

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра фізики

ЕЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

Лабораторний практикум з фізики

Харків - 2014

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики 20 лютого 2012 р., протокол № 7.

Методичні вказівки призначені для студентів усіх спеціальностей, що вивчають курс „Фізика”, денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

старш. викл. О.В. Самойлов,
асист. Д.О. Лотник

Рецензент

доц. А.Т. Котвицький

ЕЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

Лабораторний практикум з фізики

Відповідальний за випуск Самойлов О.В.

Редактор Решетилова В.В.

Підписано до друку 30.03.12 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧОГО ТРАНСПОРТУ**

ФАКУЛЬТЕТ АТЗ

Кафедра „Фізика”

Лабораторний практикум з фізики.

ЕЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

Харків 2014

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики 20 лютого 2012 р., протокол № 7.

Методичні вказівки призначені для студентів усіх спеціальностей, що вивчають курс „Фізика”, для денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

старш. викл. О.В. Самойлов,
асист. Д.О. Лотник

Рецензент

доц. А.Т. Котвицький

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3.2

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЛАКСАЦІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА

Мета роботи: визначення електричної ємності конденсатора та вивчення законів паралельного і послідовного з'єднання конденсаторів.

Прилади і матеріали: лабораторна установка.

Теоретичні відомості

Електрична ємність — C , скалярна фізична величина, яка є характеристикою здатності провідника накопичувати електричний заряд, будучи під потенціалом, і визначається формулою

$$C = \frac{Q}{V},$$

де Q — заряд провідника або обкладки конденсатора, V — потенціал провідника чи різниця потенціалів між обкладками конденсатора. Електрична ємність визначається геометричними розмірами провідника, його формою та електричними властивостями навколишнього середовища і не залежить від матеріалу провідника. У СІ одиниця електричної ємності — фарад

$$[C]_{SI} = \Phi.$$

Релаксаційним генератором називають генератор, у якому періодичні процеси відбуваються за рахунок заряду-розряду конденсатора. Існує велика кількість варіантів реалізації схем релаксаційних генераторів. Для того, щоб у схемі виникли періодичні коливання, вона повинна мати кола, що забезпечують заряд конденсатора, а при досягненні напруги на ньому певної величини його — розряд. Період коливань такого генератора залежить від ємності конденсатора, величини струму заряду. Зарядка конденсатора може здійснюватися струмом, що задається

генератором струму, або резистором. У першому варіанті напруга на конденсаторі змінюється за лінійним законом, а у другому – експоненціально. Важливу роль відіграє спосіб розряду конденсатора. У загальному випадку, конденсатор заряджається до певного рівня, при якому спрацьовує електронний ключ, який підключає паралельно до конденсатора схему розряду або закорочує полюси конденсатора, в деяких схемах відбувається переключення полярності джерела струму, що заряджає конденсатор. Спосіб заряду – розряду конденсатора визначає форму отриманого сигналу. У схемі автоколивального мультивібратора (рисунок 3.2.1), що розглядається в даній роботі, функцію електронного перемикача виконує операційний підсилювач, увімкнений за схемою тригера Шмітта, охопленого від’ємним зворотнім зв’язком за допомогою інтегруючого RC кола.

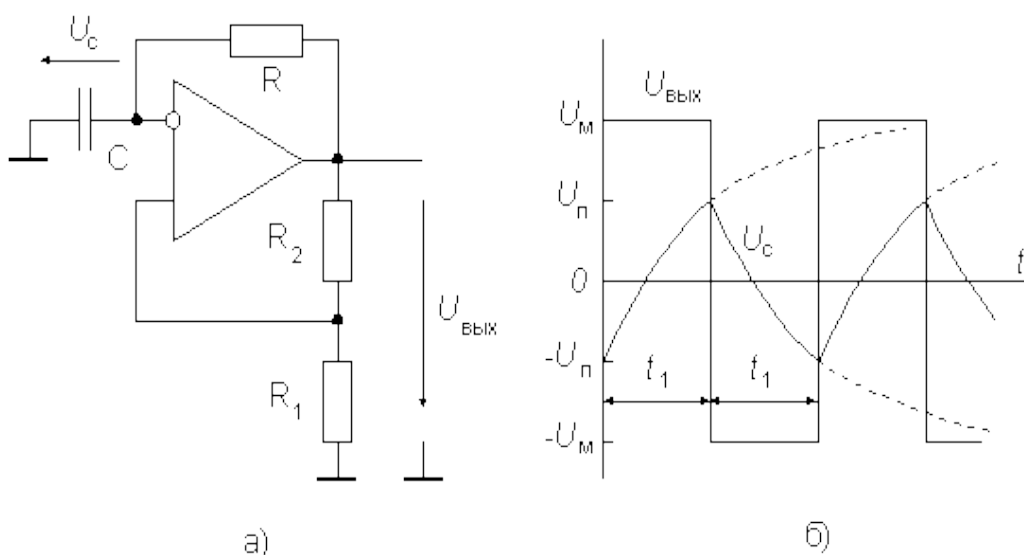


Рис. 3.2.1 – Принципова схема автоколивального мультивібратора (а) та його вольт-амперна характеристика (б)

Розглянемо принцип роботи схеми, показаної на рисунку 3.4.1,а. Припустимо, що на виході операційного підсилювача встановився високий рівень напруги U_{\max} . При цьому на неінвертуючому вході буде позитивний рівень напруги, який визначається співвідношенням резисторів R_1 , R_2 . Якщо опори резисторів однакові, то напруга на названому вході становитиме $U_{\max}/2$. Водночас конденсатор C заряджатиметься струмом, що буде протікати через резистор R . Конденсатор

підключено до інвертуючого входу операційного підсилювача. Коли напруга U_c на конденсаторі перевищить $U_{\max}/2$, схема переключиться і на виході з'явиться максимальна від'ємна напруга $-U_{\max}$. Напрямок струму заряду конденсатора зміниться на протилежний.

Схема залишатиметься в такому стані до моменту, коли від'ємна напруга на конденсаторі U_c не перевищить $-U_{\max}/2$, після чого переключиться в початковий стан. Цей процес може продовжуватись необмежено. Аналіз роботи схеми дозволяє записати рівняння:

$$\frac{dU_c}{dt} = \pm \frac{U_{\max} - U_c}{RC}.$$

За початкових умов $U_c(0) = -U_{\max}/2$ рівняння матиме рішення

$$U_c(t) = U_{\max} - (U_{\max} + U_{\max}/2) * e^{-t/RC}.$$

Як показано на діаграмі (рисунок 3.4.1,б), наступне переключення схеми відбудеться, коли напруга на конденсаторі досягне значення $U_{\max}/2$. Проміжок часу, потрібний для заряду конденсатора, дорівнюватиме

$$t = RC \ln[1 + 2 R_1/R_2].$$

Період коливань дорівнюватиме

$$T = 2t = 2RC \ln[1 + 2 R_1/R_2],$$

або у нашому випадку, коли $R_1=R_2$, $T \approx 2RC$. ($R=8400$ Ом). Задано конструктивно.

Установка

До складу установки входять такі складові:

- панель, на якій розміщено елементи схеми, клеми для підключення зовнішніх конденсаторів та щупів вимірювального приладу;
- електронний блок;
- датчик – „Частотомір”;
- комп'ютер.

