

УДК 621.317.73

В.В. МАРТИНЮК, Д.А. МАКАРИШКІН, А.С. КАШТАЛЬЯН, С.С. СОПРОНЮК

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТАНГЕНСА КУТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ  
ТА ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКЛИВОСТІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Наведені результати залежностей тангенса кута діелектричних втрат та діелектричної проникливості в широкому діапазоні частот та зарядних напруг суперконденсатора при повільних релаксаційних процесах з урахуванням нелінійного характеру суперконденсатора.

Ключові слова: суперконденсатор, тангенс кута діелектричних втрат, час релаксації, комплексна діелектрична проникливість, імпедансний спектр, нелінійність.

*The supercapacitor dielectric loss tangent and complex dielectric permittivity frequency dependences results in the wide range of frequency and charge voltages of the supercapacitor are given at sluggish relaxation processes taking into account nonlinear character of supercapacitor.*

Keywords: ultracapacitors, dielectric loss tangent, the relaxation, the complex dielectric permittivity, impedance spectrum nonlinearity.

Суперконденсатори, які відомі як конденсатори з подвійним електричним шаром, іоністори, ультраконденсатори, гібридні конденсатори та електрохімічні конденсатори – це полярні електрохімічні прилади, які здатні запасати та вивільняти електричну енергію шляхом внутрішнього перерозподілу іонів електроліту. По своїм електричним параметрам вони займають проміжне положення між електролітичними конденсаторами великої ємності та акумуляторами, але по принципу дії відрізняються від тих та інших. Електрохімічні суперконденсатори здатні перекрити практично увесь діапазон по величині питомої енергії та питомої потужності, який раніше поділяв традиційні типи енергонакопичувальних конденсаторів та акумуляторів. Використання таких джерел струму дозволяє оптимізувати габарити та масу радіоелектронної апаратури, а також вирішувати проблеми в області створення електромобілів нового покоління [1].

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

В суперконденсаторах енергія накопичується в процесі зарядки за рахунок поляризації подвійних електричних шарів на границях розділу анод/електроліт та катод/електроліт [1]. Подвійний електричний шар представляє собою конденсатор, одна з обкладинок якого є заряджена поверхня електрода, а друга шар іонів протилежного знаку в електроліті (іонного провідника) [2]. Модель подвійного електричного шару та розрахунки зроблені Штерном показують, що внутрішня зона іонного розподілу визначається процесом абсорбції. У відповідності до моделі Штерна зона у розчині, яка знаходиться за внутрішнім шаром Гельмгольца, математично описується умовою дифузійної зони розподілу іонів Гої-Чапмена рис. 1 [2].

Зусиллями Гої, Штерна та Фрумкіна створена класична теорія будови та властивостей подвійного електричного шару у водяних електролітах. Таким чином було закладено фундамент для створення різних електрохімічних перетворювачів енергії та інформації (у тому числі суперконденсаторів). В частковому випадку було встановлено, що питома ємність подвійного електричного шару є дуже високою (біля  $0,2 \text{ Ф/м}^2$ ), а стрибок потенціалу в подвійному електричному шарі може досягати величини 1 В і навіть вище [1, 2].

Іншими словами, система “електронний провідник – іонний провідник” в певних умовах поводить себе, як конденсатор, тобто при проходженні через таку систему електричного струму змінюється міжфазна різниця потенціалів  $\phi$ . Якщо ці зміни є зворотними, тоді система може характеризуватися ємністю, яка визначається для ідеального конденсатора по формулі (1) [3].

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \phi}, \quad (1)$$

де  $\Delta q$  – накопичений на міжфазній границі заряд,  $\Delta \phi$  – зміна міжфазної різниці потенціалів.

В концентрованих електролітах заряд на міжфазній границі надлишком електронного (діркового) заряду на поверхні металевого електрода та надлишком іонного заряду зі сторони електроліту. Іони електроліту є дуже щільно притиснутими до поверхні електрода електростатичним притяганням поверхневого заряду, таким чином, що відстань між зарядами в подвійному електричному шарі має порядок близький до радіуса іона. В електролітах іони, зазвичай, гідратовані (водний розчин), або сальвовані (органічний розчин), що збільшує їх радіус.

Оцінка відносної діелектричної проникливості в області подвійного електричного шару в системах

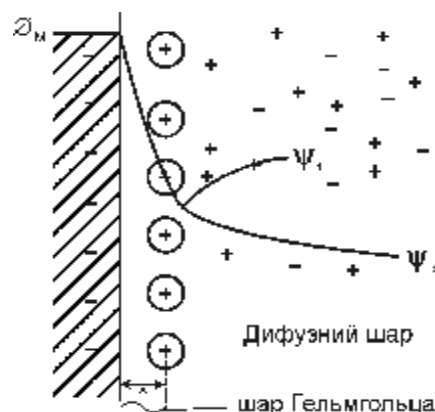


Рис. 1. Модель подвійного електричного шару Штерна

“електронний провідник – іонний провідник ” проводиться по формулі плоского конденсатора і дає величину  $\epsilon=4,5$ , тоді як для води  $\epsilon=80$  (2) [3]. :

$$\epsilon = \frac{C_{num} \cdot d}{\epsilon_0} = \frac{0,2 \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{8,85 \cdot 10^{-12}} = 4,5. \quad (2)$$

де  $C_{num}$  – питома ємність подвійного електричного шару,  $d$  – відстань між зарядами в подвійному електричному шарі, яка залежить від концентрації іонів електроліту та розмірів іонів,  $\epsilon_0$  – постійна діелектрична проникливість.

