

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Криворізький національний університет

Теорія та методика  
навчання математики,  
фізики, інформатики

*Збірник наукових праць  
Випуск X*

Том 2

Кривий Ріг  
Видавничий відділ НМетАУ  
2012

# **МІНІАТЮРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ФРОНТАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ З ФІЗИКИ «ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДКИ І РОЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА»**

В. М. Здешиц, В. П. Ржепецький

Україна, м. Кривий Ріг, Криворізький національний університет  
didanaz@i.ua

В даній статті описана лабораторна установка та методика проведення фронтальної лабораторної роботи з фізики «Вивчення процесів зарядки і розрядки конденсатора». Створення робіт такого типу проводиться в рамках держбюджетної теми № 0111U000263 «Розробка методології проведення фронтальних лабораторних робіт з фізики в умовах кредитно-модульної системи навчання» на базі волоконно-оптичної лабораторії кафедри фізики та методики її навчання Криворізького педагогічного інституту ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Концепція проведення фронтальних лабораторних робіт з фізики розглянута в роботі [1]. Суть концепції полягає в наданні кожному студентові можливості виконання лабораторної роботи з теми, яка вивчається на даний час за робочою програмою. Основою нового підходу є мініатюризація лабораторних установок до розмірів, що дозволяють розмістити їх у потрібній кількості в жорсткому чемоданчику – кейсі; кожний кейс повинен містити 15–16 лабораторних (дослідницьких) робіт на одну тему. Кількість кейсів повинна відповідати кількості тем, передбачених навчальним процесом, або хоча б темам з найбільш важливих розділів фізики. При наявності в експериментальних установках автономних джерел живлення виключається необхідність утримання і обслуговування лабораторних аудиторій, що, відповідно, здешевлює навчання і дозволяє проводити заняття в аудиторіях довільного типу. Мобільність лабораторних установок дозволить проводити навчання студентів як в аудиторіях кафедри фізики, так і у філіях навчальних закладів, на підготовчих курсах, курсах підвищення кваліфікації, а також дистанційно.

Мета наших досліджень – теоретичне обґрунтування, вдосконалення, розробка і впровадження у вищих педагогічних навчальних закладах в умовах кредитно-модульного навчання та у середніх загальноосвітніх навчальних закладах недорогих комплектів лабораторних установок, що забезпечують проведення лабораторних робіт із заданої теми фронтально.

Приклад наших розробок наведено в [2; 3]. В даній статті розгляда-

ється конструкція розробленої мініатюрної установки та методика проведення лабораторної роботи: «Вивчення процесів зарядки і розрядки конденсатора».

**Мета роботи:** Експериментально перевірити закон зарядки і розрядки конденсатора через опір. Навчитись визначати сталу часу кола (час релаксації) та значення ємності конденсатора чи опору резистора.

**Прилади і матеріали:** Батарея з двох гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру АА, мультиметр типу DT830В, установка для вивчення процесів зарядки і розрядки конденсатора, секундомір.

Розглянемо коло, що складається з джерела струму з електрорушійною силою  $\mathcal{E}$  і внутрішнім опором  $r$ , конденсатора, ємність якого  $C$ , опору  $R$  та перемикача  $SA$  (рис. 1).

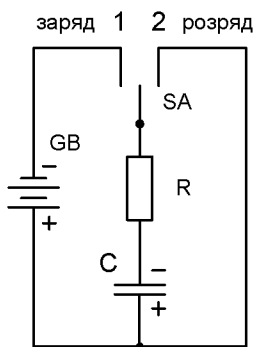


Рис. 1

Якщо перемикач  $SA$  поставити в положення 1, то конденсатор почне заряджатися від джерела через опір  $(R+r)$ . Якщо перевести перемикач в положення 2, то конденсатор почне розряджатися через опір  $R$ . Оскільки внутрішній опір джерела  $r \ll R$ , то будемо вважати, що в обох випадках опір кола дорівнює  $R$ .

