

**М.Г. Цілінко,**  
кандидат педагогічних наук, професор  
(Житомирський педуніверситет);  
**М.М. Прокопенко,**  
аспірант  
(Національний педуніверситет, м. Київ)

### ЕЛЕКТРОННИЙ МІЛІВЕБЕРМЕТР

*У статті представлено зовнішній вигляд та принципову схему електронного мілівеберметра, пропонуються методичні розробки з використання приладу в навчальному фізичному експерименті.*

На кафедрі фізики Житомирського педуніверситету розроблено, виготовлено та ефективно застосовується при виконанні лабораторних робіт та в демонстраційному експерименті прилад, яким можна вимірювати магнітний потік – електронний мілівеберметр [1:107]. Зовнішній вигляд приладу показано на рис. 1, а на рис. 2 – принципову схему мілівеберметра.

На передню панель мілівеберметра виведено такі елементи керування:

1) Тумблер SA 1 "~42V" подає живлення на прилад з мережі змінного струму напругою 36 – 42 V (при його вмиканні загоряється червоний сигнальний світлодіод) і одночасно закорочує вихід вимірювального механізму в неробочому стані, що важливо при транспортуванні. Біля тумблера стоїть позначення "~42V".

2) Тумблер SA 2 "0-П" подає живлення на вимірювальну схему (при його вмиканні загоряється зелений сигнальний світлодіод), при відключенні живлення покази вимірювального механізму скидаються (стрілка вимірювального механізму повертається до нульової відмітки шкали). Біля тумблера зверху написано "П" (пуск), знизу – "0" (нуль).

3) Для встановлення меж чутливості приладу використано клавшній перемикач SA 3 на 7 положень. Під клавшами написано числа "1"; "3"; "10"; "30"; "100"; "300"; "1000".

4) Тумблер SA 4 "П-Г" дає можливість відмикання електровимірювального механізму приладу й вмикання демонстраційного гальванометра та цифрового мілівольтметра. Зліва від тумблера написано "П" (електровимірювальний механізм приладу), а праворуч – "Г" (демонстраційний гальванометр).

5) Тумблер SA 5 "+,-" дозволяє здійснювати зміну полярності вимірювального механізму. Зліва від тумблера стоїть позначення "+", а праворуч – "-".

6) Установа і баланс нуля здійснюється за допомогою змінних резисторів R 9 і R 10, їх ручки "Г" та "Т" виведені на панель керування. Біля ручок змінних резисторів є позначення: "Г" – грубо, "Т" – тонко.

На праву бічну панель мілівеберметра виведені вхідні клеми (2) "+" та (1) "⊥".

На задню панель мілівеберметра виведено клеми (4, 5) "Г" для підключення гальванометра або цифрового вольтметра.

Мілівеберметр живиться від мережі змінного струму частотою 50 Гц і напругою 36-42 В. Для живлення мікросхеми передбачено випрямлення змінного струму зі стабілізацією та здвоєнням напруги. Прилад побудовано на прецизійній мікросхемі інтегральному операційному підсилювачі (ІОП) К140УД17. На інвертуючому вході (3) побудовано вольтметр з практично нескінченим вхідним опором на 7 діапазонів, які визначаються опорами R 6 та R 11-R 24. В розрахунку на шкалу приладу це становить: 0...0,01 В; 0...0,03 В; 0...0,1 В; 0...0,3 В; 0...1,0 В; 0...3,0 В; 0...10,0 В. Вимірювання кількості електрики  $q$  здійснюється через вимірювання напруги  $U$ , до якої заряджається конденсатор С 3 відомої ємності  $C$  інтегруючого кола вольтметром так, що:

$$q = CU. \quad (1)$$

Вимірювання магнітного потоку здійснюється через вимірювання кількості електрики індукованої при зміні магнітного потоку. Результати вимірювань відображаються електровимірювальним механізмом з лінійними шкалами на 10 та 30 поділок. Змінюють чутливості приладу клавшнім перемикачем меж вимірювання. Під клавшами написані цифри "1", "3", "10", "30", "100", "300", "1000". Ці числа визначають ціну шкали в мілівеберах. Передбачено вихід на демонстраційний гальванометр або цифровий вольтметр[2], а тому прилад може використовуватися в демонстраційному експерименті та лабораторному практикумі.