Низька величина відносної діелектричної проникливості  $\epsilon$  пояснюється тим, що молекули води на міжфазній границі є дуже сильно поляризованими.

В звичайних конденсаторах заряди розділені діелектриком, а в подвійному електричному шарі розподіл зарядів на міжфазній границі обумовлений термодинамічною неможливістю або кінетичною утрудненістю переносу зарядів в робочому інтервалі електродних потенціалів  $\Delta\phi$ . Опір переносу  $R$  в цьому випадку можна визначити за наступною формулою:

$$R = \frac{\Delta\phi}{I_{самор.}}. \quad (3)$$

де  $I_{самор.}$  – струм саморозряду.

В реальних системах струм саморозряду  $I_{самор.}$  відрізняється від нуля за рахунок наявності домішок в електроліті або електродах з більш низьким потенціалом розкладання, а також за наявності електронної складової провідності в іонних провідниках (електролітах).

В якості електродів у суперконденсаторах використовують мікропористі електронні провідники з високою питомою поверхнею, наприклад, різні активовані вуглецеві матеріали [3]. Такі матеріали містять велику кількість пор з розмірами порядку  $10^{-9}$  м та має питому поверхню біля  $10^6$  м<sup>2</sup>/кг. Розрахунки показують, що вуглеводні елементи, які поділяють пори, мають розміри такого самого порядку.

На відміну від акумуляторів, заряд і розряд яких є обмежений протіканням електрохімічних реакцій на електродах, суперконденсатори можна заряджати та розряджати великими струмами і витримувати в такому режимі велику кількість циклів. При заряді та розряді суперконденсатор поводить себе, як ідеальний конденсатор, який заряджається або розряджається через обмежений резистор – внутрішній опір. У випадку використання електролітів з високою напругою (1–3 В) та низьким питомим опором можливо створення суперконденсаторів з питомою потужністю порядку 10кВт/кг.

Найкращі зразки сучасних суперконденсаторів характеризуються величиною ємністю у тисячі фарад, високими робочими струмами (сотні і тисячі ампер) та низькими значеннями активного опору (сотні мікро Ом та одиниці мілі Ом).

Проведені дослідження показують, що властивості, електричні параметри та характеристики суперконденсаторів суттєво відрізняються від традиційних конденсаторів. Спостерігається значна частотна дисперсія ємності та активного опору суперконденсаторів, залежність цих параметрів від напруги та струму вимірювального сигналу, а також методу вимірювання електричних параметрів суперконденсаторів. Спостерігається також нелінійна залежність цих параметрів ємності та активного опору суперконденсаторів від розрядних та зарядних струмів і напруг.

Нелінійний характер суперконденсатора обумовлюється фарадеївським струмом саморозряду  $i_\phi$ , який присутній разом із зарядним струмом  $i_z$  та залежить від напруги заряду суперконденсатора [1]. Тому загальний струм, який протікає через суперконденсатор під час його заряду від джерела стабільного струму  $J=const$ , можна записати у вигляді:

$$J = i_z + i_\phi = const \quad (4)$$

Наявність фарадеївського струму саморозряду  $i_\phi$  обумовлює викривлення зарядної кривої суперконденсатора під час його заряду від джерела стабільного струму  $J = const$  (ділянка  $bc$  рис.2) порівняно із зарядною прямою ідеального конденсатора, в якому цей струм відсутній.

Залежність фарадеївського струму саморозряду  $i_\phi$  від напруги заряду суперконденсатора носить нелінійний характер і зображена на рис.3. Ця залежність показує, що на початку заряду суперконденсатора (при низькій

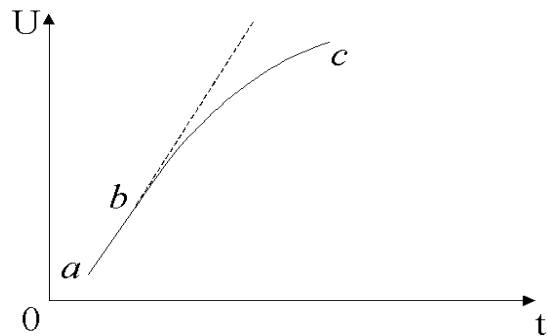


Рис. 2. Крива заряду суперконденсатора від джерела стабільного струму  $J = const$

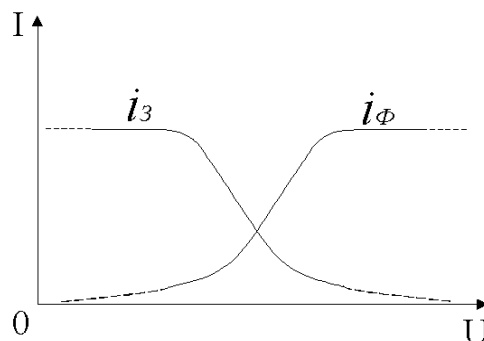


Рис.3. Графік залежності зарядного  $i_z$  та фарадеївського  $i_\phi$  струмів від напруги заряду суперконденсатора

напрузі на його виводах) фарадеївський струму саморозряду  $i_\phi$  незначний, а зарядний струм  $i_z$  максимальний. Коли напруга на виводах суперконденсатора зростає то це призводить до зростання фарадеївський струму саморозряду  $i_\phi$  до максимального значення при повному заряді суперконденсатора.

