

Після перетворення вираз для комплексного коефіцієнту відбиття $R(f)$ приймає вигляд (9), з врахуванням якого розв'язуємо систему (3), розв'язки якої описуються виразами (4). Відносно діелектричну проникність другого та третього шарів $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2$, $\epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3$ знаходимо з формул (12), (13), а глибину другого шару знаходимо зі співвідношення (14).

Висновки

Таким чином, знаючи частотну залежність коефіцієнта відбиття у визначеному діапазоні частот, який включає в себе три послідовні частоти, можна за отриманими формулами визначити діелектричні параметри середовища $\epsilon'_2, \epsilon''_2, \epsilon'_3, \epsilon''_3$ та глибину проникнення радіохвиль h .

Даний метод може бути застосовано в діагностиці пухлинних захворювань, так як він не потребує хірургічного втручання і є повністю безпечним. В подальшому планується розробити математичну модель методу визначення розподілу температури в біологічній тканині, яка буде використовувати результати даного дослідження.

Література

1. Маречек С.В. Возможности оценки приповерхностной структуры биологической ткани по измерению коэффициента отражения на отдельных частотах СВЧ-диапазона / С.В. Маречек, В.М. Поляков // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2005. – № 11–12. – С. 4–11.
2. Юшкова О.В. Восстановление параметров слоистой среды / О.В. Юшкова // Изв. ВУЗов Радиофизика – 1995. – Т. 38. – № 7. – С. 648–652.
3. Лобач В.Т. Радиолокационные измерения параметров слоистой среды / В.Т. Лобач // Радиоэлектроника. – 2002. – № 3. – С. 71–77.
4. Резник А.Н. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ диагностики / А.Н. Резник, Н.В. Юрасова // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. № 1. – С. 90–104.
5. Диэлектрические свойства растворов глюкозы в миллиметровом диапазоне волн и проблема контроля ее содержания в крови / В.В. Мериакри, Е.Е. Чиграй, И.П. Никитин, М.П. Пархоменко // Крымико. – 2005. – С. 853–854.
6. Назарчук Л.Ю. Відновлення параметрів біологічних середовищ за функцією коефіцієнта відбиття Л.Ю. Назарчук // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 1(36). – С. 65–74.

Надійшла 16.5.2012 р.

Рецензент: д.т.н. Манойлов В.П.

УДК 621.317.73

В.В. МАРТИНЮК, Д.А. МАКАРИШКІН, М.В. МАРТИНЮК

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКЛИВОСТІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Наведені результати частотних залежностей комплексної діелектричної проникливості і тангенса кута діелектричних втрат суперконденсатора при повільних релаксаційних процесах.

Results of frequency dependences of complex dielectric permittivity and dielectric loss tangent of the supercapacitor are given at sluggish relaxation processes.

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

Вступ

Суперконденсатори, які відомі як конденсатори з подвійним електричним шаром, іоністори, ультраконденсатори, гібридні конденсатори та електрохімічні конденсатори – це відносно нове покоління електрохімічних приладів збереження енергії з точки зору широкого практичного використання. 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]. 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” в певних умовах поводить себе, як конденсатор, тобто при проходженні через таку систему електричного струму змінюється міжфазна різниця потенціалів φ . Якщо ці зміни є зворотними, тоді система може характеризуватися ємністю, яка визначається для ідеального конденсатора по формулі (1) [3].

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

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

В концентрованих електролітах заряд на міжфазній границі створений надлишком електронного (діркового) заряду на поверхні металевого електроду та надлишком іонного заряду зі сторони електроліту. Іони електроліту є дуже щільно притиснутими до поверхні електроду 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 сольватовані (органічний розчин), що збільшує їх радіус.

Оцінка відносної діелектричної проникливості в області подвійного електричного шару в системах “електронний провідник – іонний провідник” проводиться по формулі плоского конденсатора і дає величину $\varepsilon=4,5$, тоді як для води $\varepsilon=80$ (2) [3]:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{нм}} \cdot d}{\varepsilon_0} = \frac{0,2 \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{8,85 \cdot 10^{-12}} = 4,5. \quad (2)$$

де $C_{\text{нм}}$ – питома ємність подвійного електричного шару, d – відстань між зарядами в подвійному електричному шарі, яка залежить від концентрації іонів електроліту та розмірів іонів, ε_0 – постійна діелектрична проникливість.

Низька величина відносної діелектричної проникливості ε 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 $\Delta \varphi$. Опір переносу R в цьому випадку можна визначити за наступною формулою:

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

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

В реальних системах струм саморозряду $I_{\text{самор.}}$ 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 $10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$. 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 ($1-3 \text{ В}$) та низьким питомим опором можливо створення суперконденсаторів з питомою потужністю порядку 10 кВт/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).

