

УДК 544.636

**ЗАЛЕЖНІСТЬ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЄМНОСТІ ТА ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ НА БАЗІ АЦЕТОНИТРИЛУ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ**

**В. Ю. Ізотов, М. І. Клюй**

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
просп. Науки, 41, г. Київ, 03028, Україна. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

**І. В. Кольцов, І. М. Бурлака, Д. С. Гавриков**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"  
просп. Перемоги, 37, 03056, Україна. E-mail: veterkoltsov@gmail.com

**Ю. Цжі**

Інститут фізики Цзілінського університету  
вул. Чаоцюнь, 19, г. Чанчунь, 130103, КНР. E-mail: zhouliang@jlu.edu.cn

Накопичення енергії в автономних джерелах живлення та подальше її раціональне використання є однією з основних задач сучасної енергетики. Технічне вирішення цієї задачі пов'язують зі створенням гібридних джерел живлення на базі високоємних акумуляторів і високопотужних джерел живлення – суперконденсаторів. Використання в гібридних джерелах живлення суперконденсаторів дозволяє передавати накопичену енергію з високим ККД і, щонайменше, подовжити строк служби акумуляторів удвічі. Ще однією позитивною властивістю суперконденсаторів є їх спроможність працювати в широкому інтервалі температур. Це істотно розширює межі використання гібридного джерела порівняно зі звичайними накопичувачами енергії на базі звичайної акумуляторної батареї. Досліджено залежності складових внутрішнього опору суперконденсатора та його ємності від температури. Запропоновано механізм зміни параметрів, що характеризують ємність системи пористий вуглецевий електрод/ органічний електроліт від температури.

**Ключові слова:** суперконденсатор, внутрішній опір, ємність.

**ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ НА БАЗЕ АЦЕТОНИТРИЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**В. Ю. Изотов, М. И. Клюй**

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва НАН Украины  
просп. Науки, 41, г. Киев, 03028, Украина. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

**И. В. Кольцов, И. М. Бурлака, Д. С. Гавриков**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"  
просп. Победы, 37, 03056, Украина. E-mail: veterkoltsov@gmail.com

**Ю. Цжи**

Институт физики Цилинского университета  
ул. Чаоцюнь, 19, г. Чанчунь, 130103, КНР. E-mail: zhouliang@jlu.edu.cn

Накопление энергии в автономных источниках питания и дальнейшее ее рациональное использование – одна из основных задач современной энергетики. Техническое решение этой задачи связывают с созданием гибридных источников питания на базе высокоемких аккумуляторов и высокоомощных источников питания – суперконденсаторов. Использование в гибридных источниках питания суперконденсаторов позволяет передавать накопленную энергию с высоким КПД и, как минимум, продлить срок службы аккумуляторов вдвое. Еще одним положительным свойством суперконденсаторов является их способность работать в широком интервале температур. Это существенно расширяет границы использования гибридного источника по сравнению с обычными накопителями энергии на базе обычной аккумуляторной батареей. Исследованы зависимости составляющих внутреннего сопротивления суперконденсатора и его емкости от температуры. Предложен механизм изменения параметров, характеризующих емкость системы пористый углеродный электрод/органический электролит от температуры.

**Ключевые слова:** суперконденсатор, внутреннее сопротивление, емкость.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Накопичення енергії в автономних джерелах живлення та подальше її раціональне використання є однією з основних задач сучасної енергетики [1–3]. Дослідженню впливу температури на властивості суперконденсаторів (СК) останнім часом приділяється багато уваги, що обумовлено складною структурою СК, які складаються з двох електродів, розділених сепаратором і просочених електролітом. Але завдяки будові своїх електродів, внутрішній опір СК характеризується двома складовими –  $R_{ESR}$  (еквівалентний послідовний опір) і  $R_{EDR}$  (еквівалентний розподілений опір) [4], а ємність СК залежить від різниці

потенціалів та описується емпіричним рівнянням [5, 6]:  $C(U) = C_0 + \alpha \cdot U$ , де  $U$  – різниця потенціалів на зовнішніх контактах СК;  $C_0$  – ємність СК при  $U=0$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності.

