

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Фізико-математичний факультет
Кафедра методики викладання фізики та дисциплін технологічної
освітньої галузі

Дипломна робота (проект)
магістра

з теми: **«ВИКОРИСТАННЯ ГАЛЬВАНОСТАТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ»**

Виконав:

студент 2 курсу Fb1-M17 групи
спеціальності 014 Середня освіта
(Фізика)

Дячук Віталій Вікторович

Керівник:

кандидат фізико-математичних наук,
доцент, доцент кафедри

Оптасюк С. В.

Рецензент

доктор педагогічних наук, професор,
завідувач кафедри МВФ та ДТОГ

Атаманчук П. С.

Кам'янець-Подільський – 2018 р.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ КОНДЕНСАТОРИ. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ ТА ЇХ ФОРМУВАННЯ	7
1.1. Принципи накопичення електричної енергії.....	7
1.2. Особливості матеріалів, що використовуються при формуванні електрохімічних конденсаторів	9
1.2.1. Матеріал електрода	9
1.2.2. Електролітична система електрохімічних конденсаторів	17
1.3. Вимоги до матеріалів і конструкцій, що застосовуються при формуванні електрохімічних конденсаторів.....	20
1.4. Фізико-хімічні параметри електролітичних конденсаторів	24
Висновки до I розділу.....	28
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ	29
2.1. Дослідження властивостей та параметрів електрохімічних конденсаторів потенціодинамічним методом	29
2.2. Дослідження особливостей електрохімічних конденсаторів методом імпедансної спектроскопії.....	31
2.3. Гальваностатичний метод дослідження електрохімічних конденсаторів .	34
2.4. Особливості вимірювання ємності і опору електрохімічних конденсаторів.....	37
Висновки до II розділу	41
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЗАРЯДНО-РОЗРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЙОГО НАЛАШТУВАННЯ.	42
3.1. Структура мікроконтролера Atmega16	42
3.1.1. Призначення портів мікроконтролера Atmega16	44
3.1.2. Аналого-цифровий перетворювач у складі мікроконтролера.	46
3.1.3. Цифро-аналоговий перетворювач у схемі пристрою.	49

3.2. Аналіз схеми управління на основі мікроконтролера ATmega 16.....	53
3.3. Програма управління мікроконтролером	56
3.4. Налаштування та проведення тестування програми.....	61
Висновки до III розділу	64
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРАЗКІВ ГАЛЬВАНОСТАТИСТИЧНИМ МЕТОДОМ. ОТРИМАННЯ ЗАРЯДНО-РОЗРЯДНИХ КРИВИХ.	65
4.1. Методика експерименту та експериментальні дослідження	65
4.2. Отримані результати та їх обговорення	66
4.3. Гальваностатичні зарядно-розрядні криві досліджувальних зразків.....	68
4.4. Ємнісні та енергетичні показники для електродів різної морфології....	70
Висновки до IV розділу	74
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76

Перелік умовних позначень

АЛП – Арифметико-логічний пристрій

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач

АВТ – активована вуглецева тканина

ВНТ – вуглецева нанотрубка

ЕК – електрохімічний конденсатор

МЗР – Молодший значущий розряд

МК – Мікроконтролер

ОЗП – Оперативний запам'ятовуючий пристрій

ПЗП – Постійний запам'ятовуючий пристрій

СЗР – Старший значущий розряд

ЦАП – Цифро-аналоговий перетворювач

RISC – Restricted instruction set computer

НВМ – нанопористий вуглецевий матеріал

ПЕШ – подвійний електричний шар

СВ – склоподібний вуглець

ПсК – псевдо конденсатор

ВСТУП

Актуальність теми полягає у тому, що прогрес в приладобудуванні, дав більш детальне теоретичне обґрунтування гальваностатичному методу та значно розширив його можливості. Методи гальваностатичного розряду і заряду в даний час з успіхом використовуються для вивчення механізму і кінетики електрохімічних процесів, дослідження будови подвійного електричного шару та його впливу на швидкість електрохімічних перетворень, що виникають під дією зовнішнього електричного струму на межі електрод-електроліт. Ці методи дозволяють отримати дані про величину ємності подвійного електричного шару на твердих електродах, а також про природу кінетики адсорбційних процесів.

Вперше метод гальваностатичного дослідження був застосований ще наприкінці минулого століття, але широкого поширення не отримав.