Дослідження комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора

В конденсаторах з подвійним електричним шаром та пористими електродами присутні процеси внутрішньої релаксації. 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 відображати 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 $\tau=RC$ 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 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. У зв'язку з цим вивчення широкосмугової діелектричної та імпедансної спектроскопії для релаксаційних процесів в суперконденсаторах є актуальною задачею. Тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$ для релаксаційної поляризації з урахуванням наскрізної провідності визначається за наступною формулою:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega RC} = \frac{1}{\omega t} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (4)$$

де τ – час релаксації, ϵ'' – уявна складова комплексної діелектричної проникливості, ϵ' – дійсна частина комплексної діелектричної проникливості.

Розглянемо залежність тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$ від частоти 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 (рис. 1) [5].

В суперконденсаторах релаксаційні втрати спостерігаються за рахунок іонно-релаксаційної поляризації, яка відрізняється широким набором часів релаксацій, внаслідок чого спостерігається згладжування (розмиття) максимумів в залежностях $tg\delta$ від частоти прикладеного поля та температури. Потенціальні бар'єри які обмежують рух слабозв'язаних іонів, є неоднаковими внаслідок локальних неоднорідностей структури суперконденсатора. Тому релаксаційні втрати суперконденсатора визначаються широким набором часів релаксації. Чим більше набір часів релаксації, тим менша значення релаксаційного максимуму, оскільки зменшується число релаксаторів кожного типу. Графік залежності часу релаксації суперконденсатора від частоти показано на рис. 2.

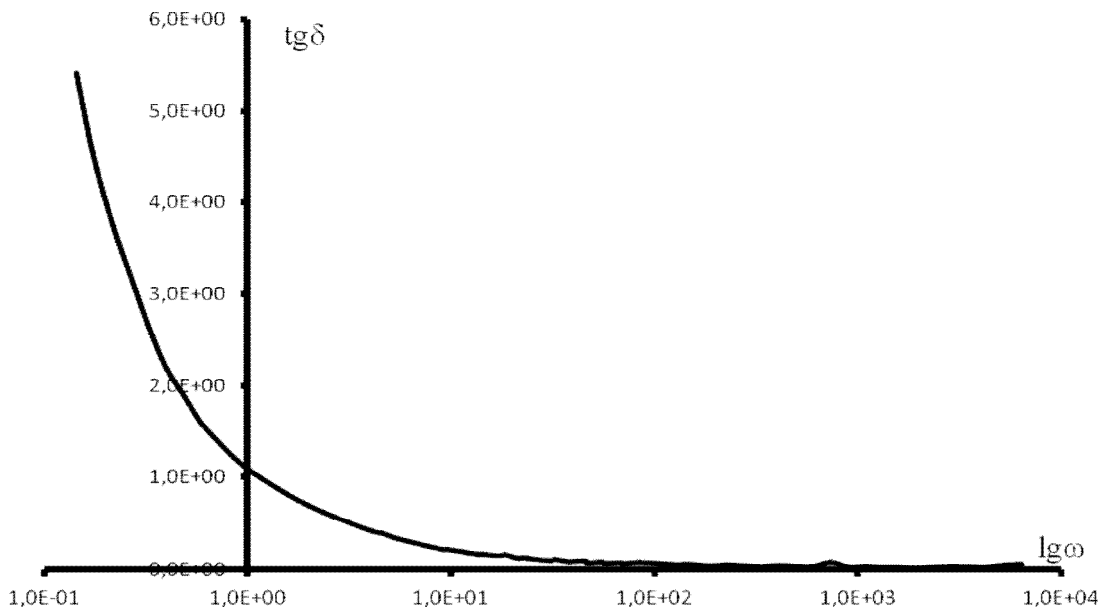


Рис. 1. Залежність тангенса кута діелектричних втрат суперконденсатора від частоти

