5. Дані по розширенню границь вимірювання вольтметра.

Попередня повірка приладу (перемикач *S* в положення 1)	№ досліду	Виміряно		Обчислено	
		$U_п$	$U_о$	ΔU	$П$
		В	В	В	В
Тип приладу: $R_{iп}$: =_____Ом; клас точності, $\gamma_{iп}$ =	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Повірка "нового" приладу (перемикач *S* в положення 2) $R_{пн}$: =_____Ом; клас точності, $\gamma_{нп}$ =	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Для розрахунків слід скористатися формулами:
-абсолютна похибка, $\Delta U=U_п-U_0$;
- поправка, $П= - \Delta U$.

4 Вказівки до звіту

Звіт по роботі повинен включати:
1 Назву і мету роботи.
2 Технічні дані вимірювальних приладів.
3 Дослідні схеми з короткою характеристикою їх елементів і пояснення методики вимірювання.

4 Результати вимірювання і розрахунків.
5 Графіки поправки для міліамперметра без шунта і з шунтом.
6 Графіки поправки для вольтметра на дві границі виміру враховуючи з додатковим резистором.
7 Стислі висновки до кожного із виконаних пунктів і по роботі в цілому.

Контрольні питання

1 Нарисувати включення вимірювальних трансформаторів в схеми.
2 Принцип роботи вимірювальних трансформаторів струму і напруги та їх особливості.
3 Призначення шунтів і додаткових резисторів їх особливості і методика їх розрахунку.
4 На які напруги випускаються стандартні шунти і яких класів точності?
5 Скільки затискачів має шунт, як вони називаються і для чого це потрібно?
6 Які вимірні механізми використовують для ватметрів?
7 Як враховується при вимірюванні використання вимірювальних трансформаторів?
8 З якого матеріалу виготовляють шунти і додаткові резистори?
9 Вивести формули розрахунку шунта і додаткового опору для вольтметра.
10 Як включається амперметр в електричне коло для вимірювання струму?
11 Як включається вольтметр в електричне коло для вимірювання напруги?
12 Який би мав бути внутрішній опір амперметра для забезпечення вимірювання струму без методичної похибки?
13 Який би мав бути внутрішній опір вольтметра для забезпечення вимірювання напруги без методичної похибки?
14 Які системи вимірювальних механізмів приміняються для вимірювання в колах постійного струму?
15 Які системи вимірювальних механізмів приміняються для вимірювання в колах змінного струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ВИВЧЕННЯ РІЗНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ОПОРІВ

1 МЕТА РОБОТИ

1.1 Вивчити вимірювання опорів різними методами, визначити найбільш точніший і найменш точніший метод.

1 2 Виміряти опір обмоток ватметра за методом вольтметра та амперметра, вимірювальним містком постійного струму, омметром та мультиміром.

1.3 Ознайомитись з будовою омметрів та мегаомметра і виміряти ним опір ізоляції між обмотками ватметра.

1.4 Обчислити відносні похибки вимірювання опорів обмоток ватметра, зумовлені застосуванням різних методів виміру.

2 СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Метод амперметра-вольтметра

Найбільш просто опір електричного кола можна виміряти при допомозі амперметра і вольтметра. Цей метод ґрунтується на використанні закону Ома для ділянки кола, в яку входить опір R_X. Величину опору визначають за відомими величинами спаду напруги U, на вимірюваному опорі і струму I, що проходить у ньому:

$$R_X = \frac{U}{I}. \tag{2.1}$$

На рис. 1*а*, і 1*б* показані можливі способи вимірювання спаду напруги U на вимірювальному опорі R_X і струму I, причому ці схеми майже ідентичні і відрізняються лише способом вимірювання напруги.

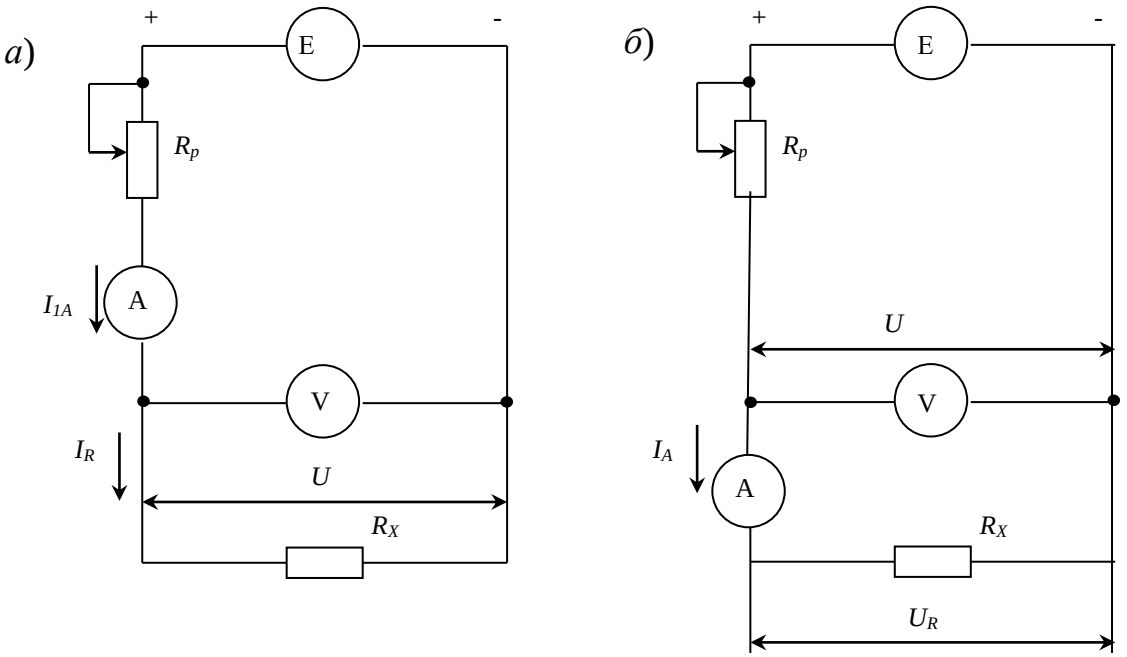


Рис. 1. Схеми вимірювання методом амперметра-вольтметра.

Порівнюючи вимірювальні схеми, бачимо, що вони не забезпечують одночасного точного вимірювання спаду напруги U і струму I. на R_X.

Справді, схема на рис. 1*а*, забезпечує точне вимірювання спаду напруги U на вимірювальному опорі R_X, але дає завищене значення струму I_{1A}, оскільки амперметр вимірює суму струмів: струм, що проходить через R_X і струм I_V, що живить обмотку вольтметра. Значення вимірюваного опору в цьому випадку дорівнює

$$R_X \approx \frac{U}{I_{1A}}; \quad R_X = \frac{U}{I_{1A} - I_v} = \frac{U}{I - U/R_v} \tag{2.2}$$

де R_v - опір обмотки вольтметра.

У схемі, на рис.1*б*, амперметр вимірює струм I, що проходить крізь вимірюваний опір R_X, а вольтметр вимірює напругу U, яка дорівнює сумі спадів напруги U_R на вимірюваному опорі R_X і U_A - на амперметрі.

Тому значення виміряного опору

$$R_X \approx \frac{U}{I_A}; \qquad R_X = \frac{U - U_A}{I_A} = \frac{U}{I_A} - \frac{U_A}{I_A} = \frac{U}{I_A} - R_A. \tag{2.3}$$

де R_A - опір обмотки амперметра.

Отже, якщо при розрахунку величини невідомого опору R_X враховувати опори вольтметра і амперметра, то для вимірювань можна застосувати обидві схеми. Похибка вимірювання складається з похибок амперметра і вольтметра та похибки методу, яка зумовлена способом вмикання приладів.

Якщо вимірювальний опір настільки малий, порівняно з опором обмотки вольтметра, (який звичайно становить тисячі або десятки тисяч Ом), то в формулі (2.2) можна знехтувати струмом I_V, який відгалужується у вольтметр, і тоді його значення R_X^1 знаходять за формулою

$$R_X^1 \approx \frac{U}{I}, \tag{2.4}$$

допускаючи відносну похибку методу вимірювання

$$\delta_M^1 = \frac{R_X^1 - R_X}{R_X} = -\frac{R_X}{R_X + R_V} \approx -\frac{R_X}{R_V}. \tag{2.5}$$

У випадках, коли вимірювальний опір за своїм значенням наближається до значення опору обмотки вольтметра R_V і знехтувати струмом I_V неможливо, то слід користуватись схемою наведеною на рис.1б, і при розрахунку не враховувати малого спаду напруги U_A на амперметрі. В цьому випадку значення вимірювального опору

$$R_X^{11} \approx \frac{U_V}{I}, \tag{2.6}$$

з відносною похибкою методу вимірювання

$$\delta_M^{11} = \frac{R_X^{11} - R_X}{R_X} = \frac{R_A}{R_X}, \tag{2.7}$$

оскільки $R_X^{11} = R_X + R_A$.

Отже, обидві наближені формули дають певну похибку, величина якої залежить від співвідношення між величинами опорів R_X, R_V, R_A. При деякому співвідношенні між цими величинами обидві схеми дають однакову відносну похибку, тобто

$$\delta^1 = \delta^{11}, \tag{2.8}$$

або, підставляючи їх абсолютні величини, маємо:

$$\frac{R_X}{R_X + R_V} = \frac{R_A}{R_X}. \tag{2.9}$$

Звідки дістаємо квадратне рівняння

$$R_X^2 - R_A R_X - R_V R_A = 0.$$

Наближеним розв'язком якого ї

$$R_X = \sqrt{R_V R_A}. \tag{2.10}$$

Очевидно, для опору R_X, величина якого зв'язана з величинами опорів вольтметра R_V і амперметра R_A формулою (2.10), вибір схеми вмикання вимірювальних приладів є визначеним. Для опорів $R_X < \sqrt{R_V R_A}$ слід віддати перевагу схемі рис.1а, тому що вона дасть меншу похибку вимірювання, а коли $R_X > \sqrt{R_V R_A}$, то менша похибка вимірювання забезпечується схемою рис.1б. Тому в практиці електричних вимірювань першу схему називають схемою для вимірювання "малих" опорів, а останню - схемою для вимірювання "великих" опорів.

Метод амперметра та вольтметра має ще ті переваги, що можна вимірювати опори при їх номінальному навантаженні по робочому струму, а це особливо важливо якщо опори нелінійні. При застосуванні змінного струму - вимірюються повні опори.

Слід мати на увазі, що для вимірювання опорів за методом вольтметра й амперметра, вимірювальні прилади треба добирати з такими межами вимірювання, щоб їх покази були близькі до номінальних значень, оскільки при цьому відносні похибки відліків будуть найменшими.

2.2 ПРИЛАДИ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ВИМІРЮВАННЯ

Опори можна вимірювати з допомогою омметрів, які являють собою магнітоелектричні прилади з шкалою, проградуйованою в омах, і використовуються для прямого вимірювання електричних опорів.

Для омметра з послідовною схемою (рис. 2*а*), струм який протікає крізь вимірювальний прилад дорівнює

$$I = \frac{U}{R_X + R_g}, \tag{2.11}$$

а для омметра з паралельною схемою (рис. 2б), дорівнює

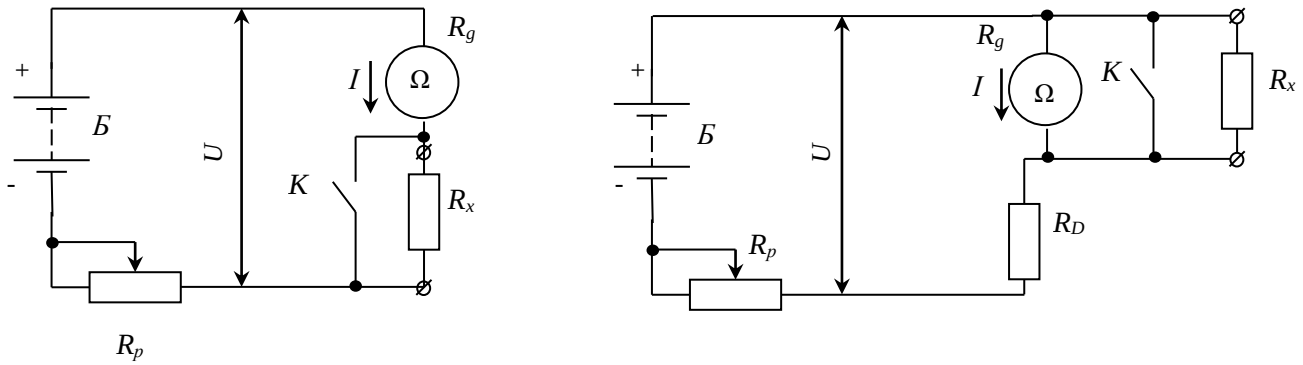
$$I = \frac{UR_X}{RR_X + R_g(R + R_X)}. \tag{2.12}$$

Отже, для обох схем омметра, при незмінній напрузі U, опорах $R_Д$ і R_g величина відхилення стрілки приладу залежить лише від значення вимірюваного опору R_X Схема (рис. 2*б*) застосовується для вимірювання малих опорів, а схема (рис. 2*а*) для вимірювання великих опорів.

У омметра з послідовною схемою, нуль шкали при R_X=0, відповідає найбільшому куту повороту рухомої частини приладу (права крайня поділка шкали) при цьому струм максимальний і дорівнює

$$I = \frac{U}{R_g}, \tag{2.13}$$

а поділка шкали, що відповідає струму I=0, (стрілка не відхиляється) тобто випадку, коли вимірювальний опір R_X відсутній (нескінченно великий)- має позначення ∞ (ліва крайня поділка шкали).



а – послідовна для великих опорів

б – паралельна для малих опорів

Рис. 2. Схеми омметрів.

В омметрах з паралельною схемою, нуль шкали відповідає короткому замиканню приладу (R_X = 0), (ліва крайня поділка шкали) поділка шкали, що відповідає вимірювальному опору R_X=∞, суміщена з найбільшим кутом повороту рухомої частини приладу (права крайня поділка шкали), тобто

$$I = \frac{U}{R_g + R_D}. \tag{2.14}$$

Оскільки напруга власних джерел електроенергії в омметрах з часом зменшується, то ці прилади мають регулюючий пристрій R_P який дозволяє перед вимірюванням опору відкалібрувати їх (встановити стрілку омметра на нуль шкали чи на ∞, в залежності від того яка схема використовується).

У приладах, що призначені для вимірювання великих опорів і називаються мегомметрами (рис. 3), як вимірювальний пристрій використовують магнітоелектричний логометр з двома жорстко скріпленими на одній осі перехресними котушками 1 і 2, які знаходяться в нерівномірному магнітному полі постійного підковоподібного магніту.

Ці котушки живляться від вбудованого електромагнітного генератора постійного струму з ручним приводом, яке видає напругу 500-2500 В. У колі котушок логометра знаходяться сталі опори R_{g1} і R_{g2} з виводами до затискачів "ЛІНІЯ" і "ЗЕМЛЯ" до яких під'єднують вимірюваний опір R_X. Щоб усунути

вплив струму витікання між цими затискачами на результати вимірювання, затискач "ЛІНІЯ" охоплюють металевим екраном, який з'єднують з додатковим затискачем мегаомметра "ЕКРАН", і який з'єднаний з позитивним полюсом генератора. Внаслідок такої схеми, струми витоку проходять поза вимірювальними котушками, що підвищує точність вимірювань. Конденсатор *С* призначений для згладжування пульсації напруги

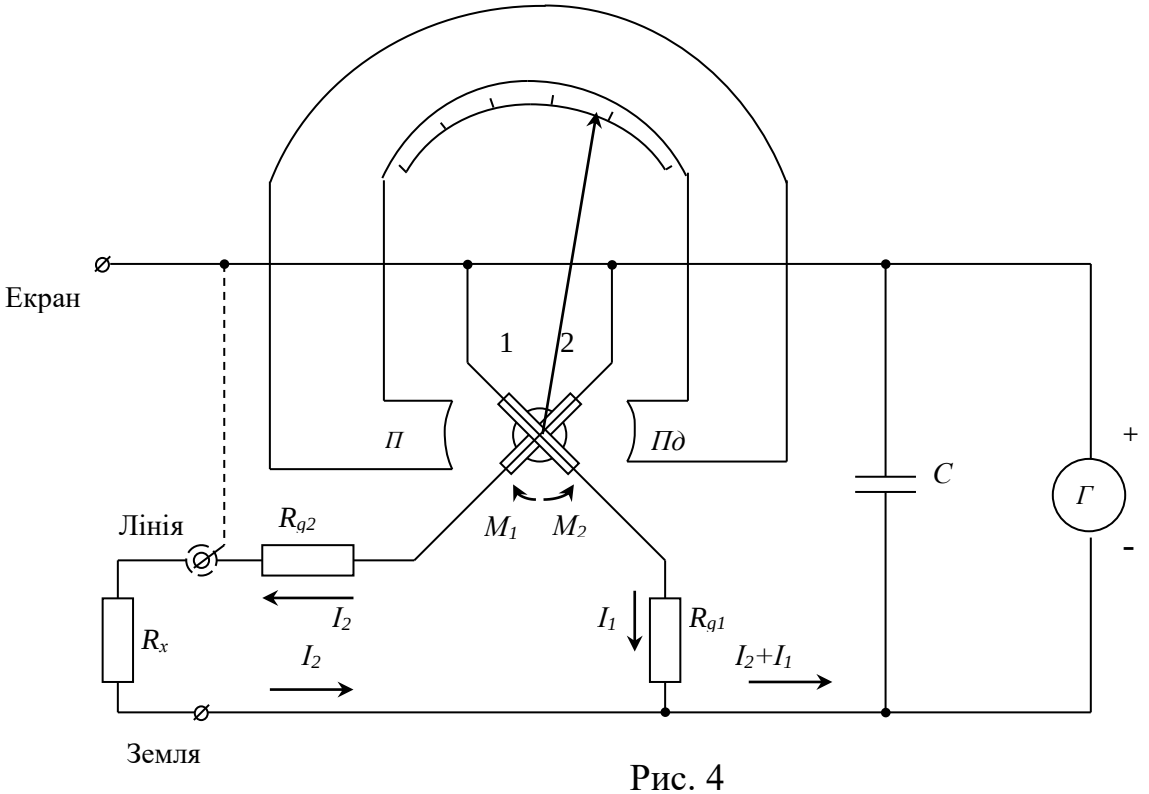


Рис. 4

Обертання вбудованого генератора *Г* виконують ручкою, виведеною на бічну стінку приладу, з швидкістю 90-150 об/хв, що забезпечує генерування напруги 500-2500 В, внаслідок чого в обмотках котушок 1 і 2 проходять струми

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_{g1}}, \tag{2.15}$$

і

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + R_{g2} + R_X}, \tag{2.16}$$

де R_1 і R_2 - відповідно, опори рамок приладу 1 і 2.

Взаємодія струмів I_1 та I_2 з магнітним полем постійного магніту приводить до виникнення двох протилежно напрямлених моментів M_1 та M_2, які повертають рухому систему. Моменти котушок M_1 і M_2 при цьому змінюються і зрівноважуються при деякому певному положенні рухомої системи відносно полюсів магніту. Стрілка приладу встановлюється при цьому на певній поділці шкали. Кут повороту рухомої системи логометра залежить лише від величини відношення струмів у встановлюючій 1 і відхиляючій 2 котушках, і не залежить від абсолютного значення величини струмів I_1 та I_2.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + R_{g2} + R_X}{R_1 + R_{g1}} . \quad (2.17)$$

Отже значення напруги і швидкість обертання приводу генератора не впливають на точність результату вимірювання.

Оскільки в розглядуваній схемі мегаомметра змінною величиною є тільки вимірюваний опір R_X, то шкалу приладу можна проградуювати в мегаомах.

Тому, що в приладі не має протидіючих моментних пружин, то, при відсутності струму, рухома система перебуває в байдужій рівновазі й стрілка може займати будь-яке положення на шкалі.