Усі проаналізовані властивості суперконденсаторів призводять до широкого відхилення їх параметрів та характеристик для зразків одного типоміналу. Також сучасні суперконденсатори характеризуються низькими робочими напругами, які залежать від типу електроліту. Якщо електроліт суперконденсаторів виготовлений на водяній основі, то робоча напруга складає  $U_{np}=1,2V$ , а для електролітів на органічній основі робоча напруга складає  $U_{np}=2,7V$ .

#### Дослідження тангенса кута діелектричних втрат та діелектричної проникливості суперконденсатора

В конденсаторах з подвійним електричним шаром та пористими електродами присутні процеси внутрішньої релаксації, яким властива нелінійність. Це пояснюється тим, що електрод представляє собою систему з широким розподілом пор по радіусу, тоді в різних порах накопичується різний заряд і за різний час. При складанні схеми заміщення суперконденсатора кожний розмір пор необхідно відобразити своєю ємністю та опором. Така модель є складною і її складно застосовувати для опису процесу роботи суперконденсатора. Як показано в [4], високої точності можна добитися, якщо пори електрода поділити на дві групи, і при цьому допустити, що постійні часу  $\tau(\omega, u) = R(\omega, u) C(\omega, u)$  цих груп є однаковими. Поділ на дві групи проводиться умовно за розмірами пор, де в першу групу потрапляють пори, радіуси яких менше 5 нм, а в другу – пори, радіуси яких є більшими. Наявність внутрішньої релаксації, яка має нелінійний характер, необхідно враховувати при розрахунку коефіцієнта корисної дії суперконденсатора [4].

Для ефективного використання суперконденсаторів та розуміння процесів, які відбуваються в них є необхідним фундаментальне вивчення діелектричної активності та процесів провідності в широкому інтервалі частот та напруг [5]. У зв'язку з цим вивчення широкосмугової діелектричної та імпедансної параметризації для релаксаційних процесів в суперконденсаторах є актуальною задачею. Тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta(\omega, u)$  для релаксаційної поляризації з урахуванням наскрізної провідності визначається за наступною формулою [5]:

$$tg\delta(\omega, u) = \frac{X_c(\omega, u)}{R(\omega, u)} = \frac{1}{\omega R(\omega, u) C(\omega, u)} = \frac{1}{\omega \tau(\omega, u)} = \frac{\varepsilon''(\omega, u)}{\varepsilon'(\omega, u)} \quad (5)$$

де  $\tau(\omega, u)$  – час релаксації,  $\varepsilon''(\omega, u)$  – уявна складова комплексної діелектричної проникливості,  $\varepsilon'(\omega, u)$  – дійсна частина комплексної діелектричної проникливості.

З радіотехнічної точки зору суперконденсатор це двополюсник, в якості передавальної функції якого виступає функція його комплексного опору (імпедансу) або комплексної провідності (адмітансу) [6, 7]. Цій функції відповідає певна еквівалентна електрична схема заміщення суперконденсатора, параметри елементів якої і визначають електричні характеристики та властивості суперконденсатора. Для аналізу еквівалентних схем заміщення суперконденсатора можуть бути застосовані методи, які використовуються для аналізу електричних кіл.

Адекватність відомих математичних моделей суперконденсатора реальному промислового зразку суперконденсатора полягає у співпадінні теоретичного імпедансного спектру, розрахованого за функцією комплексного опору (комплексної провідності) суперконденсатора, із отриманим експериментальним шляхом імпедансним спектром суперконденсатора.

Відомо, що імпедансний спектр суперконденсатора зображають у вигляді діаграми Найквіста [8]. По осі X діаграми Найквіста відкладають активне значення функції комплексного опору суперконденсатора, а по осі Y – її реактивне значення, отримане на різних частотах зондуючого сигналу. Також імпедансний спектр суперконденсатора можна зобразити за допомогою двох діаграм Боде, які мають вигляд двох залежностей активної та реактивної складових функції комплексного опору суперконденсатора від частоти.

Розглянемо імпедансний спектр у вигляді діаграми Найквіста для суперконденсатора південнокорейської фірми NESS Capacitor Co, Ltd типу HE0120C-0027A на номінальну ємність 120 Ф та напругу 2,7 В в діапазоні частот від 0, 0230014040 Гц до 1014, 40430 Гц та в діапазоні напруги заряду від 0 В до 2 В (рис. 4) [9].

Аналіз графіка імпедансного спектру суперконденсатора показує, що спостерігається незначне нелінійне відхилення експериментальних імпедансних спектрів при різних значеннях напруги зарядів суперконденсатора в області ультранизких частот на вершині імпедансного спектру. Таке відхилення пояснюється наявністю фарадеївського струму саморозряду  $i_\phi$  (рис. 3), який обумовлює викривлення експериментальних імпедансних спектрів суперконденсаторів в широкому діапазоні частот та напруги зарядів.

Із імпедансних спектрів суперконденсатора рис. 4 можна визначити значення еквівалентної ємності та активного опору суперконденсатора в діапазоні частот від 0, 0230014040 Гц до 1014, 40430 Гц та в діапазоні напруги заряду від 0 В до 2 В (рис. 5 та рис. 6).