Розглянемо спочатку процес зарядки конденсатора ( $SA$  в положенні 1). Застосуємо до цього контуру друге правило Кірхгофа:

$$i \cdot R + u = \mathcal{E}, \quad (1)$$

де  $i$  – миттєве значення сили струму,  $u$  – миттєве значення напруги на конденсаторі. Враховуючи, що  $i = \frac{dq}{dt}$ , де  $q = Cu -$  заряд конденсатора, одержимо:

$$\frac{du}{dt} RC + u = \mathcal{E}. \quad (2)$$

Вираз (2) – це диференціальне рівняння першого порядку зі сталими коефіцієнтами. Перепишемо його наступним чином:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\mathcal{E} - u}{RC}. \quad (3)$$

Введемо нову змінну  $u' = \mathcal{E} - u$  (при цьому  $du' = -du$ ):

$$-\frac{du'}{dt} = \frac{1}{RC} u'. \quad (4)$$

Розділимо змінні і проінтегруємо:

$$\ln u' = -\frac{t}{RC} + A, \quad (5)$$

де  $A$  – стала інтегрування, яку знайдемо з початкових умов: при  $t = 0$   $u = 0$ , а  $u' = \mathcal{E}$ . Отже,  $A = \ln \mathcal{E}$ .

Після потенціювання виразу (5) матимемо:

$$u' = \mathcal{E} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (6)$$

Повертаючись до змінної  $u$ , остаточно одержимо:

$$u = \mathcal{E} \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (7)$$

Напруга на конденсаторі з часом зростає за експоненціальним законом, асимптотично наближаючись до значення електрорушійної сили джерела. Такий процес зміни фізичної величини називають *апериодичним*.

Залежність зарядного струму від часу знайдемо з (1) і (7):

$$i = \frac{\mathcal{E} - u}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (8)$$

Сила струму також змінюється за експоненціальним законом, вона має найбільше значення в початковий момент часу і асимптотично прямує до нуля в процесі зарядки.

Тепер розглянемо процес розрядки конденсатора (SA в положенні 2). За правилом Кірхгофа:

$$iR + u = 0, \text{ де } i = \frac{dq}{dt}, q = Cu.$$

Одержуємо рівняння:

$$\frac{du}{dt} + \frac{u}{RC} = 0. \quad (9)$$

Розділимо змінні і проінтегруємо:

$$\ln u = -\frac{t}{RC} + B. \quad (10)$$

Сталу інтегрування  $B$  знайдемо з початкових умов: при  $t = 0$   $u = U_0$ . Отже,  $B = \ln U_0$ . Після потенціювання матимемо:

$$u = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (11)$$

Якщо в процесі зарядки напруга на конденсаторі досягла максимального значення, рівного е.р.с. джерела, то  $U_0 = \mathcal{E}$ :

$$u = \mathcal{E} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (12)$$

Струм розрядки:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (13)$$

Під час розрядки напруга і сила струму змінюються за експоненціальним законом, мають максимальні значення в початковий момент часу і асимптотично прямують до нуля.

Звернемо увагу на тотожність виразів для зарядного (8) і розрядного (13) струмів. Нагадаємо, що такий результат одержано в припущенні, що внутрішнім опором джерела можна знехтувати.

Одержані результати показують, що процеси зарядки і розрядки конденсатора (встановлення електричної рівноваги) відбуваються не миттєво, а з кінцевою швидкістю. Для розглянутого кола, що складається з конденсатора і резистора, швидкість встановлення рівноваги залежить від добутку:

$$\tau = RC, \quad (14)$$

який має розмірність часу і називається *сталюю часу* даного кола або *часом релаксації*. Стала часу показує, через який час після початку розрядки напруга на обкладках конденсатора зменшиться в  $e$  раз ( $e \approx 2,71$ ). Визначити час релаксації можна наступним чином.

