

УДК 621.317.73

В. В. Мартинюк, канд. техн. наук

КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ У НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

***Анотація.** Досліджено процес контролю електричних параметрів електрохімічних конденсаторів у нестационарному режимі після їх заряджання та розряджання великими струмами. Запропоновано узагальнену математичну модель електрохімічного конденсатора для нестационарного режиму контролю. Проведено експериментальні дослідження діаграми комплексного опору електрохімічного конденсатора у нестационарному режимі та виконано апроксимацію отриманих експериментальних даних із використанням запропонованої математичної моделі.*

***Ключові слова:** електрохімічний конденсатор, нестационарний режим контролю, електричні параметри*

V. V. Martynyuk, PhD.

ELECTROCHEMICAL CAPACITOR ELECTRICAL PARAMETERS CONTROL IN THE NONSTATIONARY MODE

***Abstract.** The control process was investigated for the electrochemical capacitor electrical parameters in the non-stationary mode after their charging and discharging with big currents. The general electrochemical capacitor mathematical model was proposed for the non-stationary control mode. The experimental researches of the electrochemical capacitor impedance were performed in the non-stationary mode and the approximation was performed with using of the proposed mathematical model.*

***Keywords:** electrochemical capacitor, non-stationary control mode, electrical parameters*

В. В. Мартынюк, канд. техн. наук

КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

***Аннотация.** Исследован процесс контроля электрических параметров электрохимических конденсаторов в нестационарном режиме после их зарядки и разрядки большими токами. Предложено обобщенную математическую модель электрохимического конденсатора для нестационарного режима контроля. Проведено экспериментальное исследование комплексного сопротивления электрохимического конденсатора в нестационарном режиме и выполнено аппроксимацию полученных экспериментальных данных с использованием предложенной математической модели.*

***Ключевые слова:** электрохимический конденсатор, нестационарный режим контроля, электрические параметры*

Постановка проблеми

Контроль електричних параметрів електрохімічних конденсаторів (ЕК) суттєво відрізняється від контролю електричних параметрів звичайних конденсаторів. Ця відмінність полягає у тому, що для звичайних конденсаторів процес контролю здійснюється у стаціонарному режимі, а для ЕК досягнення стаціонарного режиму контролю вимагає тривалого часу [1].

Тривалість перехідного процесу визначається сталою часу електричного кола. Особливістю ЕК є значення ємності у сотні та тисячі фарад, тому стала часу ЕК, а отже і тривалість перехідного процесу можуть досягати сотні та тисячі секунд. Тому використання нестационарного режиму є важливим для скорочення часу контролю.

Аналіз досліджень і публікацій

Проблема вимірювання та контролю електричних параметрів ЕК є надзвичайно важливою в процесі їх розробки, виробництва та експлуатації. До відомих методів вимірювання електричних параметрів ЕК належать зарядно-розрядні методи, методи імпедансної спектроскопії та методи нелінійної параметризації [2].

У процесі контролю електричних параметрів ЕК перераховані методи вимірювання застосовуються у стаціонарному режимі, досягнення якого потребує багато часу. Якщо стаціонарний режим контролю порушується, то в процесі вимірювання їх комплексного опору одразу після заряджання ЕК великим струмом спостерігається ефект від'ємного активного опору ЕК [3]. У цьому випадку імпедансні криві загинаються вліво, а активний опір ЕК в діапазоні ультранизь-

© Мартинюк В.В., 2012

ких частот набуває від'ємних значень (рис.1).

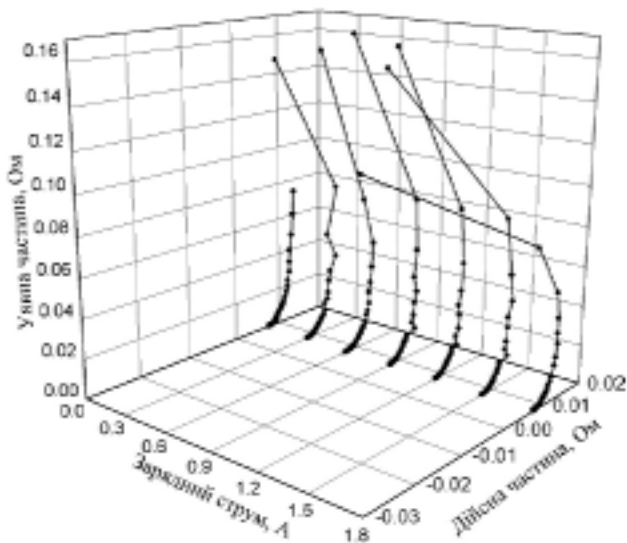


Рис. 1. Спотворення діаграми комплексного опору ЕК після його заряджання

Аналіз імпедансних кривих на рис. 1 показує, що зі збільшенням зарядного струму ЕК зростає спотворення імпедансних кривих (їх загинання вліво), що свідчить про проведення вимірювання параметрів ЕК під час перехідного процесу, а не в усталеному режимі вимірювання.

