

В.П. Манойлов, д.т.н., проф.

П.П. Мартинчук, ст. викладач

О.Л. Коренівська, к.т.н.

Державний університет «Житомирська політехніка»

М.М. Прокопенко, ст. лаборант

Житомирський державний університет ім. Івана Франка

Мікрокулонометр – вимірювач електричних зарядів

Найбільш складною проблемою в лабораторній практиці навчального процесу для демонстрації електростатики та електромагнетизму є вимірювання електричних зарядів, що знаходяться на поверхні тіл та в повітряному просторі навколишнього середовища. Фундаментальна властивість електричних зарядів визначається їх видами, які умовно названі позитивним та негативним й між собою притягуються або відштовхуються, мають електромагнітну взаємодію. Характеризуються елементарним зарядом – найменшим значенням електричного заряду незалежно від виду. Електричний заряд може приймати тільки дискретне значення, пропорційне найменшому заряду, яке може бути виражене тільки цілим числом незалежно від виду заряду. Залежно від поверхні, на якій знаходяться, можуть мати різну концентрацію, що може бути описана лінійною, поверхневою чи об'ємною густиною. Електричні заряди підлягають закону збереження зарядів – сума зарядів в ізольованій системі є постійною. Вимірювання електричних зарядів має складності: прилади – гальванометри та електроскопи, які застосовуються для цього, – вимагають певних умов, що не завжди є зручним для застосування, не забезпечують необхідну точність вимірювання. Запропоновано методи та пристрої з використанням схемотехніки мікрокулонометра для вимірювання електричних зарядів в електростатиці та електромагнетизмі, який побудовано на сучасній елементній базі із застосуванням операційних підсилювачів та мікроконтролерів.

Ключові слова: навчальний процес; електричний заряд; мікрокулонометр; електростатика; електромагнітна взаємодія; закон збереження зарядів; операційний підсилювач; мікроконтролер.

Актуальність теми. Відомо, що фізичні й хімічні властивості речовини – від атома до живої клітини – значною мірою пояснюються електричними силами. Цими знаннями завдячуємо Амперу, Фарадею, Максвеллу та багатьом іншим ученим дев'ятнадцятого століття, які відкрили природу електромагнетизму, а також фізикам та хімікам двадцятого століття, які розгадали атомну будову речовини. Класична теорія електромагнетизму пов'язана з електричними зарядами, струмами та їх взаємодіями. Передбачається, що всі ці величини можна виміряти незалежно одна від одної, з необмеженою точністю. І ґрунтується ця теорія на рівняннях електромагнітного поля, написаних Максвеллом багато років тому. Звичайно, класична теорія була ґрунтовно підкріплена експериментом, тому її можна застосовувати без найменшого побоювання до таких об'єктів, як індуктивність, конденсатор, постійний та змінний струми, і, зрештою, до радіо- та світлових хвиль.

Фундаментальною властивістю електричного заряду є його існування у двох видах, які названі позитивними чи негативними зарядами. Причому всі заряди одного виду відштовхують один одного, притягуючи водночас заряди іншого виду. Причина існування цієї універсальної властивості в деталях не відома. Але сучасні фізики схильні розглядати позитивний та негативний заряди переважно як протилежні прояви однієї якості, оскільки поняття «праве» та «ліве» є протилежними проявами властивості симетрії. Ці питання вивчає фізика елементарних частин. Контроль та вимірювання електричних зарядів має важливе значення в освіті та науці, промисловості та багатьох інших галузях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. З поняттями електричних зарядів, електростатики вперше ознайомлюємося в школі, коли вивчаємо фізику у 8 класі [1–3]. На жаль, автори цих сучасних підручників досить мало уваги приділяють точним вимірюванням кількості електрики, величин електричних зарядів. Користуються застарілими засобами під час демонстрації дослідів та проведення лабораторних робіт, такими як гальванометри та електроскопи. Такий підхід до вивчення сучасної фізики є неприпустимим, адже фізика – це важливий фундамент для вивчення у вищій школі не тільки технічних наук, а й природничих.

Понад 30 років тому професор М.Г. Цілінко Житомирського державного педагогічного університету імені Івана Франка запровадив у навчальну практику викладання фізики в розділах електростатики та електромагнетизму мікрокулонометр на основі інтегратора та багато інших приладів, розроблених власноруч. Це дозволило підняти на більш високий рівень проведення фізичних експериментів під час лабораторних та практичних занять [4, 5].