Метою роботи є дослідження впливу температури на параметри суперконденсатора – внутрішній опір ( $R_{ESR}$ ,  $R_{EDR}$ ) і складові інтегральної ємності.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** СК виготовлявся на базі органічного електроліту та пористого вуглецевого матеріалу, а дослідження виконувались з метою стабілізації його роботи в широкому інтервалі температур.

Об'єктом дослідження були макети суперконденсаторів. Енергонакопичуючі складові електродів в суперконденсаторах виготовлялись з доактивованих вуглецевих матеріалів, отриманих із порошків Фільтрасорб Chemviron Carbon марки F300. Зв'язуючою домішкою використовувалась тефлонова суспензія, а високопровідною домішкою – графітизована сажа Super P. Співвідношення між активованим вуглецевим матеріалом, високопровідною графітизованою сажею та тефлоном складало 92:4:4 вагових відсотків відповідно. Катоди та аноди в суперконденсаторі виготовлялись з однакового композитного матеріалу. Товщина енергонакопичуючої складової електродів складала 100 мкм. Площа поверхні, покритої енергонакопичуючим матеріалом на одному електроді, становила 40x85 мм<sup>2</sup>. Кількість катодів та анодів покритих з двох сторін – 14 і по одному покритому з однієї сторони. Колектор струму виготовлявся з алюмінієвої фольги товщиною 20 мкм. З метою зменшення контактного опору між алюмінієвою фольгою та енергонакопичуючою складовою електроду, в поверхню колектору, за допомогою приладу ЕІЛ-8 методом електроіскрового легування, вплавливали частинки високопровідного графіту [7]. Енергонакопичуючу складову електроду приклеювали до колектора струму високопровідною клеючою плівкою, до складу якої входили 20 масових % графітизованої сажі та 80 масових % полівінілідендифториду. Як сепаратор використовувався сепаратор «Celgard-2400» товщиною 20 мкм. Електролітом був 1,3 М розчин солі триетилметиламонію тетрафтороборату в ацетонітрилі.

Параметри суперконденсатора визначали з кривих циклування. Циклування здійснювалось за допомогою «АТГ» – приладу для тестування суперконденсаторів, підключеного до комп'ютера. В процесі циклування використовувались як гальваностатичний, так і потенціостатичний режими. Залежність різниці потенціалів на зовнішніх клемх суперконденсатора від часу під час циклування наведена на рис. 1.

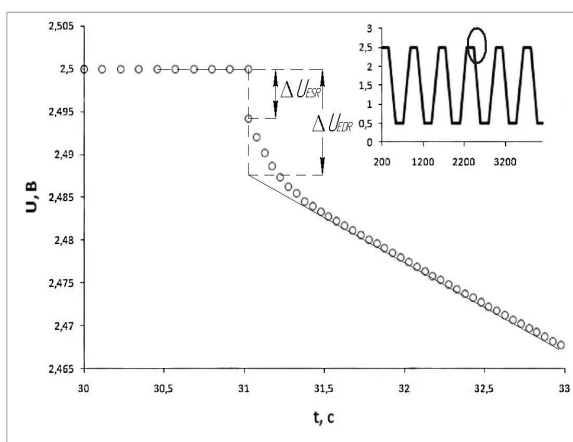


Рисунок 1 – Залежність різниці потенціалів на зовнішніх клемх суперконденсатора від часу під час циклування

Як видно з цього рисунку, кожен цикл можна розбити на чотири етапи. Використання комбінації гальваностатичного та потенціостатичного режимів дозволило усунути вплив ефекту перерозподілу заряду на параметри, що характеризують інтегральну ємність [8] та утримувати температуру СК у рамках похибки, що не перевищує 1 °С під час циклування. Останнє обумовлено тим, що під час заряду (розряду) на внутрішньому опорі СК виділяється джоулеве тепло, для дисипації якого потрібен час.

На першому етапі суперконденсатор заряджають в гальваностатичному режимі до потенціалу  $U$ . Із зарядної кривої визначають складові внутрішнього опору  $R_{ESR}$  та  $R_{EDR}$ . Складові внутрішнього опору суперконденсатора знаходили зі стрибка потенціалу  $\Delta U$  при перемиканні режиму з потенціостатичного режиму на заряд.