Аналогічне явище спостерігається, якщо досліджуваний ЕК різко розрядити великим струмом і одразу провести вимірювання комплексного опору в діапазоні вимірювальних частот від 1МГц до 1кГц (рис. 2).

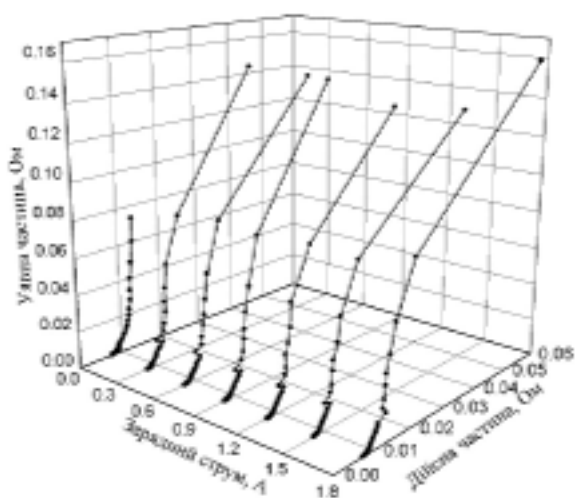


Рис. 2. Спотворення діаграми комплексного опору ЕК після його розряджання

У цьому випадку також спостерігається загинання імпедансних кривих, але уже в праву сторону, причому чим більший зарядний струм ЕК, тим більший вигин кривої. Це також свідчить про проведення вимірювання комплексного опору ЕК під час перехідного процесу, а не в усталеному режимі.

Виклад основного матеріалу дослідження

У технологічному процесі виробництва ЕК для скорочення часу контроль параметрів ЕК необхідно проводити у нестационарному режимі, коли в ЕК триває перехідний процес після його швидкого заряджання або розряджання великим струмом (рис. 3).

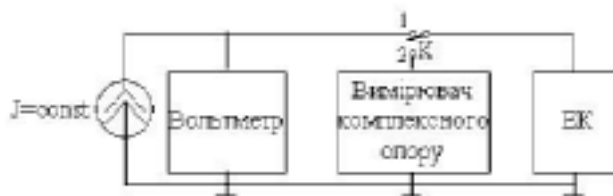


Рис. 3. Схема контролю ЕК у нестационарному режимі

Розглянемо перехідний процес заряджання еквівалентної схеми заміщення ЕК у вигляді першої форми Кауера, як зображено на рис.4.

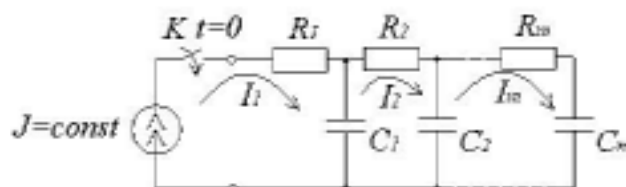


Рис. 4. Еквівалентна схема заміщення ЕК у вигляді першої форми Кауера в процесі заряджання

В наслідок перерозподілу заряду в ЕК процес відновлення напруги на його виводах описується експоненціальним законом

$$u_{\epsilon}(t) = U_{\delta} e^{-\frac{t}{\tau_{\epsilon}}} + U_{\epsilon}, \quad (1)$$

де U_{ϵ} – відновлене значення напруги; τ_{ϵ} – стала часу відновлення напруги; U_{δ} – додаткове значення напруги ($U_{зар} = U_{\epsilon} + U_{\delta}$); $U_{зар}$ – зарядне значення напруги ЕК.

Якщо в процесі відновлення напруги на ЕК подати вимірювальний гармонічний сигнал $u(t) = U_m \cos \omega_0 t$, то загальна напруга на виводах ЕК описується

$$u_{EK}(t) = U_m \cos \omega_0 t + U_\delta e^{-\frac{t}{\tau_\delta}} + U_\epsilon. \quad (2)$$

Графік загальної напруги на виводах ЕК при вимірюванні комплексного опору ЕК після його швидкого заряджання великим струмом зображено на рис. 5.