Застосування мікрокулометра в практиці вимірювання електричних зарядів дозволяє поширити такий метод не тільки під час викладання фізики, а й у застосуванні в інших галузях, використовуючи сучасні технології, зокрема й мікроелектроніку [6].

Метою статті є розгляд потенційних можливостей різних схем на базі мікрокулометра, розробленого професором М.Г. Цілінком [5].

Викладення основного матеріалу. Сучасні посібники та підручники з фізики, незважаючи на бурхливе застосування мікроелектроніки у техніці та звичайному житті, майже не пропонують використання новітніх засобів електроніки для проведення лабораторних та практичних занять як в школі, так і в сфері вищої освіти. Це ж стосується й приладів, що застосовуються під час вивчення розділів електростатики та електромагнетизму, особливо пов'язаних з вимірюваннями електричних зарядів.

Вимірювання електричних зарядів обумовлюється їх особливостями.

Електричний заряд – це фізична величина, що характеризує здатність частинок або тіл вступати в електромагнітну взаємодію.

Електричний заряд, як правило, позначається буквами q або Q . В системі СІ електричний заряд вимірюється в кулонах (Кл). Вільний заряд в 1 Кл – це гігантська величина заряду, яка практично не зустрічається в природі. Як правило, доводиться мати справу з мікрокулонами (1 мкКл = 10^{-6} Кл), наноккулонами (1 нКл = 10^{-9} Кл), пікокулонами (1 пКл = 10^{-12} Кл).

Електричний заряд має такі властивості:

- 1) електричний заряд є видом матерії;
- 2) електричний заряд не залежить від руху частинки (тіла) і від її швидкості;
- 3) електричні заряди можуть передаватися під час безпосереднього контакту від однієї частинки до іншої. На відміну від маси частинки чи тіла електричний заряд не є постійною характеристикою цієї частинки чи тіла, вони в різних умовах можуть мати різні заряди;
- 4) існує два роди електричних зарядів, умовно названих позитивними і негативними;
- 5) всі заряди взаємодіють один з одним. При цьому однойменні заряди відштовхуються, різнойменні – притягуються. Сили взаємодії зарядів є центральними, тобто лежать на прямій, що з'єднує центри зарядів;
- 6) існує мінімально можливий (по модулю) електричний заряд, названий елементарним зарядом. Його значення:

$$e = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad (1)$$

- 7) електричний заряд будь-якого тіла завжди кратний елементарному заряду:

$$Q = Ne, \quad (2)$$

де N – ціле число. Неможливе існування дробного заряду, рівного $0,3 e$; $1,6 e$; $15,8 e$ тощо. Фізичні величини, які можуть приймати тільки дискретний ряд значень, називаються квантовими. Елементарний заряд e називається квантом (найменшою порцією) електричного заряду;

8) закон збереження електричного заряду. В ізольованій системі алгебраїчна сума зарядів всіх тіл залишається постійною:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}; \quad (3)$$

9) закон збереження електричного заряду стверджує, що в замкнутій системі тіл не можуть спостерігатися процеси виникнення чи зникнення зарядів тільки одного знаку. Закон збереження зарядів свідчить: якщо два тіла одного розміру і форми, що володіють зарядами q_1 і q_2 (не важливо якого знаку заряди), привести до зіткнення, а потім розвести, то заряд кожного з тіл буде рівний:

$$q' = \frac{q_1 + q_2}{2}. \quad (4)$$

Інколи в різних задачах електричний заряд розподілений по певному тілу. Для опису цього розподілення вводяться такі величини:

- 1) лінійна густина заряду. Використовується для опису розподілення заряду по лінії прямої:

$$\lambda = \frac{q}{L}, \quad (5)$$

де L – довжина прямої лінії. Вимірюється в Кл/м;

- 2) поверхнева густина заряду. Використовується для опису розподілення заряду по поверхні тіла:

$$\sigma = \frac{q}{S}, \quad (6)$$

де S – площа поверхні тіла. Вимірюється в Кл/м²;

- 3) об'ємна густина заряду. Використовується для опису розподілення заряду по об'єму тіла:

$$\rho = \frac{q}{V}, \quad (7)$$

де V – об'єм тіла. Вимірюється в Кл/м³.

Ще одна особливість вимірювань зарядів полягає в тому, що об'єкти досліджень, заряди яких вимірюють, є дуже малопотужними і з високим внутрішнім опором.

