

Моделювання та Тестування Суперконденсаторів для Гібридного Транспорту

Олег Шинкарук, Валерій Мартинюк

Реферат – В цій статті подано математичну модель та результати тестування суперконденсаторів. Представлено розроблену 8-канальну вимірювальну систему для тестування суперконденсаторів великим постійним струмом $\pm 100\text{А}$.

Ключові слова – Суперконденсатор, Вимірювальна система, Гібридний транспорт, Постійний струм.

I. ВСТУП

Суперконденсатори – це енергонакопичувальні пристрої, які закривають прогалину між алюмінієвими електролітичними конденсаторами та батареями за показниками густини потужності та енергії [1-9].

Хоча алюмінієві електролітичні конденсатори здатні створювати надвеликі струми, але вони підтримують ці струми протягом декількох мілісекунд. Батареї, з іншого боку, здатні створювати великі струми протягом тривалих періодів часу так довго, як можуть забезпечити їх вага та маса.

Однак, батареї є чутливими до жорстких умов експлуатації таких як великих пульсацій напруги, зміни полярності, глибокого розряду. Заповнити прогалину між алюмінієвими електролітичними конденсаторами та батареями здатні суперконденсатори. Ці інноваційні накопичувальні пристрої характеризуються надвеликою ємністю понад декількох тисяч Фарад.

Суперконденсатор складається з двох електродів, які занурені в електроліт, як показано на Рис.1. Коли електроди заряджені електричними зарядами, іони електроліту рухаються під впливом електричного поля в напрямку електродів із протилежними зарядами. В зарядженому стані заряджені частинки аніонів та катіонів розміщуються поруч із електродом, де вони збалансують надлишковий заряд в активованому вуглецю [1-9].

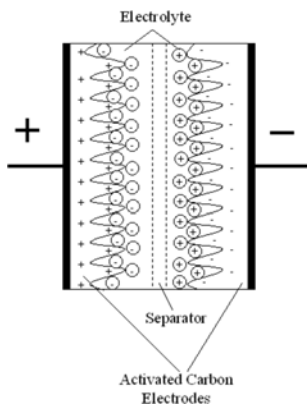


Рис.1 Структура суперконденсатора

Суперконденсатори можуть використовуватись у гібридному транспорті, де потрібно створювати короткі

Олег Шинкарук, Валерій Мартинюк – Хмельницький національний університет, вул. Інститутська 11, Хмельницький, 29016, Україна,
E-mail:valer@mailhub.tup.km.ua

великі імпульси струму. При такому застосуванні вони працюють разом із батареями, сонячними та паливними елементами. Прикладом є суперконденсатори типу APowerCap (компанії APowerCap Technologies www.apowercap.com) із номінальною ємністю 550Ф та номінальною напругою 2,7В.

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Математична модель суперконденсатора базується на еквівалентній схемі заміщення активованого вугільного електрода, як показано на Рис.2 [10].

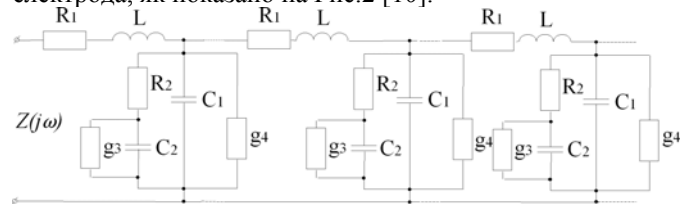


Рис.2 Еквівалентна схема заміщення активованого вугільного електрода

В цій еквівалентній схемі заміщення R_1 – питомий активний опір електрода, L – питома індуктивність електрода, R_2 - питомий активний опір електроліту, C_1 – питома ємність пор великого діаметра (швидка ємність), C_2 - питома ємність пор малого діаметра (повільна ємність), g_3 - питома активна провідність саморозряду пор малого діаметра (повільна провідність) та g_4 - питома активна провідність саморозряду пор великого діаметра (швидка провідність) [11].

Вхідний комплексний опір активованого вугільного електрода можна записати у вигляді рівняння Рів.1.

$$Z_{input}(j\omega) = \frac{R_1 + j\omega L}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_2 + \frac{1}{g_3 + j\omega C_2}} + g_4 + j\omega C_1 \right)}} \times \text{cth} \left[(R_1 + j\omega L) \cdot \left(\frac{1}{R_2 + \frac{1}{g_3 + j\omega C_2}} + g_4 + j\omega C_1 \right) x' \right] \quad (1)$$

Після математичних перетворень ми можемо отримати вираз вхідного комплексного опору активованого вугільного електрода у вигляді рівняння Рів.2.