Одержимо з експерименту залежність струму зарядки (чи розрядки) від часу  $i=f(t)$ , що повинна мати вид експоненціальної залежності (8):

$$i = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R} - \text{максимальне значення струму зарядки}). \text{ Дані експерименту подамо у вигляді графіку залежності } \ln \frac{i}{I_0} = \phi(t).$$

Якщо залежність  $i=f(t)$  має вид (8), то  $\ln \frac{i}{I_0} = -\frac{t}{RC}$ , тобто графік матиме вид прямої лінії. Приклад такого графіку наведено на рис. 2. З графіку визнача-

ємо  $RC = \frac{t}{\ln(i/I_0)}$ .

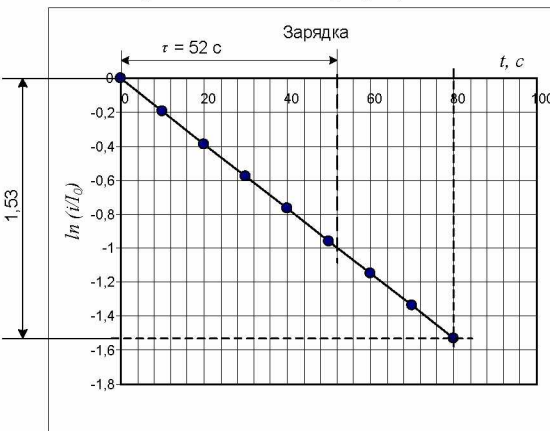


Рис. 2

$$\text{ємо } RC = \frac{t}{\ln(i/I_0)}.$$

Наприклад, для часу  $t=80$  с значення  $\ln(i/I_0)=1,53$ . Отже, час релаксації дорівнює:

$$\tau = \frac{80 \text{ с}}{1,53} = 52 \text{ с}.$$

Цей же результат можна знайти ще й так. При  $\ln(i/I_0)=1$  час  $t=\tau$ , тобто час релаксації дорівнює абсцисі точки, у якій ордината дорівнює

одиниці.

Схема установки зображена на рис. 3. Вона складається з джерела струму GB1, конденсатора C, резисторів R1 і R2, перемикача SA1, що має три положення, і кнопки SB1. На схемі перемикач SA1 зображено в положенні, при якому коло розімкнуте.

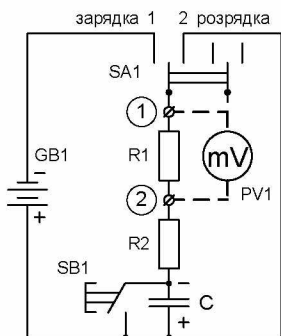


Рис. 3

Як джерело струму використовується батарея з двох з'єднаних послідовно гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру AA. Для вимірювання струму зарядки (чи розрядки) використовується мілівольтметр від мультиметра, яким вимірюють напругу на опорі R1. Якщо опір R1 вибрати рівним, наприклад, 1 кОм, то покази мілівольтметра будуть відповідати значенням струму в мікроамперах. В установці використано конденсатор K73-11 ємністю 6,8 мкФ ( $\pm 5\%$ ), резистор R2 опором 5,1 МОм ( $\pm 10\%$ ), резистор R1 опором 100 кОм. Зі значення останнього опору випливає, що покази мілівольтметра відповідатимуть струму  $10^{-8}$  А. Кнопка SB1 потрібна для розрядки конденсатора.

Проводять лабораторну роботу згідно інструкції, наведеної нижче.

1. Приєднайте до вимірювальної установки джерело живлення. Вид зверху на установку з приєднаним джерелом живлення подано на рис. 4 та рис. 5. Перемикач SA1 повинен бути в середньому положенні.

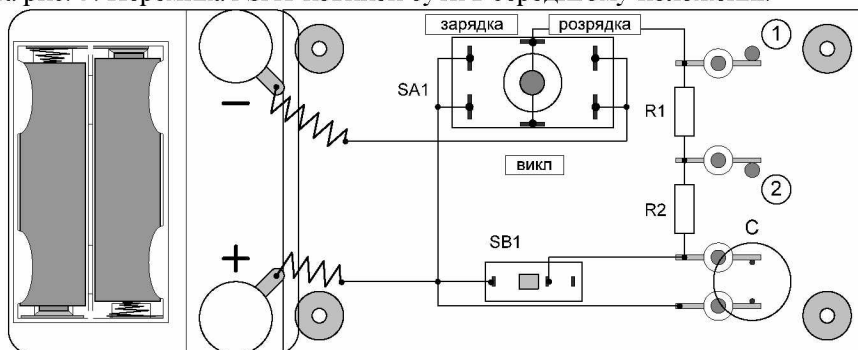


Рис. 4

2. Натисніть і потримайте декілька секунд кнопку SB1 для розряду конденсатора. Підключіть до гнізд 1 і 2 мілівольтметр від мультиметра (межа вимірювання – 200 мВ).