Інтерес до електрохімічних конденсаторів постійно зростає в усьому світі у зв'язку з їх високою питомою потужністю та швидкістю заряду-розряду в порівнянні з акумуляторами. Дані властивості обумовлюють широке використання електрохімічних конденсаторів у різних електронних пристроях, особливо в різноманітних гібридних системах (у комбінації з акумулятором, сонячною батареєю, паливним елементом, дизель-генератором та ін.). Одним із яскравих прикладів використання таких гібридних систем є комбіновані джерела струму для екологічно чистих електромобілів.

Батареї і низьковольтні елементи живлення – це типові прилади низької потужності, хоча навіть звичайні конденсатори можуть мати питому потужність $>10^6$ Вт/дм³ при низькій густині енергії. ЕК, працюючи разом з батареями, можуть покращувати їх експлуатаційні характеристики в одиницях питомої потужності, а конденсаторні експлуатаційні показники в одиницях густини енергії. ЕК, як і очікувалось, можуть витримати багато циклів заряд/розряд, що свідчить про їх довговічність, внаслідок того, що хімічні реакції обміну зарядами незначні або і взагалі відсутні

Отже, дослідження гальваностатичним методом електрохімічних конденсаторів є актуальною темою.

Об'єктом дослідження є гальваностатичний метод дослідження конденсаторів.

Предмет дослідження – особливості дослідження електрохімічних конденсаторів та фізичні процеси які протікають в них.

Метою роботи є проведення експериментальних досліджень електрохімічних конденсаторів гальваностатичним методом на базі розробленого зарядно-розрядного пристрою.

Реалізація поставленої мети передбачає вирішення таких **завдань**:

- ознайомлення з процесами, які протікають в електрохімічних конденсаторах;
- аналіз існуючих методів дослідження конденсаторів;
- виготовлення зарядно-розрядного пристрою на основі поставленої мети;
- розробка методики проведення експериментальних досліджень;
- проведення експериментальних досліджень та їх аналіз.

Апробація роботи. Роботу було заслухано і обговорено на засіданні кафедри фізики та дисциплін технологічної освітньої галузі (грудень 2017). Робота також була представлена на студентській конференції (жовтень 2018).

Структура роботи робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, який нараховує 48 позицій та займає 5 сторінок. Загальний обсяг роботи - 78 сторінок.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено фізико-хімічні параметри та процеси, які протікають в електролітичних конденсаторах. Описано основні вимоги до матеріалів і конструкцій, що застосовуються при формуванні електрохімічних конденсаторів.

2. Проведено аналіз існуючих методів дослідження електрохімічних конденсаторів, аналіз показав, що гальваностатичний метод експериментальних досліджень є – універсальним методом.

3. Розроблено зарядно-розрядний пристрій для проведення досліджень електрохімічних конденсаторів гальваностатистичним методом. Розроблено програму управління мікроконтролером та проведено налаштування та тестування програми.

4. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень та виготовлено зразки електродів, фракціонування отриманого матеріалу здійснювали відсівом на каліброваних ситах. Проведено експериментальні дослідження зразків та проведено аналіз отриманих результатів. На основі проведеного аналізу отримано ємнісні та енергетичні показники для електродів різної морфології.