$$Z_{input}(p) = \frac{p^2 \tau_2 L + p(\tau_3 R_2 + \tau_2 R_1 + L) + R_1(R_2 g_3 + 1)}{\sqrt{p^2 \tau_2 C_1 + p(\tau_5 g_3 + \tau_2 g_4 + C) + R_2 g_3 g_4 + g}} \times \text{cth} \left[(p \tau_2 + R_2 g_3 + 1) \frac{1}{2} \times \left(p^3 \frac{\tau_2}{\omega_1^2} + p^2 \left[\frac{1 + R_2 g_3}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} + \tau_2 \tau_4 + \tau_1 \tau_2 \right] + p[\tau_1(R_2 g_3 + 1) + (\tau_2 R_1 + \tau_3 R_2)g_4 + \tau_4 + \tau_6] + R_1[R_2 g_3 g_4 + g] \right)^{\frac{1}{2}} x' \right] \quad (2)$$

де $p = j\omega$ - комплексна частота;

$$\tau_1 = R_1 C_1, \quad \tau_2 = R_2 C_2, \quad \tau_3 = L g_3, \quad \tau_4 = L g_4, \quad \tau_5 = R_2 C_1,$$

$$\tau_6 = R_1 C_2 - \text{питомі постійні часу;}$$

$C_\Sigma = C_1 + C_2$ та $g_\Sigma = g_3 + g_4$ - питома загальна ємність та провідність;

$$\omega_1^2 = \frac{1}{LC_1} \quad \omega_2^2 = \frac{1}{LC_2} - \text{квадрати кутових частот.}$$

III. ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА

В цій роботі ми пропонуємо нашу 8-канальну вимірювальну систему для тестування суперконденсаторів великим постійним струмом $\pm 100\text{A}$. Ця вимірювальна система була розроблена на кафедрі радіотехніки Хмельницького національного університету для компанії APowerCap Technologies в 2007 році.

Головним принципом 8-канальної вимірювальної системи є поєднання різноманітних режимів вимірювання із високою точністю та автоматичним керуванням за допомогою персонального комп'ютера [12].

8-канальна вимірювальна система базується на алгоритмі керування, який представлено у вигляді програми низького рівня для цифрового сигнального процесора (ЦСП). ЦСП виконує ряд функцій, таких як збір і обробка даних разом та передача цих даних від незалежних каналів до персонального комп'ютера інтерфейс зв'язку.

Персональний комп'ютер виконує функції відображення даних та передачі команд від оператора до ЦСП. Блок схема 8-канальної вимірювальної системи показано на Рис.3.

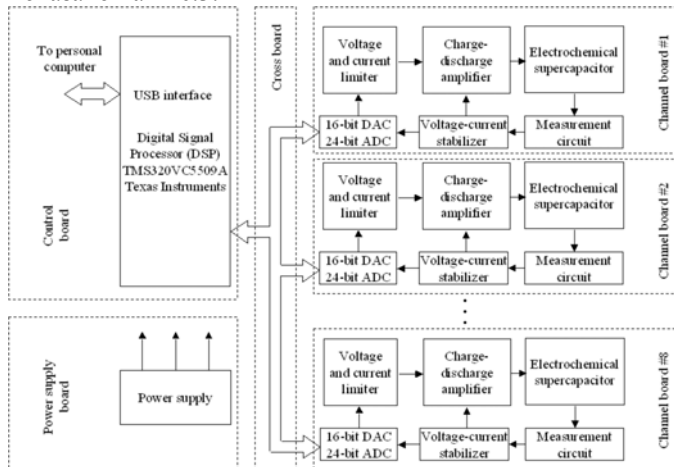


Рис.3 8-канальна вимірювальна система

8-канальна вимірювальна система складається із 8 незалежних вимірювальних каналів, які спроектовані як 8 каналних плат та плати керування. Плата керування складається із ЦСП TMS320VC5509A (Texas Instruments) із вбудованим на кристалі USB інтерфейсом для під'єднання до персонального комп'ютера та додаткових компонентів.

Канальна плата складається із 16- розрядного ЦАП, 24-розрядного АЦП, стабілізатора напруги та струму, вимірювального кола та обмежувача напруги та струму [13]. Кожна канална плата керує високо-струмовим зарядно-розрядним підсилювачем із максимальним

струмом $\pm 100\text{A}$. Високо-струмові зарядно-розрядні підсилювачі базуються на КМОН транзисторах, які з'єднано паралельно для отримання великих значень струму.

8-канальна вимірювальна система спроектована у вигляді прямокутного сталевого корпусу. Корпус розділено на чотири частини. Потужні трансформатори встановлено в середині першої частини. Перший трансформатор живить шість каналів і має максимальний вихідний струм 660A та максимальну напругу 6В. Другий трансформатор забезпечує максимальний струм 100A та максимальну напругу 17В.