У нормально діючому мегаомметрі під час обертання рукоятки привода з швидкістю 90-150 об/хв і розімкнених затискачах "ЛІНІЯ" - "ЗЕМЛЯ", що відповідає значенню вимірюваного опору $R_X = \infty$, струм I_2, який проходить по котушці 2, дорівнює нулю, і стрілка приладу встановлюється на крайній поділці шкали, яка позначена знаком ∞. При замиканні цих затискачів накоротко, що відповідає значенню $R_X = 0$, і обертанню рукоятки, струм буде найбільшим, і стрілка приладу встановиться на нуль. Обертати рукоятку з швидкістю понад 150 об/хв не рекомендується, щоб запобігти передчасному зношуванню механічної частини мегаомметра.

При користуванні мегаомметрами треба стежити, щоб електричні кола, в яких проводяться вимірювання, були знеструмлені, обмотки закорочені. Інакше прилади можуть бути пошкоджені або вимірювання зроблені не вірно.

Мегаомметрами можна вимірювати великі опори, зокрема опір ізоляції між одним проводом лінії та землею, опір ізоляції між двома розімкненими проводами лінії, опір ізоляції між двома електрично не з'єднаними обмотками та інше.

При всіх вимірюваннях затискачі "ЛІНІЯ" і "ЗЕМЛЯ" мають бути приєднаними до тих елементів знеструмленого електричного кола між якими вимірюють значення опору ізоляції.

УВАГА !

Під час роботи з мегаомметром слід пам'ятати, що при обертанні його рукоятки не можна доторкатись до затискачів приладу, а також приєднаних до них проводів, оскільки напруга між ними небезпечна для життя!

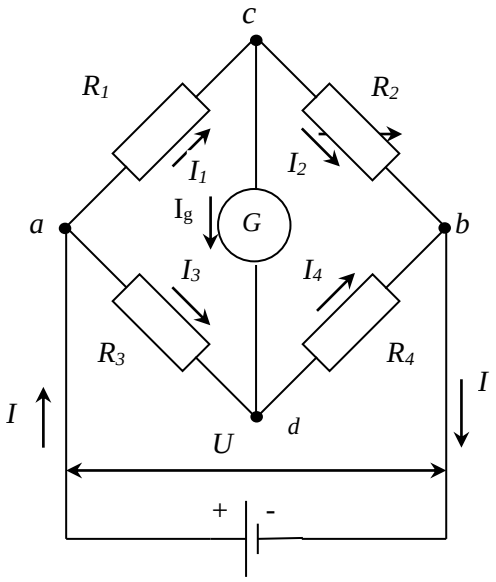
2.3 МОСТОВИЙ МЕТОД

Одинарні мости постійного струму

Щоб виміряти опори від 50 до 1000000 Ом, які не знаходяться в робочих колах, можна застосувати одинарну мостову схему (рис. 4), яка для опорів середньої величини дає досить малу похибку вимірювань (близько 0,05 - 0,1 %).

До схеми моста входять три відомі опори R_2, R_3, R_4 і один невідомий опір $R_X = R_1$, які називаються плечами моста. Точки з'єднання плеч *a, b, c* і *d* називаються вершинами моста, ділянка електричного кола, включена в протилежні вершини -

називається діагоналлю. Якщо в одну із діагоналей, наприклад, *ab*, подають постійну напругу *U*, то її називають діагоналлю живлення , а другу - *cd*,- вихідною діагоналлю, куди вмикають гальванометр *G* з нулем по середині шкали.



Б

Рис. 4. Схема моста постійного струму.

Якщо в мостовій схемі одне плече, наприклад, R_2 зробити регульованим, то можна добитись того, щоб струм у діагоналі гальванометра дорівнював нулю, тобто I_g.=0. Такий стан моста називають рівновагою, а міст - зрівноваженим.

При цьому потенціали вершин φ_c і $\varphi_в$ будуть рівні і, відповідно напруги плеч *ac* і *ad* теж будуть рівні, тобто $U_{ac} = U_{ad}$. Аналогічно і для плеч $U_{cb} = U_{db}$. Переходячи до опорів плеч і струмів, які протікають в них, можемо записати:

$$I_1R_1=I_3R_3 \quad \text{та} \quad I_1R_2=I_3R_4.$$

Поділивши ці рівняння одне на друге, отримаємо:

$$R_2R_3 = R_1R_4, \tag{2.18}$$

Рівність (2.18) називають рівнянням рівноваги моста, з неї можна знайти величину вимірюваного опору, якщо відомі три інші опори, R_2, R_3 та R_4, тобто

$$R_X = R_1 = \frac{R_2R_3}{R_4} = R_2\frac{R_3}{R_4}. \tag{2.19}$$

Опір R_2 звичайно називають плечем порівняння, а опори R_3 і R_4 - плечами відношення. В окремому випадку, коли плечі відношення $R_3=R_4$, а вимірюваний опір $R_X=R_1$ і дорівнює опору плеча порівняння R_2, тобто $R_X=R_2$ [див. формулу (2.18)].

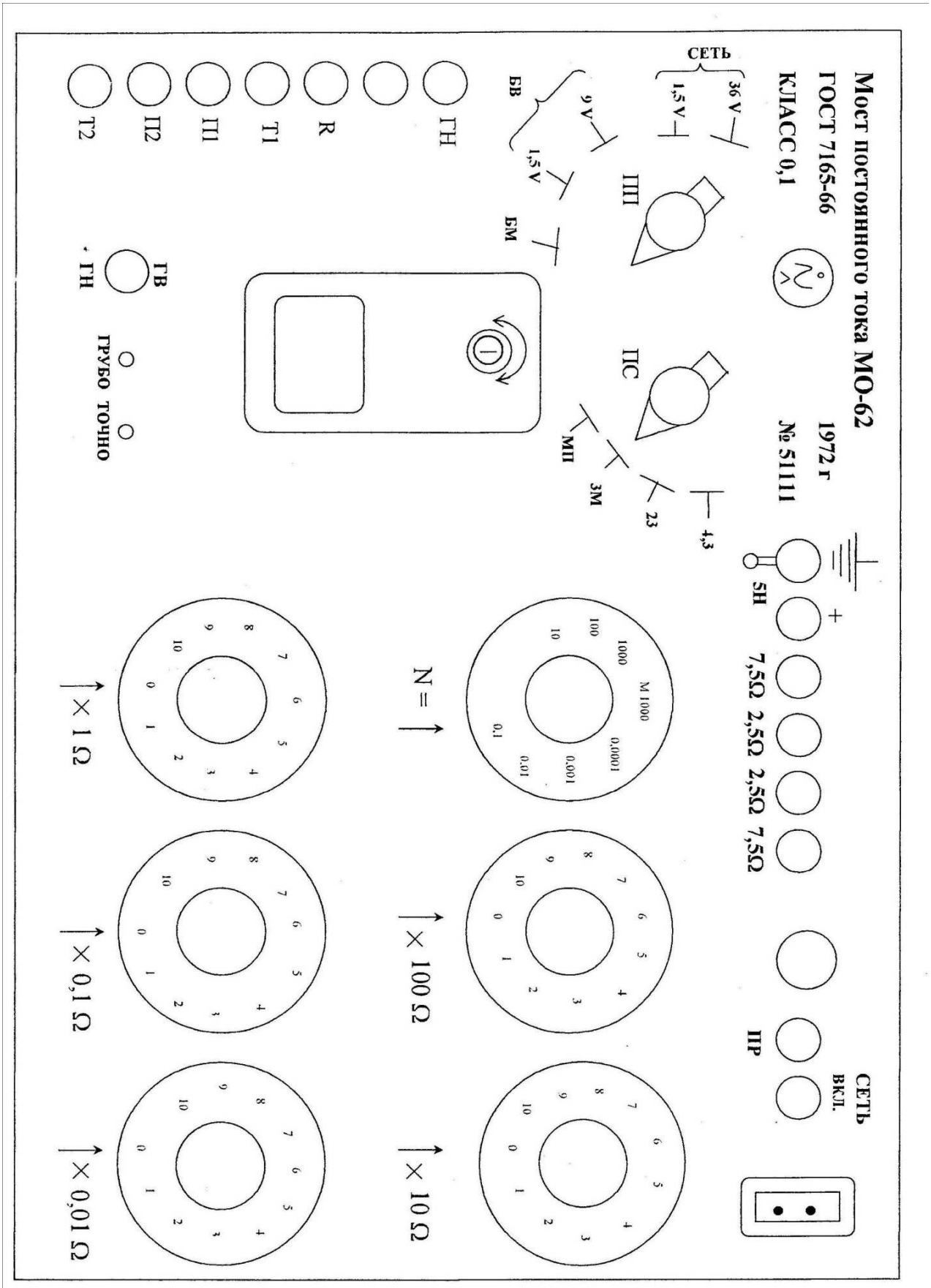
Для вимірювання опору міст зрівноважують, не тільки змінюючи значення R_2, а й зманюючи відношення (R_3 /R_4), що виконується експериментатором або з допомогою спеціальних зрівноважувальних механізмів, які діють автоматично. Якщо струм I_g, що проходить через гальванометр,

$$I_g = U\frac{R_2R_3 - R_1R_4}{R_g(R_1+R_2)(R_3+R_4)+R_1R_2(R_2+R_4)+R_3R_4(R_1+R_2)}, \tag{2.20}$$

не дорівнює нулю, то при заданих значеннях напруги *U* і опорів R_1, R_2, R_3, R_4 значення його є функцією величини вимірювального опору $R_X=R_1$, тобто

$$I_g = F(R_X).$$

Тому мости, в яких значення вимірювального опору *R*х визначають за показами стрілки гальванометра, називають *неврівноваженими*.



3 ОПИС УСТАНОВКИ

В роботі проводять вимірювання опору обмоток ватметра феродинамічної системи різними методами. *Необхідно визначити точність, зручність і економічність цих методів.*

Для вимірювання опору обмоток ватметра методом вольтметра та амперметра складають дві схеми. На рис. 5*а* подано схему для вимірювання опору послідовні обмотки ватметра, в якій передбачений реостат $R_р$ для регулювання струму в Колі, а отже, й величина спаду напруги U на вимірюваному опорі R_{XA} На рис. 5*б* подано схему для вимірювання опору паралельної обмотки ватметра, де величина напруги U, яка підводиться до вимірюваного опору R_{XV} змінюється високоомним подільником напруги П.

В обох схемах, які живляться від мережі постійного струму, застосовані прилади магнітоелектричної системи високого класу точності, з відомими опорами обмоток.

Опір обмоток ватметра також вимірюють аналоговим комбінованим приладом (тестером) Ц4342 та цифровим комбінованим приладом (мультиміром) моделі М830В, (використовуємо їх як омметри) та уніфікованим мостом постійного струму типу МО-62 (рис. 5, *інструкція по експлуатації розміщена на внутрішній стороні кришки моста*, *ознайомтеся з нею*). Результати отриманих вимірювань порівнюють.

Величину опору ізоляції між розділеними послідовною і паралельною обмотками ватметра вимірюють за допомогою мегомметра (рис. 4).

4 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

4.1 Ознайомтесь з приладами, апаратами та іншим обладнанням лабораторної установки і запишіть в звіт їх метрологічні та технічні характеристики.

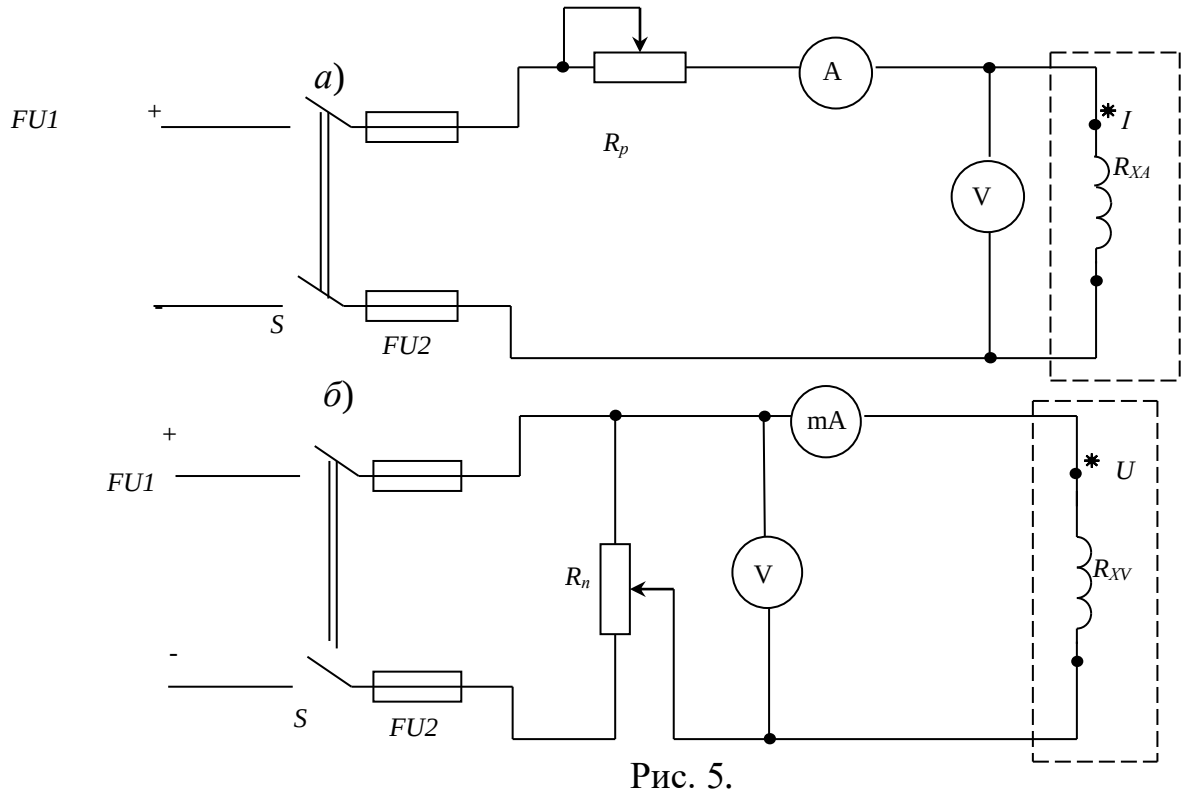


Рис. 5.

4.2 Скласти схему рис. 5*а* для вимірювання опору послідовної обмотки ватметра, поставити повзунок реостата R_p у положення, що відповідає найбільшому опору, і, після перевірки керівником правильності з'єднань, замкнути вмикач *S*

4.3 Встановити в колі реостатом R_P струм, близький до номінального струму послідовної обмотки ватметра і записати результати в табл. 1, для п'яти значень струму *I*. Живити установку напругою 15 В.

Таблиця 1. Вимірювання опору послідовної обмотки ватметра методом амперметра-вольтметра**. (**Номінальний струм послідовної обмотки ватметра *I*= ___А.)

№ досліду	Напруга, В	Струм, А	Опір, Ом	Похибки	
				ΔR_i	δ
1					
2					
3					
4					
5					
Середнє значення	-				

4.4 Скласти установку рис. 5*б* для вимірювання опору паралельної обмотки ватметра, поставити повзунок подільника напруги R_n у положення, яке забезпечує найменшу величину напруги, що підводиться до обмотки ватметра, і, після перевірки керівником правильності з'єднань, замкнути вмикач *S*.

4.5 Підвести до вимірювального опору п'ять значень напруги, і записати покази приладів для кожного досліду в табл. 2. Живити установку напругою *U*=15 В.

Таблиця 2. Вимірювання опору паралельної обмотки ватметра методом амперметра-вольтметра**. (**Номінальна напруга і струм паралельної обмотки ватметра, U_w= ____В, I_w=__ _А.)

№ досліду	Напруга, В	Струм, А	Опір, Ом	Похибки	
				ΔR_i	δ
1					
2					
3					
4					
5					
Середнє значення	-				

4.6 Користуючись інструкцією по експлуатації уніфікованого моста постійного струму МО-62, виміряти значення опорів послідовної і паралельної обмоток ватметра. Результати записати в таблиці 3*а* та 3*б.*

Таблиця 3*а*. Дані вимірювань мостом МО-62 послідовної обмотки.

№ досліду	Відлік по декадах, Ом	Множ-ник	Виміряний опір, Ом	Похибки	
				ΔR_i	δ
1					
2					
3					
4					
5					
Середнє значеня	-				

Таблиця 3*б*. Дані вимірювань мостом МО-62 паралельної обмотки.

№ дослду	Відлік по декадах, Ом	Множ-ник	Виміряний опір, Ом	Похибки	
				ΔR_i, Ом	δ
1					
2					
3					
4					
5					
Середнє значеня	-				

4.7 Виміряти опір обмоток ватметра аналоговим комбінованим приладом (тестером) Ц4342 та цифровим комбінованим приладом моделі М830В (мультиміром), (використовуємо їх як омметри) результати спостережень записати в таблицю 4.

Таблиця 4. Опір обмоток виміряний прямим методом.

№ досліду	Тестером Ц4342						Мультиміром М830					
	Послідовна			Паралельна			Послідовна			Паралельна		
	Ом	ΔR_i	δ	Ом	ΔR_i	δ	Ом	ΔR_i	δ	Ом	ΔR_i	δ
1												
2												
3												
4												
5												
Середнє знаня												

4.8 Виміряти мегаомметром опір ізоляції між розділеними послідовною і паралельною обмотками ватметра, для чого одну з них приєднати до затискача "ЛІНІЯ", а другу - до затискача "ЗЕМЛЯ". Потім, обертаючи ручку приладу з швидкістю 90-150 об/хв зробити відлік за шкалою і записати в таблицю 5. Також

виміряти опір ізоляції між розділеними послідовною і паралельною обмотками та корпусом ватметра.

Таблиця 5

№ досліду	Величина опору ізоляції, $R_{із}$, МОм
1 Опір між обмотками ватметра	
2 Опір між послідовною обмоткою і корпусом ватметра	
3 Опір між паралельною обмоткою і корпусом ватметра	
Середнє значення	

5 ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

5.1 Обчислити за наближеними формулами для всіх дослідів значення виміряних опорів обмоток ватметра і за остаточні дані взяти середні арифметичні значення знайдених результатів. Результати розрахунків занести у відповідні таблиці.

5.2 Прийнявши середні значення за дійсні, обчислити абсолютні і відносні похибки вимірювання, значення яких занести в таблицю 6.

$$\Delta R_A = R'_A - R_{Acp}, \qquad \Delta R_V = R'_V - R_{Vcp};$$

$$\delta_{RA} = \Delta R_A / R'_A, \qquad \delta_{RV} = \Delta R_V / R'_V,$$

де ΔR_A, ΔR_V, δ_{RA}, δ_{RV} - відповідно абсолютні і відносні похибки виміру відповідних обмоток.

$\Delta R'_A$, $\Delta R'_V$ – результати вимірювань які найбільше відхиляються від середнього значення відповідно - R_{Acp} і R_{Vcp}.

5.3 Визначити активні потужністі, яку споживає при номінальному струмі послідовна обмотка ватметра:

$$P_A = I^2_{WH} R_{XA},$$

яку споживає при номінальній напрузі паралельна обмотка ватметра:

$$P_V = U^2_{WH} / R_{XV},$$

а також власне (повне) споживання потужності ватметром:

$$P_W = P_A + P_V$$

Результати розрахунків записати в таблицю 6.

5.4 Порівняти похибки вимірювання опорів обмоток ватметра, визначені різними методами, і дати рекомендації щодо застосування кожного метода окремо. Дані занести в табл. 6.

5.5 Дати висновок про якість ізоляції між розділеними послідовною і паралельною обмотками ватметра та між обмотками і корпусом, яка, при

температурі навколишнього повітря від 15 до 25 °С та його відносній вологості (95±3) %, повинна бути не менше 2 МОм.

Таблиця 6. Порівняння похибок вимірювання опорів різними методами.