Порядок виконання роботи

- 1 Увімкніть комп'ютер.
- 2 Підключіть електронний блок до комп'ютера з допомогою шнура USB.
- 3 Увімкніть програму „ІТМ-Лабораторія” натиснувши відповідну піктограму на екрані комп'ютера. Ознайомтеся з загальними настановами щодо роботи з вимірювальним комплексом у режимі лабораторної установки.
- 4 Виберіть пункт «Вимірювання ємності конденсатора за допомогою релаксаційного генератора».
- 5 Підключіть конденсатор С1 до клем Сх на панелі установки.
- 6 Увімкніть режим „Вимірювання”. Після появи стабільних показань приладу зупиніть процес вимірювання. Запишіть значення частоти „ ν ” в таблицю 3.2.1.
- 7 Замініть конденсатор С1 на інший. Виміряйте частоту коливань „ ν ” та запишіть в таблицю. Повторіть вимірювання для всіх конденсаторів.
- 8 За даними таблиці 3.2.1 визначте ємність всіх конденсаторів за формулою $\frac{1}{\nu} = 2RC \ln 3$, враховуючи значення опору $R = 8400 \text{ Ом}$
- 9 Підключіть до клем паралельно два, а потім три конденсатори з відомою ємністю, перевірте формулу паралельного ввімкнення конденсаторів: $C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$.
- 10 Підключіть до клем послідовно два, а потім три конденсатори з відомою ємністю. Перевірте формулу для послідовного з'єднання конденсаторів $\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$.
- 11 Дані вимірювань та обчислень занесіть у таблицю 3.2.1.

Таблиця 3.2.1 – Звіт з виконання роботи 3.2

Ємність, яку	Частота	Експериментальне	Теоретичне
--------------	---------	------------------	------------

підключають	генератора	значення ел. ємності	значення ел. ємності
C_1			
C_2			
$C_{12\text{посл}}$			
$C_{12\text{пар}}$			
$C_{123\text{посл}}$			

Контрольні питання

- 1 Що називається електричною ємністю?
- 2 Які речовини називаються провідниками?
- 3 Що називається екіпотенціальними поверхнями?
- 4 Який вигляд мають екіпотенціальні поверхні однорідного електричного поля? Поля точкового заряду?
- 5 Чому дорівнює напруженість електричного поля рівномірно зарядженої нескінченної площини?
- 6 Як залежить ємність плоского конденсатора від його розмірів?
- 7 Яка одиниця ємності в SI? Виразіть в одиницях SI ємність конденсаторів: 4 мкФ, 5 пФ, 100 нФ.
- 8 Виведіть формулу для визначення електричної ємності при паралельному ввімкненні конденсаторів.
- 9 Виведіть формулу для визначення електричної ємності послідовно ввімкнених конденсаторів.
- 10 Виведіть робочу формулу для електричної ємності невідомого конденсатора для цієї роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3.4

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ РЕЧОВИНИ

Мета роботи: ознайомлення з роботою мостової схеми та визначення діелектричної проникності речовини.

Прилади і матеріали: лабораторна установка.

Теоретичні відомості

Діелектрик, як і всяка речовина, складається з атомів та молекул. Позитивний заряд їх зосереджений в ядрах атомів, а негативний – в електронних оболонках атомів та молекул. Оскільки позитивний заряд усіх ядер дорівнює за модулем сумарному заряду електронів, то молекули та атоми в цілому нейтральні. Якщо в молекулі центри розміщення позитивних зарядів не збігаються з центрами негативних зарядів, то така молекула має дипольний момент і має назву – *полярна молекула*. У діелектрику, який складається з полярних молекул, при відсутності зовнішнього електричного поля результуючий дипольний момент дорівнює нулю. Це зв'язано з тим, що у речовині дипольні моменти полярних молекул внаслідок їх теплового руху орієнтовані у просторі хаотично. Якщо помістити такий діелектрик у зовнішнє електричне поле, дипольні моменти орієнтуються вздовж поля, в результаті чого в діелектрику виникає дипольний момент. Явище, яке зв'язано з виникненням дипольного моменту, називається *поляризацією діелектрика*. Механізм виникнення дипольного моменту в діелектрику з полярними молекулами називається *орієнтаційним*.

Але існують молекули, у яких центри розміщення позитивних та негативних зарядів збігаються, тому вони не мають дипольного моменту. Такі молекули називаються *неполярними*. Однак під впливом зовнішнього електричного поля центри розміщення позитивних та негативних зарядів зміщуються, і молекула набуває дипольного моменту. Цей дипольний момент називається *індукованим*. Внаслідок цього діелектрик з неполярними молекулами також поляризується. Такий механізм поляризації називається *електронним*.

Дипольний момент, віднесений до одиниці об'єму діелектрика, називається поляризованістю. Поляризованість \vec{P} є кількісною характеристикою поляризації.

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V}, \quad (3.4.1)$$

де ΔV - деякий об'єм діелектрика, \vec{p}_i - дипольний момент однієї молекули, $\sum \vec{p}_i$ - сумарний дипольний момент усіх молекул, які входять до об'єму ΔV .

Експериментально підтверджено, що для великої кількості діелектриків поляризованість лінійно залежить від напруженості електричного поля \vec{E}

$$\vec{P} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E}, \quad (3.4.2)$$

де χ - діелектрична сприйнятливість речовини.

Якщо уявити діелектрик у вигляді пластини, товщина якої набагато менша її ширини та довжини, то внаслідок поляризації на одній грані такої пластини виникає надлишковий позитивний заряд, а на іншій – негативний.

Ці заряди називаються *поляризаційними*. Сумарний дипольний момент такого діелектрика визначається як сума дипольних моментів диполів, які утворюють поляризаційний заряд.

Введемо

q_i - точковий поляризаційний заряд;

d - відстань між поляризаційними зарядами протилежних знаків;

S - площа пластини діелектрика;

V - об'єм пластини діелектрика;

σ' - поверхнева густина поляризаційних зарядів.

Звідси поляризованість діелектрика буде дорівнювати

$$P = \frac{d \cdot \sum_i q_i}{V} = \frac{d \cdot \sigma' \cdot S}{S \cdot d} = \sigma'.$$

Виникнення поляризаційних зарядів на поверхні діелектрика призводить до появи додаткового електричного поля

\vec{E}' , яке має напрям, протилежний до напрямку зовнішнього поля \vec{E}_0 (рисунок 3.4.1). Результуюче поле \vec{E} всередині діелектрика є

$$E = E_0 - E' . \quad (3.4.3)$$

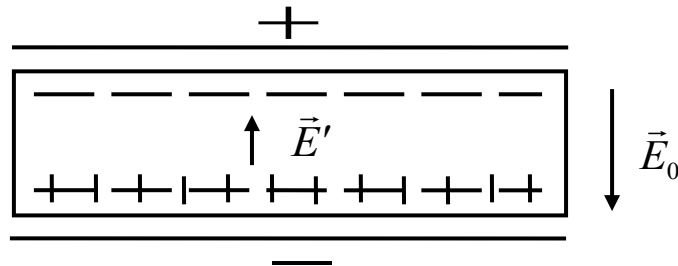


Рисунок 3.4.1 – Схема поляризації діелектрика

Величина \vec{E}' визначається за формулою для електричного поля, яке утворюється двома протилежно зарядженими паралельними площинами.

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} . \quad (3.4.4)$$

З (3.4.3) та з урахуванням (3.4.2), (3.4.4) маємо

$$E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{\varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E}{\varepsilon_0} = E_0 - \chi \cdot E .$$

Звідси отримуємо

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\varepsilon} . \quad (3.4.5)$$

Величина $\varepsilon = 1 + \chi$ називається *діелектричною проникністю*, вона визначає, у скільки разів напруженість електричного поля в вакуумі є більшою, ніж в діелектрику.

Електрична ємність плоского конденсатора визначається за формулою

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} , \quad (3.4.6)$$

де ε - діелектрична проникність діелектрика, який розташований між обкладинками конденсатора,

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - електрична стала,

S - площа пластин конденсатора,

d - відстань між пластинами.