Цей трансформатор живить один канал, який має максимальний струм +100A та максимальну напругу +15В. Це спеціальний канал для тестування суперконденсаторних модулів. Ці модулі складаються із суперконденсаторів, з'єднаних послідовно для отримання номінальної напруги 15В.

Наступні дві частини містять потужні діодні мости та конденсаторні силові фільтри. Трансформатори разом із потужними діодними мостами та силовими конденсаторними фільтрами утворюють високо потужний блок живлення.

Остання частина містить плату керування та каналні плати та малопотужний блок живлення цих плат. Цей малопотужний блок живлення забезпечує напруги живлення для плати керування та каналних плат. Суперконденсатори, які необхідно протестувати, розміщуються зверху корпусу та під'єднуються до вимірювальної системи за допомогою 16 мм² товстих мідних провідників.

IV. ТЕСТУЮЧЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕСПЕЧЕННЯ

Програмне забезпечення 8-канальної вимірювальної системи складається із трьох програм. Першою програмою є програма ЦСП, яка виконується в середині ЦСП, як показано на Рис.4. ЦСП програма виконує обробку даних для каналів в реальному режимі роботи [14].

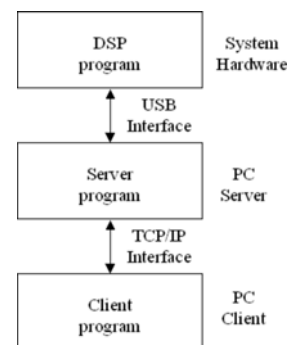


Рис.4 компоненти тестуючого програмного забезпечення

Наступна програма – це серверна програма, яка дозволяє керувати багатьом користувачам через клієнтські програми незалежними каналами. Кожний канал є повністю незалежним і може керуватися одним користувачем. Апаратне забезпечення системи під'єднується до ПК сервера через USB інтерфейс. ПК клієнти можуть бути в різних кімнатах та під'єднуються

до ПК сервера через TCP/IP інтерфейс використовуючи Інтернет. Інтерфейс користувача клієнтської програми показано на Рис.5 та Рис.6.

8-канальна вимірювальна система може працювати в повністю автоматичному або напівавтоматичному режимі. В повністю автоматичному режимі система виконує цифрову обробку сигналів без додаткових сигналів керування. Всі прийняті дані зберігаються на жорсткому диску ПК в окремих файлах даних без додаткової обробки.

В напівавтоматичному режимі система виконує цифрову обробку сигналів під керівництвом оператора. Оператор може запускати та зупиняти вибраний незалежний канал. В цьому режимі можливо перейти також до наступного етапу програмного алгоритму в ручному режимі. Всі незалежні канали відображаються в програмному вікні одночасно, як показано на Рис.6 або вибраний незалежний канал відображається окремо в одному програмному вікні, як показано на Рис.5.

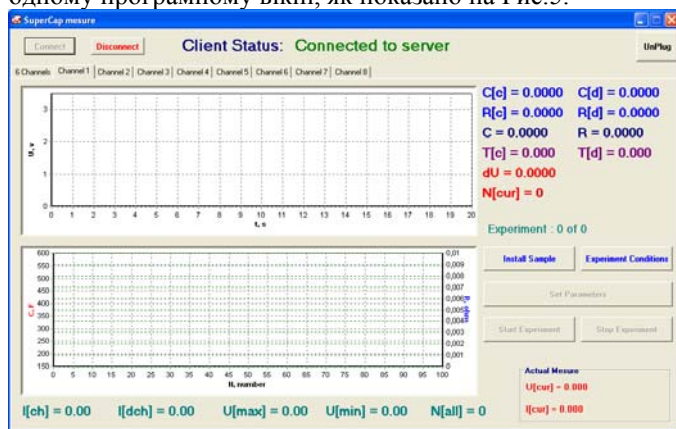


Рис.5 Інтерфейс користувача програми клієнт (відображається один канал)

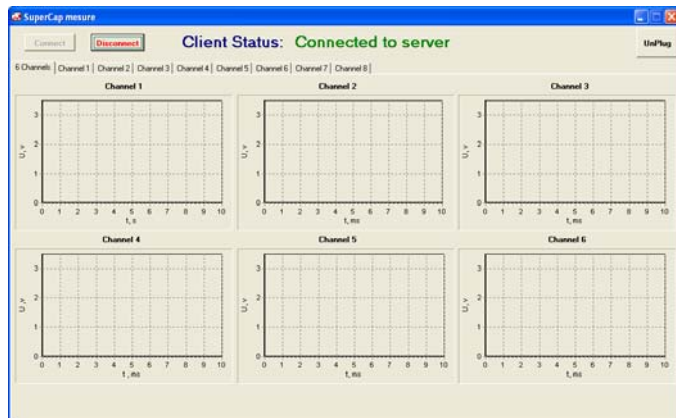


Рис.6 Шість каналів відображаються одночасно

Зарядна ємність $C(c)$, розрядна ємність $C(d)$, зарядний опір $R(c)$, розрядний опір $R(d)$, час заряду $T(c)$ та час розряду $T(d)$ відображаються в програмному вікні коли відображається один канал, як показано на Рис.5. Значення напруги каналу $U(cur)$, струму каналу $I(cur)$ та номер циклу $N(cur)$ також відображаються в цьому програмному вікні.