Рис. 1 Мілівеберметр.

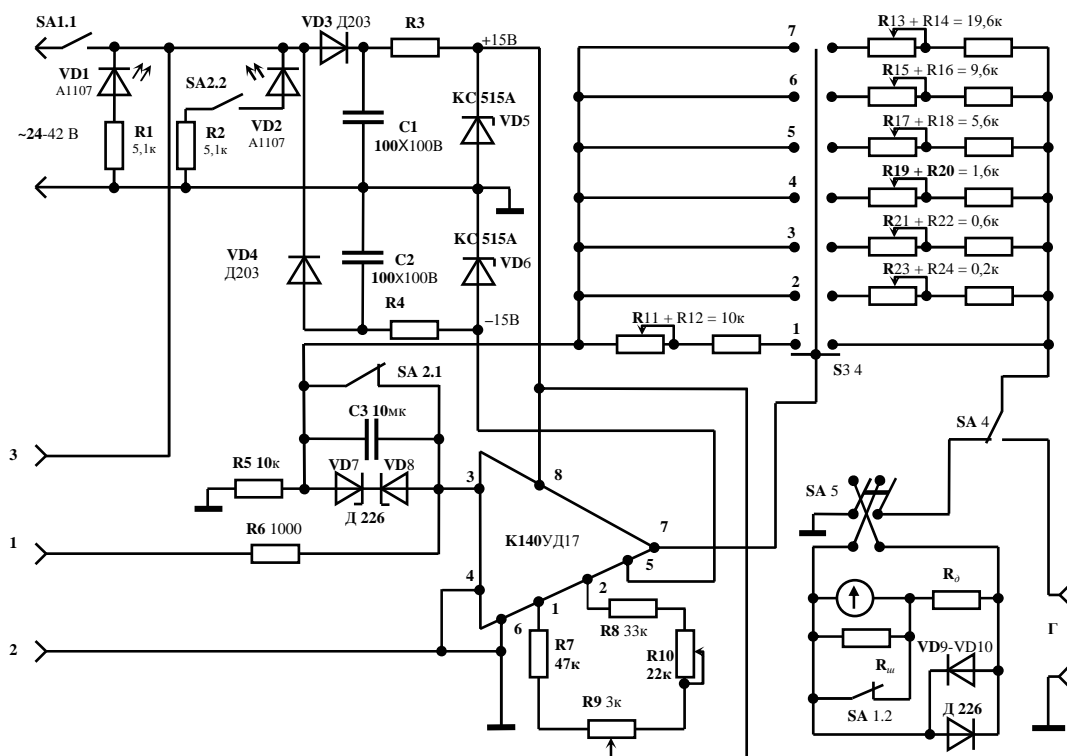


Рис. 2 Принципова схема мілівеберметра.

Відповідно (1) напруга на виході буде прямо пропорційною кількості електрики, що її одержить прилад. Згідно закону електромагнітної індукції Фарадея-Максвелла,

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} N, \tag{2}$$

де  $E$  – електрорушійна сила (ЕРС), що індукується при зміні магнітного потоку  $d\Phi$  за час  $dt$  у контурі з кількістю витків  $N$ . Миттєве значення ЕРС за законом Ома для повного кола:

$$E = i(R_{\Pi} + R_K), \tag{3}$$

де  $i$  — миттєве значення сили струму,  $R_{\Pi}$  – вхідний опір приладу,  $R_K$  – опір вимірювального контуру (котушка і з'єднувальні провідники). Якщо  $R_{\Pi} + R_K = R$  тоді (3) запишемо як:

$$E = iR, \tag{4}$$

де,  $R$  — загальний опір вимірювального контуру і приладу. Згідно означенню, миттєве значення сили струму

$$i = \frac{dq}{dt}. \tag{5}$$

Підставивши у (4) формули (2) і (5) отримаємо:

$$R \frac{dq}{dt} = - \frac{d\Phi}{dt} N. \tag{6}$$

Проінтегруємо праву і ліву частини (6)  $R \int_0^q \frac{dq}{dt} = - \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \frac{d\Phi}{dt} N$ . Інтегруючи, дістанемо, що  $qR = N(\Phi_1 - \Phi_2)$ .