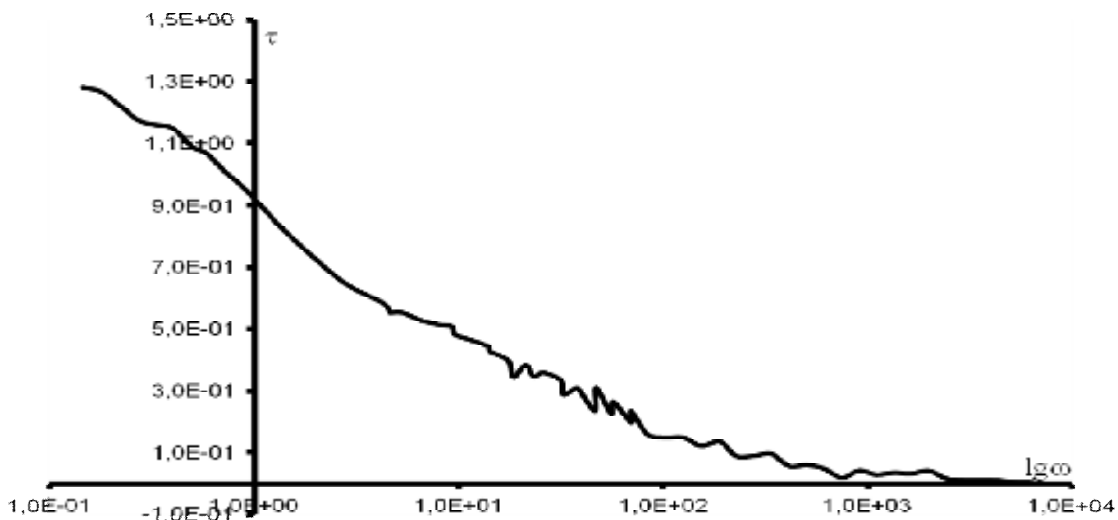


Рис. 2. Залежність часу релаксації суперконденсатора від частоти

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

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{cm.} - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (5)$$

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

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

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{cm.} - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (6)$$

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

З урахуванням формул (6) та (7) тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$ визначається за наступною формулою (8):

$$tg\delta = \frac{\omega\tau(\epsilon_{cm.} - \epsilon_{\infty})}{\epsilon_{cm.} + \epsilon_{\infty}\omega^2\tau^2} \quad (8)$$

Частотні залежності $\frac{\epsilon'}{\epsilon_{cm.}}$ та $\frac{\epsilon''}{\epsilon_{cm.}}$ для суперконденсатора в частотному діапазоні від 0, 0230014040 Гц до 1014, 40430 Гц представлені на рис. 3 та рис. 4.

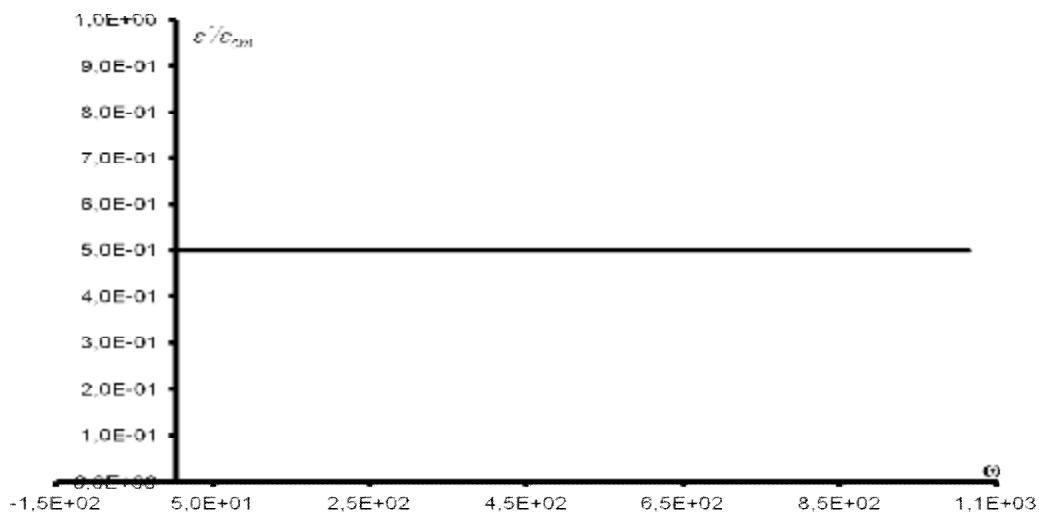


Рис. 3. Частотна залежність нормованої дійсної складової діелектричної проникливості суперконденсатора від частоти при релаксаційній дебайській дисперсії