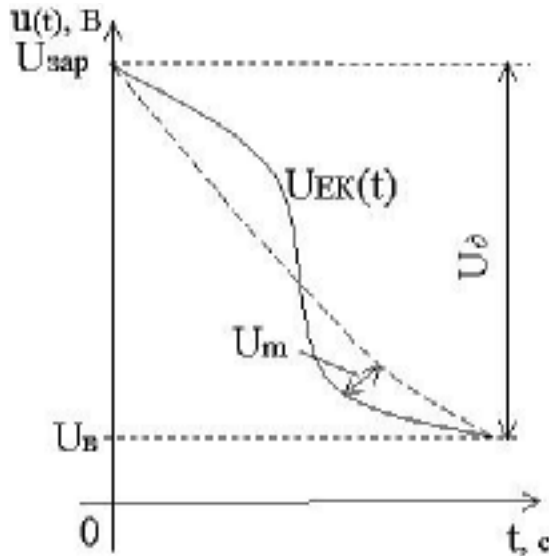


Рис. 5. Графік загальної напруги на виводах ЕК при вимірюванні комплексного опору ЕК після швидкого заряджання великим струмом

За аналогією можна записати вираз для відновлення напруги на ЕК після його швидкого розряджу великим струмом

$$u_\epsilon(t) = U_\epsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_\epsilon}} \right). \quad (3)$$

Якщо в процесі відновлення напруги на ЕК подати вимірювальний гармонічний сигнал $u(t) = U_m \cos(\omega_0 t)$, то загальна напруга на виводах ЕК

$$u_{EK}(t) = U_m \cos \omega_0 t + U_\epsilon - U_\epsilon e^{-\frac{t}{\tau_\epsilon}}. \quad (4)$$

Графік загальної напруги на виводах ЕК при вимірюванні комплексного опору ЕК після його швидкого розряджання великим струмом зображено на рис. 6.

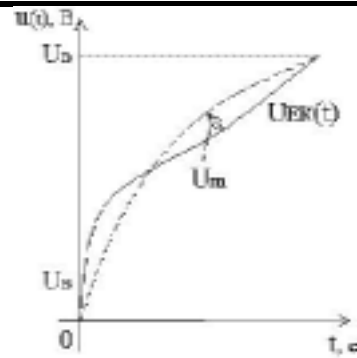


Рис. 6. Графік загальної напруги на виводах ЕК при вимірюванні комплексного опору ЕК після швидкого розряджання великим струмом

Розглянемо узагальнену діаграму комплексного опору ЕК для стаціонарного та двох нестационарних режимів контролю: після заряджання ЕК великим струмом та після його розряджання великим струмом (рис. 7).

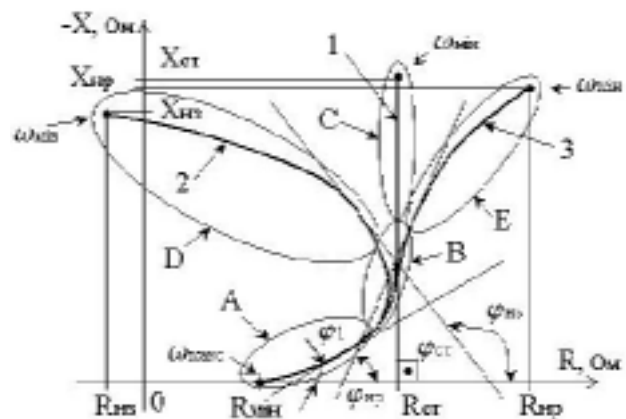


Рис. 7. Узагальнена діаграма комплексного опору ЕК у стаціонарному та нестационарному режимах:

1 – у стаціонарному режимі; 2 – у нестационарному режимі після заряджання ЕК; 3 – у нестационарному режимі після розряджу ЕК

На кривих комплексного опору ЕК (рис. 7) виділено ділянки. А і В – відповідно верхніх ($\varphi_1 < 90^\circ, \alpha < 1$) і середніх ($\varphi \approx 90^\circ, \beta \approx 1$) частот; ділянка С – нижніх частот стаціонарного режиму ($\varphi_{ст} = 90^\circ, \gamma = 1$); та ділянки D і E нижніх частот нестационарного режиму відповідно після заряджання ($\varphi_{н.з} > 90^\circ, \gamma > 2$) і після розряджання ($\varphi_{н.р} > 90^\circ, \gamma > 1$).