5. Отримані незалежними методами (електрохімічна імпедансна спектроскопія та гальваностатичний заряд-розряд) дані показують, що оптимальна морфологія для електродів конденсаторів повинна включати немонодисперсні частинки, тобто електроди повинні формуватися з частинок різних розмірів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Conway B.E. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. – N.Y.: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 1999. – 698 p.
2. Беляков А.И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы их развития // *Электрохимическая энергетика*. – 2006. – Т. 6, №3. – С. 146-149.
3. Kötz R., Carlen M. Principles and application of electrochemical capacitors // *Electrochimica Acta*. – 2000. – Vol. 45, № 15-16. – P. 2483-2498.
4. Фрумкин А.Н. Кинетика электродных процессов / Фрумкин А.Н. Багоцкий В.С., Иофа З.А., Кабанов Б.Н. – М.: Издательство МГУ, 1952.
5. Физический энциклопедический словарь [гл. ред. Введенский Б.А.]. – М.: Советская Энциклопедия. – 1960. – 517, [1] с.
6. Фрумкин А.Н. Двойной слой и электродная кинетика / Фрумкин А.Н. – М.: Наука, 1981. – 376 с.
7. Байрамов В.М. Основы электрохимии: учебное пособие / Байрамов В.М. – К.: Академия. – 2005. – с. 240.
8. Habib M.A. Solvent dipoles at the electrode-solution interface / Habib M.A. // *Modern Aspects of Electrochemistry*. N.Y.: Plenum Press. – 1977. – Vol. 12. – P. 131-182.
9. Дамаскин Б.Б. Введение в электрохимическую кинетику / Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. – М.: Высшая школа, 1983.
10. Vorotyntsev M. Modern state of double layer study of solid metals / Vorotyntsev M. // *Modern Aspects of Electrochemistry*. N.Y.: Plenum Press. – 1986.– Vol. 17. – P. 131-222.
11. Endo M. High Power Electric Double Layer Capacitor (EDLC's); from Operating Principle to Pore Size Control in Advanced Carbons / Endo M., Takeda T., Kim Y.J., Koshiba K. and Ishii K. // *Carbon science*. – 2001. – Vol. 1, № 3-4. – P. 117-128.

12. Namisnyk A.M. A Survey of Electrochemical Supercapacitor technology / A 12 Credit Point Project submitted in partial fulfillment of the requirement for the Degree of Bachelor of Engineering. – 2003. – 109 p.
13. Bockris J.O. On the structure of charged interfaces / Bockris J.O., Devanathan M.A.V., Muller K. // Proc. R. Soc. London Ser. A. – 1983. – Vol. 274, No.1356. – P. 55-79.
14. Введение в молекулярную электронику / под. ред. Н. С. Лидоренко, – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 320 с.
15. Далахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов / Далахей П.; пер. с англ. – М.: Мир. – 1967. – 351 с.
16. Kotz R. Principles and applications of electrochemical capacitors / Kotz R., Carlen M. // Electrochimica Acta. – 1999. – vol. 45. – № 15-16. – pp. 2483 – 2498.
17. Zheng J.P. The Limitations of Energy Density for Electrochemical Capacitors / Zheng J.P., Huang J., Jow T.R. // Journal of The Electrochemical Society. – 1997. – Vol. 144, № 6. – P. 2026-2031.
18. Гуревич Ю. Я. Твердые электролиты / Гуревич Ю.Я. – М.: Наука, 1986. – 174 с.
19. Conway B. E. Some basic electrochemical principles involved in supercapacitor operation and development / Conway B. E. // Proc. 4-th international seminar on double layer capacitor and similar energy storage devices. – Deerfield Beach (USA). – 1994. – 26 p.
20. Гуревич И. Г. Жидкостные пористые электроды / Гуревич И. Г., Вольфович Ю. М., Багоцкий В. С. – Минск: Наука и техника, 1974. – 244 с.
21. Вольфович Ю. М. Электрохимические конденсаторы / Вольфович Ю. М., Сердюк Т. М. // Электрохимия. – 2002. – т. 38. – № 9. – С. 1043 – 1068.
22. Vol'fkovich Yu.M. Operation of Double-Layer Capacitors Based on Carbon Materials / Vol'fkovich Yu.M., Mazin V.M., Urisson N.A. // Russian Journal

- of Electrochemistry. – 1998. – Vol. 34, № 8. – P. 740-746.
23. Little A. D. Overview of electrochemical capacitors: comparison with batteries / Little A. D. // Proc. 4-th international seminar on double layer capacitor and similar energy storage devices. – Deerfield Beach (USA). – 1994. – 32 p.
 24. Gericher H. An interpretation of the double layer capacity of graphite electrodes in relation to the density of states at the Fermi level / Gericher H. // Journal of Phys. Chem. – 1985. – vol. 89. – № 20. – pp. 4249 – 4251.
 25. Endo M., Takeda T., Kim Y.J., Koshiba K. and Ishii K. High Power Electric Double Layer Capacitor (EDLC's); from Operating Principle to Pore Size Control in Advanced Carbons // Carbon science. – 2001. – Vol. 1, № 3-4. – P. 117-128.
 26. Григорчак І.І. Молекулярні накопичувачі енергії: основні засади та новітні напрямки технологій // Вісник Прикарпатського університету. Математика. Фізика. – 2000. – Вип. 1. – С. 170-197
 27. Zheng J.P., Huang J., Jow T.R. The Limitations of Energy Density for Electrochemical Capacitors // Journal of The Electrochemical Society. – 1997. – Vol. 144, № 6. – P. 2026-2031.
 28. Нисино А., Есида А., Танахаси И., Тадзима И., Ямасита М., Муракака Г., Енэда Х. Плоские конденсаторы с двойным электрическим слоем с поляризуемыми электродами из активированного углеродного волокна: Пер. с японск. // National Technical Report. – 1983. – Vol. 31, № 3. – P.318-330.
 29. Farahmandi C.J., Blank E. Bipolar Electrochemical Capacitors Based on Organic. Electrolytes for EV Applications // Proceedings of The 4 th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. Deerfield Beach. Florida (USA). – 1994. – Vol. 4.
 30. Dietz S., Nguyen V. Monolithic Carbon for Double Layer Capacitors // Proceedings of The 10 th International Seminar on Double Layer Capacitors