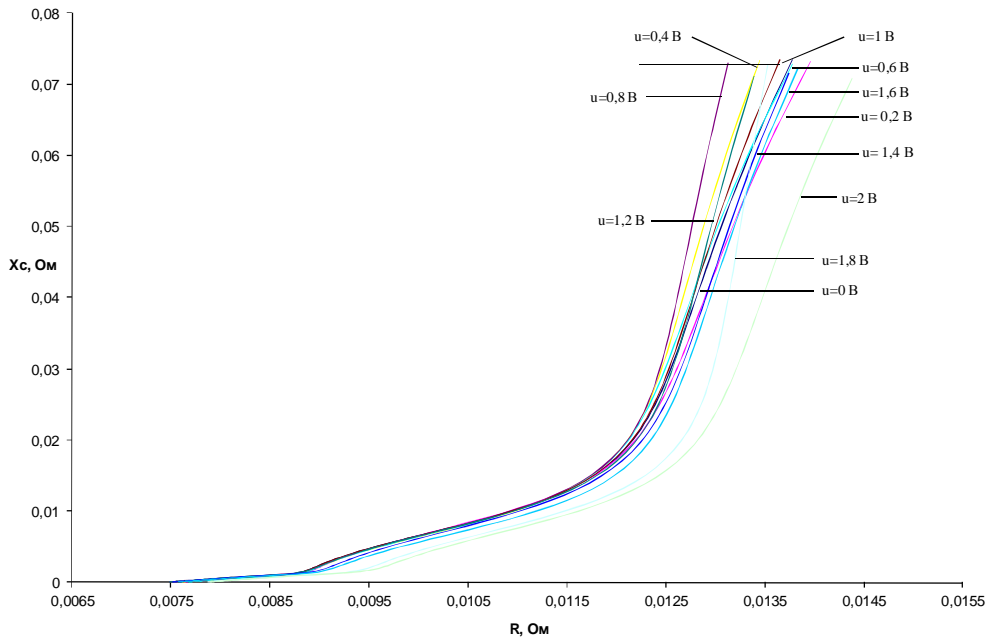


Рис. 4. Імпедансний спектр суперконденсатора у вигляді діаграми Найквіста для різних напруг заряду

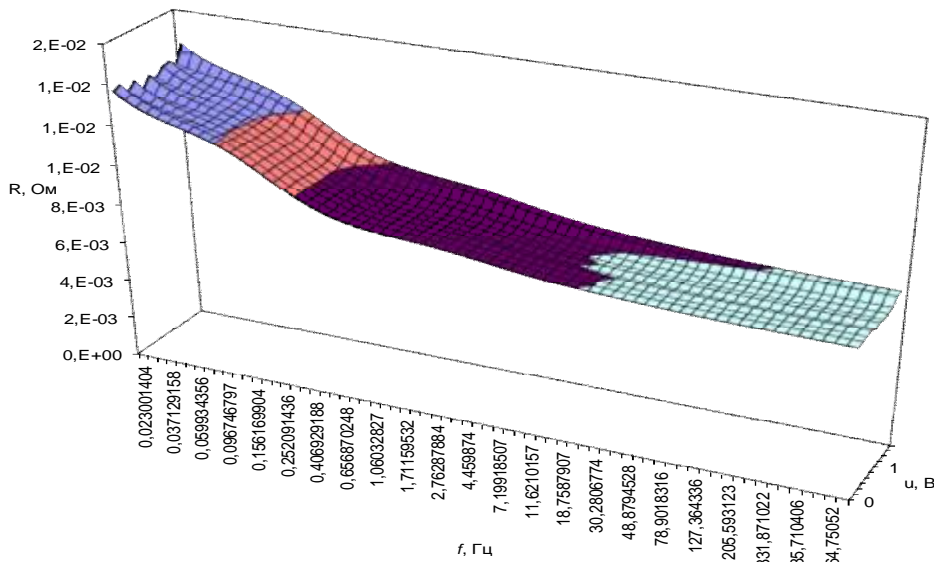


Рис. 5. Експериментальна поверхня еквівалентного активного опору суперконденсатора