З цієї формули бачимо, що електрична ємність конденсатора прямо пропорційна діелектричній проникності. Чим більше ε , тим більше електрична ємність. Якщо між обкладинками конденсатора вакуум (або повітря), то електрична ємність визначається як

$$C_\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}. \quad (3.4.7)$$

Тоді можна сказати, що діелектрична проникність показує, у скільки разів електрична ємність конденсатора, між обкладинками якого знаходиться діелектрик, більше, ніж електрична ємність конденсатора, між обкладинками якого знаходиться вакуум

$$\varepsilon = \frac{C}{C_\varepsilon}. \quad (3.4.8)$$

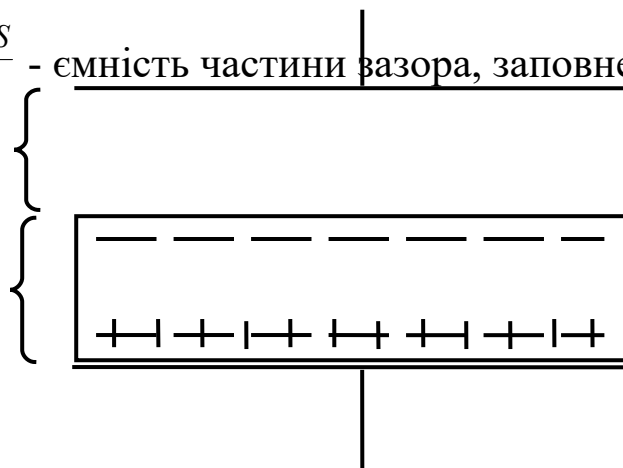
Якщо між обкладинками конденсатора помістити два типи діелектрика, то ємність такого конденсатора буде складатися з ємностей двох конденсаторів, з'єднаних послідовно. На рисунку 3.4.2 зображено конденсатор, між обкладинками якого знаходиться шар повітря товщиною d_1 та шар діелектрика товщиною d_2 .

Ємність такого конденсатора можна обчислити за формулою

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2},$$

де $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d_1}$ - ємність частини зазора, заповненого повітрям;

$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d_2}$ - ємність частини зазора, заповненого діелектриком.



d_1 d_2

—

Рисунок 3.4.2 – Схема експерименту, де d_1 – товщина повітряного шару, d_2 – товщина діелектрика

В даній роботі ємність конденсатора визначається за частотою релаксаційного генератора. Конденсатор включено в коло, що задає період коливань генератора. Частота генератора обернено пропорційна ємності конденсатора. Конденсатор являє собою вимірювальну комірку з повітряним зазором. Ємність комірки 8 пФ. Величина зазора комірки – 4 мм. Якщо у комірку ввести діелектрик, ємність конденсатора збільшиться, а частота генератора зменшиться. У такому випадку можна записати:

$$\frac{8 \cdot 10^{-12}}{C} = \frac{\nu_d}{\nu_0} \quad (3.4.9)$$

де ν_0 - частота генератора, коли зазор комірки заповнено повітрям $\varepsilon \approx 0$;

ν_d - частота генератора, коли частину зазора комірки заповнено діелектриком;

C – ємність конденсатора (вимірювальної комірки) з діелектриком та повітрям у зазорі (за схемою на рисунку 3.4.2);

$8 \cdot 10^{-12}$ Ф – ємність комірки без діелектрика (з повітрям у зазорі).

Звідси

$$C = \frac{\nu_0}{\nu_d} \cdot 8 \cdot 10^{-12} \text{ Ф (Фарад)}.$$

Порядок виконання роботи

1 Увімкніть комп'ютер. Увімкніть програму „ІТМ-лабораторія”, натиснувши відповідну піктограму на екрані комп'ютера. Ознайомтеся з загальними настановами щодо роботи з вимірювальним комплексом у режимі лабораторної установки.

2 Виберіть необхідний пункт «Визначення діелектричної проникності речовини»

3 Увімкніть режим „Вимірювання” та через декілька секунд вимкніть його. Запишіть показання приладу $V_0 =$

4 Обчисліть ємність плоского повітряного конденсатора за формулою $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, $S = 80,5 \text{ см}^2$, $d = 4 \text{ мм} =$

5 Введіть перший зразок, виготовлений з діелектричного матеріалу, у зазор вимірювальної комірки.

6 Знову увімкніть режим „Вимірювання” та через декілька секунд вимкніть його і запишіть показання приладу $V_{d1} =$

7 Виміряйте товщину діелектрика (пластини) (Товщину зразків слід вимірювати з допомогою штангенциркуля.) $d_{11} =$

8 Обчисліть ємність плоского конденсатора з діелектриком за формулою $C_1 = \frac{V_0}{V_1} C_0$.

9 Обчисліть товщину повітряного зазора $d_{12} = d - d_{11}$.

10 Обчисліть ємність плоского конденсатора з повітряним зазором за формулою $C_{12} = \frac{\epsilon_0 S}{d_{12}}$.

11 Обчисліть ємність плоского конденсатора, утвореного діелектриком C_{11} , враховуючи, що C_{11} і C_{12} з'єднані послідовно та утворюють конденсатор ємністю C_1 .

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_{11}} + \frac{1}{C_{12}}, \text{ тоді } C_{11} = \frac{C_{12} \cdot C_1}{C_{12} - C_1}.$$

12 За формулою $C_{11} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d_{11}}$ обчисліть діелектричну проникність речовини.

13 За наведеними вище формулами обчисліть ϵ для даної речовини $\epsilon_1 = \frac{C_{11} d_{11}}{\epsilon_0 S}$.

14 Повторіть вимірювання для інших зразків.

15 Дані вимірювань та обчислень занесіть у таблицю 3.4.1.

Таблиця 3.4.1 – Звіт з виконання лабораторної роботи 3.4.

N	$V_i, \text{Гц}$	$\tilde{N}_i, \text{Ф}$	$d_{i1}, \text{м}$	$d_{i2}, \text{м}$	$C_{i1}, \text{Ф}$	$C_{i2}, \text{Ф}$	ε_i
$i = 1$							
$i = 2$							
$i = 3$							

Контрольні питання

- 1 Що таке електрична ємність відокремленого провідника? В чому вимірюється електрична ємність?
- 2 Що таке конденсатор та як він побудований?
- 3 Як розрахувати електричну ємність плоского конденсатора?
- 4 Який напрямок має вектор напруженості електричного поля в плоскому конденсаторі?
- 5 Як розрахувати напруженість електричного поля в конденсаторі?
- 6 Які речовини називаються діелектриками?
- 7 Що таке поляризація?
- 8 Які діелектрики називають полярними? Неполярними?
- 9 Поясніть сутність діелектричної сприйнятливості речовини.
- 10 Що таке діелектрична проникність речовини?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3.7

ВИЗНАЧЕННЯ КОРИСНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ ТА КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Мета роботи: визначення залежності потужності електричного струму, корисної потужності та коефіцієнта корисної дії джерела струму від опору навантаження.

Прилади і матеріали: лабораторна установка.

Теоретичні відомості

Потужністю електричного струму називається скалярна фізична величина P , яка характеризує швидкість перетворення енергії електричного струму в інші форми і визначається як енергія, що перетворюється за одиницю часу:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(V \cdot Q) = V \frac{dQ}{dt} = I \cdot V,$$

де W - енергія електричного струму,

V - різниця потенціалів,

Q - заряд,

I - електричний струм.