V. ВИСНОВКИ

1. Суперконденсатори зараз використовуються в різних застосуваннях, але сучасні вимірювальні системи мають обмеження по діапазонах струму та напруги..

2. Суперконденсаторна математична модель описує поведінку активованого вугільного електроду, що базується на порах великого та малого діаметра.

3. Розроблена 8-канальна вимірювальна система виконує вимірювання та тестування суперконденсаторів із високою точністю та великими значеннями струму.

4. Використовуючи незалежні канали ми можемо вимірювати окремі суперконденсатори та суперконденсаторні модулі одночасно.

5. ЦСП виконує вимірювальні тести в реальному режимі роботи і використовуючи TCP/IP інтерфейс 8-каналів суперконденсаторів можуть керуватися через Інтернет.

6. Спеціалізоване програмне забезпечення дозволяє автоматизувати вимірювальні тести та зберігати результати вимірювання за допомогою ПК та Інтернету.

ЛІТЕРАТУРА

[1] B.E. Conway, Electrochemical Supercapacitors: Scientific Principles and Technological Application, Plenum, New York, NY, 1999.

[2] Harri V. Superkapazitäten revolutionieren Energiespeicher // Bulletin SEV. – 1999. - №1. -P.25.

[3] Harri V., Marinkovic G. Innovative Technologien im Einsatz bei Hybrid – Fahrzeugen, Blauer Engel wirdfluge // Megalink. – 1997. - №6. - P.20.

[4] J.R. Miller Electrochemical capacitors for Hybrid Vehicles / The 7th International Seminar on Double-Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. – Deerfield Beach, Vol 7, 1997.

[5] Spyker R.L., Nelms R.M. Double-Layer Capacitor / AC-DC Converter System Applied to Constant Power Load // IEEE. – 1996. – V. 31/1. – P.255.

[6] Boas D.L., Adams H.A., Hacha T.H., Metcalfe J.E. A 3 cubic inch 200F capacitor // 21st Electron. Compon. Conf. (Washington, D.C., 1971). – New York. – 1971. –P.338-342.

[7] Halpin S.M. et al. Application of Double-Layer Capacitor Technology Static Condensers for Distribution System Voltage Control // IEEE. – 1996. – V. 11/4. – P.899.

[8] Watanabe N., Kimura K. Characteristics and fidelity of SUPERCAPs // NEC Technological I. – 1983. – 36, №12. – P.130-133.

[9] Yoshida A. et al. An Electric Double – Layer Capacitor with High Capacitance and Low Resistance // IEEE Transactions on Component, Hybrids And Manufacturing Technologue. – 1992. – 15, №1. – P.133.

[10] V. Martynyuk, D. Makaryshkin, J. Boyko Frequency Domain Analysis for Electrochemical Supercapacitors // Proceedings of the 15th IMEKO TC-4 International Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentations, Iasi, Romania, September 18-22, 2007, Volume II, pp. 357-361.

[11] V. Martynyuk, D. Makaryshkin, J. Boyko Electrochemical Supercapacitor Time Domain Analysis by Means of Multi-Channel Measurement System // Proceedings of the 15th IMEKO TC-4 International Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentations, Iasi, Romania, September 18-22, 2007, Volume I, pp. 207-211.

[12] V. Martynyuk. Supercapacitor Data Acquisition Systems // Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Computing System: Technology and Applications IDAACS'2007, Dortmund, Germany, September 6-8, 2007, pp. 24-28.

[13] V. Martynyuk, O. Vdovin, J. Boyko and N. Vlasenko, "Super-High Capacitor Analyzer with Compensation of Common-Mode Error", Proc. of the 11th IMEKO TC-4 Symposium "Trends in electrical measurement and instrumentation", Lisbon, Portugal, pp. 340-343, 2001.

[14] O. Vdovin, V. Martynyuk, M. Surdu, "A Combined Method for Measuring Super-High Capacitor Absorption Characteristics", Proc. of the 11th IMEKO TC-4 Symposium "Trends in electrical measurement and instrumentation", Lisbon, Portugal, pp. 373-375, 2001.