№ пп.	Метод виміру	ΔR_A	ΔR_V	δ_{RA}	δ_{RV}	P_V	P_A	P_W
		Ом	Ом	%	%	Вт	Вт	Вт
1	Амперметра і вольтметра							
2	Міст МО-62							
3	Тестером							
4	Мультиміром							

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1 Чому виникає потреба застосувати різні схеми вмикання електровимірювальних приладів для вимірювання опорів методом вольтметра і амперметра. Нарисувати схеми і пояснити зменшення похибок.

2 Які опори при вимірюванні вважають "великими", а які "малими"?

3 Вивести рівняння рівноваги моста. Як зрівноважують міст?

4 Нарисувати схеми омметрів. Пояснити як вони працюють?

5 Як виміряти опір ізоляції між двома розділеними обмотками трансформаторів, електровимірювального приладу або інших електроізольованих об’єктів?

6 Нарисувати схему мегаомметра. Пояснити чому в переносних мегаомметрах застосовують логометричний вимірювальний механізм.

7 Пояснити принцип дії логометричних вимірювальних механізмів та їх конструктивне виконання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4
РОЗРАХУНОК ШУНТА ДО АМПЕРМЕТРА І ДОДАТКОВОГО РЕЗИСТОРА ДО ВОЛЬТМЕТРА

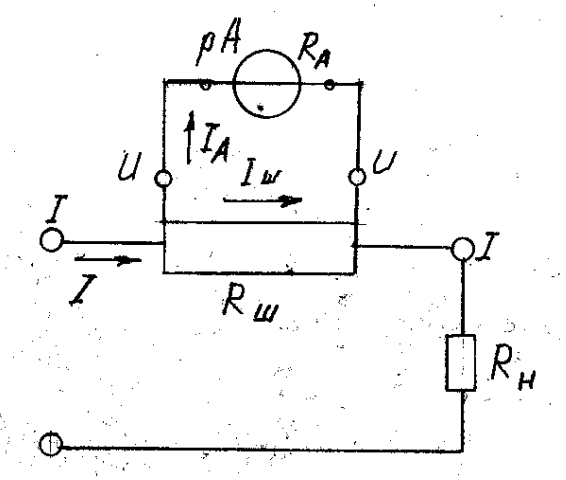
Завдання 1. За вихідними даними таблиці і схемами, зображеними на рис.1.1 і рис.1.2. обчислити опори шунта і додаткового резистора. Накреслити схему об'єднаного приладу – ампервольтметра, на якій вказати задані і обчислені значення опорів і меж вимірювання.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку шунта і додаткового резистора.

Варіант	Межі вимірювання, I_A, **мкА**	Внутрішній опір, R_A **Ом**	Верхня межа амперметра з шунтом I, **А**	Верхня межа вольтметра з додатковим опором Е, **В**
1	100	1500	0,005	1,5
2	200	900	0,010	1,8
3	500	150	0,020	1,5
4	1000	150	0,050	1,5
5	50	3000	0,100	1,5
6	100	1500	0,200	1,5
7	200	900	0,500	1,8
8	500	150	1,0	3,0
9	1000	150	2,0	3,0
0	200	150	5,0	3,0

Конструкція вимірювального механізму магнітоелектричної системи є такою, що вимірюваний струм протікає через спіральні пружини, які створюють протидіючий момент. При великому струмі пружини нагрівалися б і змінювали момент пружності. Це створювало б недопустимо велику похибку вимірювання струму. Для забезпечення достатньої чутливості магнітоелектричних приладів обмотка рамки повинна бути легкою і мати багато витків з тонкого проводу, який теж не повинен нагріватися. Щоб похибки не перевищували 0,5 – 1,5% верхньої межі вимірювання, у приладах, що виготовляють серійно, її обмежують на рівні 200 мА. Для вимірювання більших постійних струмів застосовують шунти.

При протіканні струму по обмотці магнітоелектричного амперметра на ній створюється спад напруги, рівний $U_V = I_A R_A$. Отже, при внутрішньому опорі амперметра R_A струму I_A на шкалі амперметра відповідає напруга U_A. Це значить що шкалу магнітоелектричного приладу можна проградувати у Вольтах. У такого вольтметра верхня межа вимірювання напруги буде теж обмеженою. Для розширення меж вимірювання вольтметрів застосовують додаткові резистори. Схема включення шунта зображена на рис. 1.1, додаткового резистора – на рис. 1.2.



I – верхня межа шкали амперметра з шунтом; I_A – верхня межа шкали амперметра без шунта;

Рисунок 1.1 – Схема вмикання амперметра з шунтом

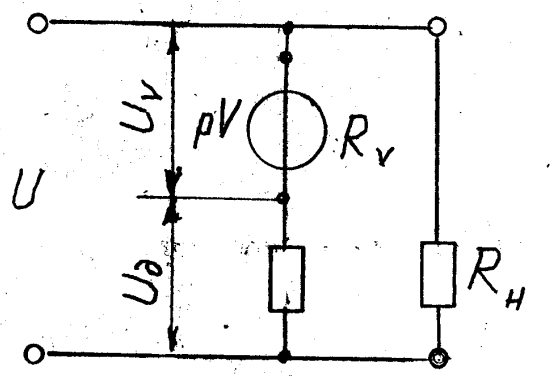


Рисунок 1.2 – Схема вмикання вольтметра з додатковим резистором

Розглянемо співвідношення:

$1) I_{Ш} = I - I_A;\ \ 2) I_{Ш} R_{Ш} = I_A R_A \ \ \ 3) I / I_A = n$,

R_A – внутрішній опір амперметра;

Праву і ліву частини 1) поділимо на I_A, отримаємо $I_{Ш} = I_A(n-1)$, підставимо в 2) і отримаємо :

$$R_{Ш} = \frac{R_A}{n\text{-}1} \tag{1.1}$$

Відомими величинами при розрахунку опору додаткового резистора є: U – верхня межа шкали вольтметра з додатковим резистором; U_V – верхня межа шкали вольтметра без додаткового резистора; R_V – внутрішній опір вольтметра без додаткового резистора. Відповідно до схеми складемо рівняння: $1) U = U_V + U_д$; $2) U_V / R_V = U_д / R_д$; $3) U / U_V = n$. Рівняння 3) підставимо в 1) і отримаємо:

$$U_V(n-1) = U_д \tag{1.2}.$$

(1.2) підставимо у (2) і отримаємо:

$$R_{\partial} = R_V (n-1) \tag{1.3}$$

Завдання 2. Накреслити схему ампервольтомметра, схема якого зображена на рис. 1.4. Визначити діапазони вимірювання малого і великого опорів. Проградуювати омметр за формулами (1.3) і (1.4), змінюючи ***x*** від 0 до 1 через 0,1.

У цій задачі $R_V = R_A$ та ЕРС ***E*** в кожному варіанті дорівнює верхній межі вольтметра з додатковим резистором R_0 з останнього рядка таблиці 1.

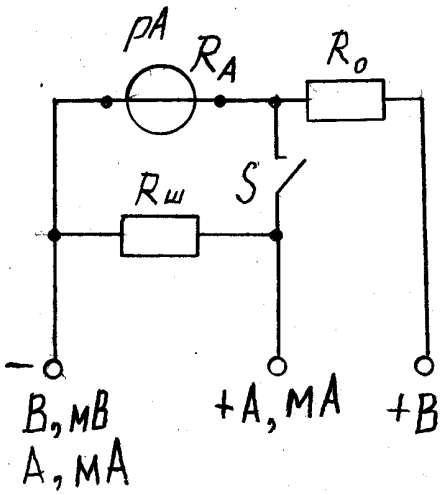
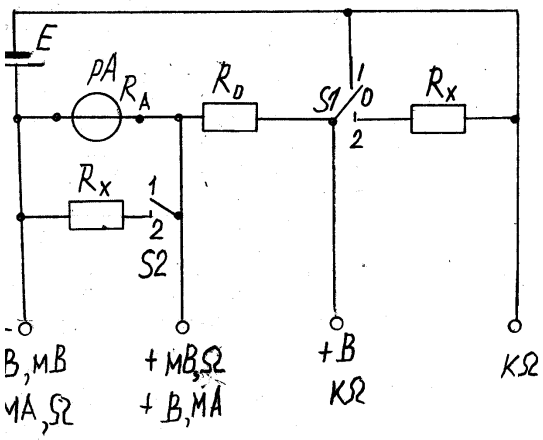


Рисунок 1.3 – Схема ампервольтметра.*)

*) – проставити числові значення свого варіанту.



Е – джерело живлення; *pA* – мікроамперметр; R_A - внутрішній опір мікроамперметра; $R_{\varnothing}$ - опір шунта; R_0 - опір додаткового резистора; R_x - вимірювані резистори

Рисунок 1.4 – Вимірювальна схема ампервольтомметра (авометра)

№ з/п	Положення	Положення	Затискачі	Шкала
1	$S1$ - 1	$S2$ - 1	-В,+В	Вольтметр
2	$S1$ - 0	$S2$ - 1	- мА, +мА	Мікроамперметр
3	$S1$ - 0	$S2$ - 2	-А, +А	Амперметр
4	$S1$ - 1	$S2$ - 1	- кΩ, + кΩ	кілоОм, уст. на 0
5	$S1$ - 2	$S2$ - 1	- кΩ, + кΩ	кілоОм, вимірювання
6	$S1$ - 1	$S2$ - 1	–Ω,+Ω	Ом, уст. на 0
7	$S1$ - 2	$S2$ - 2	–Ω,+Ω	Ом, вимірювання

2.1 Розрахунок опору вимірювальної схеми кілоомметра

Метод вимірювання опору за схемою вольтметра полягає в наступному.

Перемикач $S1$ встановлюємо в положення 1.Виконуємо вимірювання струму. Отримуємо струм I_1 і кут відхилення стрілки α_1.Потім перемикач замикаємо в положення 2, отримуємо струм I_2 і кут α_2.

$I_1 = E / R_A + R_0 = \alpha_1 \cdot S;\ I_2 = E / R_A + R_0 + R_x = \alpha_2 \cdot S$

Поділимо $I_1 / I_2 = \alpha_1 / \alpha_2 = (R_A + R_0 + R_õ) / (R_A + R_0)$.

Якщо при першому вимірюванні встановити стрілку на кінцеву поділку шкали амперметра, то всю шкалу можна прийняти за 1, тобто можна прийняти, що $\alpha_1 = 1$. Тоді при другому вимірюванні стрілка відхилиться на кут $\alpha_2 < 1$. Для цього випадку можна записати рівняння

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{R_A + R_0 + R_X}{R_A + R_0} = 1 + \frac{R_X}{R_A + R_0},$$

Якщо $\alpha_1 = 1;\ \alpha_2 = x$, то

$$R_X = \frac{1 - x}{x}(R_A + R_0);\qquad x = \frac{R_A + R_0}{R_A + R_0 + R_x} \qquad (1.4)$$

2.2 Розрахунок опору вимірювальної схеми омметра

Струм при першому вимірюванні дорівнює

$$I_1 = E / R_A + R_0;$$

при другому вимірюванні струм в ланцюзі

$$I_2 = E\frac{R_A + R_x}{R_0(R_A + R_x) + R_A R_x};$$

Струм через амперметр $$I_2^{'} = E\frac{R_x}{R_0(R_A + R_x) + R_A R_x};$$

Відношення струмів $$\frac{I_1}{I_2^{'}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{R_0 R_A}{R_x(R_0 + R_A)} + 1;$$

З останнього $$R_x = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot \frac{R_0 R_A}{R_0 + R_A};$$

Якщо при першому вимірюванні встановити стрілку на кінець шкали, то $\alpha_1 = 1; \alpha_2 < 1$. При $\alpha_2 = x$

$$R_x = \frac{x}{1 - x} \cdot \frac{R_0 R_A}{R_0 + R_A}; \qquad x = \frac{R_X(R_0 + R_A)}{R_0 R_A + R_0 R_x + R_A R_x}$$

де ***x*** – поділка на шкалі у відносних долях від 1 або в % від 100.

ЗВІТ

З виконання лабораторної роботи на тему:

“Розрахунок шунта до амперметра і додаткового резистора до вольтметра. Розрахунок опорів вимірювальної схеми омметра”

Студента гр. _____ Варіант № 1_____

1. Розрахунок шунта до амперметра і додаткового резистора до вольтметра.

Варіант	Межі вимірювання, I_A **мкА**	Внутрішній опір, R_A **Ом**	Верхня межа амперметра з шунтом I ,**А**	Верхня межа вольтметра з додатковим опором E, **В**
1	100	1500	0,005	1,5
2	200	900	0,010	1,8
3	500	150	0,020	1,5
4	1000	150	0,050	1,5
5	50	3000	0,100	1,5
6	100	1500	0,200	1,5
7	200	900	0,500	1,8
8	500	150	1,0	3,0
9	1000	150	2,0	3,0
0	200	150	5,0	3,0

Згідно з номером залікової вихідні дані беру з варіанту №____.

Розв’язок:

1). $R_{Ø} = \frac{R_A}{n-1} = \frac{1500}{49} = 30,6$ Ом;

2) Верхня межа вольтметра без додаткового резистора

$U_{Â} = I_A R_A = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 = 0,15$ В

3) Опір додаткового резистора: $R_0 = R_V (n\text{-}1)$. В даному випадку $R_V = R_A$.

Отже, $R_0 = 1500(1,5 / 0,15 - 1) = 13500 = 13,5$ кОм.

В результаті отримуємо ампервольтметр, схема якого зображена на рис. 1.3.

4)Якщо до отриманого ампервольтметра додати гальванічний елемент з ЕРС 1,5 В і два перемикача $S1$ та $S2$ і з'єднати всі деталі за схемою рис.1.4, то отриманий прилад можна використовувати для вимірювання опорів постійному струму методом вольтметра та методом амперметра. Тоді цей прилад буде мати 6 шкал – 2 шкали як амперметр, 2 шкали як вольтметр і 2 шкали як омметр. При вимірюванні опору методом вольтметра отримаємо шкалу в кілоомах, а методом амперметра – в Омах.

5) Градуювання шкали методом вольтметра виконуємо за формулами:

$$R_X = \frac{1-x}{x}(R_A + R_0) \quad ; \qquad x = \frac{R_A + R_0}{R_A + R_0 + R_x} \tag{1.5}$$

Градуювання шкали методом амперметра виконуємо за формулами:

$$x = \frac{R_X(R_0 + R_A)}{R_0R_A + R_0R_x + R_AR_x} \quad ; \qquad R_x = \frac{x}{1-x} \times \frac{R_0R_A}{R_0 + R_A} \tag{1.6}$$

6) Градуювання шкали омметра за формулами (1.5)

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0.9	1,0
R_x, кОм	∞	135	60	35	22,5	15	10	6,43	3,75	1,67	0

Градуювання шкали омметра за формулами (1.6) .

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0.9	1,0
R_x, Ом	0	100	225	386	600	900	1350	2100	3600	8100	∞

7) Накреслити схеми, зображені на рис.1.3 і 1.4. нанести на них вихідні і обчислені дані свого варіанту.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5
ВИМІРЮВАННЯ ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ МОСТОМ ЗМІННОГО СТРУМУ

1 МЕТА РОБОТИ

1.1 Ознайомлення з мостовим методом вимірювання параметрів електричних кіл змінного струму.

1.2 Практично освоїти методику вимірювання ємностей, індуктивностей, добротності та взаємоіндуктивностей мостовим методом.

1.3 Придбати навики в роботі з мостом промислового виготовлення.

1.4 Провести розрахунок похибок вимірювання.

1.5 Зробити науковий висновок по роботі.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Загальні відомості

Загальна схема моста змінного струму, плечі якого складаються із резисторів з комплексними опорами $\dot{Z}_1$, $\dot{Z}_2$, $\dot{Z}_3$ та $\dot{Z}_4$ приведена на рис. 1.

Якщо нульовий індикатор *Hi*, який ввімкнений в діагональ *b-d,* покаже відсутність струму, тобто $I_г$=0, то

$$I_1\dot{Z}_1=I_2\dot{Z}_3 \quad \text{та} \quad I_1\dot{Z}_2=I_2\dot{Z}_4, \tag{4.1}$$

Із рівняння (4.1) одержимо умову рівноваги схеми

$$\dot{Z}_1\dot{Z}_4=\dot{Z}_2\dot{Z}_3 \tag{4.2}$$

Якщо в (4.2) підставити комплекси повних опорів плеч моста, які представлені в показниковій формі, то одержимо вирази

$$\dot{Z}_1\dot{Z}_4 e^{j(\varphi 1+\varphi 4)}=\dot{Z}_2\dot{Z}_3 e^{j(\varphi 2+\varphi 3)} \tag{4.3}$$

Звідкіля маємо два рівняння

$$Z_1Z_4=Z_2Z_3;$$
$$\varphi_2+\varphi_3=\varphi_1+\varphi_4. \tag{4.4}$$

Тут Z - модулі комплексів;

φ - їх аргумент.

Таким чином, умова рівноваги моста змінного струму являє собою два рівняння виду (4.4). Ці рівняння повністю рівносильні і обов`язкові для досягнення рівноваги мосту. *Тому для зрівноваження моста змінного струму потрібно регулювати два параметри*.

Вираз $\varphi_2+\varphi_3=\varphi_1+\varphi_4$ показує, при якому положенні плеч моста, в залежності від їх характеру, можна зрівноважити мостову схему. *Якщо в два протилежні плеча моста* (рис. 2) *ввімкнені резистори з чисто активними опорами, то в два інші - протилежні їм плечі, повинні бути ввімкнені в одне - котушка індуктивності, а в друге конденсатор. Якщо резистори з активними опорами ввімкнути в сусідні плечі, то в два інші сусідні плеча повинні бути ввімкнені котушки індуктивності або конденсатори* (рис. 3).

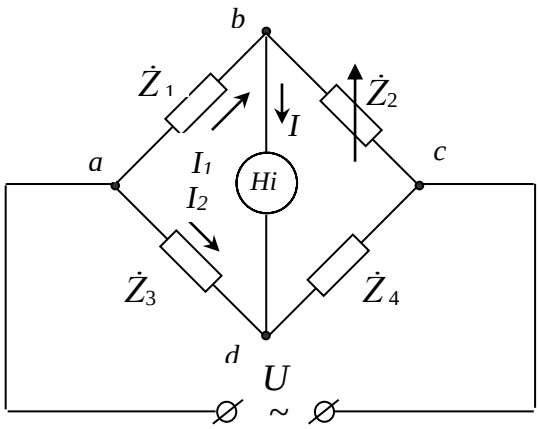
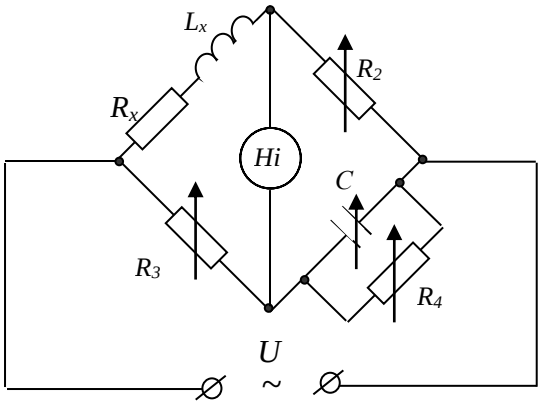


Рис. 1.

а) при $Q < 30$,



б) при $Q < 30$.

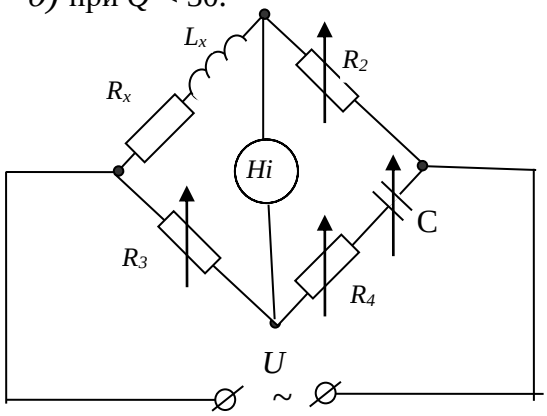


Рис. 2. Схеми для вимірювання L_x і Q_x котушок індуктивності без феромагнітного осердя *а* і з феромагнітним осердям *б*.