Використовуючи закон Ома для ділянки ланцюга

$$I = \frac{V}{R},$$

де R - електричний опір, одержуємо декілька формул:

$$P = I \cdot V = \frac{V}{R} V = \frac{V^2}{R} = I \cdot I \cdot R = I^2 R.$$

Корисна потужність – це потужність, яка виділяється на зовнішньому опорі (див. рисунок 3.7.1). Вона розраховується за формулою

$$P_a = I^2 R, \quad (3.7.1)$$

де I - струм, який йде через опір R . Струм знайдемо за законом Ома для замкненого кола

$$I = \frac{E}{R+r}, \quad (3.7.2)$$

де E - ЕРС (електрорушійна сила) джерела струму,
 r - внутрішній опір цього джерела.

Зробивши підстановку (3.7.2) в (3.7.1), отримуємо

$$P_a = \left(\frac{E}{R+r} \right)^2 R = \frac{E^2 R}{(R+r)^2}. \quad (3.7.3)$$

Для того щоб дослідити цю функцію $P_a = f(R)$ на екстремум,
 візьмемо похідну по зовнішньому опору R , тоді маємо

$$\begin{aligned} \frac{dP_a}{dR} &= \frac{d}{dR} \left(\frac{E^2 R}{(R+r)^2} \right) = \frac{E^2}{(R+r)^4} [(R+r)^2 - 2(R+r)R] = \frac{E^2(R+r)}{(R+r)^4} [(R+r) - 2R] = \\ &= \frac{E^2(R+r)}{(R+r)^4} [r - R] = \frac{E^2(r^2 - R^2)}{(R+r)^4}. \end{aligned}$$

Точка екстремуму знаходиться розв'язуванням рівняння
 $\frac{dP_a}{dR} = 0$, тобто

$$\frac{E^2(r^2 - R^2)}{(R+r)^4} = 0.$$

Очевидно, що рішення є $R^2 = r^2$, або

$$R = r. \quad (3.7.4)$$

Цей екстремум є максимумом. Це можна з'ясувати, якщо
 обчислити другу похідну, але можна зробити таким чином. З
 виразу (3.7.3) ми бачимо, що

$$\begin{aligned} P_a(0) &= \frac{E^2 \cdot 0}{(0+r)^2} = 0; \\ P_a(R) &\xrightarrow{R \rightarrow \infty} = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{E^2 R}{(R+r)^2} = E^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{R}{(R+r)^2} = E^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{R}{R^2} = E^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{1}{R} = 0. \end{aligned}$$

З фізичних умов $P_a(R) > 0$, це означає, що ця функція
 починається з нуля і знову йде до нуля на нескінченності, а
 оскільки вона всюди позитивна і має екстремум, то цей
 екстремум є максимумом.

Таким чином, ми з'ясували, що корисна потужність максимальна, якщо зовнішній опір дорівнює внутрішньому. Розрахуємо цю потужність.

$$P_a^{\max}(R) = P_a(r) = \frac{E^2 r}{(r+r)^2} = \frac{E^2 r}{4r^2} = \frac{E^2}{4r}. \quad (3.7.5)$$

Коефіцієнт корисної дії η джерела ЕРС визначається відношенням корисної роботи до повної роботи

$$\eta = \frac{W_a}{W}. \quad (3.7.6)$$

Оскільки потужність визначається швидкістю перетворення роботи, то $P = W/t$, або $W = P \cdot t$ і ми отримуємо

$$\eta = \frac{P_a \cdot t}{P \cdot t} = \frac{P_a}{P}, \quad (3.7.7)$$

де

$$P = I \cdot E = I^2(R+r) \quad (3.7.8)$$

повна потужність у замкненому колі.

Таким чином, ми маємо

$$\eta = \frac{P_a}{P} = \frac{I^2 R}{I^2(R+r)} = \frac{R}{R+r}. \quad (3.7.9)$$

З виразу (3.7.8) одержуємо $\eta|_{R=0} = \frac{R}{R+r}|_{R=0} = 0$. При нескінченному зростанні зовнішнього опору ККД прямує до одиниці

$$\eta = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{R}{R+r} = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{R}{R} = 1,$$

але струм і корисна потужність у цьому випадку прямує до нуля. Таким чином, одночасне отримання максимальної корисної потужності при максимальному ККД не можливо.

Коли корисна потужність досягає максимуму, то $\eta = 0,5$ (ККД = 50%), коли ж ККД $\eta \rightarrow 1$, то корисна потужність зменшується, це означає, що для зростання ККД необхідно зменшувати внутрішній опір джерела ЕРС. Для ідеального джерела $r = 0$ і ККД завжди дорівнює одиниці.

Послідовність виконання роботи

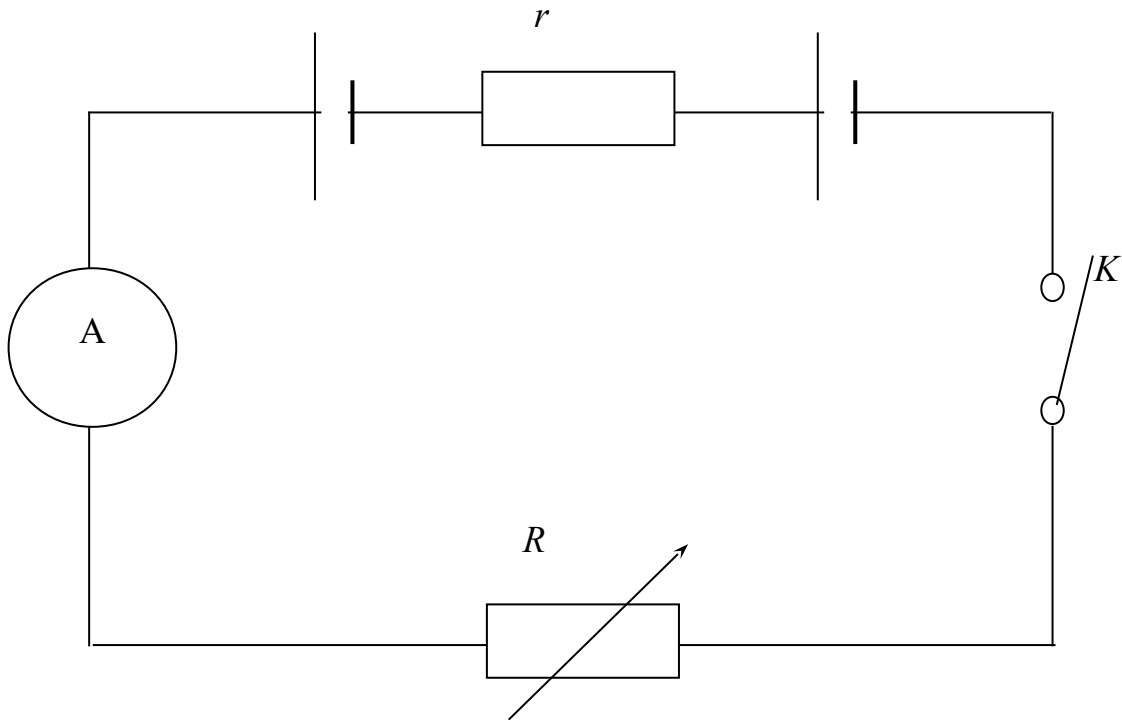


Рисунок 3.7.1 – Електрична схема

- 1 Ознайомитися зі схемою на стенді (рисунок 3.7.1).
- 2 Запустити програму „ІТМ-лабораторія”. Вибрати пункт „Дослідження корисної потужності та ККД джерел струму”.
- 3 Уважно ознайомитися з установкою. Переконаватися, що блок живлення увімкнений в мережу, а вимикач на ній знаходиться в положенні «выкл».
- 4 Регулятор на блоці живлення поставити в середнє положення. Підключити один з опорів з набору R_1 Перемикач джерел ЕДС встановити в положення «2» (або «1» за вказівкою викладача).
- 5 Увімкнути тумблер на блоці живлення.
- 6 Запустити програму, двічі натиснувши кнопку «вимірювання»
- 7 Натиснути кнопку «струм» на установці на 5-10 секунд і відпустити. Відключити процес вимірювання, натиснувши на кнопку «зупинити».