Якщо магнітний потік змінюється від  $\Phi_1 = \Phi$  до  $\Phi_2 = 0$ , то  $qR = N\Phi$ , а  $N\Phi = \Psi$ .

$$\Psi = qR, \tag{7}$$

де  $\Psi$  – повний магнітний потік.

Перерахунок результату вимірювання в одиницях магнітного потоку здійснено, виходячи з того, що зміна магнітного потоку  $\Psi$  пов'язана з кількістю індукованої електрики, співвідношенням (7). На основі цього співвідношення отримаємо, що Вебер є такий магнітний потік, який, змінюючись до нуля в контурі, що має опір 1 Ом, індукує кількість електрики 1 Кл.

Вимірювання магнітного потоку здійснюється через вимірювання кількості електрики індукованої при зміні магнітного потоку. У відповідності до (10), перехід від одиниць кількості електрики до одиниць магнітного потоку здійснюється в залежності від вхідного опору мілівеберметра. Найвища чутливість приладу в одиницях кількості електрики буде  $q = 1 \text{ мкКл}$  на шкалу. Якщо вхідний опір мілівеберметра  $R = 1 \text{ кОм}$ , то для вимірювання зміни магнітного потоку найвищою чутливістю буде  $\Psi = 10^{-7} \text{ Кл} \cdot 10^4 \text{ Ом} = 10^{-3} \text{ Вб} = 1 \text{ мВб}$ . Таким чином, прилад має сім діапазонів вимірювання 0...1 мВб, 0...3 мВб, 0...10 мВб, 0...30 мВб, 0...100 мВб, 0...300 мВб, 0...1000 мВб.

Запропонований мілівеберметр може знайти широке застосування в технічних вимірюваннях і особливо в навчальному фізичному експерименті. Зокрема мілівеберметр може бути застосований при виконанні лабораторних робіт та у демонстраціях при вивченні магнетизму.

Прилад дає можливість виконати ряд важливих лабораторних робіт та провести пізнавальні демонстраційні досліди по вимірюванню магнітного потоку, а отже і визначення індукції магнітного поля. Лабораторні роботи по визначенню індукції магнітного поля раціональніше проводити, здійснюючи прямі вимірювання магнітного потоку мілівеберметром. В якості джерел електрики у лабораторних роботах використано калібратор струму і напруги та калібратор низької напруги.

*Лабораторні роботи з використанням мілівеберметра:*

1. Дослідження намагнічування феромагнетиків за методом О.Г. Столетова. Знімання петлі гістерезису.
2. Дослідження намагнічування феромагнетиків у магнітному полі короткої котушки.
3. Дослідження намагнічування феромагнетиків у магнітному полі соленоїда (метод Столетова-Юінга).
4. Магнітне коло. Дослідження коефіцієнту взаємної індукції котушки трансформатора.
5. Визначення вертикальної і горизонтальної складових індукції магнітного поля Землі.
6. Дослідження магнітного поля постійних магнітів.
7. Дослідження магнітного поля колового струму.
8. Дослідження магнітного поля соленоїда.
9. Дослідження залежності коефіцієнту самоіндукції (індуктивності) котушки від кількості її витків.
10. Дослідження коефіцієнту взаємоіндукції двох котушок.
11. Дослідження магнітного кола трансформатора.

*Демонстраційний експеримент та експериментальні задачі з використанням мілівеберметра:*

1. Електромагнітна індукція.
2. Визначення індукції магнітного поля постійного магніту.
3. Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.
4. Виникнення вихрового магнітного поля при зміні електричного (рівняння Максвела).
5. Вимірювання індукції магнітного поля колового струму.
6. Вимірювання індукції магнітного поля соленоїда.
7. Визначення коефіцієнту самоіндукції (індуктивності) котушки.