Балістичні гальванометри, що застосовувалися у лабораторній практиці для вимірювання електричних зарядів, являють собою високочутливий прилад магнітоелектричної системи зі збільшеним періодом коливання рамки за рахунок збільшення моменту інерції рухомої частини приладу без протидіючого моменту. Якщо час проходження імпульсу струму через рамку набагато менший від періоду коливання рамки, то кут відхилення рамки буде пропорційний кількості електрики, що пройде через рамку гальванометра. Гальванометри градуйовані в одиницях кількості електрики за розрядом конденсатора відомої ємності, зарядженого до відомої напруги так, що:

$$Q = CU. \quad (8)$$

Високочутливі гальванометри є стаціонарними приладами, тому мають обмежене використання, оскільки вимагають особливих умов застосування. Найбільш широке використання в навчальній практиці набули електроскопи, але вони є досить неточними внаслідок конструктивних особливостей.

Поява сучасних інтегральних мікросхем, зокрема операційних підсилювачів, дозволила розробляти прилади, в тому числі й переносні, для вимірювання кількості електрики (рис. 1), названі професором М.Г. Цілінко – нано(мікро)кулонометри [4, 5].



Рис. 1. Мікрокулонометр проф. М.Г. Цілінка

Основу приладу для вимірювання кількості електрики становить інтегратор на операційному підсилювачі типу К140УД8А, вхідні кола якого будувалися з використанням польових транзисторів, що мали високий вхідний опір. Вихідна величина відображалася на аналоговому вимірювальному приладі чутливістю 50–100 мкА (рис. 2).

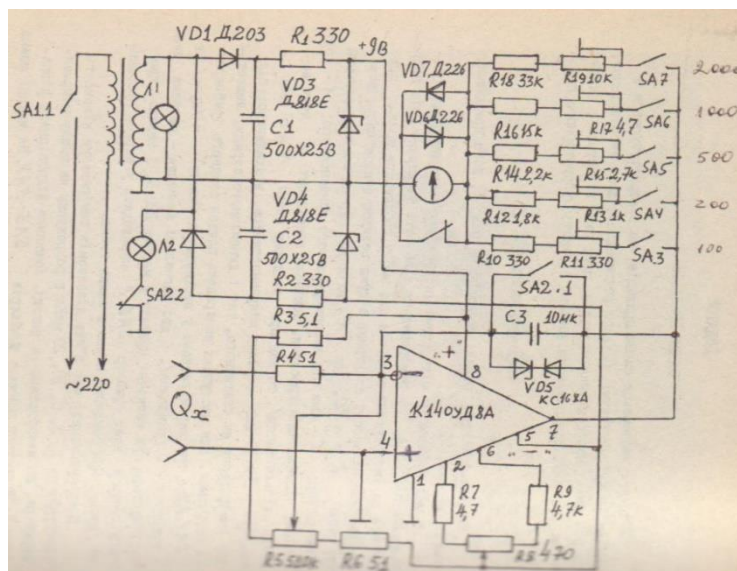


Рис. 2. Схема мікрокулонометра проф. М.Г. Цілінка

Під час вимірювання кількості електрики заряди подавалися на інвертуючий вхід операційного підсилювача. Це дало змогу побудувати прилад з дуже високою сталою часу τ , яка дорівнювала:

$$\tau = kRC, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача; R – вхідний опір інвертуючого входу, на схемі $R4 = 51 \text{ Ом}$; C – накопичувальний конденсатор, на схемі $C3 = 10 \text{ мкФ}$.

Оскільки коефіцієнт підсилення операційного підсилювача становить більше десяти тисяч, то стала часу τ може складати кілька десятків секунд, що дозволяє виконувати вимірювання як статичних, так і динамічних зарядів. При цьому стрілка аналогового приладу лишається нерухомою, що дозволяє легко виконати відлік, кут відхилення стрілки приладу пропорційний величині вхідного заряду:

$$U_{\text{вих}} = \frac{q}{C}. \quad (10)$$

Прилади, розроблені професором М.Г. Цілінко, виготовлялися на одному з підприємств м. Житомира, використовуються в навчальному процесі кафедрами фізики Житомирського державного університету імені Івана Франка та Державного університету «Житомирська політехніка» (рис. 3).