2.2 Вимірювання індуктивності, добротності і взаємоіндуктивності котушок

Мости для вимірювання індуктивності методом порівняння із взірцевою індуктивністю не отримали великого поширення, так як котушки із взірцевою регульованою індуктивністю не мають великої точності та порівняно мають велику собівартість. Найбільше поширення отримали мости для виміру індуктивності шляхом порівняння L_x із взірцевою ємністю (рис. 2). В якості взірцевої ємності як правило, застосовують конденсатор, який має малі втрати, тому для досягнення рівноваги моста в плече із взірцевою єністю вмикають резистор із змінним активним опором. Останній, в залежності від величини добротності котушки L_x, може бути ввімкнений паралельно (рис. 2*а*) , або послідовно (рис. 2*б*).

Запишемо умову рівноваги мосту, схема якого зображена на рис. 2*а*

$$(R_x + j\omega L_x)(R_4/(1 + j\omega CR_4)) = R_2R_3,$$

Розділяючи дійсні і уявні складові, отримуємо

$$R_x = R_2R_3/R_4, \quad (4.5)$$

$$L_x = CR_2R_3. \quad (4.6)$$

Відомо, що під добротністю котушки індуктивності розуміємо відношення:

$$Q_x = \omega L_x / R_x.$$

Тоді для схеми рис. 2*а* маємо

$$Q_x = \omega C R_2 R_3 R_4 / (R_2 R_3) = \omega C R_4. \quad (4.7)$$

Таким чином, при фіксованій ємності та фіксованій частоті напруги живлення моста, шкалу резистора із змінним опором R_4 можна проградуювати безпосередньо в значеннях Q_x.

Схема моста, яка зображена на рис. 2*б*, відповідає наступній умові рівноваги

$$(R_x + j\omega L_x)(R_4 + 1/(j\omega C)) = R_2 R_3,$$

При реальному виконанні моста по схемі рис. 2*б* значення резистора R_4, ємності C при даній частоті напруги живлення моста підбирається так, щоб виконувалась нерівність

$$R_4^2 \omega^2 C^2 << 1$$

Враховуючи це, неважко показати, що

$$R_x = R_2 R_3 R_4 \omega^2 C^2, \quad (4.8)$$

$$L_x = C R_2 R_3, \quad (4.9)$$

$$Q_x = 1/(\omega C R_4) \quad (4.10)$$

ці (4.10) слідує, що в цьому випадку шкала резистора із опором R_4 може бути проградуйована в значеннях Q_x.

Також ясно [формули (4.5) і (4.6)], *що міст, принципова схема якого зображена на рис. 2а, являється частотно - незалежним*, тобто рівновага моста при зміні частоти або форми кривої напруги не порушується. і, навпаки, із розглянутої формули (4.8) для моста, принципова схема якого зображена на рис. 2*б*, слідує, що міст являється частотно - залежним і при зміні частоти або форми кривої напруги живлення рівновага моста порушується.

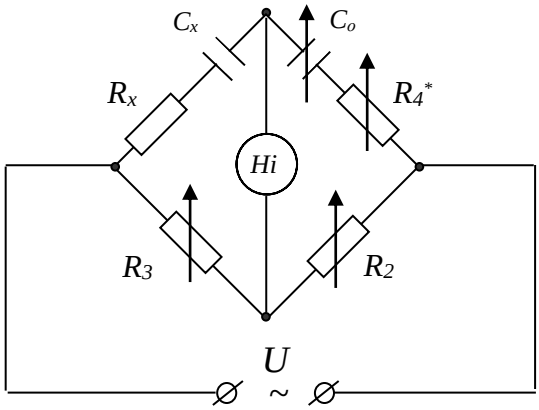


Рис. 3. Схема частотно незалежного мосту для виміру ємності C_x з малими втратами при допомозі взірцевої ємності C_o.

З формул (4.7) і (4.10) ясно, що градуювання шкали резистора R_4 в значеннях Q_x справедлива лише при одній, певній частоті живлення моста, незалежно від того, по якій принциповій схемі (рис. 2) він побудований.

Для виміру взаємоіндуктивності двох котушок можна використати найбільш простий метод, який грунтується на вимірюванні сумарної індуктивності котушок при їх послідовному сполученні при узгодженому (L_y) та зустрічному ($L_з$) ввімкненні. Взаємоіндуктивність розраховується по формулі

$$M = \frac{L_y - L_з}{4}.$$

2.3 Вимірювання ємності та кута втрат конденсатора

При вимірюванні ємності C_x. при допомозі взірцевої ємності C_o використовується схема частотно незалежного моста, яка зображена на рис. 3. із аналізу умови рівноваги цієї схеми слідує:

$$R_x = R_3 \frac{R_4}{R_2}, \tag{4.11}$$

$$C_x = C \frac{R_2}{R_3}. \tag{4.12}$$

Із векторної діаграми схеми заміщення конденсатора із твердим діелектриком, яка зображена на рис. 4,

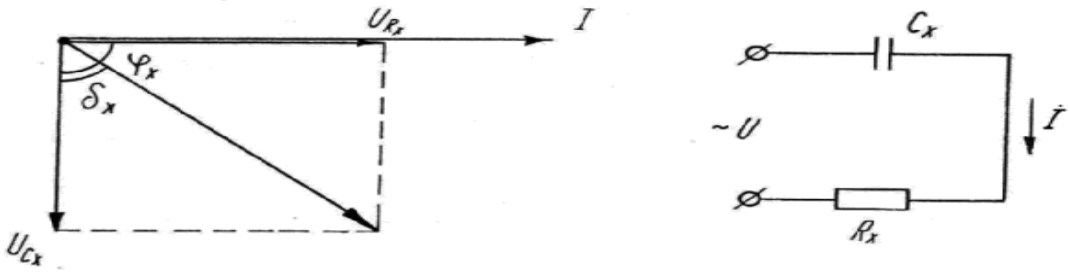


Рис. 4.

слідує що

$$tg\delta_x = \frac{U_{R_x}}{U_{C_x}} = \frac{R_x}{\left(\frac{1}{\omega C_x}\right)} = \omega C_x R_x. \tag{4.13}$$

Підставляючи у вираз (4.13) значення R_x і C_x. отримуємо

$$tg\delta_x = \omega C R_4 \tag{4.14}$$

Таким чином, при постійній ємностмі і частоті живлення напруги моста, шкалу резистора із опором R_4 можна проградуювати в значеннях $tg\delta_x$.

3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Наша промисловість виготовляє універсальні мости, які дозволяють здійснювати виміри опорів на змінному струмі, ємність та кут втрат конденсаторів, індуктивність та добротність котушок на фіксованих частотах в досить широкому діапазоні значень L_x та C_x.

В основу роботи мостів покладені принципові схеми, які зображені на рис. 2 і рис. 3. Перехід від однієї схеми вимірювань до другої здійснюється таким чином, щоб використовувалось найбільше число одних і тих самих елементів.

Прикладом універсального моста може бути міст Е7-4, який застосовується в лабораторії Вимірна частина приладу являє собою чотирьохплечий міст на якому отримують три основні вимірні схеми (рис. 2, рис. 3) для виміру *R, C* та *L*. При вимірюванні ємностей та індуктивностей два із чотирьох плеч моста являються

комплексними. Всі три мости мають одне і те ж саме плече з якого знімається відлік, що дає можливість зробити для приладу єдиний відліковий пристрій при вимірюванні опорів, ємностей та індуктивностей.

При вимірюванні опорів, рівновага моста досягається почерговим покручуванням ручок "МНОЖИТЕЛЬ" і "ОТСЧЕТ". При вимірюванні ємностей та індуктивностей, рівновага моста досягається почерговим регулюванням відповідно ручок "МНОЖИТЕЛЬ", "ОТСЧЕТ" та " Q - tg ".

Відліковий пристрій включає в себе перемикач відліку, на якому послідовно монтуються чотири опори по 1000 Ом, змінний опір на 1100 Ом з лінійною шкалою та множник.

Відліковий перемикач "ОТСЧЕТ" дискретного відліку, має вікно, в якому появляються цифри 0, 1, 2, 3, 4. У відповідності до положення перемикача, ту чи іншу цифру видно в віконці над ручкою дискретного перемикача.

Шкала плавного відліку має наступні оцифровані точки:

0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,1.

Дискретний перемикач "МНОЖИТЕЛЬ" служить для перемикання діапазонів вимірювань *L; C* і *R* (наприклад опорів: 1 Ом; 10 Ом; 100 Ом; 1000 Ом; 10000 Ом; 100000 Ом; 1000000 Ом).

В залежності від положення цього перемикача виставляється значення з цифрою множника та найменуванням вимірюваної величини.

Відлік тангенса кута втрат та добротності здійснюється по шкалі, відградуйованій в значеннях *Q* та *tgφ*. Змінні опори для відліку добротності та тангенсу кута втрат мають загальну вісь.

На передній панелі є наступні органи керування:

- ручка дискретного перемикача "ОТСЧЕТ", перемикає послідовно з`єднані опори;
- ручка змінного опору "ОТСЧЕТ", розміщена під відліковою шкалою;
- ручка перемикача частоти генератора з написом "ЧАСТОТА Гц";
- ручка перемикача відлікових шкал добротності та тангенса кута втрат з написом "*Q*" та " *tgδ*";
- ручка перемикача під діапазонів вимірювання, розміщена над написом "МНОЖИТЕЛЬ", з відповідною кожному піддіапазону та виду вимірювання з цифрою множника;
- ручка перемикача видів вимірювальних мостів з написом "ВИД ИЗМЕРЕНИЯ" з позначенням *L, C, ~R, =R*;
- тумблер ввімкнення живлення приладу з написом "СЕТЬ".

На передній панелі є також наступні затискачі:

- для підключення вимірюваного об’єкту: - *R; C; L*;

На задній стінці приладу розміщені:

- запобіжник;
- ручка змінного опору, яка регулює вихідну напругу генератора з написом "ВЫХ. НАПР. ГЕНЕРАТОРА";
- клеми для підключення зовнішнього генератора змінної напруги "ВНЕШНИЙ ГЕНЕРАТОР".

Ознайомитись з приладами, апаратами та іншим обладнанням лабораторної установки і записати в звіт їх технічні характеристики.

4 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

4.1 Ввімкнути прилад в мережу, повинно засвітитись віконце «СЕТЬ».

4.2 Через 5 хвилин після ввімкнення прилад готовий до проведення вимірювань (час прогріву приладу для стабілізації показів).

4.3 Провести вимірювання постійного опору котушки, індуктивності та добротності 10-и пускорегулюючих апаратів (дроселів) із магнітним осердям та 10-и самих котушок без осердя. Провести вимірювання ємностей та тангенса кута втрат ($tg\delta$) 10-и конденсаторів.

5 ВИМІРЮВАНЯ ОПОРУ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ

5.1 Перевести перемикач роду робіт в положення =R.

5.2 Перемикачами «МНОЖИТЕЛЬ» та дискретним "ОТСЧЕТ" добитись найменшого відхилення стрілки приладу від нуля (показуючий прилад μA).

5.3 Ручками змінного опору "ОТСЧЕТ" зрівноважити міст, тобто добитись найменшого відхилення стрілки приладу від нуля (показуючий прилад μA).

5.4 Збільшити чутливість нульіндикатора ручкою «ЧУВСТВИТ. ИНДИКАТОРА», при цьому стрілка відхилеться від нуля піся чого повторити п.3 і так до тих пір поки не буде досягнута максимальна чутливість індикатора.

5.5 Відлік значення опору дорівнює сумі відліків по диску перемикача "ОТСЧЕТ" та по шкалі його змінного опору, помноженій на відповідний множник перемикача «МНОЖИТЕЛЬ».

6 ВИМІРЮВАНЯ ІНДУКТИВНОСТІ ТА ДОБРОТНОСТІ

6.1 Перевести перемикач роду робіт в положення L.

6.2 Перемикачами «МНОЖИТЕЛЬ» та дискретним "ОТСЧЕТ" добитись найменшого відхилення стрілки приладу від нуля (показуючий прилад μA).

6.3 Ручками змінного опору "ОТСЧЕТ" та відліку добротності чи тангенсу кута втрат «tg, Q», зрівноважити міст, тобто добитись найменшого відхилення стрілки приладу від нуля (показуючий прилад μA).

6.4 Збільшити чутливість нульіндикатора ручкою «ЧУВСТВИТ. ИНДИКАТОРА», при цьому стрілка відхилеться від нуля піся чого повторити п.3 і так до тих пір поки не буде досягнута максимальна чутливість індикатора.

6.5 Відлік значення індуктивності дорівнює сумі відліків по диску перемикача "ОТСЧЕТ" та по шкалі його змінного опору, помноженій на відповідний множник перемикача «МНОЖИТЕЛЬ». Відлік добротності провести по шкалі " tg " при Q > 30, тоді Q = 1/tg, або по шкалі " Q " при Q < 30.

При вимірах на частоті 100 Гц, відлік індуктивності додатково перемножується на 10.

Дані вимірювань заносять в табл..1.

Таблиця 1. Дані вимірювань та обчислень.

№ спостереження	Виміряні значення індуктивностей, добротностей та опорів						Виміряне значення ємностей		Абсолютні похибки вимірювання							
	без осердя			з осердям					без осердя			з осердям			ємність	
	L	Q	R-	L^*	Q^*	R^*	C	$tg\delta$	ΔL	ΔR	ΔQ	ΔL^*	ΔQ^*	ΔR^*	ΔC	Δtg
	Гн	-	Ом	Гн	-	Ом	мкФ	-	Гн	Ом	-	Гн	-	Ом	мкФ	-
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
Середне значення																

Результат вимірювань:

Індуктивність без осердя	Індуктивність з осердям	Ємності	Оцінка точності проведеного вимірювання		
L =	L^* =	C =	δ_L=	δ_{L^*}=	δ_C=
Q =	Q^* =	tg =	δ_Q=	δ_{Q^*}=	δ_{tg}=
R =	R^* =	-	δ_R=	δ_{R^*} =	-

7 Вимірювання ємності та тангенса кута втрат

7.1 Перевести перемикач роду робіт в положення С.

7.2 Зрівноваження мосту виконується у відповідності до підпунктів 5.2 – 5.4.

7.3 Провести відлік вимірювальної величини ємності та тангенса кута втрат. Вимірювальна величина ємності дорівнює сумі відліків по показах перемикача "ОТСЧЕТ", та по шкалі його потенціометра, помноженій на відповідний множник перемикача «МНОЖИТЕЛЬ». Вимірювальна величина - тангенса кута втрат відраховується безпосередньо по шкалі " tg ". При вимірюванні на частоті 100 Гц відлік ємності додатково помножується на 10.

8 ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

8.1 Виміряні значення опорів, індуктивності, добротностей, ємностей та тангенсів кутів втрат занести в таблицю 1.

8.2 Оскільки виміри прямі, то похибки вимірювання визначають по наступній методиці (похибки подати до другого знаку після коми):

а) обчислити середнє значення із n спостережень, яке прийняти за модуль результату вимірювань

$$x=(x_1+x_2+...+x_n)/n;$$

б) знайти абсолютну похибку кожного із n вимірів

$$\Delta x_i=x_i-x$$

в) оцінити середнє квадратичне відхилення результату спостережень

$$S_n=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i)^2}$$

г) дати оцінку середньоквадратичного відхилення результату вимірювань

$$S_x=\frac{S_n}{\sqrt{n}};$$

д) визначити довірчі границі випадкової похибки при заданій імовірності (приймаємо, що похибки підлягають нормальному розподіленню)

$$\varepsilon=tS_x,$$

де t - коефіцієнт Стьюдента, для P = 0,95 при n = 5 має значення 2,571, а при n = 10 - 2,262.

е) границі невиключеної систематичної похибки Θ результату вимірювання обчислити шляхом побудови композиції невиключених похибок засобів вимірювання, похибок метода і похибок визваних іншими джерелами. При рівномірному розподілі маємо

$$\Theta=k\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\Theta_i^2}$$

де k – коефіцієнт який при P = 0,95 має значення 1,1, а при P = 0,99 має значення 1,4.

m - кількість не виключених похибок.

8.3 Границі похибки результату вимірювань.

Якщо $\Theta/S_x<0{,}8$ то $\Delta=\varepsilon=tS_x$;

якщо $\Theta/S_x>8$ то $\Delta=\Theta$;

для всіх інших випадків $\Delta=KS_z$,

де K - коефіцієнт який залежить від співвідношення випадкової і невиключеної систематичної похибок і визначається згідно ГОСТ 8.207-76 по емпіричній формулі

$$K=\frac{\varepsilon+\Theta}{S_x+\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\frac{\Theta_i^2}{3}}}.$$

Sz - оцінка сумарного середнього квадратичного відхилення результату вимірювань

$$S_z=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\frac{\Theta_i^2}{3}+S_x^2}.$$

Записати результат вимірювання в стандартній формі

$$X=x\pm\Delta,\ P=0{,}95.$$

Досить часто дають оцінку точності проведеного вимірювання, обраховуючи відносну похибку $\delta=\frac{\Delta x}{x}$ в відносних одиницях або в відсотках $\delta=\frac{\Delta x}{x}100\ \%$.

8.4 Зробити науковий висновок по роботі.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1 Які вимірювальні схеми називаються мостовими?

2 Вивести умови рівноваги моста змінного струму.

3 Які умови рівноваги моста змінного струму?

4 Для вимірювань яких фізичних величин можуть застосовуватись мостові схеми змінного струму?

5 Яка методика визначення основних, рівнянь що дозволяють використовувати міст змінного струму для вимірювання індуктивності, ємності, добротності та тангенса кута втрат ?

6 Як використовують міст змінного струму для визначення взаємоіндуктивності? Вивести формулу.

7 Нарисувати векторну діаграму, яка дозволяє визначити *tg*.

8 Які прилади використовують в якості індикаторів нуля в мостах змінного струму?

9 Які вимоги пред’являють до індикаторів рівноваги мостів змінного струму?

10 Як здійснювати вимір добротності, величина якої більше 30?

11 Яка методика визначення похибок вимірювання?

12 Що називають умовами балансу моста?
13 Які є різновидності мостових схем?
14 Які переваги мостових вимірювальних схем?
15 Пояснити принцип вимірювання ємностей конденсаторів з допомогою мосту змінного струму.
16 Пояснити принцип вимірювання індуктивності котушок з допомогою мосту змінного струму.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6
ОЦІНКА ПОХИБОК ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ З ОДНОРАЗОВИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ

Мета роботи — вивчення похибок електровимірювальних приладів, ознайомлення з основними додатковими похибками і способами їх визначення та видами представлення результатів вимірювання.

1 Основні визначення й формули

Похибка вимірювань Δ в загальному випадку містить наступні складові:

- інструментальну похибку - $\Delta_і$;
- методичну похибку – $\Delta_м$;
- похибку відліку – $\Delta_{від}$;

Інструментальна похибка у свою чергу складається з *основної* ($\Delta_о$) і *сумарної додаткової* ($\Delta_д$) *похибок* засобів вимірювань (ЗВ), а також *динамічної складової похибки* вимірювань ($\Delta_{дин}$) і *похибки взаємодії* ЗВ з об'єктом вимірювання ($\Delta_{вз}$). Нарешті, $\Delta_д$ сама складається з ряду складових ($\Delta_{д1}$, $\Delta_{д2}$, ... $\Delta_{дn}$), обумовлених різними *впливаючими величинами* ζ_1, ζ_2, ... ζ_n.