Наведемо приклад запропонованої нами лабораторної роботи:

**"Дослідження намагнічування феромагнетика в магнітному полі короткої котушки" [1:105]**

#### Теоретичні відомості

Метод тороїда [1:96] є найбільш точним при вимірюваннях магнітних характеристик феромагнетиків. Щоб порівняти характеристики феромагнетиків, потрібно з кожного із них виготовити тороїд і провести вимірювання, що не завжди можливо, коли є в наявності невелика кількість матеріалу. В тому випадку, якщо можна задовольнитись не дуже високою точністю, можна скористатись методом винесення магнетика із намагнічуючого поля. Щоб зменшити до мінімуму вплив розмагнічуючого фактора, досліджувані зразки слід брати у вигляді тонких і довгих смужок або дротин. Смужку чи дротину вносять у відоме намагнічуюче поле та вимірюють ступінь його намагнічення, тобто вимірюють магнітну індукцію всередині магнетика. Намагнічуюче поле можна створити будь-якою котушкою. Можна використати для цієї мети шкільну дросельну котушку.

Індукцію магнітного поля в цьому випадку слід вимірювати флюксметром. Флюксметр – це прилад, який вимірює кількість індукованої електрики при зміні магнітного потоку, але шкала його градуйована в одиницях магнітного потоку, найчастіше в мілівеберах.

Якщо кінці котушки приєднати до мілівеберметра і винести її з магнітного поля, то при цьому буде виміряний потік зчеплення  $\Psi_0$ , тобто повний магнітний потік. Магнітний потік буде рівний  $\Phi_0 = \frac{\Psi}{N}$ , а

індукція поля  $B_0 = \frac{\Phi_0}{S_K} = \frac{\Psi_0}{NS_R}$ . Якщо всередину котушки внести магнетик, то він певним чином намагнітиться.

При винесенні магнетика із котушки відбудеться зміна магнітного потоку, який буде виміряний мілівеберметром.

$\frac{\Psi}{N} = (B - B_0) \cdot S_M$ , де  $S_M$  – площа перерізу магнетика. Звідки

$B = \frac{\Psi}{N \cdot S_M} + B_0$ . Магнітна проникність  $\mu = \frac{B}{B_0}$ .

#### Прилади

1. Мілівеберметр (описано вище).
2. Джерело струму.

Може бути використане будь-яке джерело постійного струму з фільтром, що дає можливість забезпечити силу струму до 1 А. У цій роботі використано нами розроблений калібратор струму КС-1А.

Користуючись калібратором КС-1А, можна одержувати будь-який струм силою від 0 до 1000 мА. Змінювати силу струму можна плавно або



Рис. 3 Калібратор струму КС-1А.

ступінчато. Одержувана сила струму в певному інтервалі не залежить від опору зовнішнього кола. Калібратор не "боїться" короткого замикання і видає струм тієї сили, що був встановлений. Зовнішній вигляд показано на рис. 3.

На передню панель приладу винесено тумблер для вмикання його в мережу "42 В", тумблер "0-П" (нуль-пуск) для скидання показів приладу, тумблер перемикання реєструючого пристрою "П-Г" (прилад-гальванометр), клавішний перемикач діапазонів на сім положень, ручка потенціометра для встановлення сили струму. На ліву бічну стінку винесено вихідні клеми живлення та клеми змінної напруги для розмагнічування досліджуваних зразків.

Прилад має сім діапазонів по струму: 0...100 мА, 0...200 мА, 0...300 мА, 0...400 мА, 0...600 мА, 0...800 мА, 0...1000 мА, які вмикаються клавішним перемикачем на сім положень. Зверху над клавішами написані числа "100", "200", "300", "400", "600", "800", "1000". Ці числа визначають ціну шкали в міліамперах.

При натисканні клавіші "100" можна встановити певний струм від 0 до 100 мА; при натисканні клавіші "200" – від 0 до 200 мА і т. д. і при натисканні клавіші "1000" струм можна змінювати ручкою потенціометра від 0 до 1000 мА.

### 3. Намагнічуюча котушка.

Можна використати секцію на 1200 витків шкільної дросельної котушки. Зняти нікелеві пластини, вставлені всередину котушки, для збільшення її індуктивності (рис. 4).