8 Для сталого режиму зняти значення напруги і сили струму водночас. Записати дані в таблицю $U_1 =$ $I_1 =$

9 Підключити другий опір i , повторюючи пункти 6-8, записати такі значення напруги і сили струму: $U_2 =$ $I_2 =$

10 Обчислити внутрішній опір джерела ЕРС $r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$.

11 Обчислити ЕРС $E = U_1 + I_1 r$ $E = U_2 + I_2 r$. Порівняти два значення.

12 Підключити відомий опір $R_3 =$. Зміряти за допомогою установки, як вказано в пунктах 6-8.

13 $I_3 =$ Обчислити $I_3 = \frac{E}{R_3 + r} =$. Порівняти результати пунктів 16, 17. Виконати пункти 15-17 ще для R_4, R_5, R_6 . Обчислити потужності за формулами. Корисну $P_{Ai} = I_i^2 R_i$ для кожного $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Повну $P_{Fi} = I_i^2 (R_i + r)$ для кожного $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Обчислити ККД для кожного $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Дані вимірювань та обчислень занесіть у таблицю 3.7.1.

Таблиця 3.7.1 – Звіт з виконання лабораторної роботи 3.7

R_i	I_i	$P_{Ai} = I_i^2 R_i$	$P_{Fi} = I_i^2 (R_i + r)$	$\eta_i = P_{Ai} / P_{Fi}$

Контрольні питання

- 1 Що називається ККД джерела ЕРС?
- 2 Як визначається корисна потужність джерела ЕРС?
- 3 Чому дорівнює максимальна корисна потужність джерела ЕРС?
- 4 Коли корисна потужність максимальна?
- 5 Чому дорівнює ККД при максимальній корисній потужності?

- 6 Довести, що при $R = r$ функція $P_a(R)$ дійсно має максимум.
- 7 Пояснити залежність $\eta(R)$.
- 8 Що таке ЕРС джерела?
- 9 Які сили називають сторонніми, де вони діють?
- 10 Чому неprimуєливо замкнення накоротко джерела ЕРС?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3.8

ЗНЯТТЯ СІТКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІОДА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

Мета роботи: вивчення закономірностей розповсюдження потоків заряджених частинок в електричному полі та ознайомлення із пристроями вакуумної електроніки.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для зняття сіткових характеристик тріода та визначення його параметрів.

Теоретичні відомості

В металах атоми є дісоційованими на позитивно заряджені іони, які утворюють кристалічну ґратку, знаходячись у її вузлах, і валентні електрони, що можуть майже вільно рухатися між іонами та знаходяться у тепловому хаотичному русі. Завдяки цьому та за наявності зовнішнього накладеного електричного поля метали проводять електричний струм. Хоча валентні електрони можуть майже вільно рухатись у металі, між валентними електронами та іонами кристалічної ґратки існує енергія зв'язку і електрони не можуть вільно покинути межі металу. Для переміщення електрона за межі металічного тіла потрібно виконати роботу. Така робота називається роботою виходу електрона з поверхні металу. Вона залежить від природи металу та стану його поверхні. Для чистих металів робота виходу становить декілька електронвольт (1 eV дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Валентні електрони мають різні теплові швидкості, розподіл теплових швидкостей цих електронів, згідно з класичними уявленнями, є максвеловським. Незважаючи на велику кількість валентних електронів (наприклад, концентрація валентних електронів у міді становить приблизно $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$), при кімнатній температурі тільки у незначній їх кількості може вистачити кінетичної енергії, щоб перевищити роботу виходу та звільнитись з металу. Підвищення температури призводить до збільшення кількості електронів, здатних подолати вплив кристалічної ґратки і покинути метал (типовими температурами є значення порядку 1000 K). Явище вивільнення електронів з поверхні твердого тіла під дією температури називають термоелектронною емісією.

Електрони, що вилетіли за межі металевого тіла, створюють поблизу нього електронну хмару. Електричне поле цієї негативно зарядженої хмари протидіє подальшому вивільненню електронів з поверхні металу. Таким чином створюється динамічна рівновага: кількість електронів, що покидають поверхню металу за заданої температури металевого тіла, дорівнює кількості електронів, що повертається під дією негативного потенціалу електронної хмари.

Якщо на випущені металом електрони накласти зовнішнє електричне поле, вони стануть рухатися, створюючи електричний струм. Таку ситуацію можна реалізувати, якщо помістити нагрітий метал у вакуум і підключити до нього негативний полюс постійного джерела ЕРС (катод), а до іншого електрода (анод), що знаходиться на певній відстані від нагрітого металу, – позитивний. Відсутність повітря (вакуум) покликана запобігти зіткненню електронів із молекулами газу та збільшити електричний струм у катод-анодному просторі. Пристрій із двома вміщеними у вакуум різнойменно зарядженими електродами, на катоді якого реалізуються умови термоелектронної емісії, називається двохелектродною лампою, або вакуумним діодом (див. схему на рисунку 3.8.1). Такі пристрої та їх модифікації набули широкого застосування у сучасних потужних джерелах НВЧ-випромінювання для прискорювачів елементарних частинок, супутникового зв'язку та ракетно-космічної техніки.

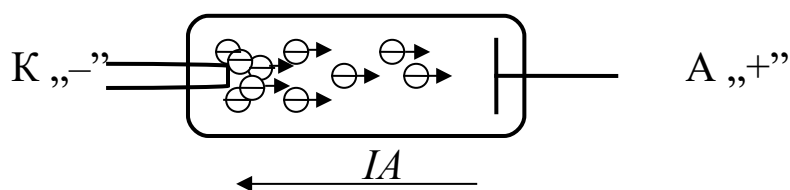


Рисунок 3.8.1 – Схема термоелектронної емісії вакуумної лампи

З допомогою такої лампи можна вивчити залежність термоелектронного струму I_A від різниці потенціалів (напруги) між катодом і анодом UA . Виявляється, що струм у лампі не описується законом Ома, а має більш складну залежність від напруги та температури катода. При постійній температурі

катода і до певних значень анодної напруги струм у лампі підпорядковується закону Чайлда-Ленгмюра (1911 р.):

$$I_A = P \cdot U_A^{\frac{3}{2}},$$

де коефіцієнт пропорційності P зумовлений формою та розташуванням електродів і називається первеансом. Зростання напруги призводить до збільшення кількості електронів, що переміщуються від катода до анода. Але за певного значення анодної напруги всі електрони, що виходять з поверхні катода, переміщуються до анода і подальше збільшення напруги не призводить до зростання анодного струму. Така напруга називається напругою насичення. Збільшити струм в цій ситуації (струм насичення) можна тільки підвищенням температури катода.

Закон Чайлда-Ленгмюра відображує той факт, що розподіл некомпенсованого (на відміну від, наприклад, електричного струму у звичайному дроті) заряду струму електронів, які знаходяться між катодом та анодом, впливає на просторовий розподіл потенціалу та рух цих самих електронів.