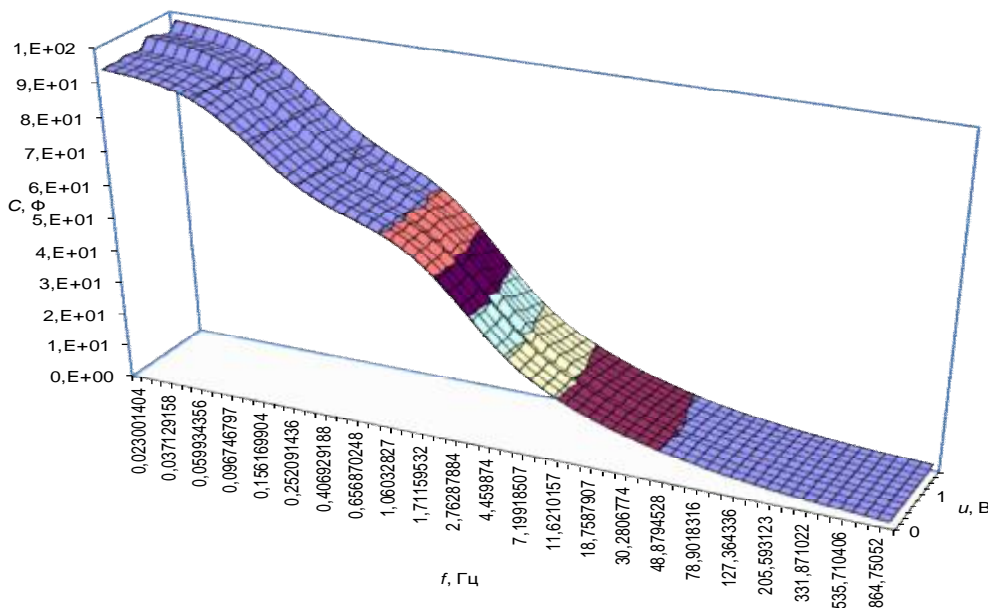


Рис. 6. Експериментальна поверхня еквівалентної ємності суперконденсатора

Отримані значення еквівалентного активного опору та еквівалентної ємності суперконденсатора дозволяють здійснювати математичне моделювання процесу роботи суперконденсаторів. Аналізуючи експериментальну поверхню еквівалентного активного опору рис. 5 та еквівалентної ємності суперконденсатора рис. 6 можна визначити мінімальне та максимальне значення еквівалентного активного опору, а також мінімальне та максимальне значення еквівалентної ємності.

Розглянемо залежність тангенса кута діелектричних втрат  $tg\delta(\omega, u)$  від частоти і напруги заряду для суперконденсатора південнокорейської фірми NESS Capacitor Co, Ltd типу HE0120C-0027A на номінальну ємність 120 Ф та напругу 2,7 В в діапазоні частот від 0,023001404 Гц до 1014,40430 Гц та в діапазоні напруги заряду від 0 В до 2 В (рис. 7).

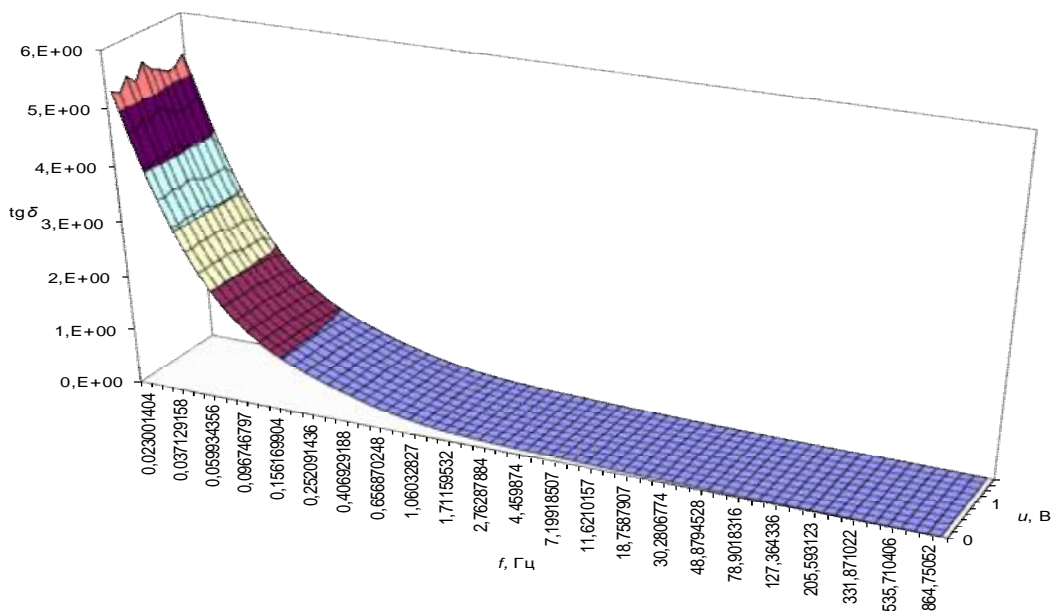


Рис. 7. Експериментальна поверхня тангенса кута діелектричних втрат суперконденсатора

В суперконденсаторах релаксаційні втрати спостерігаються за рахунок іонно-релаксаційної поляризації, яка відрізняється широким набором нелінійних функцій часів релаксацій, внаслідок чого спостерігається згладжування (розмиття) максимумів в залежностях  $tg\delta(\omega, u)$  від частоти прикладеного поля та температури, а також напруги заряду. Потенціальні бар'єри які обмежують рух слабозв'язаних іонів, є неоднаковими внаслідок локальних неоднорідностей структури суперконденсатора. Тому релаксаційні втрати суперконденсатора визначаються широким набором нелінійних функцій часів релаксації. Чим більше набір часів релаксації, тим менша значення релаксаційного максимуму, оскільки зменшується число релаксаторів кожного типу. Експериментальна поверхня часу релаксації суперконденсатора показано на рис. 8.