3. Приготуйте для вмикання секундомір, перевірте його роботу.

Приготуйте зошит для запису результатів. Записи доведеться робити швидко, кожні 10 с записувати покази мультиметра.

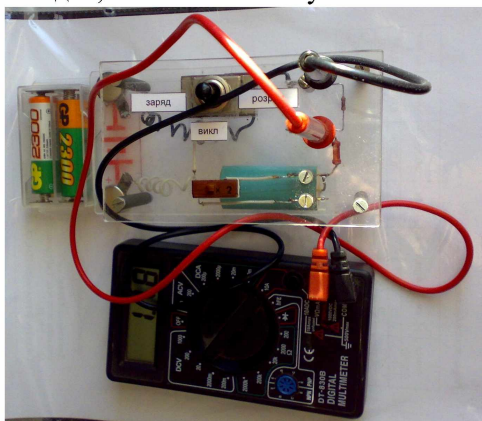


Рис. 5. Вигляд дослідної установки

4. Натисніть кнопку SB1 і утримуйте її в цьому положенні. Переведіть перемикач SA1 в положення «зарядка» і запам'ятайте (або зразу запишіть) покази мультиметра. Це значення відповідає початковому струму  $I_0$ . Кнопку не відпускайте!

5. Одночасно запусить секундомір і відпустіть кнопку SB1. Почнеться зарядка конденсатора і секундомір почне відлік часу.

6. В момент, коли на секундомірі з'являться покази «10 с», швидко переведіть погляд на мультиметр і запам'ятайте та запишіть його покази. Можливо спочатку доведеться трохи потренуватись виконувати цю вправу; від точності записів буде залежати кінцевий результат.

7. Пункт 6 треба виконувати кожні 10 секунд на протязі трьох хвилин. Ви одержите 19 значень сили струму зарядки. Залиште перемикач SA1 в режимі зарядки ще на дві-три хвилини, але вже не ведіть записи.

8. Приготуйте секундомір до роботи, перемикач SA1 поставте в середнє положення «викл», потім одночасно переведіть SA1 в положення «розрядка» і включіть секундомір.

9. Початковий струм, звичайно, записати неможливо, тому записи починайте з моменту часу 10 секунд. Продовжуйте запис результатів протягом 3 хвилин. Якщо зарядка конденсатора виконана до кінця, то початкова напруга на ньому дорівнюватиме е.р.с. джерела, отже, початковий струм розрядки  $I_0$  дорівнюватиме початковому струму зарядки.

10. Оскільки зарядка і розрядка здійснюються через один і той же опір, то відповідні значення струмів зарядки і розрядки будуть близькими одне до одного. Значні відхилення можуть вказати на якісь помилки при виконанні роботи.

11. Після трьох хвилин спостереження натисніть і потримайте декілька секунд кнопку SB1 для повної розрядки конденсатора.

12. Повторіть вимірювання, почавши з пункту 4. Якщо результати повторного вимірювання мало відрізняються від першого, то на цьому вимірювання можна припинити.

13. Переведіть перемикач SA1 в положення «викл» і від'єднайте джерело живлення.

14. За результатами експерименту побудуйте графіки залежності  $i=f(t)$ .

15. Обчисліть відношення  $i/I_0$ , потім  $\ln(i/I_0)$  і побудуйте графік залежності  $\ln(i/I_0)$  від часу  $t$ . Якщо одержана залежність  $i=f(t)$  експоненціальна, то останній графік буде прямою лінією. Обчислення і побудову графіків слід виконувати, використовуючи електронні таблиці.