Значення  $R_{ESR}$  та  $R_{EDR}$  визначалось згідно з формулою  $R_{ESR(EDR)} = \frac{\Delta U_{ESR(EDR)}}{I}$ , де  $I$  – струм заряду. З рис. 1 видно, яким чином визначаються стрибки потенціалу  $\Delta U_{ESR(EDR)}$ . Час для визначення величини  $\Delta U_{ESR}$  складав не більше однієї мілісекунди.

Для визначення параметрів, що характеризують інтегральну ємність суперконденсатора, його заряд треба проводити від нуля до різних значень  $U$ . При проведенні експерименту  $U$  приймало наступні значення 2,5; 2,25 В; 2 В; 1,75 і 1,5 В. Виходячи з того, що при розряді СК розряджають до нуля, ємність  $C(U)$  визначається за формулою:  $C(U) = \frac{I \cdot t}{U - \Delta U_{ESR}}$ , де  $t$  – час заряду.

На другому етапі СК витримували при постійному потенціалі  $U$  впродовж 300 с. За цей час суперконденсатор охолоджувався до температури кліматичної камери. На третьому етапі СК розряджали у гальваностатичному режимі до нуля та визначали інтегральну ємність СК на розряді. Різниця інтегральної ємності на заряді та на розряді для визначених зразків не перевищувала 1 %. Струм заряду (розряду), незалежно від потенціалу до якого заряджали СК, дорівнював 5 А. На четвертому етапі СК витримували при різниці потенціалів на зовнішніх клемх рівній нулю впродовж 300 с. Результати вимірів наведені на рис. 2 і 3.

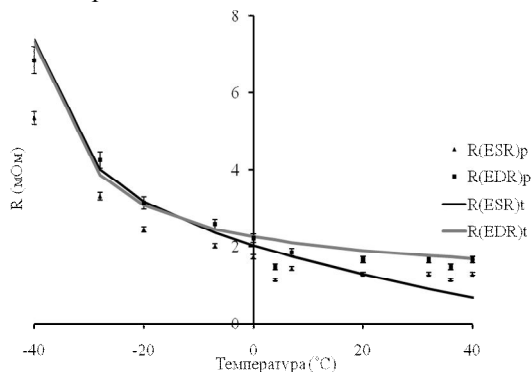


Рисунок 2 – Залежність внутрішнього опору від температури: неперервні лінії  $R(ESR)_t$ ,  $R(EDR)_t$  відповідають теоретичним значенням, а точки  $R(ESR)_p$ ,  $R(EDR)_p$  – експериментальним значенням

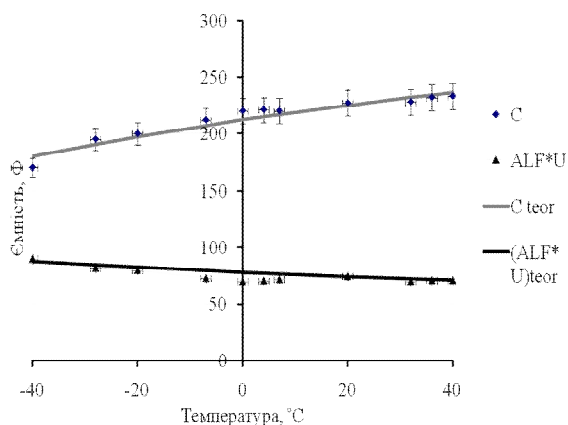


Рисунок 3 – Залежність ємності суперконденсатора від температури: неперервні лінії відповідають теоретичним розрахункам, а точки – експериментальним даним

Розглянемо залежність внутрішнього опору СК від температури, наведену на рис. 2. Внутрішній опір СК можна умовно розділити на дві складові – електронну та йонну. Електронний опір складається з опору алюмінієвого колектору, контактного опору алюмінієвий колектор/пористий вуглецевий матеріал та опору пористого вуглецевого матеріалу, з якого виготовлена енергонакопичуюча складова електроду. Йонний опір складається з опору в мікропорах, опору в транспортних каналах та опору в сепараторі. Як показують модельні розрахунки [9], основний вклад у внутрішній опір вносить йонна підсистема, але нехтувати електронною теж не можна. З кривих, наведених на рис. 2, видно, що зі зменшенням температури від +40 до -40 °C спостерігається нелінійне зростання складових внутрішнього опору СК ( $R_{ESR}$ ,  $R_{EDR}$ ). Це зростання, в першу чергу, обумовлене зростанням в'язкості ацетонітрилу, що призводить до зменшення електропровідності електроліту. Виходячи з того, що в'язкість у пористій системі зі зменшенням температури зростає швидше, ніж в об'ємі, слід було б чекати швидшого зростання питомого опору в пористій системі, ніж в об'ємі електроліту.