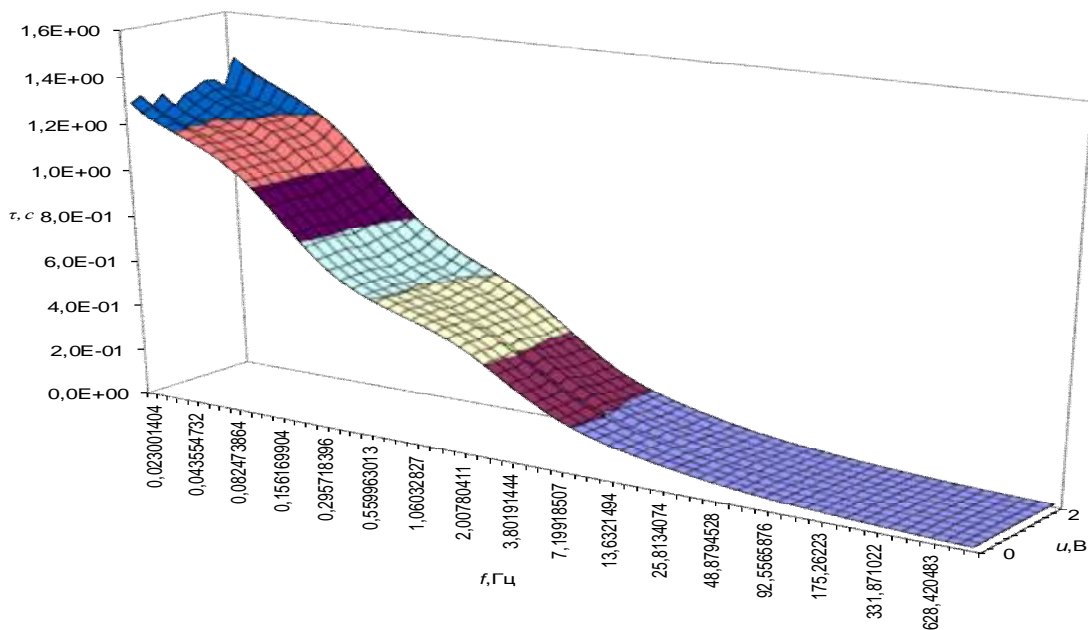


Рис. 8. Експериментальна поверхня часу релаксації суперконденсатора

Аналізуючи експериментальну поверхню часу релаксації рис. 8 можна визначити набір нелінійних функцій часів релаксації, які необхідно враховувати при використанні суперконденсаторів для їх ефективної роботи.

Розглянемо релаксаційну діелектричну дисперсію суперконденсатора з нелінійним характером. Комплексна нелінійна діелектрична проникливість суперконденсатора визначається за формулою Дебая (6), яка описує нелінійну частотну залежність комплексної діелектричної проникливості при релаксації [5].

$$\mathcal{E}(\omega, u) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{cm} - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau(\omega, u)} \quad (6)$$

де  $\epsilon_{cm}$  – відносна діелектрична проникливість при електростатичному полі ( $\omega=0$ ),  $\epsilon_{\infty}$  – відносно діелектрична проникливість при максимальній частоті.

З цієї формули отримують вираз для дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникливості:

$$\epsilon'(\omega, u) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{cm} - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2(\omega, u)} \quad (7)$$

$$\epsilon''(\omega, u) = \frac{\omega\tau(\omega, u) \cdot (\epsilon_{cm} - \epsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2(\omega, u)} \quad (8)$$

З урахуванням формул (7) та (8) тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta(\omega, u)$  визначається за наступною формулою (9):

$$tg\delta(\omega, u) = \frac{\omega\tau(\omega, u)(\epsilon_{cm} - \epsilon_{\infty})}{\epsilon_{cm} + \epsilon_{\infty} + \omega^2 \tau^2(\omega, u)} \quad (9)$$

Використовуючи набір нелінійних функцій часів релаксації побудуємо експериментальну поверхню нормованої дійсної складової  $\frac{\epsilon'(\omega, u)}{\epsilon_{cm}}$  та уявної складової  $\frac{\epsilon''(\omega, u)}{\epsilon_{cm}}$  для суперконденсатора в частотному діапазоні від 0, 0230014040 Гц до 1014, 40430 Гц та в діапазоні напруги заряду від 0 В до 2 В, які представлені на рис.9 та рис.10.

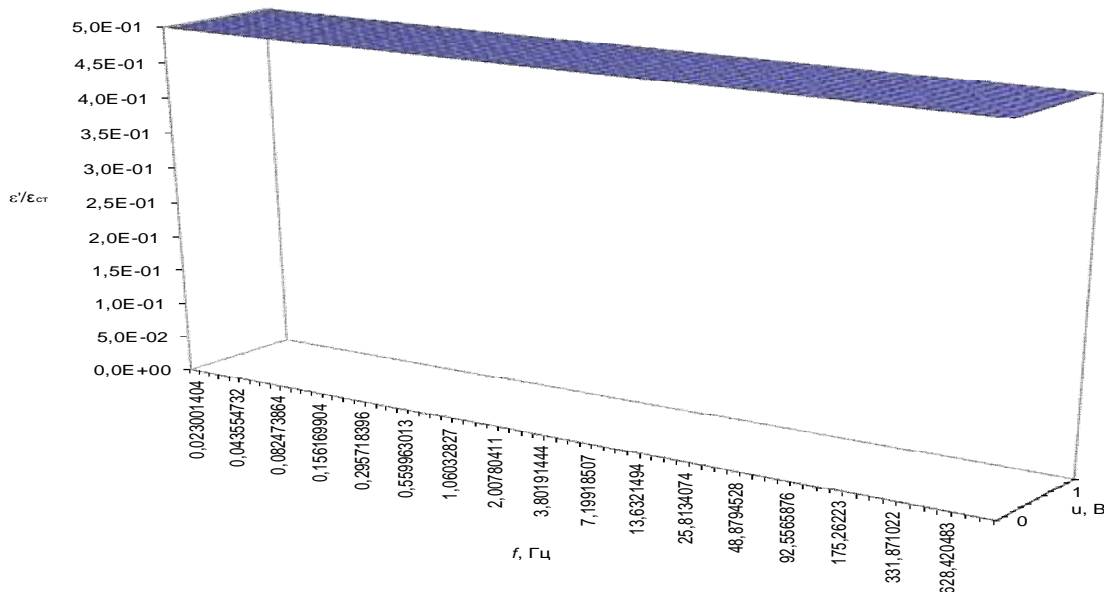


Рис. 9. Експериментальна поверхня нормованої дійсної складової діелектричної проникливості суперконденсатора при релаксаційній дебайській дисперсії