16. За графіком  $\ln \frac{i}{I_0} = \phi(t)$  визначте час релаксації  $\tau$ . Порівняйте

одержане значення з відомими вам значеннями  $R$  та  $C$ .

Приклад виконання роботи за інструкцією наведено нижче.

Запишемо значення опорів та ємність конденсатора:

$R_2 = 5,1 \text{ Мом} \pm 10\%$ ,  $R_1 = 100 \text{ кОм}$ ,  $C = 6,8 \text{ мкФ} \pm 5\%$  (K73-11 160 В).

В нижченаведених табл. 1 і табл. 2 одержані з досліду значення струму зарядки і розрядки та обчислені значення  $i/I_0$  та  $\ln(i/I_0)$ .

Таблиця 1

Таблиця 2

Результати зарядки конденсатора

Результати розрядки конденсатора

Зарядка			
Час, с	Струм, $10^{-8} \text{ А}$	$i/I_0$	$\ln i/I_0$
0	57,5	1	0
10	43,8	0,761739	-0,27215
20	33,3	0,57913	-0,54623
30	25,4	0,441739	-0,81704
40	19,2	0,333913	-1,09687
50	14,6	0,253913	-1,37076
60	11,2	0,194783	-1,63587
70	8,5	0,147826	-1,91172
80	6,4	0,111304	-2,19549
90	4,9	0,085217	-2,46255
100	3,7	0,064348	-2,74345
110	2,8	0,048696	-3,02217
120	2,2	0,038261	-3,26333
130	1,7	0,029565	-3,52116
140	1,3	0,022609	-3,78942
150	1	0,017391	-4,05178
160	0,8	0,013913	-4,27493
170	0,6	0,010435	-4,56261
180	0,5	0,008696	-4,74493

Розрядка			
Час, с	Струм, $10^{-8} \text{ А}$	$i/I_0$	$\ln i/I_0$
0	57,5	1	0
10	43,4	0,754783	-0,28133
20	33,1	0,575652	-0,55225
30	25,2	0,438261	-0,82494
40	19,1	0,332174	-1,1021
50	14,6	0,253913	-1,37076
60	10,9	0,189565	-1,66302
70	8,3	0,144348	-1,93553
80	6,4	0,111304	-2,19549
90	4,8	0,083478	-2,48317
100	3,6	0,062609	-2,77085
110	2,8	0,048696	-3,02217
120	2,1	0,036522	-3,30985
130	1,6	0,027826	-3,58178
140	1,2	0,02087	-3,86946
150	0,9	0,015652	-4,15715
160	0,7	0,012174	-4,40846
170	0,5	0,008696	-4,74493
180	0,4	0,006957	-4,96808



На рис. 6 та рис. 7 зображені залежності струму від часу. Дані таблиць і графіки вказують на ідентичність процесів зарядки і розрядки.

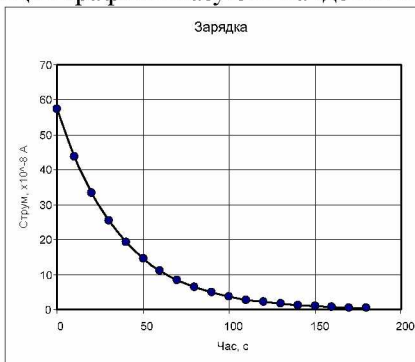


Рис. 6

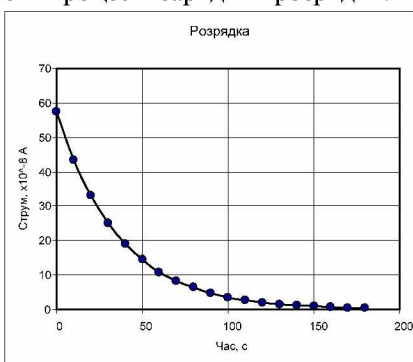


Рис. 7

На рис. 8 та рис. 9 зображені залежності  $\ln(i/I_0)$  від часу. Графіки є практично прямими лініями, що свідчить про експоненціальну залежність струму зарядки чи розрядки від часу.