Рис. 3. Сучасний мікрокулонометр

Кафедрою біомедичної інженерії та телекомунікацій (БІтаТ) мікрокулонометри професора М.Г. Цілінка були удосконалені та застосовувалися для вимірювання електричних зарядів повітряного простору в навколишньому середовищі та інших галузях (рис. 4, 5). Низку схем приладів розроблено з застосуванням сучасної мікроелектроніки, в тому числі і мікропроцесорів, виконано бакалаврські та магістерські роботи. Запропоновано давачі для вимірювання концентрації електричних зарядів (аероіонів) в повітряному просторі. Окрім безпосереднього вимірювання електричних зарядів, розроблено прилад із застосуванням флексометричного методу з оригінальним давачем. На прилади було отримано патенти України [7–9], є публікації у фахових виданнях України [6, 10–12].



Рис. 4. Розробки кафедри БІтаТ

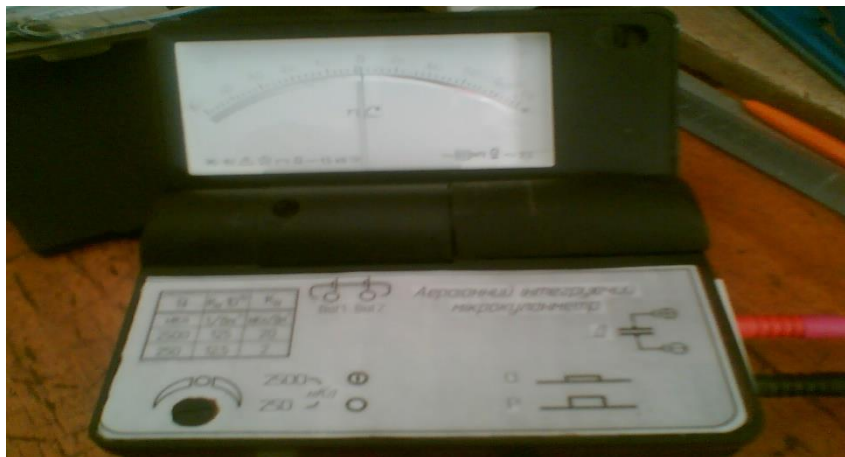


Рис. 5. Аероіонний мікрокулонометр

Висновки та перспективи подальших досліджень. Застосування запропонованих приладів, а також вибір того чи іншого методу вимірювання та схемотехніки на елементах сучасної мікроелектроніки надають нові можливості як у проведенні навчального процесу на високому рівні, так і в проведенні наукових досліджень у різних галузях науки і техніки.

Список використаної літератури:

1. Фізика : підручник для 8 класу / В.Г. Бар'яхтар, Ф.Я. Божинова, С.О. Довгий, О.О. Кірюхіна. – Харків : Ранок, 2016. – 240 с.
2. Пістун П.Ф. Фізика : підручник для 8 класу / П.Ф. Пістун, В.В. Добровольський, П.І. Чопик. – Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2016. – 208 с.
3. Засєкіна Т.М. Фізика : підручник для 8-го класу (поглиблене вивчення фізики) / Т.М. Засєкіна, Д.О. Засєкін. – Київ : УОВЦ «Оріон», 2016. – 304 с.
4. Цілінко М.Г. Саморобні електронні прилади в навчальному експерименті : посібник для вчителя / М.Г. Цілінко. – К. : Рад. шк., 1990. – 141 с.
5. Цілінко М.Г. Саморобні електронні прилади в лабораторному практикумі з електрики та магнетизму : навчальний посібник / М.Г. Цілінко. – Київ : ІСЛО, 1995. – 186 с.
6. Коренівська О.Л. Актуальні питання контролю аероіонізації / О.Л. Коренівська, П.П. Мартинчук // Метрологія та прилади. – 2011. – № 4. – С. 34–36.
7. Патент України. Аероіонний мікрокулонометр / В.П. Манойлов, П.П. Мартинчук, О.Л. Коренівська. – № 94169 ; від 11.04.2011, Бюл. № 7/2011.
8. Патент України. Аероіонний програмний мікрокулонометр / В.Б. Бенедицький, П.П. Мартинчук, О.Л. Коренівська, Т.М. Нікітчук. – № 117708 ; від 10.09.2018, Бюл. № 17/2018.
9. Патент України. Вимірювач електричного заряду / В.Б. Бенедицький, П.П. Мартинчук, Т.В. Митрофанова, Т.М. Нікітчук. – № 118047 ; від 12.11.2018, Бюл. № 21/2018.
10. Коренівська О.Л. Прилад вимірювання концентрації легких аероіонів / О.Л. Коренівська // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2014. – № 1 (68). – С. 51–58.
11. Коренівська О.Л. Нові можливості практичного застосування аероіонного мікрокулонометра / О.Л. Коренівська, П.П. Мартинчук // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування 2011: стан і перспективи». – Київ : ПБФ НТУУ «КПІ», 2011. – 173 с.
12. Коренівська О.Л. Аналіз похибок приладу вимірювання концентрації легких аероіонів / О.Л. Коренівська // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2015. – № 3. – С. 25–32.