### 4. Вимірювальна котушка.

Котушка має  $N = 3000$  витків, площу поперечного перерізу  $S_k = 4 \text{ см}^2$ . Довжина її має бути дещо меншою від довжини намагнічуючої котушки. У конструкції вимірювальної котушки для зручності передбачено ручку. Вимірювальну котушку показано на рис. 4 вставленою у намагнічуючу котушку.

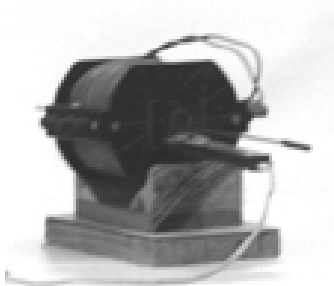


Рис. 4 Вимірювальна та намагнічуюча котушка.

## Виконання вимірювань

Перед початком вимірювань зразок розмагнічують. Намагнічуючу котушку приєднують до клем змінного струму випрямляча ВН-45М, встановлюють напругу 36 В. Зразок протягують через котушку. При цьому він розмагнічується. Складають електричне коло згідно з рис. 6. Кінці вимірювальної котушки L2 приєднують до мілівеберметра, а намагнічуючої L1 – до джерела постійного струму КС.

Зовнішній вигляд установки для дослідження показано на рис. 6.

Спочатку необхідно виміряти індукцію намагнічуючого поля за різних значень сили струму. Оскільки індукція магнітного поля всередині котушки лінійно залежить від сили струму, то виміри можна зробити лише для двох значень сили струму і побудувати графік залежності. Інші значення можна знайти з графіка або обчислити.

Вимірювальну котушку вносять всередину намагнічуючої. При винесенні її з намагнічуючої відбувається зміна магнітного потоку, що вимірюється мілівеберметром.

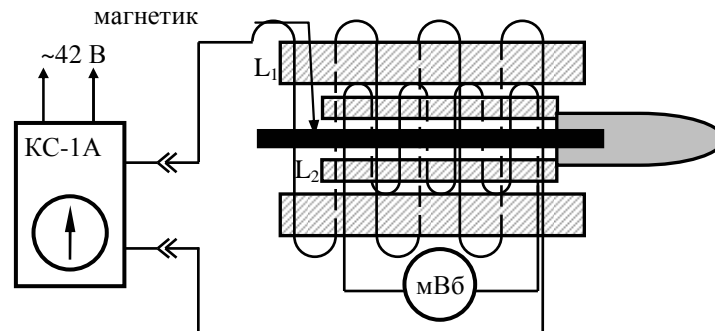


Рис. 5 Електрична схема установки для дослідження намагнічення феромагнетика методом винесення його з магнітного поля.

Щоб одержати експериментальні дані для побудови основної кривої намагнічення і петлі гістерезису, необхідно визначити магнітну індукцію всередині магнетика при зміні сили струму від 0 до 800 мА, від 800 мА до 0 і знову при зміні напрямку струму від 0 до -800 мА. Решту віток петлі гістерезису можна побудувати на основі їх симетричного розміщення. Магнітну проникність розраховують лише для значень індукції магнітного поля, що визначають основну криву намагнічення.

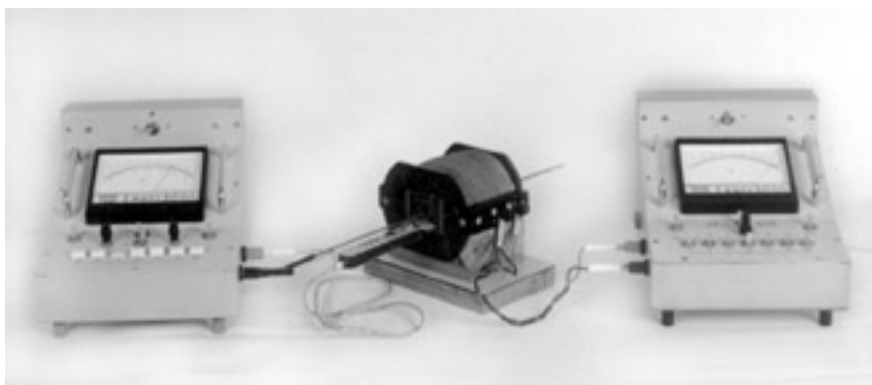


Рис. 6 Електрична схема установки для дослідження намагнічення ферромагнетика методом винесення його з магнітного поля.