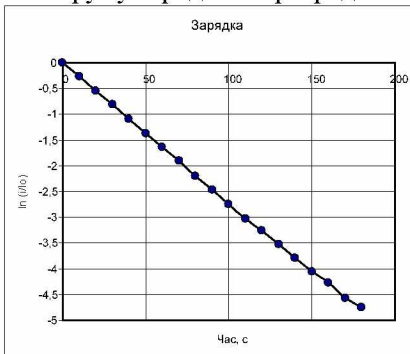


Рис. 8

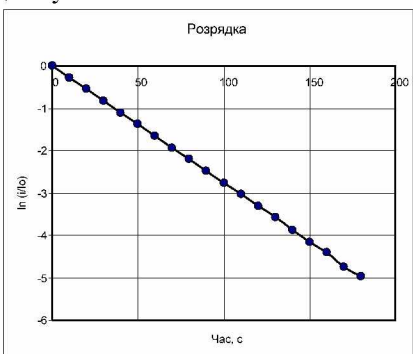


Рис. 9

На рис. 10 та рис. 11 зображені ті ж залежності  $\ln(i/I_0)$  від часу, але для збільшення масштабу взято лише 60 секунд процесу. Це дає можливість досить точно графічним методом визначити час релаксації:  $\tau=36,4$  с. Очевидно, що для графіка розрядки буде одержане таке ж значення  $\tau$ .

Враховавши значення ємності і опорів, наведених в опису схеми установки, для добутку RC маємо:  $RC=5,2 \text{ МОм} \cdot 6,8 \text{ мкФ}=35,36 \text{ с} \approx 35,4 \text{ с}$ . Враховуючи клас точності резисторів і конденсатора і вважаючи, що похибка вхідних даних дорівнює 10%, одержимо:  $RC=(35,4 \pm 3,54) \text{ с}=(35 \pm 4) \text{ с}$ , що гарно узгоджується з експериментальним

значенням  $\tau$ .

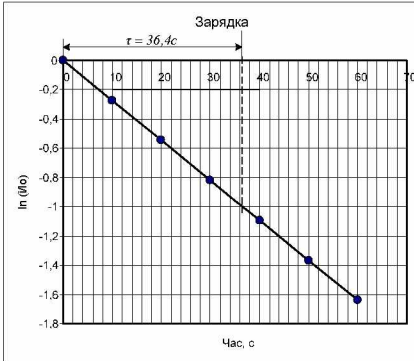


Рис. 10

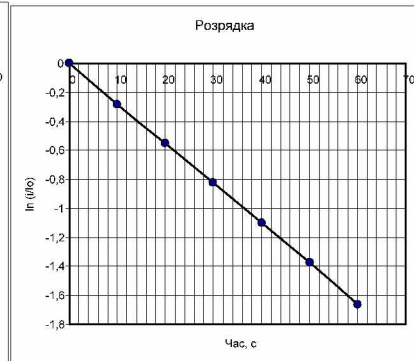


Рис. 11

Розглянемо проблеми, що виникли при конструюванні установки.

### 1. Вимірювання струмів мілівольтметром.

Вимірювання струму в лабораторних роботах можна виконувати міліамперметром від мультиметра. Проте в багатьох задачах необхідно знати більш-менш точно опір міліамперметра і враховувати його в розрахунках кіл. З цієї причини доцільно вимірювання струму замінити вимірюванням напруги на відомому опорі, який увімкнений в ділянку кола замість амперметра. При значенні опору 1 Ом покази мілівольтметра відповідатимуть значенню струму в мА. При необхідності вимірювати струми в десятки мікроампер опір в 1 Ом треба замінити на опір в 1 кОм. В роботі «Вивчення процесів зарядки і розрядки конденсатора» цей прийом був успішно застосований для вимірювання струмів до 0,01 мкА. При цьому в коло був включений резистор 100 кОм.