Аналіз експериментальної поверхні дійсної частини комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора з полімерним електролітом дозволяє визначити дійсну частину комплексної діелектричної проникливості в широкому частотному діапазоні частот та напруг заряду, що є необхідним для ефективного використання суперконденсаторів. А також аналіз цієї поверхні показує, що дійсна частина в досліджуваному діапазоні частот (від 0, 0230014040 Гц до 1014, 40430 Гц) та напруг (від 0 В до 2 В) не змінюється, і при цьому в 2 рази менше від значення відносно діелектричної проникливості при електростатичному полі  $\epsilon_{cm}$ .

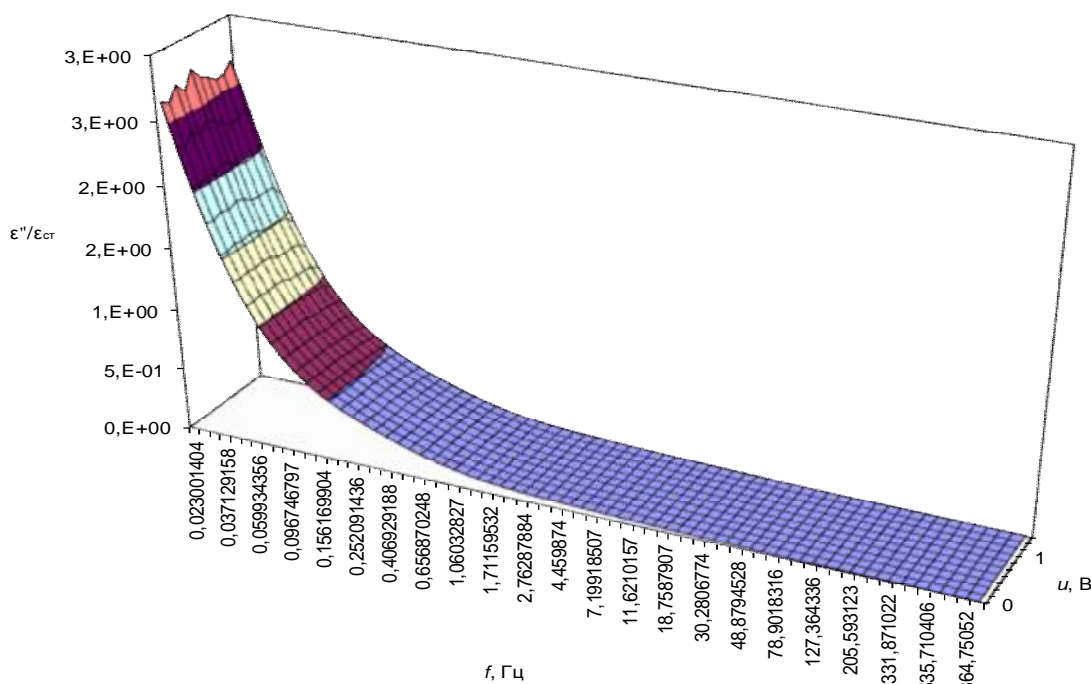


Рис. 10. Експериментальна поверхня уявної складової діелектричної проникливості суперконденсатора при релаксаційній дебаєвській дисперсії

Аналіз експериментальної поверхні уявної складової комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора з полімерним електролітом дає можливість визначити уявну складову комплексної діелектричної проникливості в широкому діапазоні частот та напруг заряду, що дозволяє визначити загальну питому провідність суперконденсатора, врахування якої є необхідним для ефективного використання суперконденсаторів. Також аналіз показав, що при зростанні частоти уявна складова зменшується і в області ультранизьких частот спостерігається нелінійний характер уявної складової в залежності від напруги заряду, це пояснюється тим, що питома провідність електроду набагато більша за питому провідність електроліту (умова зазвичай виконується), тоді на високих частотах поведінка суперконденсатора визначається ділянками пор, які є близькими до поверхні, а вклад більш глибоких ділянок є незначним: Це призводить до того, що опір і ємність суперконденсатора зменшується на високих частотах та нелінійно відхиляються в області ультранизьких частотах при різних зарядних напруг.