По точності вимірювань прилади поділяються на класи. ***Клас точності*** - узагальнена характеристика засобу вимірювальної техніки (засобу вимірювань), що визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність, значення яких регламентується. **Клас точності ЗВ дає інформацію про межі допустимих значень $\Delta_о$ і $\Delta_{д1}$, ... $\Delta_{дn}$, тобто дає числові граничні значення $\Delta_{о,г}$ і $\Delta_{д1,г}$ ... $\Delta_{дn,г}$.**

Динамічна складова $\Delta_{дин}$ виникає в тих випадках, коли інформативний параметр сигналу змінюється в часі, а інерційні властивості ЗВ не дозволяють зробити його точне вимірювання. *При статичних вимірюваннях* $\Delta_{дин} = 0$.

Похибка від взаємодії ЗВ з об'єктом вимірювання $\Delta_{вз}$, залежить як від властивостей ЗВ, так і від властивостей об'єкту.

Наприклад, при вимірюванні вольтметром напруги постійного струму U, на затискачах активного двополюсника виникає похибка через зниження U при підключенні вольтметра до об'єкту.

Така ж похибка виникає і при вимірюванні струму амперметром, якщо останній після одержання результату вимірювання виключають із кола. Причина похибки – збільшення опору кола на значення опору амперметра R_A.

Відносне значення цієї похибки при $R_{вих} \ll R_V$ і $R_A \ll R_{вих}+R_н$ у відносних одиницях визначається відповідно виразами:

$$\delta_{вз\,V} = -R_{вих} / R_V, \qquad (11.1)$$

$$\delta_{вз\,A} = -R_A / (R_{вих} + R_н), \qquad (11.2)$$

де $\delta_{вз\ V}$, $\delta_{вз\ A}$ – відносне значення похибки взаємодії при вимірюванні відповідно вольтметром чи амперметром;

$R_{вих}$ - вихідний опір досліджуваного кола (включно з джерелом живлення);

R_V, R_A - вхідний (внутрішній) опір вольтметра і амперметра;

$R_н$ – опір навантаження;

Вхідні кола ЗВ, що вимірюють змінну напругу, характеризується паралельним з'єднанням вхідного опору R_V і вхідної ємності вольтметра C_V.

У даному випадку, якщо прийняти, що вихідний опір джерела сигналу чисто активний, а вимірювана напруга синусоїдальна $u = U_m \sin\omega t$,

то, при

$$R_{вих} \ll R_V \quad \text{і} \quad (\omega T)^2 \ll 1, \tag{11.3}$$

де $T = R_{вих} C_V$.

І замість (11.1) маємо

$$\delta_{вз\,V} = -R_{вих}/R_V - 0{,}5(\omega T)^2. \tag{11.4}$$

Методична складова похибки вимірювання $\Delta_м$ обумовлена недосконалістю методу вимірювання. Наприклад, заміна нелінійної функції перетворення ЗВ із слабо вираженою не лінійністю, лінійною залежністю й ін. Виявлення джерел і характеру поведінки методичних похибок може бути виконано ретельним аналізом прийнятого в конкретному експерименті методу вимірювання.

Похибка відліку $\Delta_{від}$ в ЗВ з цифровим відліковим пристроєм не перевищує одного кванта шкали відлікового пристрою і включається в склад основної похибки $\Delta_о$, а в ЗВ з аналоговим відліковим пристроєм не включається. Її граничне значення для аналогових приладів визначається формулою

$$\Delta_{від,г} = \pm K Ц_П, \tag{11.5}$$

де $Ц_П$ – ціна поділки;

K – коефіцієнт, значення якого залежить від того, до якої долі ділення проводиться заокруглення при відліку (якщо до половини, то $K = 0{,}5$; якщо до десятої долі, то $K = 0{,}1$ і т. д.).

2 Додавання складових похибки вимірювання й подання результату вимірювання

По нормованим метрологічним характеристикам, якими характеризуються ЗВ можна визначити тільки граничні значення складових $\Delta_{i,г}$ похибки вимірювання Δ, тобто такі, для яких з ймовірністю $P=1$ можна вважати, що дійсні значення цих складових Δ_i не перевищують граничного $\Delta_{i,г}$.

Якщо значення всіх $\Delta_{i,г}$ симетричні, тобто $\Delta_{i,г} = \pm A$ (похибка), то модуль граничного значення похибки вимірювання знаходиться шляхом арифметичного додавання модулів складових

$$\left|\Delta_г\right| = \sum_{i=1}^{n} \left|\Delta_{i\,,\,г}\right|. \tag{11.6}$$

Після цього результат вимірювання можна подати у вигляді (*1-а найбільш поширена форма*)

$$X \pm \Delta_г, \quad P = 1. \tag{11.7}$$

Якщо ж деякі $\Delta_{i,г}$ несиметричні, тобто модулі нижньої $\Delta_{i,г,н}$ і верхньої границі $\Delta_{i,г,в}$ не однакові, нижня і верхня границі похибки вимірювання обчислюються окремо

$$\Delta_{г,н} = \sum_{i=1}^{m} \Delta_{i,г,н} - \sum_{i=m+1}^{n} \left|\Delta_{i,г}\right|, \qquad (11.8)$$

$$\Delta_{г,в} = \sum_{i=1}^{m} \Delta_{i,г,в} + \sum_{i=m+1}^{n} \left|\Delta_{i,г}\right|, \qquad (11.9)$$

де $i = 1,..., m$ та $i = m + 1,\ldots, n$ – номери складових з несиметричними і симетричними границями.

$$\left|\Delta_{Г}\right| = 0{,}5\sum_{i=1}^{m} \left|\Delta_{i,г,в} - \Delta_{i,г,н}\right| + \sum_{i=m+n}^{n} \left|\Delta_{i,г}\right| .$$

Тоді результат вимірювання подається у вигляді (*2-а форма*)

$$X;\ \Delta_{г} \text{ від } \Delta_{г,н} \text{ до } \Delta_{г,в};\quad P = 1. \qquad (11.10)$$

Якщо складові з несиметричними границями мають симетричні відносно математичного сподівання закони розподілу, то можна внести поправку $П$ в результат вимірювання X. Для цього потрібно її вирахувати

$$П = 0{,}5\sum_{i=1}^{n} (\Delta_{i,г,н} + \Delta_{i,г,в}). \qquad (11.11)$$

і модуль симетричного граничного значення похибки вимірювання

$$\left|\Delta_{г}\right| = 0{,}5\sum_{i=1}^{m} |\ \Delta_{i,г,в} + \Delta_{i,г,н}\ | + \sum_{i=m+n}^{n} \left|\Delta_{i,г}\right|. \qquad (11.12)$$

після чого подати результат вимірювання у вигляді (*3-я форма*)

$$(X - П) \pm \Delta_{г};\quad P = 1. \qquad (11.13)$$

Нарешті, коли закони розподілу симетричні тільки для частини складових із несиметричними границями, то

$$П = 0{,}5\sum_{i=1}^{l} (\Delta_{i,г,н} + \Delta_{i,г,н}), \qquad (11.14)$$

де i=1,..., l - номери цих складових.

$$\Delta_{г,н} = \sum_{i=l+l}^{m} \Delta_{i,г,н} - \sum_{i=m+1}^{n} \left|\Delta_{i,г}\right|, \qquad (11.15)$$

$$\Delta_{г,в} = \sum_{i=l+l}^{m} \Delta_{i,г,в} + \sum_{i=m+1}^{n} \left|\Delta_{i,г}\right|, \qquad (11.16)$$

і відповідно результат вимірювання (*4-а форма*)

$$X - П;\ \Delta_{г} \text{ від } \Delta_{г,н} \text{ до } \Delta_{г,в};\quad P = 1. \qquad (11.17)$$

Статистичне сумування складових $\Delta_{г}$ передбачає відомим вид законів їх розподілу. Якщо вид законів розподілу складових $\Delta_{г}$ невідомий, то приймають певні припущення у даному питанні.

Граничне значення складової $\Delta_{i,г}$ (надійні межі) пов'язано з її σ середньоквадратичним відхиленням (СКВ) співвідношенням:

$$\sigma_i = \Delta_{i,г} / g, \qquad \text{або} \qquad \Delta_{i,г} = \pm g\ \sigma_i, \qquad (11.18)$$

де g – коефіцієнт, який залежить від виду закону розподілу складових похибок (див. додаток 1) і заданого значення ймовірності P.

Для рівномірного закону і ймовірності P = 1, g=√3 (точно), для утнутого (усіченого) нормального розподілу g≈3. Якщо всі складові мають симетричні границі, то СКВ результуючої похибки, тобто похибки вимірювання, обчислюється за формулою

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2}. \qquad (11.19)$$

Модуль граничного значення похибки вимірювання (довірчий інтервал) з формули (11.18), замінивши g на t, буде

$$|\Delta_г| = t\sigma, \qquad (11.20)$$

де t залежить від заданого значення (довірчої) ймовірності P і кількості спостережень n (див. додаток 3) для виконання умови

$$X - \Delta_г <= X_{іст} <= X + \Delta_г \qquad (11.21)$$

де $X_{іст}$ – істинне значення вимірюваної величини.

При сумуванні нормально розподілених складових, результуючий закон також є нормальним. Залежність $t(P)$ для нормального закону табульована (Додаток 3). Приймають P = 0,95, для цього значення ймовірності t = 2, тобто

$$|\Delta_г| = 2\sigma, \qquad (11.22)$$

Після обчислень $|\Delta_г|$ результат вимірювання записують у вигляді

$$X \pm \Delta_г; \quad P=0,95. \qquad (11.23)$$

Якщо із загального числа n частина $\Delta_{i,г}$ з номерами i = 1, . . .m має несиметричні границі, то для них замість (11.18) σ_i обчислюється за формулою

$$\sigma = \frac{0,5(\Delta_{i,г,в} - \Delta_{i,г,н})}{g}, \qquad (11.24)$$

результуюче σ замість (11.19) знаходять за виразом

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \sigma_i^2 + \sum_{i=m+1}^{n} \sigma_i^2}\ , \qquad (11.25)$$

і $П$ за формулою (11.14).

Після цього є два варіанти продовження рішення – з уведенням і без уведення поправки:

1. Розрахувати $|\Delta г|$ за формулою (11.22) або (11.24) при P = 0,95 після чого представити результат у вигляді

$$(X - П) \pm \Delta_г; \qquad P. \qquad (11.26)$$

2. Розрахувати $\Delta_{г,н}$ і $\Delta_{г,в}$ за формулами:

$$\Delta_{г,н} = П - g\sigma, \qquad (11.27)$$

$$\Delta_{г,в} = П + g\sigma. \qquad (11.28)$$

Або, при P = 0,95

$$\Delta_{г,н} = П - 2\sigma, \qquad (11.29)$$

$$\Delta_{г,в} = П + 2\sigma, \qquad (11.30)$$

і представити результат у вигляді (2-а форма):

X; $\Delta_г$ від $\Delta_{г,н}$ до $\Delta_{г,в}$; $P = 0{,}95$. (11.31)

При записі чисел X і $\Delta_г$ *необхідно користуватися наступними правилами заокруглення*:

1 Число, що виражає результат вимірювання X, повинно закінчуватись цифрою того ж розряду, що і граничне значення похибки вимірювання $\Delta_г$. При цьому зайві цифри у цілих числах заміщаються нулями, а в десятковому дробі відкидаються.

Наприклад, число 1731 (любих одиниць вимірювання) при похибці вимірювання ±50 (тих же одиниць) заокруглюють до 1730, а число 1,731 при похибці ±0,05 – до 1,73.

Якщо десятковий дріб закінчується нулями, то відповідно відкидаються не всі нулі. Наприклад, для числа 1,5 при тій же похибці ±0,05, слід записати 1,50.

2 Якщо перша із цифр яку замінюють нулями або відкидають у числі X менша 5, то решту цифри не змінюють, якщо ж вона більша чи дорівнює 5, то останню цифру збільшують на одиницю. Наприклад, число 21,3 при зберіганні двох значущих цифр заокруглюють до 21, а число 17,5 до 18.

3 Число, що являє собою граничне значення похибки вимірювання $\Delta_г$, повинно містити не більше двох цифр, до того ж похибка заокруглення при обчисленні цього значення повинна бути не більше 5 %.

Заокруглення проводиться тільки в кінцевому результаті. Проміжні обчислення проводяться з числами, що мають хоча б один зайвий знак, щоб похибка наступного заокруглення була невеликою.

3 Приклади обчислень результату вимірювань

Приклад 3.1

Аналоговим вольтметром класу точності γ=0,5 із діапазоном вимірювання X_N від 0 до 3 В і шкалою на N = 150 поділок у нормальних умовах виміряна напруга постійного струму. Із заокругленням до десятої долі ділення зроблено відлік: $N_в$ = = 51,3 поділки. Вихідний опір джерела сигналу малий. Необхідно записати результат вимірювання.

Обчислення

Ціна поділки $Ц_п$ шкали вольтметра становить

$$Ц_п = X_N \ / N = 3/150 = 0{,}02 \text{ В/поділку.}$$

Відлік відповідає значенню вимірювальної напруги

$$U = N_в \, Ц_п = 51{,}3 \cdot 0{,}02 = 1{,}026 \text{ В.}$$

Аналіз складу похибки вимірювання

Вимірювання виконано в нормальних умовах, отже $\Delta_д = 0$. Вимірювання статичне, отже $\Delta_{дин} = 0$. Завдяки тому що вихідний опір джерела сигналу малий, похибку взаємодії у відповідності з (11.1) можна прийняти $\Delta_{вз} = 0$. Методична складова похибки в даному завданні $\Delta_м = 0$. Припустимо, що граничне значення

складової $\Delta_{від}$ можна прийняти симетричним і рівним по модулю одній четвертині поділки, тобто:

$$\Delta_{від,\,г} = \pm\, 0{,}25\, Ц_п = \pm\, 0{,}25 \cdot 0{,}02 = \pm\, 0{,}005 \text{ В}.$$

Таким чином, в даному випадку, є тільки дві складові похибки вимірювання $\Delta_о$ - основна похибка вольтметра і похибка відліку $\Delta_{від}$. Обчислимо модуль граничного значення $\Delta_о$:

$$|\Delta| = \frac{\gamma X_N}{100}.$$

де γ – границя допустимого значення приведеної основної похибки, клас точності приладу;

X_N – нормуюче значення величини для даного приладу (діапазон шкали).

Підставивши значення $\gamma = 0{,}5$ % і $X_N = 3$ В, одержимо:

$$|\Delta_{о,г}| = 10^{-2} \cdot 0{,}5 \cdot 3 = 0{,}015 \text{ В}.$$

У відповідності з (11.6)

$$|\Delta_{о,г}| = \Delta_{о,г\,+}\, \Delta_{від,\,г} = 0{,}015 + 0{,}005 = 0{,}02 \text{ В}.$$

Результат вимірювання згідно з (11.7) слід записати у вигляді

$$U_1 = (1{,}03 \pm 0{,}02) \text{ В}; \quad P = 1.$$

Приклад 3.2

При умовах попереднього прикладу припустимо, що температура навколишнього середовища змінюється в границях робочих умов, а вольтметр відноситися до ЗВ другої групи згідно з ГОСТ 22261-82.

Обчислення

В даному випадку додається третя складова – додаткова температурна похибка $\Delta_д = \Delta_{д,т}$. Для ЗВ класу точності 0,5 область нормальних значень температури становить $t_{но} = (20 \pm 2)$ °С, а область робочих температур $t_н \div t_в = (+10 \div +35)$ °С, при цьому додаткова температурна похибка не перевищує основної на кожні $\Delta t_\gamma = 10$ °С.

Визначимо граничні значення впливаючої величини:

$$\zeta_в = t_в - t_{но} = 35\text{-}20 = 15 \text{ °С};$$

$$\zeta_н = t_н - t_{но} = 10\text{-}20 = -10 \text{ °С}.$$

Через те що, $\zeta_в > \zeta_н$ граничне значення будемо обчислювати по $\zeta_в$

$$|\Delta_{д,т,г}| = \frac{\zeta_в \cdot |\Delta_{о,г}|}{10} = 0{,}1 \cdot 15 \cdot 0{,}015 = 0{,}0225 \text{ В}.$$

У відповідності з (11.6) маємо

$$|\Delta_г| = \Delta_{о,г} + \Delta_{від,г} + \Delta_{д,т,г} = 0{,}015 + 0{,}005 + 0{,}0225 = 0{,}0425 \text{ В}.$$

Заокруглivши, одержимо $|\Delta_г| = 0{,}04$ В.

Результат вимірювання

$$U_2 = (1{,}03 \pm 0{,}04) \text{ В}; \quad P = 1.$$

Приклад 3.3

Ті ж умови, що і в завданні 3.2, але відомо, що вихідний опір об'єкту знаходиться в межах $0 < R_{вих} < 200$ Ом, а вхідний опір вольтметра $R_v = (10{,}0 \pm 0{,}1)$ кОм.

Обчислення

В завданні додається четверта складова – похибка від взаємодії вольтметра з об'єктом $\Delta_{вз}$. Згідно з (11.1) вона завжди від'ємна й максимальна по модулю при максимальному $R_{вих}$ і мінімальному R_v отже:

$$\left|\delta_{вз}\right|_{\max} = \frac{R_{вих,\max}}{R_{V,\min}} = \frac{200}{9900} = 0{,}0202 \text{ В}.$$

Відповідно при $U = 1{,}026$ В

$$\left|\Delta_{вз}\right|_{\max} = \delta_{вз} U = 0{,}0202 \cdot 1{,}026 = 0{,}0207 \text{ В}.$$

Тоді $\Delta_{вз} = 0 \div - 0{,}0207$ В,

тобто ця складова має несиметричні границі

$$\Delta_{вз,г,н} = - 0{,}0207 \text{ В}; \quad \text{та} \quad \Delta_{вз,г,в} = 0.$$

$\Delta_{вз}$ не має симетричного закону розподілення, тому вносити поправку не можна і у відповідності з (11.8) і (11.9) необхідно обчислити несиметричні границі похибки вимірювання.

З використанням результатів обчислення $\Delta_г$ в приклад 3.2 одержимо:

$$\Delta_{г,н} = \Delta_{вз,г,н} + \Delta_г = - 0{,}0207 - 0{,}0425 = - 0{,}0632 \text{ В};$$

$$\Delta_{г,в} = \Delta_{вз,г,в} + \Delta_г = 0 + 0{,}0425 = 0{,}0425 \text{ В}.$$

У відповідності з (11.10) після заокруглення результат вимірювання слід подати у вигляді:

$$U_З = 1{,}03 \text{ В}; \ \Delta_г \text{ від } - 0{,}06 \text{ до } 0{,}04 \text{ В}; \quad P = 1.$$

Розглянемо ще раз складову $\Delta_{вз}$, з (11.1) випливає, що при заданих діапазонах можливих значень $R_{вих}$ і R_v і закон розподілення $\Delta_{вз}$ практично визначається законом розподілення $R_{вих}$. Якщо в доповнення до вхідних даних є відомості про те, що закон розподілення $R_{вих}$ симетричний, то можна скористатися цим і внести поправку. У відповідності з (11.11)

$$П = 0{,}5(\Delta_{вз,г,н} + \Delta_{вз,г,в}) = 0{,}5(- 0{,}0207 + 0) = - 0{,}01035 \text{ В}.$$

Піся чого

$$X - П = 1{,}03 + 0{,}01035 = 1{,}04035 \text{ В}.$$

Після заокруглення

$$X - П = 1{,}04 \text{ В}.$$

Відповідно з (11.12) і з використанням результатів попередніх обчислень, одержимо:

$$|\Delta_г| = П + \Delta_{г,в} = 0{,}01035 + 0{,}0425 = 0{,}05285 \text{ В}.$$

Заокруглено

$$|\Delta_г| = 0{,}05 \text{ В}.$$

У відповідності з (11.13) результат вимірювання має вигляд

$$U_З = (1{,}04 \pm 0{,}05) \text{ В}; \quad P = 1.$$

Приклад 3.4

Ті ж умови, що і в завданні 3.3. Але обчислимо значення $\Delta_г$ при статистичному сумуванні складових. Задаємось вірогідністю $P = 0{,}95$ виконання умови (11.21). У відповідності з (11.18), (11.19) і (11.25), прийнявши закон розподілення для $\Delta_{від,г}$ і $\Delta_{вз}$ рівномірним, а для $\Delta_{о,г}$ і $\Delta_{д,т}$ утнутим нормальним, одержимо:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3}(0{,}005^2 + 0{,}01035^2) + \frac{1}{9}(0{,}015^2 + 0{,}0225^2)} = 0{,}01103 \text{ В}.$$

У відповідності з (11.22)

$$|\Delta_г| = 2\sigma = 20{,}01103 = 0{,}02206 \text{ В}.$$

Округлено

$$|\Delta_г| = 0{,}02 \text{ В}.$$

Результат вимірювання з уведеною поправкою, згідно (11.26) можна подати у вигляді:

$$U_4 = (1{,}04 \pm 0{,}02) \text{ В}; \quad P = 0{,}95.$$

4 Опис дослідної установки

Лабораторна робота виконується з використанням учбового лабораторного стенда К 242, експлуатація якого здійснюється у відповідності з технічною документацією на стенд, яка знаходиться на робочому місці.