До речі, опір міліамперметра від мультиметра DT830B має наступні значення. На межі вимірювання 200 мА – 5,6-5,7 Ом, на межі 20 мА – 14,7-15 Ом, на межі 2000 мкА – 104 Ом, на межі 200 мкА – 1 кОм. Таким чином, включаючи в коло резистор ми не погіршуємо параметрів кола порівняно з випадком, коли вимірювання струму здійснюється міліамперметром. Струми ж менше мікроампера мультиметром виміряти взагалі неможливо.

При вимірюванні струмів до десятків мкА мілівольтметр підключається паралельно до резистора (1 Ом, 1 кОм), опір якого значно менший опору мілівольтметра (990 кОм). Тому підключення мілівольтметра не змінює параметри кола. При вимірюванні малих струмів (менше 1 мкА) використовується резистор 100 кОм, тому слід враховувати опір мілівольтметра. Опір, на якому вимірюється напруга, повинен бути 111-112 кОм, в цьому випадку разом з мілівольтметром якраз одержимо

100 кОм.

## 2. Вибір конденсатора для вивчення процесів зарядки і розрядки.

Пробне виконання роботи показало, що параметри установки для вивчення процесів зарядки і розрядки конденсатора слід вибирати таким чином, щоб час релаксації був в межах 20–50 с. При ємності конденсатора 1000 мкФ, опорі 20 кОм і джерелі живлення з е.р.с. 3 В початковий струм становить  $\approx 150$  мкА і за 100 с зменшується до одиниць мкА. Для вимірювання таких струмів можна використати мультиметр на межі 200 мкА, який на цій межі має внутрішній опір 1 кОм. Проте зручніше цей струм вимірювати за спадом напруги на опорі 1 кОм, постійно увімкнутим в коло. Покази мілівольметра на межі 200 мілівольт будуть при цьому відповідати струму в мкА.

Практичне виконання роботи на установці з оксидним конденсатором (К50-35 1000 мкФ 25 В) показало, що експоненціальний закон для зарядного струму спостерігається лише на початку процесу зарядки. Причиною є значні струми витоку, пов'язані з дефектами оксидного шару конденсатора.

Вказане явище значно ускладнює інтерпретацію результатів роботи, оскільки одержана залежність  $\ln(i/I_0)=f(t)$  не є лінійною (див. рис. 12, 13).

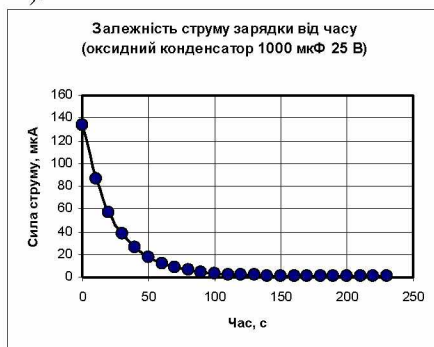


Рис. 12

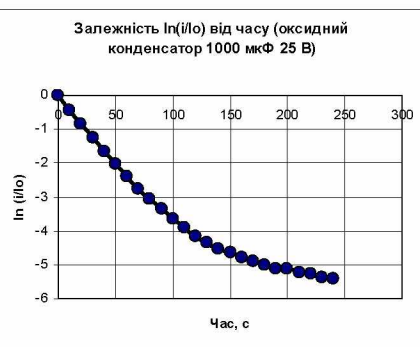


Рис. 13

Для усунення цього недоліку слід використати конденсатор з гарним діелектриком, не електролітичні. Такі конденсатори мають значно меншу ємність – одиниці мікрофарад. Для забезпечення необхідного часу релаксації треба брати опір, рівний 5–10 МОм. При таких опорах струм зарядки становитиме вже долі мкА – від 0,05 мкА до 0,001 мкА. Мультиметр такі струми вже не вимірює і єдиним варіантом залишається вимірювання напруги тепер уже на опорі в 100 кОм. Тепер вже необхідно враховувати опір мультиметра на межі 200 мВ (990 кОм) і замість резистора в 100 кОм використати резистор 111 – 112 кОм. Реалізація

цього варіанту показала його цілковиту придатність.