Таблиця 1.

№ п/п	Магнітні характеристики	Сила струму у намагнічуючій котушці, А						
		0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,600	0,800
1.	Повний магнітний потік у вимірювальній котушці, мВб							
2.	Індукція намагнічуючого поля, мкТл							
3.	Повний магнітний потік магнетика при зміні струму від 0 до 800 мА, мВб							
4.	Індукція магнітного поля в магнетика при зміні струму від 0 до 800 мА, мкТл							
5.	Магнітна проникність, $\mu$							
6.	Повний магнітний потік магнетика при зміні струму від 800 до 0 мА, мВб							
7.	Індукція магнітного поля в магнетика при зміні струму від 800 до 0 мА, мкТл							
8.	Повний магнітний потік в магнетика при зміні струму 0 до -800 мА, мВб							
9.	Індукція магнітного поля при зміні струму від 0 до -800 мА, мкТл							

Індукцію магнітного поля всередині магнетика вимірюють в такому порядку. Встановлюють силу струму 25 мА. Вимірювальну котушку вносять всередину намагнічуючої. Досліджуваний зразок вносять всередину вимірювальної котушки до його половини. Перевіряють положення нуля мілівеберметра та в разі потреби коректують його. Тумблер "0-П" переводять в положення "П" (пуск), виймають досліджуваний зразок із котушки, знімають покази мілівеберметра. Встановлюють силу струму 50 мА, вводять досліджуваний зразок всередину вимірювальної котушки, тумблер "0-П" переводять в положення "П", виймають зразок із вимірювальної котушки, вимірюють повний магнітний потік. Такі вимірювання здійснюють для значень сили струму, що вказані у звітній таблиці до досягнення сили струму 800 мА. Потім вимірюють повний магнітний потік при зміні струму від 800 мА до 0. Після цього змінюють напрям струму в намагнічуючій котушці і знову вимірюють повний магнітний потік при зміні струму від 0 до -800 мА. Результати вимірювань і обчислень заносять до таблиці №1. Будують графік основної кривої намагнічення та петлю гістерезису на спільних осях координат ( $B_0$ ,  $B$ ). Графік залежності магнітної проникності від індукції намагнічуючого поля (крива Столетова) будують у координатах ( $B_0$ ,  $\mu$ ).

#### Контрольні питання

1. В чому полягає метод дослідження намагнічування ферромагнетика винесенням його з магнітного поля?
2. Залежність між якими величинами відображає крива Столетова?
3. В чому полягає явище гістерезису? Коли й ким було відкрите це явище?
4. Як визначити напруженість магнітного поля в середині довгого соленоїда?
5. Вивести робочу формулу для індукції магнітного поля в магнетика.

Виконання цієї лабораторної роботи розраховано на дві академічних години.



1. Цілінко М. Г. Саморобні електронні прилади в лабораторному практикумі з електрики і магнетизму: Навч. посіб. – К.: ІСДО, 1995. – 188с.
2. Цілінко М. Г., Прокопенко М. М. Електронний мікрокулон-мілівеберметр // Удосконалення навчання фізики у вищій школі. Матеріали ІІІ Всеукраїнської наукової конференції "Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики" – К., 1998 – Ч. 1 – С. 171-175.

Матеріал надійшов до редакції 27.01.2004 р.

***Целинко М.Г., Прокопенко Н.Н. Электронный милливеберметр.***

*В статье представлен внешний вид и принципиальная схема электронного милливеберметра, предлагаются методические разработки по использованию прибора в учебном физическом эксперименте.*

***Tsilinko M.G., Prokopenko M.M. Electronic Millivebermeter.***

*This article presents the picture and basic circuit of the electronic millivebermeter and suggests methods of applying the device for carrying out experiments in the course of physics.*