5 Хід виконання лабораторної роботи

5.1 Для спостережень складіть схему по рис.1 і зарисуйте її в звіт по роботі.

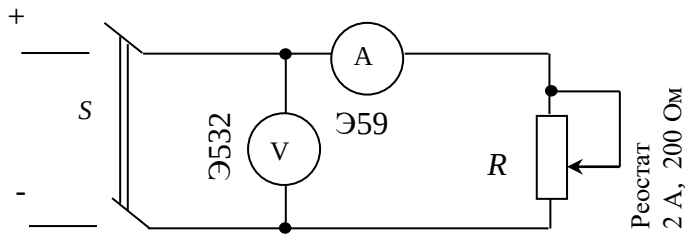
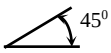


Рис. 1

5.2 Запишіть дані вимірювальних приладів в таблицю 1.

Таблиця 1. Метрологічні та технічні характеристики приладів

Назва приладу, тип	Сис-тема	Рід стру-му	Клас точ-ності	Діапазон виміру	Ціна поділки	Робоче поло-ження	Вхідні дані		
							$R_{вх}$, Ом	L, мГн	f, Гц
Ампер-метр, Э514			0,5	0,1–1,0 А	0,1 А		0,035	0,052	40-100-2000
Вольт-метр, С50			1,0	15-75 В	1,0 В		Рівний опору ізоляці	$C_{вх}$= =7 пФ	20 Гц-5 МГц--10 МГц

Увага! В приведеній таблиці подано зразок заповнення! Таблицю необхідно заповнити даними приладів використаних у роботі! На рис.1 типи приладів теж позначені умовно!

5.3 При заданому викладачем значенні напруги, міняючи опір навантаження, проведіть п’ять спостережень струму та опору навантаження і дані записують в таблицю 2.

Таблиця 2. Дані спостережень

№ досліду	Покази вольтметра		Покази амперметра		Навантаження
	Ділень шкали	Вольт	Ділень шкали	Ампер	$R_{вих}$, Ом
1					
2					
3					
4					
5					

5.4 По вибраному викладачем результату спостережень необхідно обчислити результат вимірювання аналогічно прикладам 3.1 – 3.4 із тими ж самими змінами впливаючих величин, які вводяться в прикладах 3.2.-.3.4, і записати їх результати в стандартній формі в таблицю 3, яка обов’язково входить в звіт.

5.5 В звіті в висновках подати аналіз отриманих результатів і пояснити вплив додаткових факторів на точність вимірювань.

6 Запитання для самоперевірки

1 Які похибки мають вимірювальні прилади?
2 Що таке основна похибка приладу, які похибки вона може включати?
3 Що означає клас точності приладу, як його визначають і як позначають.
4 Які є додаткові похибки, як вони враховуються?
5 Як враховується похибка відліку?
6 Яка методика обчислювання похибок при прямих методах вимірювання?
7 Які правила заокруглень результату вимірювань?
8 Які є форми представлення результатів вимірювання?
9 Які є закони розподілу складових похибок?
10 Як визначають закони розподілу складових похибок?

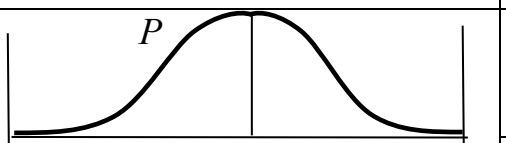
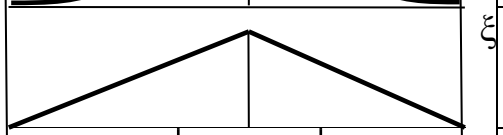
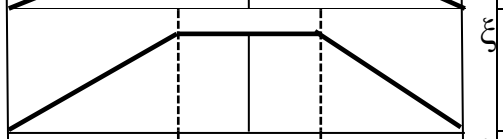
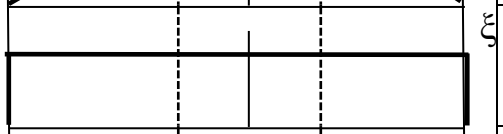
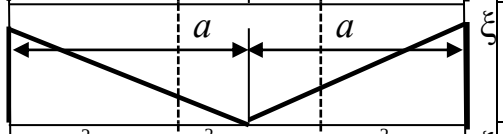
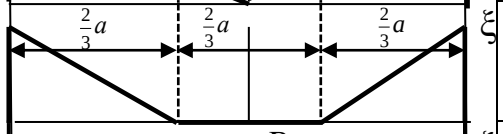
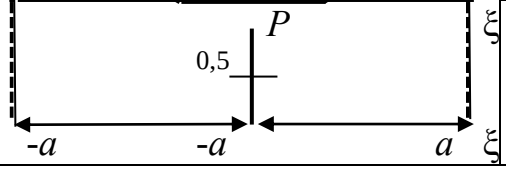
Таблиця 3. Результати вимірювань з врахуваннм впливаючих величин

№ прик-ладу	*П*	*Х-П*	Впливаючі величини										Результат вимірювань
			$\Delta_{о}$	$\Delta_{д,т}$	$\Delta_{дин}$	$\Delta_{вз,г,н}$	$\Delta_{вз,г,в}$	$\Delta_{м}$	$\Delta_{від}$	$\Delta_{о,г}$	$\Delta_{г,н}$	$\Delta_{г,в}$	
3.1	-	-	±0,015	0	0	0	0	0	±0,005	±0,02	-	-	(1,03±0,02) В; P=1
3.2	-	-	±0,015	-0,0225	0	0	0	0	±0,005	±0,0425	-	-	(1,03±0,04) В; P=1
3.3	-	-	±0,015	-0,0225	0	-0,0207	0	0	±0,005	±0,0425	-0,06632	0,0425	1,03 В; $\Delta_{Г}$ від-0,06 до 0,04 В; P=1
3.3п	0,01035	1,04035	±0,015	-0,0225	0	-0,0207	0	0	±0,005	±0,05285	-	-	(1,04±0,05) В; P=1
3.4	0,01035	1,04035	±0,015	-0,0225	0	-0,0207	0	0	±0,005	±0,02	-	-	(1,04±0,02) В; P=0,95

Увага! В приведеній таблиці подано зразок заповнення! Дані взяті по прикладам 3.1...3.4.
Таблицю необхідно заповнити даними з своєї роботи!

Додаток 1

Стандартні апроксимації функцій розподілу складових похибок

Розподіл	Скорочне позначення	Графік	$g = \frac{a}{\sigma}$
Нормальний	Норм		3,0 при P=0,997; 2,0 при P=0,954
Трикутний	Δ		2,4
Трапецевидний	Трап		2,8
Рівномірний	Рівн		1,7
Антимодальний I	Ам I		1,4
Антимодальний II	Ам II		1,2
Дискретний	Дискр		1,0

Додаток 2.

Нормальні умови використання аналогових вимірювальних приладів класу 0,5 по ГОСТ 30012.1-2002.

Назва впливаючих величин	Значення величини
Температура навколишнього середовища, °С	23±2
Відносна вологість повітря, %	40…60
Атмосферний тиск, кПа	84…106
Напруга сітки живлення, В	220±11
Частота сітки живлення, Гц	50±0,5

Додаток 3

Значення *t* для різних довірчих ймовірностей (розподіл Стьюдента)

Степенів свободи *n-1*	*P* = 0,9	*P* = 0,95	*P* = 0,99	*P* = 0,999
2	2,92	4,30	9,93	31,60
3	2,353	3,182	5,841	12,94
4	2,132	2,776	4,604	8,61
5	2,015	2,571	4,032	6,86
6	1,943	2,447	3,707	5,96
7	1,895	2,365	3,499	5,40
8	1,860	2,306	3,355	5,04
9	1,833	2,262	3,250	4,78
10	1,812	2,228	3,169	
11	1,796	2,201	3,106	4,49
13	1,771	2,160	3,012	4,12
15	1,753	2,131	2,947	4,07
17	1,740	2,110	2,898	3,97
19	1,729	2,093	2,861	3,88
30	1,697	2,042	2,750	3,66
60	1,671	2,000	2,660	3,46
120	1.658	1.980	2,617	3,37
∞	1,645	1,960	2,576	3,29

Примітка: *n* - кількість спостережень.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7
ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

Мета роботи — вивчення випадкових похибок і основних понять теорії імовірностей, ознайомлення з основними характеристиками випадкових величин і можливими способами їх експериментального визначення на прикладі моделювання повірки точності показів електровимірювального приладу.

1 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ІМОВІРНОСТЕЙ

Випадкова похибка - складова похибки, що не прогнозовано змінюється в ряді вимірювань тієї ж величини. Випадкову похибку визначити неможливо, тому її вплив враховують методами математичної статистики та теорії ймовірності.

Випадковою величиною називають величину, значення якої змінюються при повторенні дослідів деяким, заздалегідь не передбачуваним чином. На відміну від невипадкових (детермінованих величин), для випадкової величини не можна заздалегідь точно сказати, яке конкретне значення вона прийме у визначених умовах, а можна тільки вказати закон її розподілу. Закон розподілу вважається заданим, якщо:

1) зазначена безліч можливих значень випадкової величини;

2) зазначений спосіб кількісного визначення імовірності попадання випадкової величини в будь-яку область безлічі можливих значень.

Імовірність попадання в задану область може бути визначена формулою:

$$p_m = \lim_{N\to\infty} \frac{N_m}{N} . \qquad (1.1)$$

Тут N_m — кількість спостережень випадкової величини, що знаходяться в заданій області;

N - загальне число спостережень (частотне визначення імовірності).

Аналітичними вираженнями законів розподілу випадкових величин є функції розподілу імовірностей — інтегральна і диференційна.

Інтегральна функція розподілу $F(x)$ випадкової величини X показує імовірність того, що випадкова величина не перевищує деякого заданого чи поточного значення x, тобто $F(x)=P\{X \le x\}$*. Отже, імовірність того, що значення випадкової величини X розміщене між x_1 і x_2 дорівнює різниці значень функції розподілу, обчислених у цих двох точках:

$$P\{x_1 \prec X \succeq x_2\} = F(x_2) - F(x_1) . \qquad (1.2)$$

Аналогічно,

$$P\{X \succ x\} = 1 - F(x) \qquad (1.3)$$

*Через P звичайно позначають оператор імовірності, а через p — конкретну величину імовірності.

Інтегральна функція розподілу випадкової величини X має наступні властивості:

1) $\lim\limits_{x\to-\infty} F(x) = F(-\infty) = 0;$ 2) $\lim\limits_{x\to\infty} F(x) = F(\infty) = 1;$

3) $F(x) \geq 0$ *для всіх* x; 4) $F(x_2) \geq F(x_1)$, *якщо* $x_2 \geq x_1$.

Надалі будемо розглядати лише безперервні випадкові величини, область можливих значень яких включає всі точки з деякого інтервалу. Для такої величини можливий вигляд функції розподілу *F{x)* зображений на рис. 1.1.

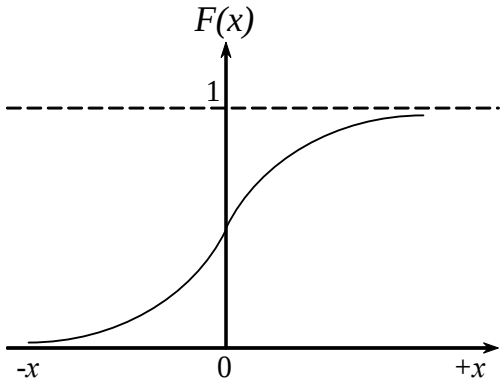


Рис. 1.1

Якщо функція *F (x)* диференційована для всіх значень випадкової величини *X,* то закон розподілу імовірностей може бути виражений в аналітичній формі також за допомогою *диференційної функції* розподілу імовірностей:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \lim_{\Delta x\to 0} \frac{P\{x < X \leq x + \Delta x\}}{\Delta x} (\Delta x > 0). \quad (1.4)$$

Таким чином, значення функції *f {x}* наближено дорівнює відношенню імовірності попадання випадкової величини в інтервал $(x,\ x+\Delta x)$ до довжини Δx цього інтервалу, коли Δx — нескінченно мала величина. Тому функцію *f (x)* називають також *функцією щільності розподілу імовірностей* (чи коротше-*функцією густини імовірності)*.

Основні властивості функції *f (x):*

1) $f(x) \geq 0;$ 2) $\int\limits_{-\infty}^{\infty} f(x)\,dx = 1;$

3) $\int\limits_{-\infty}^{x} f(z)\,dz = F(x);$ 4) $\lim\limits_{|x|\to\infty} f(x) = 0.$

,

де - *z*-змінна інтегрування.

За допомогою диференційної функції розподілу обчислюється імовірність перебування випадкової величини в будь-якій області з безлічі її можливих значень. Зокрема,

$$P\{X \leq a_1\} = \int_{-\infty}^{a_1} f(x)dx; \quad P\{X \succ a_2\} = \int_{a_2}^{\infty} f(x)dx;$$

$$P\{a_1 \prec X \leq a_2\} = \int_{a_1}^{a_2} f(x)dx. \quad (1.5)$$

Для неперервної випадкової величини імовірність можна визначити як відносну частину площі під кривою щільності розподілу імовірностей *f(x).* Так, наприклад, імовірність того, що випадкова величина *X* прийме значення, менше a_1 , дорівнює відносній частоті площі під кривою *f{x}* ліворуч від точки a_i (рис. 1.2*а)*; імовірність того, що ця величина *X* прийме значення, більше a_2, дорівнює відносній частині площі під кривою *f (x)* праворуч від точки a_2; (рис. 1.2*в*);

імовірність того, що вона прийме значення, розміщене між a_1 і a_2 дорівнює відносній частині площі під кривою *f(x)* між точками a_1 і a_2; (мал. 1.2*б).*

Як інтегральна, так і *диференційна* функції розподілу є вичерпними імовірнісними характеристиками випадкової величини. Однак деякі основні властивості випадкових величин можуть бути описані більш просто за допомогою визначених числових параметрів.

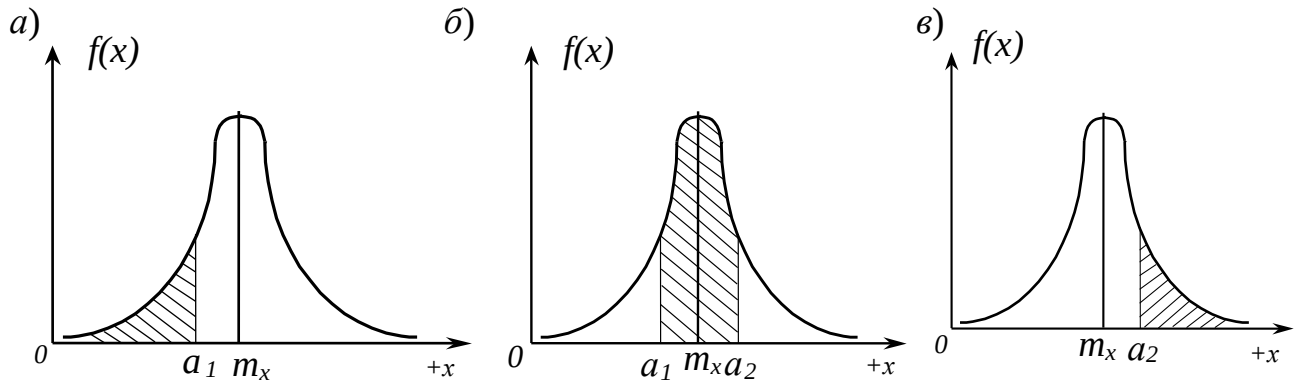


Рис. 1.2

Найбільшу роль серед них на практиці грають два параметра, які характеризують центр розсіювання (центр розподілу) випадкової величини і ступінь її розсіювання навколо цього центру. Характеристикою центру розподілу є *математичне сподівання* M_x, випадкової величини X (часто називають також *генеральним середнім значенням*):

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x\, f(x)\, dx. \tag{1.6}$$

Ступінь розсіювання випадкової величини X відносно M_x, може бути охарактеризована за допомогою *генеральної дисперсії* D_x^2 *:*

$$D_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x)^2\, f(x)\, dx. \tag{1.7}$$

Якщо *f(x)* все в більшому ступені концентрується поблизу M_x то значення D_x^2 зменшуються. Якщо ж маються дуже віддалені від M_x значення випадкової величини *X,* то дисперсія D_x^2 збільшується. Квадратний корінь з дисперсії $\sqrt{D_x^2}$ називається *середнім квадратичним відхиленням* (СКВ) σ_x

Всі описані вище функції і пов’язані з ними параметри є теоретичними, що характеризують визначені властивості досліджуваного об'єкту. На практиці майже завжди ці характеристики невідомі і виникає задача експериментального (емпіричного) визначення тих чи інших характеристик випадкових величин на основі спостережень і приймають практичні значення: $M_x \approx$ середнє арифметичне $\overline{x}$, дисперсія $D_x^2 \approx \sigma_x^2$, СКВ $\approx \sigma$.

2 Експериментальний аналіз одномірної випадкової величини

Нехай є набір (вибірка) експериментальних даних $x_1, x_2,...,x_N$. Обробку цих даних для одержання емпіричних характеристик одномірної випадкової величини роблять в такий послідовності.

2.1 Побудова варіаційного ряду. Варіаційний ряд $z_1, z_2,...,z_N$ одержують з вихідних даних шляхом розташування $x_m(m=1, 2,\ldots, N)$ у порядку зростання від $x_{\min}$ до $x_{\max}$ так, щоб $x_{\min} = z_1 \le z_2 \le ... \le z_N = x_{\max}$.

Нехай, наприклад, маємо $N= 5$ спостережень; $x_1= 5$; $x_2 = 2$; $x_3= 4$; $x_4=5$; $x_5=7$. Тоді їм відповідає варіаційний ряд $z_1=2$; $z_2=4$; $z_3=5$; $z_4=5$; $z_5=7$.