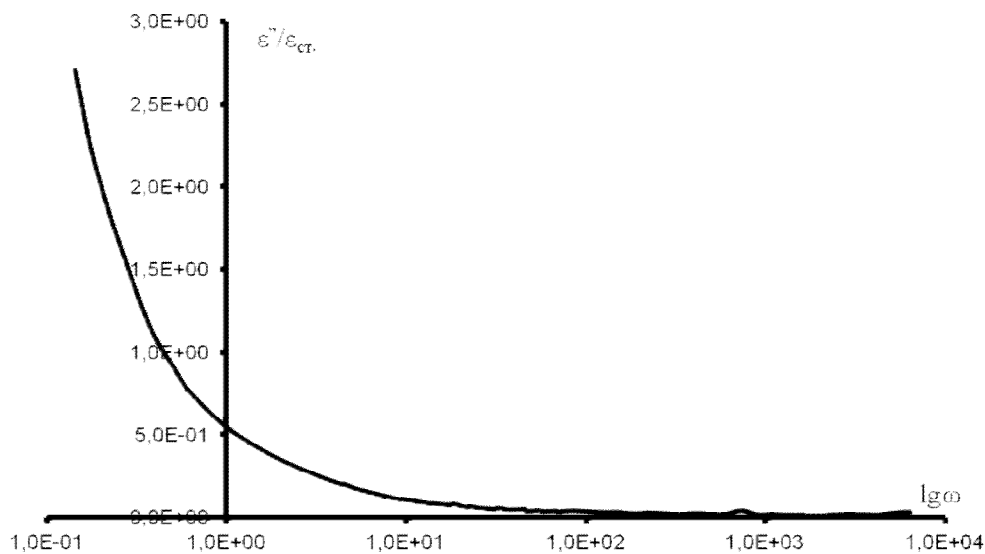


Рис. 4. Частотна залежність уявної складової діелектричної проникливості суперконденсатора від частоти при релаксаційній дебайській дисперсії

Аналіз графіка залежності дійсної частини комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора з полімерним електролітом в широкому частотному діапазоні частот показує, що дійсна частина в досліджуваному частотному діапазоні (від 0, 0230014040 Гц до 1014, 40430 Гц) не змінюється, і при цьому в 2 рази менше від значення відносної діелектричної проникливості при електростатичному полі ϵ_{cm} .

Аналіз зміни уявної складової комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора з полімерним електролітом при зростанні частоти показує, що уявна складова зменшується, 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: опір і ємність суперконденсатора зменшується на високих частотах.

Висновки

1. Встановлено, що релаксаційні втрати в суперконденсаторі спостерігаються за рахунок іонно-релаксаційної поляризації, яка відрізняється широким набором часів релаксації при наявності мікропористої структури електродів, що накопичують об'ємний заряд. При цьому потенціальні бар'єри які обмежують рух слабозв'язаних іонів, є неоднаковими внаслідок локальних неоднорідностей структури суперконденсатора

2. Комплексна діелектрична проникливість суперконденсатора визначається дебаєвськими процесами, які встановлюють її частотну залежність при повільних релаксаційних процесах.

3. Дійсна частина комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора з полімерним електролітом в частотному діапазоні від 0, 0230014040 Гц до 1014, 40430 Гц не змінюється, і при цьому в 2 рази менше від значення відносної діелектричної проникливості при електростатичному полі ϵ_{cm} .

4. Уявна складова комплексної діелектричної проникливості суперконденсатора з полімерним електролітом при зростанні частоти зменшується, це пояснюється тим, що питома провідність електроду набагато більша за питому провідність електроліту тоді на високих частотах поведінка суперконденсатора визначається ділянками пор, які є близькими до поверхні, а вклад більш глибоких ділянок є незначним: опір і ємність суперконденсатора зменшується на високих частотах.

Література

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 / В.В. Мартинюк, Д.А. Макаришкін // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. 2004. – №2. – С. 54–57.
3. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская, Е. Шувалов // Компоненты и технологии. 2005. – № 6.
4. Изотопов В.Ю. Моделирование та розрахунок робочих параметрів суперконденсатора / В.Ю. Изотопов, Д.Г. Громадський, Ю.А. Малетін // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 6.
5. Martynuk V. Frequency Domain Analysis for Electrochemical Supercapacitors / V. Martynuk, D. Makaryshkin, J. Boyko // Proceedings of the 15th IMEKO TC – 4 International Symposium on Novelties in Electrical Measurement and Instrumentations. – Iasi. – 2007 – Volume II. – P. 357 – 361.
6. Macdonald J.R. Impedance Spectroscopy. Emphasizing Solid Materials and Systems./ Macdonald J.R. – New York. – 1987. – P. 534.

Надійшла 12.5.2012 р.
Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.

УДК 621.372

І.В. ГУРМАН
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТА НА ОСНОВІ ТРИАД НЕНАПРАВЛЕНИХ ДАТЧИКІВ ДОВІЛЬНОЇ ТОПОЛОГІЇ

Разработанная модель позволяет получить точное аналитическое решение системы гиперболических уравнений определения координат объекта триадой датчиков произвольной топологии при отсутствии итерационных процедур в расчетах.

The developed model allows to get the exact analytical decision of the system of hyperbolic equalizations of determination of coordinates of object the triad of sensors of arbitrary topology in default of iteration procedures in calculations.

Ключові слова: визначення координат, сейсмолокаційні засоби охорони.

Вступ. Радіотехнічні системи сейсмічного контролю в даний час знаходять широке застосування для охорони цивільних та військових об'єктів. Пасивний характер роботи сейсмічних пристроїв, можливість