Якщо між катодом і анодом помістити третій електрод і подати на нього позитивний потенціал відносно катода, електричний струм з катода на анод збільшиться при постійних температурі катода та катод-анодній напрузі, тому, що створене додаткове електричне поле буде діяти на електрони в тому ж напрямку, що й основне (створене катод-анодною напругою). Цей третій електрод розташовують поблизу від поверхні катода, щоб збільшити напруженість додаткового електричного поля за не дуже великих потенціалів. Щоб електрони могли пролітати відстань від катода до анода, додатковий електрод роблять „прозорим”. Для цього його виготовляють з тонкого металевого дроту у вигляді сітки. Звідси і назва цього електрода – сітка. Якщо на сітку подати негативний потенціал, то струм у лампі зменшиться. За певної величини негативного потенціалу сітки додаткове електричне поле, створене між анодом і сіткою, компенсує основне і струм у лампі зникне. Таким чином, змінюючи напругу між катодом та сіткою, можна керувати струмом з катода на анод цієї лампи. Тому сітку називають

електродом управління, а такий пристрій – трьохелектродною лампою, або вакуумним тріодом. Електричну схему установки для дослідження властивостей тріода показано на рисунку 3.8.2.

Характеристики вакуумного тріода можна вивчати, знімаючи залежності струму I_A від напруги між катодом і сіткою U_C при постійній нарузі між катодом і анодом U_A . Такі залежності називають анодно-сітковими характеристиками тріода.

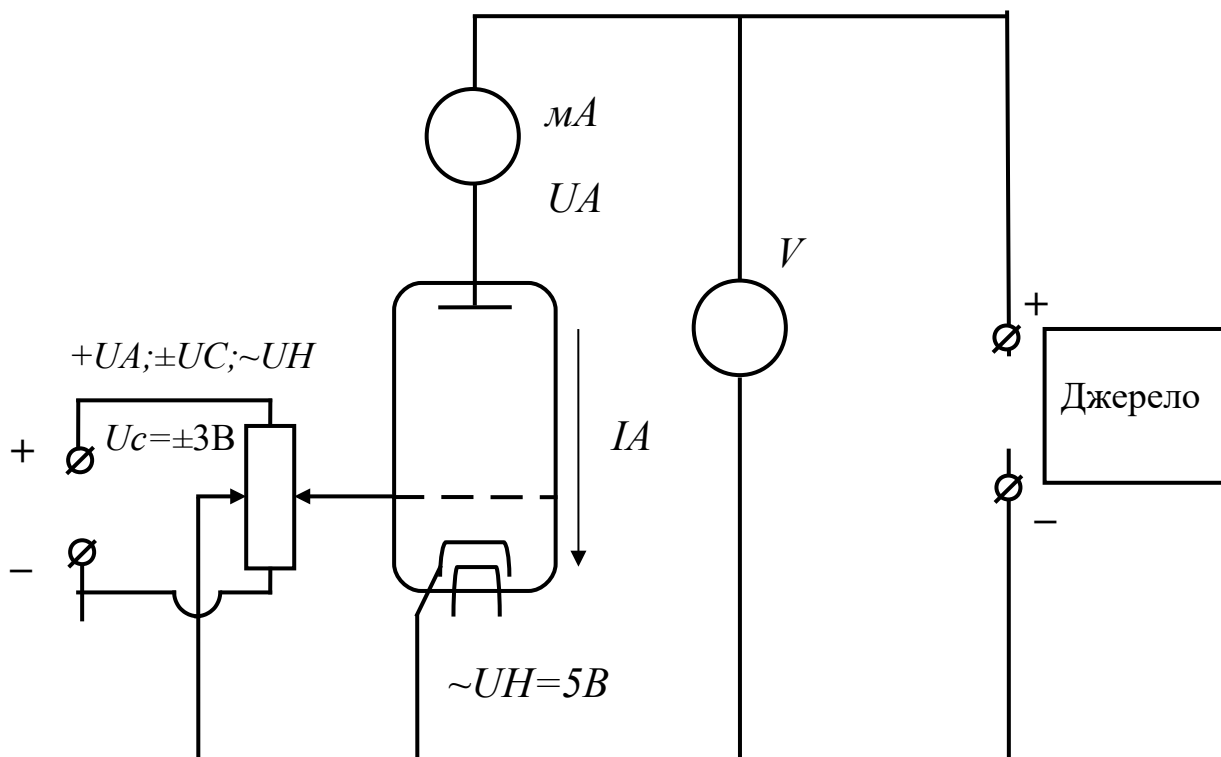


Рисунок 3.8.2 – Схема установки для вивчення анодно-сіткових характеристик вакуумного тріода.

Властивості тріода можна повністю описати параметрами, що визначаються з анодно-сіткових характеристик при двох різних значеннях напруги U_A ($U_{A2} > U_{A1}$).

Основні параметри вакуумного тріода

1 Крутизна сіткової характеристики тріода визначається співвідношенням зміни величини струму I_A до зміни напруги U_C за умови незмінної катод-анодної напруги U_A :

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_C} \text{ при } U_A = \text{const} .$$

2 *Внутрішній опір триода* – це співвідношення зміни напруги U_A до відповідної зміни величини струму I_A при постійній напрузі U_C :

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \text{ при } U_C = \text{const} .$$

3 *Статичний коефіцієнт підсилення* – співвідношення, що показує, у скільки разів зміна катод-анодної напруги U_A (при фіксованій напрузі U_C) перевищує зміну напруги U_C (при фіксованій напрузі U_A), щоб забезпечити таку ж саму зміну струму ΔI_A :

$$\mu = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_C} \text{ при } \Delta I_A = \text{const} .$$

Між трьома параметрами вакуумного триода – внутрішнім опором, крутизною сіткової характеристики та статичним коефіцієнтом підсилення має місце такий зв'язок:

$$R_i \cdot S = \mu .$$

Порядок виконання роботи

1 Увімкніть комп'ютер та запустіть програму „Навчальна лабораторія ІТМ”. Ознайомтеся з загальними настановами щодо роботи з вимірювальним комплексом у режимі лабораторної установки.

2 Підключіть блок живлення установки до мережі 220 В. Встановіть органи керування у положення:

- вмикач живлення -,„Відключено”;
- перемикач анодної напруги – U1;
- регулятор сіткової напруги поверніть проти годинникової стрілки до упору.

3 Увімкніть режим “Вимірювання” натисканням екранної кнопки в меню „Хід експерименту”. Повільно повертаючи регулятор сіткової напруги за годинниковою стрілкою, отримайте на екрані графік залежності анодного струму від сіткової

напруги. Зупиніть вимірювання. Проконтролюйте показання датчика анодної напруги.

4 Перемкніть перемикач анодної напруги у положення U2 і повторіть вимірювання залежності анодного струму від сіткової напруги для іншого значення анодної напруги.

5 За отриманими даними обчисліть крутизну сіткової характеристики, внутрішній опір тріода, статичний коефіцієнт підсилення тріода.

6 Експоруйте дані вимірювань у електронні таблиці Excel та зробіть необхідні обчислення.

Контрольні питання

1 Яке явище називають термоелектронною емісією?

2 Що таке робота виходу електрона з поверхні металу?

3 В чому полягає принцип дії вакуумного діода? Нарисуйте вольт-амперну характеристику діода.

4 На вольт-амперній характеристиці діода вкажіть струм насичення. Як із зменшенням температури катода змінюється струм насичення?

5 Запишіть закон Чайлда-Ленгмюра та поясніть його фізичну сутність.

6 Дайте визначення первеансу діода. Чи залежить первеанс від катод-анодної напруги?

7 Який пристрій називається вакуумним тріодом? Яку роль у тріоді відіграє сітка?

8 Запишіть основні параметри вакуумного тріода.

9 Запишіть зв'язок між основними параметрами тріода та поясніть сутність цих параметрів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3.11

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА ТА АМПЕРМЕТРА

Мета роботи – визначити питомий опір металів методом вольтметра та амперметра.

Прилади і матеріали: лабораторна установка.

Теоретичні відомості

Електричний опір – фізична величина, що характеризує властивість провідників протидіяти протіканню електричного струму. Електричний опір провідника дорівнює відношенню напруги на його кінцях до сили струму, що через нього протікає.