### Висновки

1. Встановлено, що внутрішня релаксація, має нелінійний характер, який необхідно враховувати при розрахунку коефіцієнта корисної дії суперконденсатора.
2. Релаксаційні втрати в суперконденсаторах спостерігаються за рахунок іонно-релаксаційної поляризації, яка відрізняється широким набором нелінійних функцій часів релаксацій  $\tau(\omega, u) = R(\omega, u) C(\omega, u)$ .
3. Встановлено, що при наявності мікропористої структури електродів, які накопичують об'ємний заряд, потенціальні бар'єри які обмежують рух слабозв'язаних іонів, є неоднаковими внаслідок локальних неоднорідностей структури суперконденсатора.
4. Тангенс кута діелектричних втрат та діелектрична проникливість суперконденсатора визначається з експериментального імпедансного спектру, який має нелінійний характер, що обумовлений фарадеївським струмом саморозряду.
5. Діелектрична проникливість суперконденсатора визначається дебаєвськими процесами, які встановлюють її частотну залежність при повільних релаксаційних процесах, що змінюється в широкому діапазоні зарядних напруг суперконденсатора.
6. Дійсна частина діелектричної проникливості суперконденсатора з полімерним електролітом в частотному діапазоні від 0, 023001404 Гц до 1014, 40430 Гц та зарядних напруг від 0 В до 2 В не змінюється, і при цьому в 2 рази менше від значення відносної діелектричної проникливості при електростатичному полі  $\epsilon_{ст}$ .
7. При зростанні частоти уявна складова діелектричної проникливості суперконденсатора зменшується і в області ультранизьких частот спостерігається нелінійний характер уявної складової в залежності від напруги заряду, а також експериментальна поверхня уявної складової комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора дозволяє визначити питому провідність суперконденсатора, що є необхідним для їх ефективного використання.



1. Conway B.E. Electrochemical supercapacitors: Scientific Principles and Technological application / Conway B.E. – Plenum. – New York, 1999. – P. 906.
2. Мартинюк В.В. Дослідження ємності подвійного електричного шару електрохімічних суперконденсаторів / Мартинюк В.В., Макаришкін Д.А. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2004. – № 2. – С. 54–57.
3. Кузнецов В. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н., Шувалов Е. // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6.
4. Ізотопов В.Ю. Моделювання та розрахунків робочих параметрів суперконденсатора / В.Ю. Ізотопов, Д.Г., Громадський, Ю. А. Малетін // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 6.
5. Мартинюк В.В. Дослідження комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора / Мартинюк В.В., Макаришкін Д.А., Мартинюк М.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький. – 2012. – № 3. – Т. 3. – С. 148–152.
6. Scheider W. Theory of the Frequency Dispersion of Electrode Polarization: Topology of Networks with Fractional Power Frequency Dependence / Scheider W. // Journal Phys. Chem. – 1975. – № 79. – P. 127–136.
7. Вдовін О.А. Математичні моделі об'єктів з надвеликими ємностями / Вдовін О.А., Мартинюк В.В., Бойко Ю.М. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 1999. – № 4. – Том 1. – С. 7–9.
8. Macdonald J.R. Impedance Spectroscopy. Emphasizing Solid Materials and Systems / Macdonald J.R. – New York, 1987. – P. 534.
9. Martynuk V. Frequency Domain Analysis for Electrochemical Supercapacitors / V. Martynuk, D. Makaryshkin, J. Boyko // Proceedings of the 15<sup>th</sup> ІМЕКО TC – 4 International Symposium on Novelty in Electrical Measurement and Instrumentations. – Iasi. – 2007 – Volume II. – P. 357–361.

Надійшла 14.11.2012 р.

Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.

УДК 621.317.73

Ю.М. БОЙКО

Хмельницький національний університет

## СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ З ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ У ЦИФРОВИХ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛАХ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

*Проведений аналіз особливостей обробки дискретних сигналів у супутникових системах зв'язку із врахуванням способів забезпечення завадостійкого приймання та мінімізації ефекту стрибків фази при демодуляції фазо-модульованих сигналів. Сформовано модель супутникового каналу передавання інформації із каскадним кодуванням. Розроблено розгорнуту схему цифрового супутникового каналу передавання інформації із зовнішнім, внутрішнім кодером та перемежовуванням. Дані рекомендації відносно виду та структури елементів каскадного кодера. Наведено аналітичні залежності та результати досліджень для опису ймовірності біткової помилки складових каскадного кодера. Засобами імітаційного моделювання **Matlab-Simulink** досліджено основні характеристики та особливості роботи супутникового каналу передавання інформації із каскадним кодуванням та квадратурною модуляцією.*

*Ключові слова: завадостійке кодування, каскадне кодування, сигнально-кодова конструкція.*

*Conducted analysis of features of treatment of discrete signals in satellite communication networks with the account of methods of providing of steady the hindrances acceptance and minimization of effect of jumps of phase at treatment a phase is modulation signals. The model of satellite channel of passed to information is formed with a cascade code. The unfolded chart of digital satellite channel of passed to information is developed with external, internal device of code and interleaver. These recommendations are in relation to a kind and structure of elements of cascade device of code. Analytical dependences, and results of researches, are resulted, and for description of probability of bit error of constituents of cascade device of code. By facilities of imitation design of Matlab-Simulink probed basic descriptions and features of work of satellite channel of passed to information with a cascade code and quadrature modulation.*

*Keywords: Antinoise coding, cascade coding, signal-code construction.*

### Вступ

Базовим напрямком підвищення достовірності передавання інформації в супутникових цифрових системах є процес додавання надлишковості до початкової інформації. Цей процес здійснюється завадостійким кодуванням. Основна задача кодера в цьому випадку полягає у виконанні операції завадостійкого кодування [1]. Оцінити достовірність передавання інформації в цифрових системах можна статичною величиною – ймовірністю помилки на біт (BER – Bit Error Rate) [2]. BER, в цьому випадку, є ймовірністю помилкового прийому при передачі одного біта інформації, усередненої для статистично великого об'єму переданої інформації. Супутникові системи передавання інформації мають свої