- and Similar Energy Storage Devices. Deerfield Beach. Florida (USA). – 2000. – Vol. 10. – P. 85-92.
31. Salitra G., Soffer A., Eliad L., Cohen Y., Aurbach D. Carbon Electrodes for Double-Layer Capacitors I. Relations Between Ion and Pore Dimensions // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2000. – Vol. 147, N. 7. – P. 2486-2493.
 32. Hang Shi Activated carbons and double layer capacitance // *Electrochimica Acta*. – 1996. – Vol .41, № 10. – P. 1633-1639.
 33. Volkovich Yu.M., Bogotsky V.S. The method of standard porosimetry: 1. Principles and possibilities // *Journal of Power Sources*. – 1994. – Vol. 48, № 3. – P. 327-338.
 34. Regisser F., Lavoie M.A., Champagne G.Y., Bélanger D. Randomly oriented graphite electrode. Part 1. Effect of electrochemical pretreatment on the electrochemical behavior and chemical composition of the electrode // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 1996. – Vol 415, № 1-2. – P. 47-54.
 35. Momma A., Liu X., Osaka T., Ushio Y., Sawada Y. Electrochemical modification of active carbon fiber electrode and its application to double-layer capacitor // *Journal of Power Sources*. – 1996. – Vol. 60, № 2. – P. 249-253.
 36. Nakamura M., Nakanishi M., Yamamoto K. Influence of physical properties of activated carbons on characteristics of electric double-layer capacitors // *Journal of Power Sources*. – 1996. – Vol. 60, № 2. – P. 225-231.
 37. Yoshida A., Tanahashi I., Nishino A. Effect of concentration of surface acidic functional groups on electric double-layer properties of activated carbon fibers // *Carbon*. – 1990. – Vol. 28, № 5. – P. 611-615.
 38. Час виконання команд для каналів з диференціальним входом [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://lektsiopedia.org/lek3-93554.html>

39. Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров: Посібник / Ю.А. Шпак. – Москва: МК Пресс, 2011. – 396 с.
40. Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/Avr/>
41. R/2R ЦАП. Практическое применение [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://avrdevices.ru/r-2r-cap-praktiticheskoe-primenenie/>
42. Special microcontroller ports Atmega16 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.futurlec.com/Atmel/ATMEGA16.shtml>
43. Костинюк Л. Д. Мікропроцесорні засоби та системи : Навчальний посібник / Л.Д. Костинюк., Я.С. Паранчук, І.З. Щур. – Львів: Видавництво НУ ”ЛП”, 2002. – 200 с.
44. Грищук Ю.С. Мікропроцесорні пристрої: Навчальний посібник. – Харків: НТУ“ХП”, 2007. – 280 с.
45. System | Interrupt Vectors in ATmega16 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://datasheet4u.com/datasheet-pdf/ATMEL/ATmega16PU/pdf.php>
46. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. / Баранов В.Н. – М.: “Додэка-XXI”, 2004. – 288 с.
47. Калабеков Б. А. Микропроцессоры и их применение в системах передачи и обработки сигналов: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Калабеков. – Москва: Радио и связь, 1988. – 368 с.
48. Програмування мікроконтролерів систем автоматики: конспект лекцій для студентів базового напрямку 050201 “Системна інженерія” / Укл.: А.Г. Павельчак, В.В. Самотий, Ю.В. Яцук – Львів: Львівська політехніка, – 2012. – 143 с.