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

Величина опору провідника залежить від його форми та розмірів, а також від матеріалу, з якого його виготовлено. Для однорідного провідника з постійною площею перетину

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де l - довжина провідника, S - площа перетину, ρ - питомий електричний опір матеріалу провідника.

Звідси

$$\rho = R \frac{S}{l}.$$

Питомий опір провідника чисельно дорівнює опору провідника одиничної довжини та одиничної площі перетину. Питомий опір залежить від природи провідника.

Для визначення питомого опору ρ матеріалу провідника необхідно виміряти його електричний опір R , довжину l та площу перетину S . У разі циліндричного провідника

$$S = \pi r^2 = \pi \frac{D^2}{4}.$$

В даній лабораторній роботі для вимірювання опору використовується метод амперметра і вольтметра. В основі цього

методу полягає закон Ома. За законом Ома, сила струму, що протікає в однорідному металевому провіднику, пропорційна напрузі на кінцях цього провідника.

$$I = \frac{U}{R}$$

Тому для нашого методу, враховуючі попередню формулу, можна записати

$$\rho = \frac{U\pi d^2}{4lI}$$

Експериментальна установка

Схема установки для вимірювання опору показана на рисунку 3.11.1.

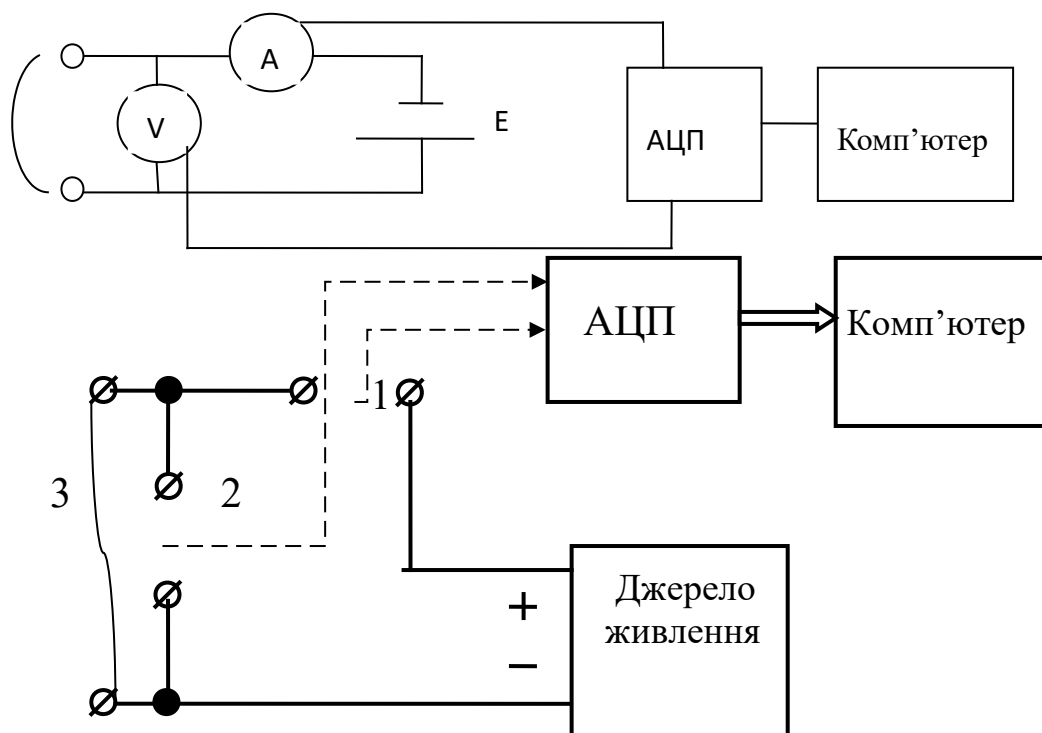


Рисунок 3.11.1 – Експериментальна установка до лабораторної роботи 3.11:

1 – клеми для підключення датчика струму; 2 – клеми для підключення датчика напруги; 3 – досліджуваний зразок; АЦП – аналого-цифровий перетворювач

Порядок виконання роботи

1 Увімкніть комп'ютер та запустіть програму „Навчальна лабораторія ІТМ”. Ознайомтеся з загальними настановами щодо роботи з вимірювальним комплексом у режимі лабораторної установки.

2 Запустіть програму „ІТМ-лабораторія”.

3 Виберіть пункт „Візначення питомого опору металів”.

4 Уважно ознайомтеся з установкою. Переконайтеся, що блок живлення включений в мережу, а вимикач на ній знаходиться в положенні «выкл». Регулятор на блоці живлення поставте в крайнє ліве положення.

5 Підключіть блок живлення установки до мережі 220 В (блок живлення 12В).

6 Увімкніть тумблер на блоці живлення.

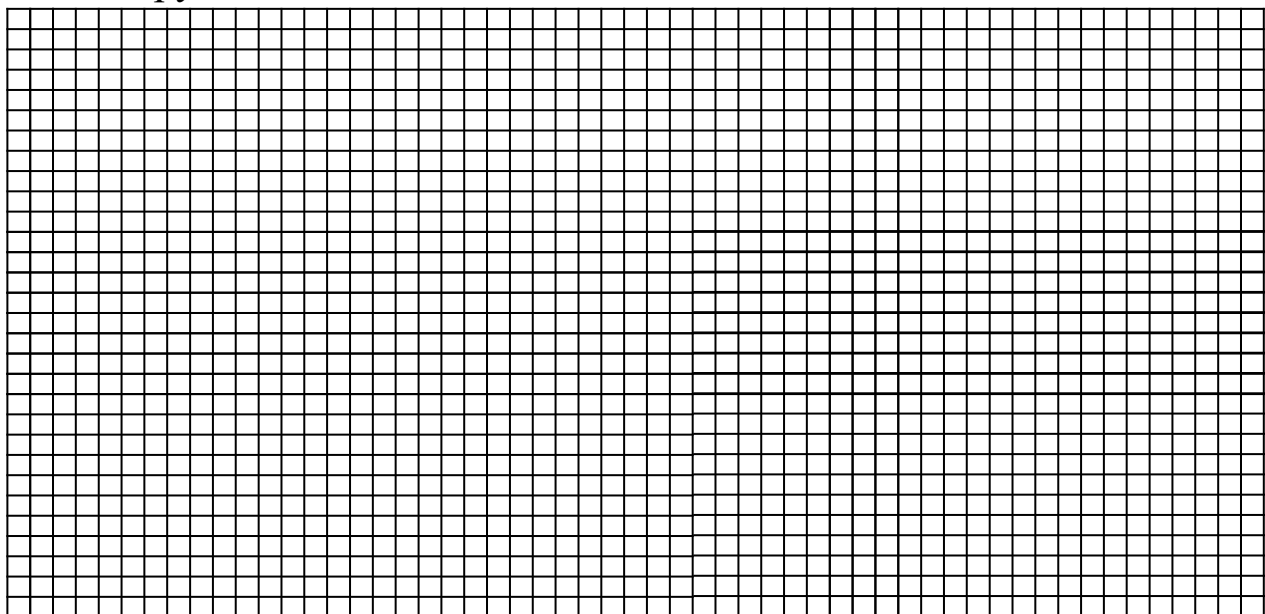
7 Запустіть програму. Для цього двічі натисніть на кнопку «вимірювання».

8 Реостатом на блоці живлення плавно змініть значення напруги від мінімального до максимального за 5-10 секунд.

9 У вікні програми «Хід роботи» натисніть кнопку «Зупинити».

10 Подумки розбийте інтервал напруги і струмів на десять приблизно рівних інтервалів. Для кожного інтервалу, при одному тимчасовому значенні, запишіть значення напруги і струму в таблицю 3.11.1.