Отже, виходячи із припущення, що внутрішній опір СК визначається його йонною складовою, а також, враховуючи те, що електропровідність в порах з температурою спадає швидше, ніж в об'ємі електроліту, слід чекати, що відносна зміна внутрішнього опору з температурою буде зростати швидше, ніж відносна зміна електропровідності в об'ємі електроліту. З огляду на зроблене припущення розглянемо зміну внутрішнього опору з температурою. Для того, щоб виключити із розгляду геометричні фактори (товщину шару, площу електродів), що впливають на опір, при подальшому аналізі будемо розглядати відносну зміну опору. Зіставимо відносну зміну з температурою об'ємної електропровідності ацетонітрильного електроліту зі зміною питомого внутрішнього опору СК. Відносна зміна  $R_{ESR}$  і  $R_{EDR}$  у зазначеному температурному інтервалі складає 1,8 рази, а електропровідність чистого електро-

літу з температурою змінюється майже в три рази. Така відмінність свідчить про те, що не тільки зміна електропровідності електроліту з температурою визначає зміну внутрішнього опору СК. Пояснення такої поведінки складових внутрішнього опору  $R_{ESR}$  та  $R_{EDR}$  з температурою полягає в тому, що їх зміна обумовлена двома конкуруючими факторами. З одного боку, зростанням йонної складової опору, а з іншого – зменшенням його електронної складової.

Зі зменшенням температури електронна складова опору зменшується, і ця залежність носить лінійний характер. З іншого боку, електропровідність електроліту зі зменшенням температури зменшується, і ця залежність теж носить лінійний характер. Характерною є  $T_k$  – температура замерзання електроліту. Нижче температури замерзання електропровідність електроліту дорівнює нулю. В нашому випадку температура замерзання електроліту дорівнює -49,3 °C. Отже, можна припустити, що функціональна залежність внутрішнього опору від температури буде описуватись рівнянням:

$$R_{ESR(EDR)} = A_{ESR(EDR)} / (t - T_k) + B_{ESR(EDR)} t + C_{ESR(EDR)}, \quad (1)$$

де  $t$  – температура, °C;  $A_{ESR(EDR)}$  – стала, що характеризує зміну відповідної складової внутрішнього опору, пов'язану зі зміною йонної складової внутрішнього опору з температурою;  $B_{ESR(EDR)}$  – стала, що характеризує зміну електронної складової внутрішнього опору;  $C_{ESR(EDR)}$  – характеризує внутрішній опір системи пористий вуглецевий електрод/ацетонітрил при розряді в імпульсному (ESR) і стаціонарному (EDR) режимах розряду СК.

Розраховані параметри  $A_{ESR(EDR)}$ ,  $B_{ESR(EDR)}$  та  $C_{ESR(EDR)}$  складають відповідно  $A_{ESR} = 51$  мОм·град,  $A_{EDR} = 64$  мОм·град,  $B_{ESR} = -0,022$  мОм/град,  $B_{EDR} = -0,022$  мОм/град,  $C_{ESR} = 1$  мОм,  $C_{EDR} = 2,21$  мОм. Наведені на рис. 2 теоретичні розрахунки добре співпадають з експериментальними результатами, що свідчить на користь модельних припущень.

Експериментальні дані залежності параметрів, що характеризують ємність СК від температури, наведено на рис. 3.