References:

1. Bar'jahhtar, V.G., Bozhynova, F.Ja., Dovguy, S.O. and Kirjuhina, O.O. (2016), *Fizyka*, pidruchnyk dlja 8 klasu, Ranok, Narkiv, 240 p.
2. Pistun, P.F., Dobrovol's'kyj, V.V. and Chopyk, P.I. (2016), *Fizyka*, pidruchnyk dlja 8 klasu, Navchal'na knyga – Bogdan, Ternopil', 208 p.
3. Zaszekina, T.M. and Zaszekin, D.O. (2016), *Fizyka*, pidruchnyk dlja 8 klasu (poglyblene vuvchennja fizyky), UOVC «Orion», Kyi'v, 304 p.
4. Cilynko, M.G. (1990), *Samorobni elektronni prylady v navchal'nomu eksperymenti*, posibnyk dlja vchytelja, Rad. shk., K., 141 p.
5. Cilynko, M.G. (1995), *Samorobni elektronni prylady v laboratornomu praktykumi z elektryky ta magnetyzmu*, navchal'nyj posibnyk, ISLO, Kyi'v, 186 p.
6. Korenivs'ka, O.L. and Martynchuk, P.P. (2011), «Aktual'ni pytannja kontrolju aeroionizacii», *Metrologija ta prylady*, No. 4, pp. 34–36.

7. Manojlov, V.P., Martynchuk, P.P. and Korenivs'ka, O.L. (2011), *Aeroionnyj mikrokulonometr*, Patent Ukraïny No. 94169, vid 11.04.2011, Bjul. No. 7/2011.
8. Benedyc'kyj, V.B., Martynchuk, P.P., Korenivs'ka, O.L. and Nikitchuk, T.M. (2018), *Aeroionnyj programnyj mikrokulonometr*, Patent Ukraïny No. 117708, vid 10.09.2018, Bjul. No. 17/2018.
9. Benedyc'kyj, V.B., Martynchuk, P.P., Mytrofanova, T.V. and Nikitchuk, T.M. (2018), *Vymirjuvach elektrychnogo zarjadu*, Patent Ukraïny No. 118047, vid 12.11.2018, Bjul. No. 21/2018.
10. Korenivs'ka, O.L. (2014), «Prylad vymirjuvannja koncentracii' legkyh aeroioniv», *Visnyk Zhytomyrs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 1(68), pp. 51–58.
11. Korenivs'ka, O.L. and Martynchuk, P.P. (2011), «Novi mozhlyvosti praktychnogo zastosuvannja aeroionnogo mikrokulonometra», *Zbirnyk tez dopovidej X Mizhnarodnoi' naukovo-tehnichnoi' konferencii' «Pryladobuduvannja 2011: stan i perspektyvy»*, PBF NTUU «KPI», Kyïv, 173 p.
12. Korenivs'ka, O.L. (2015), «Analiz pohybok prykladu vymirjuvannja koncentracii' legkyh aeroioniv», *Visnyk Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 3, pp. 25–32.

Манойлов В'ячеслав Пилипович – доктор технічних наук, професор кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка сигналів в радіотехнічних системах;
- біомедичні прилади та пристрої.

<http://orcid.org/0000-0001-6961-6995>.

E-mail: krt_mvp@ukr.net.

Мартинчук Петро Петрович – старший викладач кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка сигналів в радіотехнічних системах;
- електро- та радіовимірювальні прилади.

<http://orcid.org/0000-0002-3220-6033>.

E-mail: m_petro@ukr.net.

Коренівська Оксана Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- побудова медичної апаратури;
- апаратура підтримки життєдіяльності;
- дослідження роботи серця.

<http://orcid.org/0000-0002-3735-7690>.

E-mail: o.l.korenivska@gmail.com.

Прокопенко Микола Миколайович – старший лаборант кафедри фізики та охорони праці Житомирського державного університету імені Івана Франка.

Наукові інтереси:

- теорія та методика викладання фізики.

<http://orcid.org/0000-0002-7464-5093>.

E-mail: prokopenkonik@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 09.07.2020.