11 За даними таблиці 3.11.1 побудуйте графік сили струму від напруги.



12 Графічно усередніть експериментальні значення і проведіть пряму лінію з початку координат.

13 Тангенс кута нахилу до осі «сила струму» визначатиме значення електричного опору струни.

14 Зміряйте довжину струни між внутрішніми клемми l і діаметр струни d .

15 Обчисліть питомий опір металу з формули $R = \rho \frac{l}{S}$, де $S = \frac{1}{4} \pi d^2$ - площа поперечного перетину струни.

16 Дані вимірювань та обчислень занесіть у таблицю 3.11.1.

Таблиця 3.11.1 – Звіт з виконання лабораторної роботи 3.11

	Сила струму, А	Напруга, В	Знайдений з графіка ел. опір, Ом
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Контрольні питання

- 1 Що таке ЕРС джерела?
- 2 Які сили називають сторонніми, де вони діють?
- 3 Чому непримустимо замкнення накоротко джерела ЕРС?
- 4 Коли корисна потужність максимальна?
- 5 Як визначається корисна потужність джерела ЕРС?
- 6 Чому дорівнює максимальна корисна потужність джерела ЕРС?
- 7 Що таке електричний опір?
- 8 Запишіть закон Ома для однорідної та неоднорідної ділянки ланцюга.
- 9 Що таке питомий електричний опір матеріалу провідника?
- 10 Поясніть фізичний сенс питомого опору металу.

11 Якими чинниками зумовлено опір провідника?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3.12

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДУ ТА РОЗРЯДУ КОНДЕНСАТОРА

Мета роботи: вивчення властивостей RC кіл. Вимірювання параметрів конденсаторів та резисторів.

Прилади і матеріали: лабораторна установка.

Теоретичні відомості

Розглянемо схему, показану на рисунку 3.12.1. Конденсатор, резистор та амперметр підключено послідовно. Встановимо перемикач К у положення 1, тоді, якщо у початковому стані конденсатор був повністю розряджений, струм I від джерела ЕРС протікатиме через амперметр, резистор R і заряджатиме конденсатор C . Опір амперметра малий у порівнянні з опором резистора, тому його можна не враховувати. В процесі заряду конденсатора напруга на його обкладинках збільшуватиметься, а струм зменшуватиметься. Коли напруга на конденсаторі сягне значення ЕРС, струм у колі перестане протікати.

Переведемо перемикач у положення 2. Коло замкнеться, і струм потече у зворотному напрямку і протікатиме у колі, поступово зменшуючись, до повного розряду конденсатора. Прийmemo за позитивний напрямок струму, коли він заряджає конденсатор.

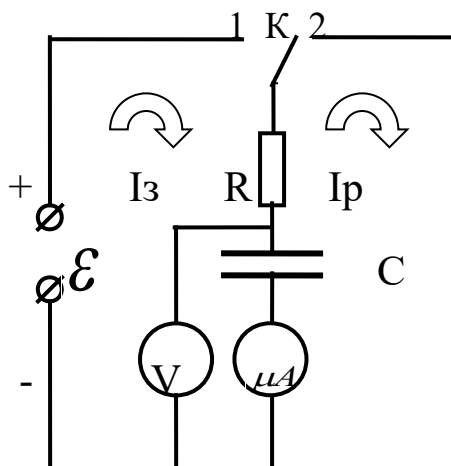


Рисунок 3.12.1 – Електрична схема лабораторної роботи 3.12

Визначимо закон, за яким змінюється струм заряду конденсатора у часі.

За другим законом Кірхгофа сума падінь напруги у замкненому колі дорівнює сумі всіх ЕРС, що діють у цьому колі.

$$U_r + U_c + U_R = \varepsilon ; \quad (3.12.1)$$

Внутрішній опір джерела живлення малий, тому падінням напруги на ньому можна знехтувати. Тоді отримаємо

$$U_c + U_R = \varepsilon , \quad (3.12.2)$$

де $U_c = \frac{q}{C}$ - падіння напруги на конденсаторі, а $U_R = IR$ - падіння напруги на резисторі.

Оскільки сила струму $I = \frac{dq}{dt}$, то (2) можна записати у вигляді

$$\varepsilon = \frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt} , \quad (3.12.3)$$

або

$$\frac{dq}{\varepsilon C - q} = \frac{dt}{RC} .$$

Якщо вибрати декілька пар резисторів та конденсаторів з відомими параметрами, так, щоб добуток $R \cdot C$ залишався однаковим, то можна пересвідчитись у тому, що експериментально виміряні значення струму заряду та розряду лягають на одну криву $I/I_0 = f(t)$, або на одну пряму, якщо графік побудувати у координатах $\ln(I/I_0) = \phi(t)$. При цьому тангенс кута нахилу прямої дорівнює $1/RC$. Час τ , протягом якого струм заряду зменшується у e разів, називають сталою часу RC кола або часом релаксації. За графіком $\ln(I/I_0) = \phi(t)$ можна знайти $\tau = RC$. Воно збігається з значенням абсциси точки, для якої

$$\ln I_0 - \ln I = 1 .$$

Вимірюючи струм та вивчаючи закон зміни струму заряду - розряду для невідомих конденсаторів і резисторів, можна визначити їх ємності, опори або час релаксації.

Порядок виконання роботи

1 Увімкніть комп'ютер та запустіть програму „Навчальна лабораторія ІТМ”. Ознайомтеся з загальними настановами щодо роботи з вимірювальним комплексом у режимі лабораторної установки.

2 Запустіть програму „ІТМ-лабораторія”.

3 Виберіть пункт „Вивчення процесів заряду та розряду конденсатора.”

4 Підключіть до клем резистор з набору зразків.

5 Увімкніть тумблер заряду конденсатора у положення „заряд конденсатора” „↑”.

6 Увімкніть режим „Вимірювання” натисканням екранної кнопки меню „Хід експерименту” і за показаннями датчика „Вольтметр” встановіть напругу у межах 8-9 В. Проконтролюйте показання датчика напруги.

7 Зупиніть вимірювання, переключіть тумблер на панелі установки у положення „↓” – „розряд конденсатора”, підключіть досліджуваний конденсатор і запустіть режим „Вимірювання” знову.

8 Перемиканням тумблера заряду-розряду конденсатора повністю зарядіть та розрядіть конденсатор.

9 Експортуйте дані вимірювань у електронні таблиці Excel.

10 Обчисліть значення RC для п'яти пар резисторів та конденсаторів. Значення ємності кожного конденсатора позначено на корпусі.

11 Визначте опір кожного з резисторів.

12 Повторіть вимірювання, використовуючи один резистор з різними конденсаторами. Обчисліть час релаксації.

13 Дані вимірювань та обчислень занесіть у таблицю 3.12.1.

Таблиця 3.12.1 – Звіт з виконання лабораторної роботи 3.12

Номер досліджу	Параметр	R	C	τ
1				
2				
3				
4				
5				

Контрольні питання

- 1 Яку величину називають сталою часу RC кола?
- 2 Які параметри кола впливають на час релаксації?
- 3 Що таке електричний опір?
- 4 Що таке електроємність?
- 5 Поясніть, користуючись графіком, як змінюється струм у колі і напруга на обкладинках конденсатора.

Додаток А

Приклад оформлення титульного аркуша

Українська державна академія залізничного транспорту

Кафедра «Фізика»

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3.2

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЛАКСАЦІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА

Роботу виконав: студент(ка)

(прізвище, ім'я, по батькові)

(курс) (група)

« » _____ 20 р.

Роботу прийняв:

(прізвище та ініціали викладача)

Оцінка: _____
(оцінка, бал)

(дата й підпис викладача)