Як видно рис. 3, зі зменшенням температури спостерігається зменшення складової ємності  $C_0$  та зростання  $\alpha$ . На теперішній час механізм, який призводить до такої залежності, в літературі не наводиться, хоча експериментальні дослідження виконувались. Як приклад можна навести роботу Лиу Венвєня зі співробітниками [10], в якій досліджувалась температурна залежність ємності системи графеновий електрод/органічний електроліт. У зазначеній роботі наведені експериментальні дані без будь-яких припущень відносно механізму, що призводить до зменшення  $C_0$  та зростання  $\alpha$ . У цій роботі йдеться мова про те, що система є дуже складною, і автори проводять апроксимацію залежностей поліномом третього ступеня. Ми пропонуємо наступний механізм, що може пояснити зміни  $C_0$  та  $\alpha$  з температурою. Для пояснення механізму зміни параметрів, що характеризують ємність системи пористий вуглецевий електрод/органічний електроліт, від температури, зробимо припущення відносно механізму виникнення двох складових ємності. До першої віднесе-

мо ємність, яка відповідає за адсорбцію іонів на поверхні пористого вуглецевого електроду. Друга – ємність щільної частини подвійного шару на границі вуглець/органічний розчинник. Якщо подивитись на розподіл пор за розмірами для активованого вуглецевого матеріалу (рис. 4), то пори з діаметром більшим ніж 60 нм складають не менше 10 % від загального об'єму.

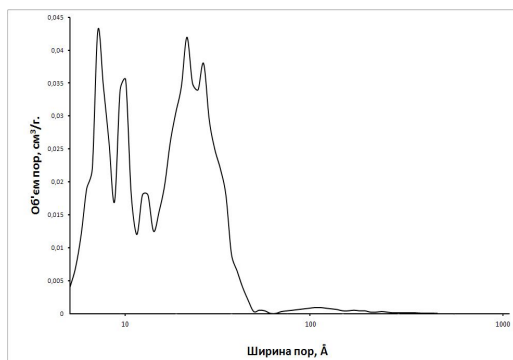


Рисунок 4 – Розподіл пор за розмірами для активованого вуглецевого матеріалу

У середині таких пор існує градієнт потенціалу, тобто, для цих пор, а також для транспортних каналів, можна говорити про зміну структури границі вуглецевий електрод/органічний розчинник при зміні потенціалу електроду. Поряд із цим, на поверхні цих пор та транспортних каналів відбувається адсорбція іонів. Отже, загальна ємність великих пор і транспортних каналів складається з ємності щільної частини подвійного шару та адсорбованих на поверхні іонів.

Поверхню великих пор і транспортних каналів можна розглядати як неоднорідну з енергетичної точки зору поверхню, тобто як поверхню з центрами адсорбції. Враховуючи взаємодію між адсорбованими іонами можна припустити, що стан рівноваги в такій системі буде описуватись за допомогою ізотерми Фрумкіна-Фаулера-Гуггенгейма, яка має вигляд:

$$\beta c = \theta \exp(-A \theta) / (1 - \theta), \quad (2)$$

де  $c$  – концентрація іонів в об'ємі електроліту;  $\beta$  – константа адсорбційної рівноваги;  $A$  – атракційна стала. Атракційна стала виражається через енергію електростатичної взаємодії між адсорбованими іонами ( $E$ ) та описується рівнянням:  $A = E/k \cdot T$ , де  $k$  – стала Больцмана. Частка заповнення поверхні  $\theta = \Gamma/\Gamma_{\infty}$ , де  $\Gamma$  – концентрація адсорбованих іонів;  $\Gamma_{\infty}$  – концентрація центрів адсорбції.

З рівняння (2) знаходимо, що зміна концентрації адсорбованих іонів ( $\sigma$ ) з температурою дорівнює:

$$\sigma/N = -\beta^2 c^2 E / [(\beta c + 1)^2 (\beta c - 1) kT]. \quad (3)$$

Враховуючи ту кількість припущень, яка була зроблена при виведенні цього рівняння, важко очікувати, щоб воно точно описувало зміну концентрації адсорбованих іонів від температури. Але це рівняння, на думку авторів, вірно передає функціона-

льну залежність між кількістю адсорбованих іонів і температурою. Легко показати, що аналогічна функціональна залежність від температури буде справедлива для ємності, на яку зменшується  $C_0$ . Тому, при описанні зміни концентрації адсорбованих іонів з температурою будемо використовувати рівняння:

$$dC = Q/(273+t) + G, \quad (4)$$

де  $dC$  – ємність на яку зменшується  $C_0$  з температурою. Значення варіаційних сталих  $Q$  та  $G$  визначаємо з експериментальних даних. Для нашої системи  $Q = 50300$  Ф·град,  $G = -165$  Ф.