2.2 **Побудова діаграми накопичених частот** $\hat{F}_N(z)$ яка є емпіричним аналогом інтегрального закону розподілу. Діаграму будують відповідно до формули

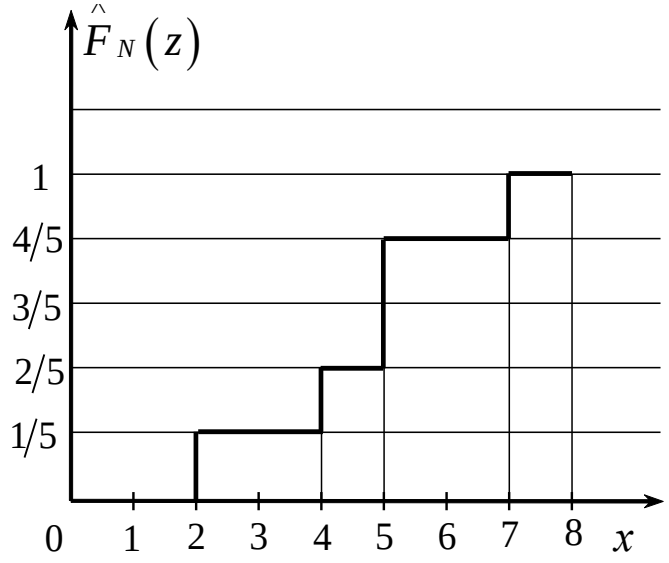


Рис.1.3.

$$\hat{F}_N(z) = \sum_{j=1}^{\mu_N(z)} \frac{1}{N}, \quad (1.8)$$

де $\mu_N(z)$ — число елементів у вибірці, для яких значення $z_j<z$. Практично це робиться так. На осі абсцис вказують значення спостережень x_m (або z_l). Значення по осі ординат дорівнює нулю лівіше точки $x_{\min}$; у точці $x_{\min}$ і далі у всіх інших точках x_m діаграма має стрибок, рівний $1/N$. Якщо існує декілька співпадаючих значень x_m, то в цьому місці на діаграмі відбувається стрибок, рівний λ/N, де λ — число співпадаючих точок. Ясно, що для величин $x>x_{\max}$ значення діаграми накопичених частот дорівнює 1. Відзначимо, що якщо $N \to \infty$, то $\hat{F}_N(x) \to F(x)$.

Використовуючи дані попереднього прикладу, побудуємо відповідну діаграму (рис. 1.3)

2.3 Побудова гістограми вибірки. Гістограма $\hat{f}_N(x)$ є емпіричним аналогом функції щільності розподілу $f(x)$. Звичайно її будують у такий спосіб:

а) Знаходять попередню кількість квантів (інтервалів), на яке повинна бути розбита вісь Ox. Цю кількість K визначають за допомогою оцінної формули

$$K = 1 + 3{,}2 \lg N, \quad (1.9)$$

де знайдене значення округляють до найближчого цілого числа.

б) Визначають довжину інтервалу:

$$\Delta x = (x_{\max} - x_{min}) / K. \qquad (1.10)$$

Величину Δx можна округлити для зручності обчислень.

в) Середину області зміни вибірки (центр розподілу) $(x_{\max} + x_{\min}) / 2$ приймають за центр деякого інтервалу, після чого легко знаходять границі й остаточну кількість зазначених інтервалів так, щоб у сукупності вони перекривали всю область від $x_{\min}$ до $x_{\max}$.

г) Підраховують кількість спостережень N_m що потрапило в кожен квант: N_m дорівнює числу членів варіаційного ряду, для яких справедлива нерівність

$$x_m \le z_l < x_m + \Delta x \qquad (1.11)$$

Тут x_m і $x_m + \Delta x$ — границі m-го інтервалу. Відзначимо, що при використанні формули (1.11) значення z_1, що потрапили на границю між $(m$-1)-м m-м інтервалами , відносячи до *m-му* інтервалу.

д) Підраховують відносну кількість (відносну частоту) спостережень N_m/N , що потрапили в даний квант.

е) Будують гістограму, яка представляє собою східчасту криву, значення якої на m-му інтервалі $(x_m, \ldots x_m + \Delta x)$ де $(m$=1, 2, ..., K) постійне і дорівнює N_m/N, чи з урахуванням умови $\int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(z)dz = 1$, дорівнює $(N_m/N)\Delta x$.

Нехай, наприклад, мається вибірка з 40 спостережень, а відповідний їй варіаційний ряд має вид $x_{\min}=z_1=0{,}3$; $z_2=0{,}4;\ldots.$; $z_{40}=x_{\max}=7{,}1$.

По формулі (1.9) одержуємо

$$K = 1 + 3{,}2 \cdot lg40 = 1 + 3{,}2\ 1{,}602 = 6{,}13;$$

приймаємо K=7. Тоді $\Delta x = (7{,}1 - 0{,}3)/7 = 0{,}971$; приймємо $\Delta x = 1{,}0$. Знаходимо $(x_{\min}+x_{\max})/2=(0{,}3+7{,}1)/2=3{,}7$. Після чого легко визначаємо границі інтервалів (рис. 1.4). Допустимо, після такої розбивки з'ясувалося, що в перший інтервал потрапило два значення x_i: N_1 =2; у другий - чотири: N_2=4; у наступні: N_3=9; N_4=13; N_5=8; N_6=3; N_7=1. Вираховуємо значення функції $\hat{f}_N(x)$, тобто P, для кожного інтервалу (додаток 1). Відповідна гістограма зображена на рис. 1.4.

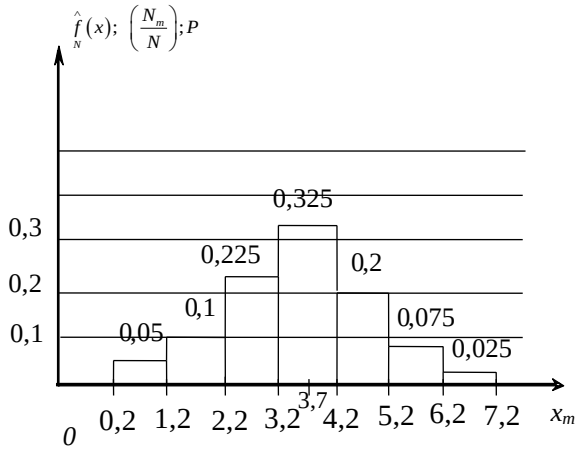


Рис. 1.4

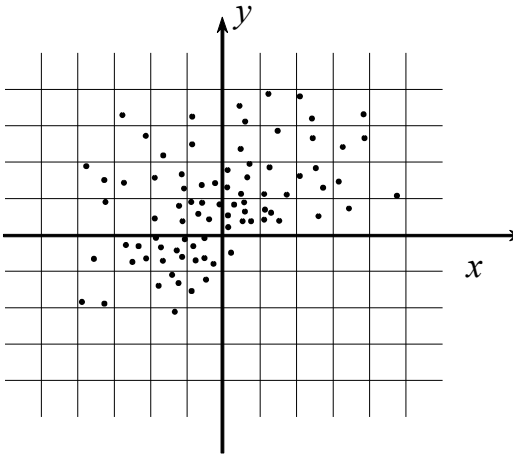


Рис. 1.5

2.4 Визначення практичних оцінок математичного сподівання $\overline{x}$, дисперсії σ_x^2 і середнього квадратичного відхилення СКВ σ вираховують по формулах:

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \tag{1.12}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\Delta x_i)^2, \tag{1.13}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2}\,. \tag{1.14}$$

Відзначимо, що множник 1/(*N* — 1) (замість 1/*N*) у формулі (1.13) уводиться для одержання незміщеної оцінки дисперсії.

3 ЗАВДАННЯ І ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Змоделювати дослідження повірки точності показів електровимірювального приладу. Для моделювання використовують кидання грального кості (кубика). Тип приладу, відмітку шкали яку досліджують (повіряють), клас точності та множник на який помножують очки, що випали вибирають по таблиці 1.

Таблиця 1

Остання цифра залік.книжки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Назва приладу	Вольт-метр	Ампер-метр	Ват-метр	Вольт-метр	Ампер-метр	Ват-метр	Вольт-метр	Ампер-метр	Ват-метр	Вольт-метр
Діапазон вимірювань	0-250 В	0-5 А	0-500 Вт	0-150 В	0-5 mA	0-750 Вт	0-50 В	0-1 А	0-950 Вт	0-500 В
Клас точності	1,5	2,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	2,5
Відмітка шкали	200 В	4 А	400 Вт	100 В	4 mA	500 Вт	30 В	0,8 А	800 Вт	400 В
Множник, *k*	0,1	0,01	0,1	0,1	0,001	0,1	0,01	0,001	0,1	1

3.1 По даних табл. 1 обчислити допустиму основну похибку для заданого приладу.

3.2 Провести по 21-у спостереженню при підході до заданої поділки як з “низу” і які записуються з знаком „мінус”, так і з “верху” і які записуються із знаком „плюс”. В кожній групі спостережень перші 5 показів множать на 3*k*, наступні 8 показів множать на 2*k*, решту 8 показів множать на *k*. Прийнявши значення повіряємої відмітки за середнє арифметичне $\overline{X}$, то отримані значення

$\Delta x_i = (x_i - X)$ будуть рівні похибці показу приладу для даної відмітки шкали. Отримані дані занести в таблицю 2*а* і 2*б*.

Таблиця 2*а*. Підхід з „низу”

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	....	19	20	21
Значення показів, Δx_i (випадкове відхилення)											
Квадрат випадкового відхилення, $(\Delta x_i)^2$											
Дисперсія, D^2											
СКВ, σ											

Таблиця 2*б*. Підхід з „верху”

Рисується аналогічно таблиці 2*а*.

3.3 На основі отриманих спостережень:

а) побудувати спільний варіаційний ряд (об’єднують дані обох таблиць);

б) за допомогою варіаційного ряду побудувати діаграму накопичених частот;

в) побудувати гістограму вибірки;

г) розрахувати по формулах (1.13)—(1.14) оцінки дисперсії D і середнього квадратичного відхилення σ випадкових похибок (за оцінку математичного сподівання приймається значення повіряємої відмітки шкали).

д) вирахувати максимальну варіацію показів приладу по формулі $\Delta B_{max}=x_{max}-x_{min}$.

(*Варіацією показів приладу називають різницю між окремими показами приладу при підході з „низу” та з „верху” до однієї і тієї ж поділки*).

е) зробити висновок про придатність даного приладу до використання. (Якщо максимальні абсолютна похибка Δx_{max} і варіація показів ΔB_{max} перевищують основну похибку приладу то прилад не придатний до використання).

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1 Дати визначення випадкової величини.

2 Дати визначення одномірного інтегрального і диференціального законів розподілу випадкової величини і назвати їх властивості.

3 Які числові параметри найбільше часто використовуються як міри розташування і розсіювання одномірної сукупності випадкових величин?

4 Яким чином проводиться побудова варіаційного ряду, діаграми накопичених частот.

5 Яким чином проводиться побудова гістограми вибірки одномірної випадкової величини?

6 Що таке густина розподілу випадкових похибок? Властивості густини.

7 Як можна зменшити випадкову похибку вимірювання?

8 Що таке математичне сподівання і дисперсія результату вимірювання

Додаток 1

Розрахунки по побудові гістограми рис. 1.4 проводять виходячи з того, що вся вибірка, тобто кількість спостережень, згідно визначення, приймається рівним 1. Тоді висота ступеньок для кожного інтервалу буде дорівнювати:

$$P_1 = \frac{N_1}{N} = \frac{2}{40} = 0,05;$$

$$P_2 = \frac{N_2}{N} = \frac{4}{40} = 0,1;$$

$$P_3 = \frac{N_3}{N} = \frac{9}{40} = 0,225;$$

$$P_4 = \frac{N_4}{N} = \frac{13}{40} = 0,325;$$

$$P_5 = \frac{N_5}{N} = \frac{8}{40} = 0,2;$$

$$P_6 = \frac{N_6}{N} = \frac{3}{40} = 0,075;$$

$$P_7 = \frac{N_7}{N} = \frac{1}{40} = 0,025;$$

$$\sum P_i = 1,0$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8
ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЕННЯ

Мета роботи: освоїти методику вимірювання опору заземлення, набути навички користування приладом Ф4103-М1. Дослідити вплив питомого опору та стану ґрунту, площі та глибини розташування електродів на опір заземлення

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Під час виконання лабораторної роботи потрібно знати такі визначення:

заземлювальний пристрій - сукупність електрично з'єднаних заземлювача і заземлювальних провідників;

заземлювач - провідник або сукупність електрично з'єднаних між собою провідників, які перебувають у надійному контакті з землею;

штучний заземлювач - заземлювач, спеціально виконаний для заземлення;

природний заземлювач - електропровідні частини комунікацій, будинків і споруджень виробничого або іншого призначення, які перебувають у надійному контакті з землею і використовуються для заземлення;

заземлювальний провідник - провідник, який з’єднує заземлювані частини із заземлювачем;

питомий опір грунту - опір між протилежними площинами куба ґрунту з ребрами розміром 1 м.

Заземлювальні пристрої (ЗП) повинні задовольняти вимоги забезпечення експлуатаційних режимів роботи електроустановок, а також вимоги забезпечення електробезпечності обслуговуючого персоналу і захисту електроустановок.

Загальні принципи раціонального конструювання (розміщення та кількість елементів), а також умови задоволення вимог щодо виконання ЗП електроустановок викладено у відповідних нормативних документах і проектній документації.

Одним з основних параметрів, які характеризують стан ЗП, є опір.

На ЗП, які знаходяться в експлуатації, повинен бути паспорт, шо містить виконавчу схему заземлення і дані на елементи заземлювача, питомий опір землі, результати перевірок, ремонтів і змін, внесених у цей пристрій.

Відповідно до вимог ҐКД 34.20.507-2003 і ГКД 34.20.302-2002 періодичність вимірювання опору ЗП така:

- для ново зведених ЗП;
- після капітального ремонту;
- після монтажу;
- після реконструкції;

але не рідше одного разу на 12 років.

На повітряних лініях (ПЛ) електропередачі напругою до 1 кВ вимірювання виконуються:

- на опорах з грозозахистом;
- на опорах з повторними заземлювачами нульового проводу;
- вибірково у 2 % загальної кількості опор.

В обсяг вимірювань опору ЗП після монтажу, переобладнання і капітального ремонту повинна входити також і перевірка цілісності заземлювальних провідників, прокладених приховано, які знаходились у зоні робіт або самі були об'єктом проведення цих робіт, тому що в процесі виконання перебудови, капітального ремонту і монтажу може бути порушено цілісність самого ЗП і з'єднань його елементів, можуть виявитись від'єднаними (приєднаними) природні заземлювачі або приєднані додаткові елементи заземлювачів.

Вплив розмірів електрода і глибини його розташування на опір заземлення електрода

Вплив розміру: збільшення діаметра штиря зменшує опір заземлення незначно. Подвоєння діаметра знижує опір менше, ніж на 10 % .

Вплив глибини заземлення штиря: опір заземлення зменшується зі збільшенням глибини. Теоретично при подвоєнні глибини опір зменшується на 40 %.

Вплив питомого опору ґрунту на опір заземлення електрода

Питомий опір ґрунту є головним чинником, що визначає опір заземлення й глибину заземлення штиря, яка буде потрібна для забезпечення малого опору. Питомий опір ґрунту сильно змінюється залежно від району земної кулі й пори року. Він в значній мірі залежить від вмісту в ґрунті електропровідних мінералів й електролітів у вигляді води з розчиненими в ній солями. Сухий ґрунт, що не містить розчинних солей, має високий опір.

Методи вимірювання опору розтіканню

Розрізняють такі основні методи: амперметра-вольтметра, компенсаційний, мостовий та безпосереднього вимірювання опору.

Мостові методи вимірювання, незважаючи на високу точність вимірів, не одержали широкого поширення через складність вимірювань і розрахунків. При вимірюваннях варто враховувати, що земля має іонну провідність і при прикладенні до землі постійної напруги в місцях дотику електродів із землею виникає е.р.с. поляризації, шо може значно вплинути на результати вимірювань. Тому дія вимірювання опору розтіканню застосовується змінний струм.

Найбільш простим є метод амперметра-вольтметра, що і одержав найбільше поширення. Схема для вимірювання опору заземлення методом

амперметра-вольтметра приведена на рисунку 1.

Якщо правильно розташувати допоміжні електроди В і ЗН й внутрішній опір вольтметра Я у значно більше опору кола зонда ЗН, то опір розтіканню випробуваного заземлювача $г_х$ можна визначити по формулі:

$$r_x = \frac{u}{I}.$$

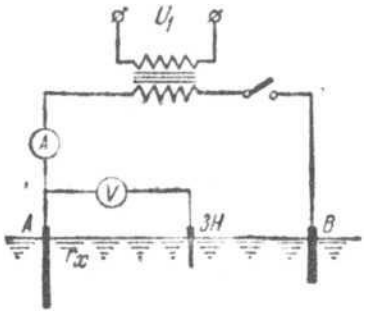


Рисунок 1 - Схема для вимірювання опору заземлення методом амперметра-вольтметра

Якщо перевищує в 100 разів опір ланцюга зонда ЗН (І1зн$^+$ опір сполучних проводів), то похибка вимірювань не перевищуватиме 10%. Цей метод є найпоширенішим при проведенні відповідальних випробувань, особливо при вимірюванні малих опорів заземлень.

Підготовка до вимірювання опору розтіканню

Перед проведенням вимірювань опору ЗП необхідно вивчити проектну документацію, акти на виконання прихованих робіт, розташування підземних комунікацій (трубопроводів, кабелів і т.д.) у районі ЗП, ознайомитись з результатами попередніх вимірювань.

Опір ЗП вимірюється при приєднаних природних заземлювачах. Заземлювач, що служить для повторного заземлення нульового проводу мережі, повинен бути від’єднаний від нульового проводу. Для цього повинні бути передбачені надійні болтові з'єднання.

Вимірювання опору ЗП потрібно виконувати в періоди найменшої провідності землі - взимку або влітку, тобто у періоди найбільшого просихання грунту. Допускається проводити ці вимірювання в інші сезони, але з урахуванням сезонних коефіцієнтів, які приведені в таблиці 1 і таблиці 2, та які зазначаються в проектній документації. Проводити вимірювання в умовах промерзлого грунту не рекомендується.

Виміряне значення опору ЗП не повинно перевищувати нормованого значення (таблиця 3) в будь-яку пору року і повинно відповідати вимогам діючих нормативних документів.

Таблиця 2 - Сезонні коефіцієнти для складних заземлювачів.

Тип заземлювача	Розмір заземлювача	Глибина прокладки горизонтальної смуги (провідника) чи відстань між верхнім торцем заземлювача і поверхнею землі					
		0.7-0.8 м			0.5 м		
		При вологому чи грунті після випадіння великої кількості опадів	При середній вологості чи грунті після випадіння невеликої кількості опадів	При сухому чи фунті після випадіння невеликої кількості опадів	При вологому чи грунті після випадіння великої кількості опадів	При середній вологості чи грунті після випадіння невеликої кількості опадів	При сухому чи грунті після випадіння невеликої кількості опадів
Горизонтальна смуга	Довжина 5 м	4.3	3.6	2.9	8.0	6.2	4.4
	Довжина 20 м	3.6	3.0	2.5	6.5	5.2	3.8
Сітка, чи контур	Площа 400 м^2	2.6	2.3	2.0	4.6	3.8	3.2
	Площа 900 м^2	2.2	2.0	1.8	3.6	3.0	2.7
	Площа 3600 м^2	1.8	1.7	1.6	3.0	2.6	2.3
Сітка чи контур і вертикальними електродами довжиною 5 м	Площа 900 м^2, кількість ел> 10 шт.	1.6	1.5	1.4	2.1	1.9	1.8
	Площа 3600 м^2, кількість ел.> 15 шт.	1.5	1.4	1.3	2.0	1.9	1.7

Таблиця 3 - Найбільші допустимі значення опору заземлюючих пристроїв

Найменування електроустановок	Характеристика електроустановок і заземлюючого об'єкта	Величина, що вимірюється	Опір, Ом
Електроустановка на напругу до 1000 В крім ПЛ.	Штучний якого приєднані генераторів і трансформаторів на напругу до 1000 В.	Опір заземлювача для мережі 660/380 В; 380/220 В; 220/127.	 15 ЗО 60
	Те саме, тільки природними заземлювачами.	Те саме для мереж 660/380 В; 380/220 В; 220/127.	 2 4 8
ПЛ напругою до 1 кв.	Опори з заземлювачами проводу в мережах глухо заземленою нейтраллю.	Опір заземлювача для мережі: 660/380 В; 380/220 В; 220/127.	 15 30 60
	Опори металеві в мережі з глухо заземленою нейтраллю	Опір заземлювача	50
	Заземлювач грозозахисту	Те саме	ЗО

Виконання вимірювань.