Проте не всі типи конденсаторів однаково придатні для даної задачі. Погані результати були одержані з конденсатором МБМ 1 мкФ 160 В (рис. 14, 15).

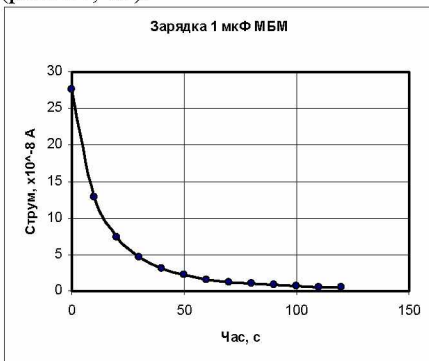


Рис. 14

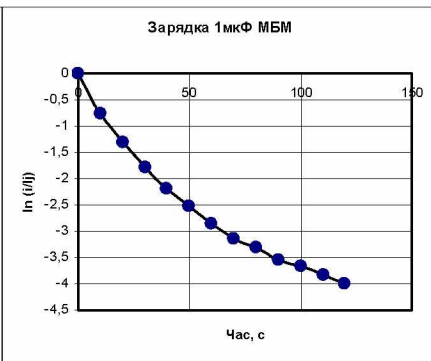


Рис. 15

Найкращі результати були одержані з конденсаторами К73-11 160 В ємністю 3,3 мкФ та 6,8 мкФ. Конденсатори такого типу і були використані в моделях установок (рис. 16, 17).

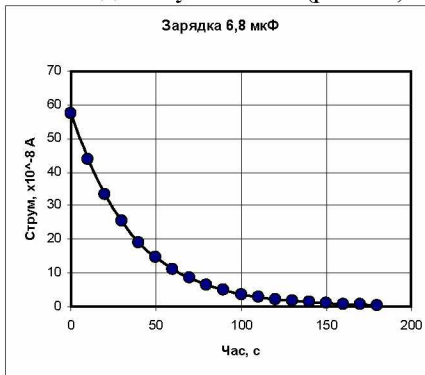


Рис. 16

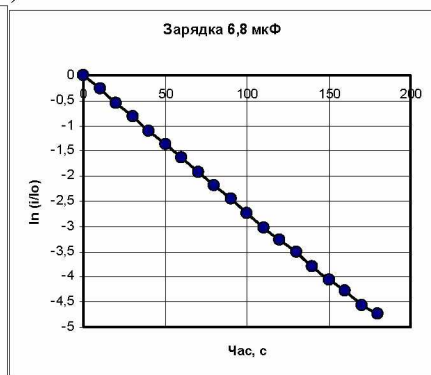


Рис. 17

Таким чином, мініатюризація дослідних установок дозволяє фронтально на сучасному рівні досліджувати фундаментальні процеси, суттєво зменшуючи вартість обладнання. Маємо надію на те, що наші розробки дозволять навчальним закладам України найближчим часом мати для вивчення фізики повноцінну експериментальну базу.

## Література

1. Здешиц В. М. Застосування новітніх технологій для проведення лабораторних занять з фізики / В. М. Здешиц // III Всеукраїнська конференція «Сучасні технології в науці та освіті» : зб. наук. пр. – Кривий Ріг : Вид-во НМетАУ, 2003. – Т. 2. – С. 67-71.

2. Здешиц В. М. Розробка фронтальних лабораторних робіт з фізики в умовах кредитно-модульної системи навчання / В. М. Здешиц, В. М. Кадченко, В. П. Ржепецький, І. В. Шелевицький // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: зб. наук. пр. – Вип. IX. – Кривий Ріг : Вид. відділ НМетАУ, 2011. – С. 280-287.

3. Здешиц В. М. Мініатюрні багатофункціональні дослідницькі установки для проведення фронтальних лабораторних робіт з фізики / В. М. Здешиц, В. М. Кадченко, О. А. Коновал, В. П. Ржепецький // Фізика та астрономія. – К., 2012. – Вип. I. – С. 25-30.