Зміну коефіцієнту  $\alpha$  будемо розраховувати виходячи з того, що зменшення ємності  $C_0$  відбувається за рахунок десорбції іонів, що призводить до збільшення площі, яка визначається ємністю щільної частини подвійного шару. При зменшенні ємності на 64 Ф добуток  $\alpha U$  ( $U = 2,5$  В) зростає на 19 Ф. Отже, для подальших розрахунків  $\alpha$  використовується пропорція.

Результати розрахунків  $C_0$  та добуток  $\alpha \cdot U$  наведені на рис. 3. Як видно з рис. 3 експериментальні дані непогано узгоджуються з теоретичними розрахунками, що свідчить на користь зроблених модельних припущень.

**ВИСНОВКИ.** Залежність складових внутрішнього опору суперконденсатора від температури обумовлена конкуренцією двох факторів. При зменшенні температури відбувається зростання іонної складової опору за рахунок зростання в'язкості розчинника та зменшення електронної складової внутрішнього опору. Загальна ємність системи пористий вуглецевий електрод/органічний електроліт складається з двох компонент. Перша – це ємність, яка пов'язана з адсорбцією іонів на поверхні вуглецевого електроду, а друга – ємність, пов'язана зі структурою щільної частини подвійного електричного шару. Друга складова залежить від потенціалу електроду. Перерозподіл загальної площі електроду між цими складовими обумовлює перерозподіл загальної ємності між зазначеними компонентами. Поведінка ємності з температурою обумовлюється поведінкою адсорбованих іонів. Зі зменшенням температури зростає вплив адсорбційної складової, пов'язаної з електростатичним відштовхуванням між адсорбованими іонами, що призводить до десорбції іонів з поверхні електроду та до зменшення площі, яку вони займають. Як наслідок, зростає площа, що контактує безпосередньо з електролітом та на якій утворюється щільна частина подвійного шару, що призводить до збільшення коефіцієнту  $\alpha$ .

Перспективними можна вважати дослідження спрямовані на пошуки нового пористого вуглецевого матеріалу з оптимальним співвідношенням між мікропористою структурою та поверхнею, ємність якої зростає з потенціалом. На сьогодні матеріал, що повною мірою відповідає таким вимогам, ще не створений. Тому вказані рекомендації слід розглядати як орієнтири для науковців, які працюють над створенням нових вуглецевих матеріалів для суперконденсаторів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. / Burke Andrew // *J. Power Sources* – 2000. – Vol. 91(1). – PP. 37–50.

2. Carbon properties and their role in supercapacitors / Pandolfo A.G., Hollenkamp A.-F. // *J. Power Sources*. – 2006. – Vol. 157(1). – PP. 11–27.

3. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors / Frackowiak E., Beguin F. // *Carbon*. – 2001. – Vol. 39(6). – PP. 937–50.

4. An impedance-based approach to predict the state-of-charge for carbon-based supercapacitors / Li Z., Chen J. // *Microelectronic Engineering*. – 2008. – Vol. 85. – PP. 1549–1554.

5. Capacitance characterization methods and ageing behavior of supercapacitors / Kurzweil P., Frenzel B., Gallay R. // *Proc. The 15-th International Seminar On Double Layer Capacitors*. – Deerfield Beach, Fl., U.S.A., Dec. 5–7, 2005. – PP. 1–12.

6. Залежність інтегральної ємності конденсаторів подвійного електричного шару від потенціалу / В.Ю. Ізотов // *Наукові вісті НТУУ „КПІ”*. – 2011. – № 3 (71). – С. 119–122.

7. Пат. України № 90448. Спосіб виготовлення електродів з низьким контактним опором для батарей та конденсаторів подвійного електричного шару / Малетін Ю.А., Стрижакова Н.Г., Подмогильний С.Н. та інші; заявл. 25.06.2005; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.

8. Ізотов В.Ю., Громадський Д.Г., Рудницька А.А., Кольцов І.В. Особливості саморозряду суперконденсаторів на основі пористих вугільних матеріалів та органічного електроліту // *Відновлювальна енергетика*. – 2011. – № 2 (25). – С. 5–10.