Для вимірювання опору ЗП створюється коло струму через ЗП. Для цього на певній відстані від ЗГ1 розташовуються (забиваються) струмовий допоміжний електрод і потенційний допоміжний електрод - для вимірювання падіння напруги в опорі ЗП, який вимірюється, під час проходження через нього струму. В якості допоміжних електродів застосовуються сталеві стрижні або труби діаметром до 50 мм.

Верхня частина електродів повинна бути обладнана затискачем чи іншим пристосуванням, що забезпечує надійне кріплення вимірювального провідника.

Стрижні в місці приєднання провідників потрібно очистити від іржі. Стрижні забивають або вгвинчують у землю на глибину від 0,8 до 1,0 м. Кількість стрижнів в одному електроді залежить від необхідного опору електрода і від питомого опору поверхневого шару землі. Практично в більшості випадків потрібний опір електрода можна досягти, забивши один -

два стрижні. У сухих піщаних грунтах іноді доводиться забивати три - п’ять стрижнів, тому бажано мати про запас до 10 шт. Для зменшення екранування стрижні розміщують у ряд чи по контуру на відстані 1-1,5 м один від одного.

Точність вимірювання опору ЗП залежить від взаємного розташування ЗП та допоміжних електродів і відстаней між ними. Відстань від ЗП до струмового допоміжного електрода і потенційного допоміжного електрода залежить від розмірів ЗП і характерних особливостей території навколо електроустановки. Допоміжні електроди необхідно розташовувати біля об'єкта на території, вільній від ліній електропередач та підземних металевих комунікацій (трубопроводів, кабелів з металевими оболонками і т.ін.).

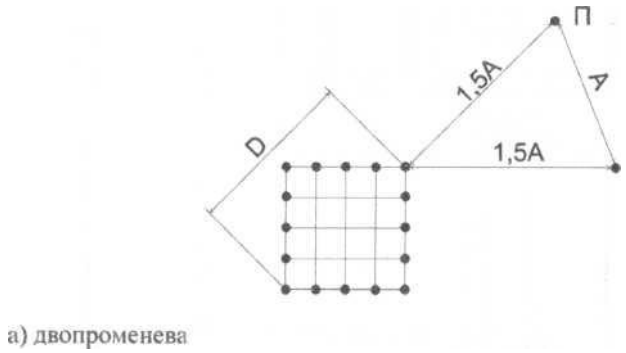
Для вимірювань опору складних ЗП достатніми є відстані між струмовим і потенційним допоміжними електродами і від обох допоміжних електродів до випробуваного ЗП, які дорівнюють ЗД (Д - найбільша діагональ ЗП або довжина променя, або довжина вертикального електрода ЗП). Для сіток, контурних заземлювачів, що складаються з сітки контуру чи вертикальних електродів, Д приймають рівним довжині більшої діагоналі контуру. Для вертикальних електродів, розташованих у ряд і об'єднаних смугою, О приймають рівним довжині смуги.

Можна виконати декілька вимірювань опору при різних напрямках променів (напрямках розміщення допоміжних електродів), при різних відстанях Д і ***А,*** зазначених у таблиці 4, і за фактичний прийняти варіант із найбільшим значенням опору.

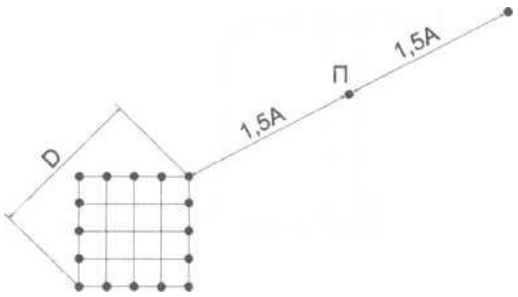
Таблиця 4 - Рекомендовані значення відстаней О і ***А***

Відстань, м			
Д	>40	10-40	< 10
А	>Д	>40	>20

Для вимірювання опорів складних ЗП слід застосовувати схеми розташування струмового ***Т*** та потенційного ***П*** електродів, зображені на рисунку 3.2.



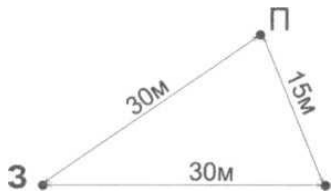
а) двопроменева



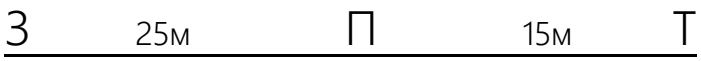
б) однопроменева

Рисунок 2 - Схеми розташування електродів при вимірюванні опорів складних заземлювачів та одиночних горизонтальних смуг.

При вимірюванні опорів одиночних вертикальних заземлювачів, довжиною до 6 м, варто користуватися схемами розташування електродів, зображеними на рисунку 3.3, а довжиною понад 6м- схемами на рисунку 4. Розмір *B* вибирається в залежності від довжини lв заземлювача. Розмір *B* повинний бути не менше 3х lв.



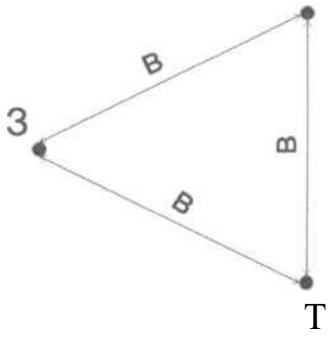
а)двопроменева



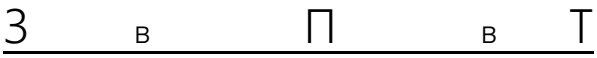
б)однопроменева

Рисунок 3 - Схеми розташування електродів при вимірюванні опорів одиночних вертикальних заземлювачів довжиною до 6 м.

П



а) двопроменева



б) однопроменева

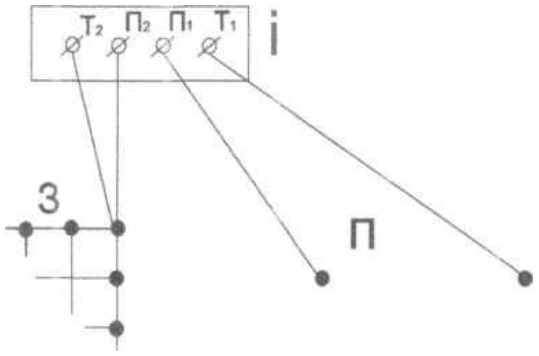
Рисунок 4 - Схеми розташування електродів при вимірюванні опорів одиночних вертикальних заземлювачів довжиною понад 6 м.

Необхідно дуже точно відзначати всі відстані. Відстані за звичай відміряють за допомогою рулетки.

Вимірювальні провідники повинні бути мідними, ізольованими та гнучкими, не мати оголених ділянок. Переріз провідників, які з'єднують прилад зелектродами, повинен бути не менш 2,5 мм-. Провідник, що з'єднує прилад із ЗП, повинен мати переріз не менше 4,0 мм^. Вимірювальні провідники повинні мати наконечники, а провідник, що приєднується до ЗП - струбцину чи пружинний затиск і т.д. Вимірювальні провідники варто зберігати на барабанах чи подібних інших пристосуваннях.

Для вимірювання значного опору ЗП вимірювальний прилад вмикають за трипровідною схемою. V цьому випадку опір провідника, який з'єднує прилад з ЗП, є частиною вимірюваного опору.

Для вимірювання малого опору ЗП, прилади слід вмикати за чотирнпровідною схемою, яка приведена на рисунку 5.



ЗП - заземлюючий пристрій;
І - вимірювальний прилад;
П - потенційний електрод;
Т - струмовий електрод.

Рисунок 3.5 - Схема вимірювання опору заземлюючих пристроїв за допомогою приладу Ф 4103-М1, коли опір вимірювальних провідників не входить у вимірювану величину.

При вимірюванні опору складних ЗГІ - прилад слід приєднувати до одного з зовнішніх (краще кутових) елементів ЗП. Під час вимірювання опору не допускається перевищення опорів струмового та потенційного допоміжних електродів, зазначених в таблиці 5.

Таблиця 5 - Технічні характеристики приладу Ф 4103-М1

Діапазон вимірювань. Ом	Діапазон допустимих значень опорів електродів, кОм	
	Потенціальних Rп1, Rп2 або їх сумарний опір (Rп1+ Rп2)	Струмових Rп1, Rп2 або їх сумарний опір (Rп1+ Rп2)
0-0.3; 0-1	0-1	0-1
0-3; 0-10	0-6	0-3
0-30; 0-100 0-300; 0-1000 0-3000; 0-15000	0-12	0-6

Для зменшення зазначеного опору рекомендується:

- забити електроди на більшу глибину;
- зволожити грунт на ділянках розміщення електродів водою чи розчином солі, при цьому волога повинна проникнути на глибину забивання електрода;
- зібрати кожен вимірювальний електрод (струмовий і потенційний) з декількох сталевих штирів, забитих на відстані 2-3 м один від одного і з'єднаних між собою провідником.

Вимірювання проводять у відповідності до заводської інструкції з експлуатації приладу Ф 4103-М1.

Не постійне положення стрілки приладу при вимірюванні свідчить про завищений перехідний опір струмового електрода, в цьому разі потрібно знизити його.

Для обчислення максимально можливого протягом року опору заземлювача Rmax, вимірювану (зафіксовану приладом) величину R_{B1IM} необхідно помножити на коефіцієнт сезонності K_c:

$$Rmax = R_{B1IM} Kc. \quad (1)$$

Значення коефіцієнтів сезонності K_c у залежності від вологості грунту, приведені у таблиці 2 - для складних заземлювачів і в таблиці 1 - для одиночних заземлювачів.

Вимірювання питомого опору грунту

Схема вимірювання питомого опору грунту за допомогою приладу Ф 4103- М1 методом чотирьох електродів зображена на рисунку 6. Вимірювальні

електроди розміщаються в одну лінію на відстані не менш 2-4 м від осі підземних металевих споруджень, комунікацій (трубопроводів, кабелів).

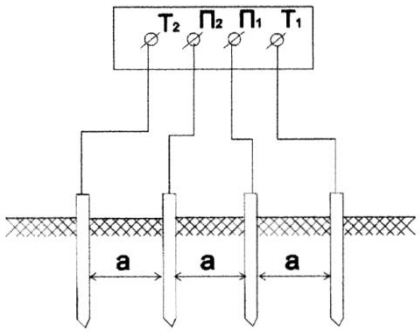


Рисунок 6 - Схема вимірювання питомого опору грунту методом чотирьох електродів за допомогою приладу Ф 4103-М1.

Відстань між електродами *а* приймається однаковою і дорівнюй глибині закладення заземлювача, а саме:

- для горизонтальних заземлювачів - відстань від поверхні землі до цього заземлювача;
- для вертикальних заземлювачів (електродів) - відстань від поверхні землі до середині електрода.

Вимірювання проводять у відповідності до заводської інструкції з експлуатації приладу Ф 4103-М1.

Вимірюваний питомий опір грунту $\rho_{вим}$ обчислюється за формулою:

$$\rho_{вим} = 2\pi aR, \text{ (Омм)} \qquad (2)$$

де *а* - відстань між електродами, м;

R - показання приладу, Ом.

Поверхневий шар ґрунту глибиною 2 м у залежності від ступеня зволоження (висихання) змінює свій питомий опір. Для приведення значення вимірюваного питомого опору до умов найбільшого просихання землі необхідно враховувати сезонний коефіцієнт $К_с$, що приймається рівним:

- при вологому ґрунті чи після випадіння великої кількості опадів - 5;
- при середній вологості грунту чи після випадіння невеликої кількості опадів - 2.7;
- при сухому грунті чи після випадіння невеликої кількості опадів - 1.9.

Враховувати сезонний коефіцієнт для шарів землі на глибині 2 м і більш не потрібно.

Розрахунковий питомий опір землі $\rho_{розрах}$, з урахуванням коефіцієнта сезонності, для шарів ґрунту глибиною до 2-х метрів обчислюється за формулою:

$$\rho_{розрах} = \rho_{вим} К_с \qquad (3.3)$$

Для шарів землі глибиною 2 м і більш розрахунковим питомим опором землі є $р_{вим}$ (показання приладу).

Загальна характеристика вимірювача опору заземлень Ф4103-М1

Вимірювач опору заземлень Ф4103-М1 призначений для вимірювання опору заземлюючих пристроїв будь-яких геометричних розмірів, питомого опору грунтів і активних опорів при температурі навколишнього середовища від -25 до +55 °С і відносній вологості повітря до 90% при температурі 30 °С.

Технічні характеристики пристрою:

- Клас точності приладу 4,0 на діапазоні 0-0,3 Ом і 2,5 на інших діапазонах;
- Межі допустимої основної приведеної похибки ±2,5%;
- Частота вимірювального струму знаходиться в межах 256-310 Гц;
- Змінна напруга на затискачах ТІ та Т2 при розімкнутому зовнішньому колі не більше 36 В;
- Споживаний струм від джерел живлення не більше 160 мА;
- Час встановлення показання в положенні «ИЗМ І» не більше 6 с, в положенні «ИЗМ ІІ» не більше ЗО с. Час встановлення робочого режиму не більше 10 с.

Зовнішній вигляд пристрою наведено на рисунку 7.

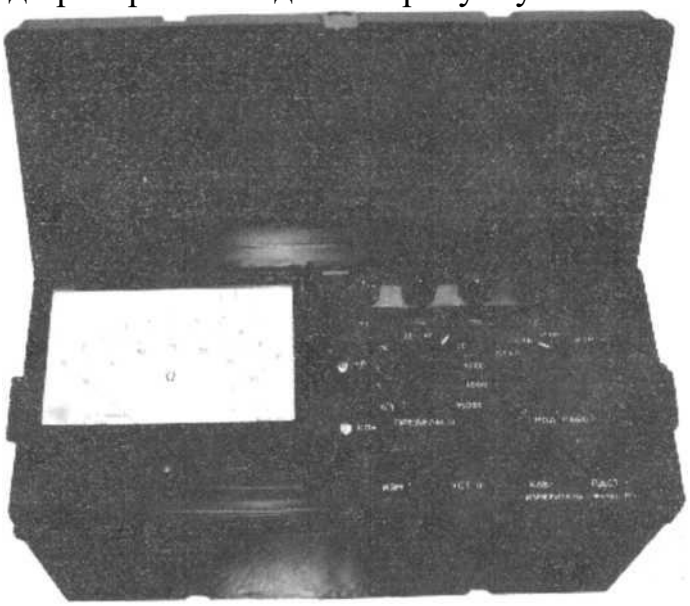


Рисунок 7 - Зовнішній вигляд пристрою Ф4103-М1

Прилад виконаний в пластмасовому корпусі, що має знімну кришку і ремінь для носіння приладу. В нижній частині корпусу знаходиться відсік для розміщення сухих елементів. На лицевій панелі розташований відліковий пристрій, затискачі для підключення струмових і потенціальних електродів, органи керування, розетка для підключення зовнішнього джерела струму.

Прилад є безпечним. При роботі з ним в електричних колах напругою більше 36 В необхідно виконувати вимоги безпеки виконання робіт в таких колах.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Підготовка приладу Ф 4103-М1 до роботи

1. Встановити вимірювач на рівній поверхні і зняти кришку, при необхідності закріпити її на боковій поверхні корпусу.

2. Перевірити напругу джерела живлення. Для цього закоротити затискачі ТІ, ПІ, П2, Т2, встановити перемикачі в положення «КЛБ» і «0,3», а ручку «КЛБ»

- в крайнє праве положення. Натиснути кнопку «ИЗМ». Якщо при цьому лампа КП не загориться, напруга джерела в нормі.

3. Перевірити працездатність вимірювача. Для цього, в положенні «КЛБ» перемикача, встановити нуль ручкою «УСТ 0», натиснути кнопку «ИЗМ», ручкою «КЛБ» встановити стрілку на позначку «30».

Вимірювання опору заземлюючих пристроїв.

1. Виміряти опір одиничного стержневого ЗП:
   - заглибленого на всю свою довжину;
   - заглибленого на всю свою довжину зі зволоженим навколо нього грунтом;
   - заглибленого на половину своєї довжини;

   Вимірювання провести у відповідності до заводської інструкції з експлуатації приладу Ф 4103-М1 з врахуванням залежності $R_{В1ІМ}$ = f(1зт) та допустимих значень опорів електродів.
2. Дослідити вплив зміни діаметру та площі межування з ґрунтом стержневого ЗП (забити два стержні так, щоб вони торкались один одного) на його опір.
3. Виміряти опір складного ЗП (по завданню викладача).
4. Виміряти опір заземлюючого пристрою лабораторії 1-126 (по завданню викладача).

Всі вимірювання провести по одно- та двопроменевій схемі. Виміряти розміри електродів.

Вимірювання питомого опору грунту.

Виміряти питомий опір грунту у відповідності до заводської інструкції з експлуатації приладу Ф 4103-МІ.

Обробка результатів вимірювань

1. Розрахувати питомий опір грунту, та знайти його значення з урахуванням коефіцієнту сезонності.
2. Побудувати залежність $R_{В1ІМ}$ = f(1зт) .
3. Розрахувати опір ЗП (по завданню викладача).
4. Розрахувати максимально можливе протягом року значення опору ЗП.
5. Виміряні та розраховані дані звести в таблицю.

Отримані результати порівняти із нормованими. Зробити висновки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

з дисципліни

«Основи метрології та електричних вимірювань»

1. Решетник В.Я. Основи метрології та електричних вимірювань : навчально-методичний посібник для студентів електромеханічного факультету /. В. Я. Решетник, С. М. Бабюк. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. – 160 с.
2. Метрологія та вимірювальна техніка [Текст] : підручник / [Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук та ін.] ; за ред. : Є. С. Поліщук ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - 2-ге вид., допов. та перероб. - Львів : Львівська політехніка, 2012. - 541 с.
3. Метрологія. Терміни та визначення. ДСТУ 2681-94 [Текст] : стандарт. - Офіц. вид. - К. : Держстандарт України, 1994. - 15 с.
4. Державна система забезпечення єдності вимірювань" ДСТУ 2682-94 [Текст] : стандарт. - Офіц. вид. - К. : Держстандарт України, 1994. - 68 с.
5. Дудюк Д. Л. Електричні вимірювання [Текст] : навч. посіб. / Д. Л. Дудюк, В.М. Максимів, Р.Я. Оріховський ; М-во освіти і науки України, Наук.-метод. центр вищ. освіти, Укр. держ. лісотехн. ун-т. - 2-е вид., випр. - Львів : Афіша, 2003. - 265 с.
6. Еріванцев І. М. Електричні вимірювання [Текст] : навч. посібник для інженер. спец. вузов / І. М. Еріванцев, В. В. Коваль. - Дніпропетровськ : Дніпр-ська книжк. друкарня, 1998. - 512 с.
7. Тарасова В. В. Метрологія, стандартизація і сертифікація [Текст] : підручник для студ. вузів / В. В. Тарасова, А. С. Малиновський, М. Ф. Рибак. - К. : Центр навчальної літератури, 2006. - 264 с.

ЗМІСТ

ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ 3

Лабораторна робота №1. Вивчення аналогових електровимірювальних приладів та їх метрологічних характеристик 5

Лабораторна робота №2. Вимірювання струму, напруги, потужності в колах постійного та змінного струмів 24

Лабораторна робота №3. Вивчення різних методів вимірювання електричних опорів 39

Лабораторна робота №4. Розрахунок шунта до амперметра і додаткового резистора до вольтметра 52

Лабораторна робота №5. Вимірювання індуктивності та ємності мостом змінного струму 59

Лабораторна робота №6. Оцінка похибок прямих вимірювань з одноразовими спостереженнями 69

Лабораторна робота №7. Основні характеристики випадкових похибок і експериментальний аналіз випадкових величин 82

Лабораторна робота №8. Вимірювання опору заземлення 90

Перелік посилань з дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань» 102