9. Matching the nanoporous carbon electrodes and organic electrolytes in double layer capacitors. / Yu. Maletín, P. Novak, E. Shembel, et al. // *Applied Physics. A: Material Science and Processing*. – 2006. – Vol. 82. – PP. 653–657.

10. Effects of concentration and temperature of EMIMBF4/acetonitrile electrolyte on the supercapacitive behavior of graphene nanosheets / Wenwen Liu, Xingbin Yan, Junwei Lang, Qunji Xue // *J. Mater. Chem.* – 2012. – Vol. 22. – PP. 8853–8861.

**DEPENDENCE OF THE INTEGRATED CAPACITY AND INTERNAL RESISTANCE OF SUPERCAPACITORS BASED ON TEMPERATURE ACETONITRILE**

**V. Izotov, M. Kluj**

V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine  
prosp. Nauki, 41, Kiev, 03028, Ukraine. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

**I. Koltsov, I. Burlaka, D. Gavrikov**

National Technical University of Ukraine "KPI"  
prosp. Peremogi, 37, 03056, Ukraine. E-mail: veterkoltsov@gmail.com

**Yu Tszhi**

Institute of Physics Jilin University,  
vul. Chaotsyun, 19, Changchun, 130103, China. E-mail: zhouliang@jlu.edu.cn

Energy storage in autonomous power sources and its subsequent rational use is one of the major challenges of modern power engineering. Technical solution of the problem is associated with the creation of hybrid power sources on the basis of high-capacity batteries and high-power sources – supercapacitors. Using of ultracapacitors for the hybrid power sources may enable to transmit the stored energy with high efficiency and double the battery lifetime. Another positive feature of supercapacitors is their ability to operate in a wide temperature range. This greatly extends the use of a hybrid power in comparison to conventional energy storage on the basis of the conventional batteries. In the work the dependencies of components of the SC internal resistance were studied. The mechanism to change the parameters of the porous carbon electrode/organic electrolyte system depending on temperature was proposed.

**Key words:** supercapacitor, internal resistance, capacitance.

REFERENCES

1. Burke, Andrew (2000), “Ultracapacitors: why, how, and where is the technology”, *J. Power Sources*, no. 91(1), pp. 37–50.

2. Pandolfo, A.G., Hollenkamp, A.-F. (2006), “Carbon properties and their role in supercapacitors”, *J. Power Sources*, no. 157(1), pp. 11–27.

3. Frackowiak, E., Beguin, F. (2001), “Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors”, *Carbon*, no. 39(6), pp. 937–50.

4. Li, Z., Chen, J. (2008), “An impedance-based approach to predict the state-of-charge for carbon-based supercapacitors”, *Microelectronic Engineering*, no. 85, pp. 1549–1554.

5. Kurzweil, P., Frenzel, B., Gallay, R. (2005), “Capacitance characterization methods and ageing behavior of supercapacitors”, *Proc. The 15-th International Seminar On Double Layer Capacitors*. pp. 1–12.

6. Izotov, V.Yu. (2011), “The dependence of integral capacity of capacitors of potential electric

double-layer” *Naukovi Visti NTUU "KPI"*, no. 3 (71). pp. 119–122.

7. Maletín, U.A., Stryzhaklva, N.G. Podmohylnyy, S.N. et al. (2010), “The manufacturing method of low contact resistance electrodes for batteries and electric double-layer capacitors”, Pat. Ukraine № 90448.

8. Izotov, V.Yu., Gromadsky, D.G., Rudnytska, A.A., Koltsov, I.V. (2011), “Self-discharge specifics of supercapacitors on the basis of porous carbon materials and organic electrolyte”, *Vidnovlyuvalna Energetika*, no. 2(25), pp. 5–10.

9. Maletín, Yu., Novak, P., Shembel, E. et al. (2006), “Matching the nanoporous carbon electrodes and organic electrolytes in double layer capacitors”, *Material Science and Processing*, no. 82, pp. 653–657.

10. Wenwen, Liu, Xingbin, Yan, Junwei, Lang, Qunji, Xue (2012), “Effects of concentration and temperature of EMIMBF4 acetonitrile electrolyte on the supercapacitive behavior of graphene nanosheets”, *J. Mater. Chem.*, no. 22, pp. 8853–8861.

Стаття надійшла 12.04.2014.