Проведені експериментальні дослідження ЕК на змінному струмі показують, що його математичною моделлю комплексного опору у стаціонарному режимі є модель, яка

використовує дробово–інтегруючий елемент [4 – 5].

Узагальненням такої математичної моделі ЕК для нестационарного режиму є використання трьох дробово–інтегруючих елементів у виразі комплексного опору ЕК у нестационарному режимі:

$$Z(j\omega) = R_{\min} + \frac{1}{(j\omega)^\alpha \cdot C_B} + \frac{1}{(j\omega)^\beta \cdot C_C} + \frac{1}{(j\omega)^\gamma \cdot C_H}, \quad (5)$$

де R_{\min} – мінімальний активний опір ЕК на максимальній частоті контролю ω_{\max} ; α і C_B – показник степеня дробового порядку і ємність на верхніх частотах контролю; β і C_C – показник степеня дробового порядку і ємність в діапазоні середніх частот контролю; γ і C_H – показник степеня дробового порядку і ємність на нижніх частотах контролю.

Узагальненій математичній моделі ЕК (5) для нестационарного режиму контролю відповідає узагальнена еквівалентна схема заміщення ЕК наведена на рис. 8.

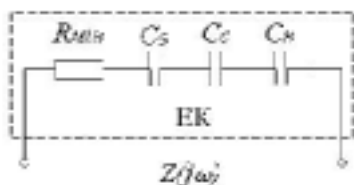


Рис. 8. Узагальнена еквівалентна схема заміщення ЕК для нестационарного режиму

В процесі контролю електричних параметрів ЕК на великих зарядних або розрядних струмах не відбувається повне зарядження або повне розрядження ЕК при досягненні напруги на його виводах заданого значення.

Це означає, що перехідний процес ще не закінчився, а вже змінюються зарядний або розрядний струм. В результаті такого порушення принципу стаціонарності режиму контролю виникають додаткові похибки.

Для моделювання перехідних процесів ЕК необхідно визначити його імпульсну $h(t)$ та перехідну $G(t)$ характеристики у нестационарному режимі. Перехід від комплексного опору (5) ЕК до його імпульсної характеристики у нестационарному режимі можна здійснити, використовуючи обернене перетворення Лапласа.

Для цього спочатку запишемо вираз операторного опору ЕК у нестационарному режимі, замінивши у виразі (5) $j\omega$ на p :

$$Z(p) = R_{\min} + \frac{1}{p^\alpha \cdot C_B} + \frac{1}{p^\beta \cdot C_C} + \frac{1}{p^\gamma \cdot C_H}. \quad (6)$$

Тоді застосуємо до виразу (6) обернене перетворення Лапласа:

$$h(t) = \mathbf{L}^{-1}[Z(p)]. \quad (7)$$

В результаті отримаємо вираз імпульсної характеристики ЕК у нестационарному режимі:

$$z(t) = R_{\min} \delta(t) + \frac{t^\alpha}{C_B \Gamma(1+\alpha)} \sigma(t) + \frac{t^\beta}{C_C \Gamma(1+\beta)} \sigma(t) + \frac{t^\gamma}{C_H \Gamma(1+\gamma)} \sigma(t), \quad (8)$$

де $\delta(t)$ – дельта функція Дірака; $\sigma(t)$ – одинична функція Хевісайд; $\Gamma(\bullet)$ – гама функція.

Перехідну характеристику ЕК у нестационарному режимі можна знайти, проінтегрувавши його імпульсну характеристику (8)

$$G(t) = \int h(t) dt = R_{\min} + \frac{t^\alpha}{C_B \Gamma(1+\alpha)} + \frac{t^\beta}{C_C \Gamma(1+\beta)} + \frac{t^\gamma}{C_H \Gamma(1+\gamma)}. \quad (9)$$

Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження комплексного опору були виконані для ЕК південнокорейської компанії NESS Capacitor Corporation типу HE0120C-0027A номінальною ємністю 120 Ф та робочою напругою 2,3 В. Контроль проводився з використанням імпедансного спектрометра BPS1000FL південнокорейської компанії Kumho Chemical Laboratories.

Контроль комплексного опору ЕК проводився в діапазоні частот від $f_{\min} = 1 \text{ мГц}$ до $f_{\max} = 1 \text{ кГц}$. Амплітуда напруги вимірювального синусоїдального сигналу становила 5 мВ.

Апроксимація отриманих експериментальних даних проводилась із використанням виразу (5) та програми апроксимації комплексного опору CNLS [4], яка використовує метод найменших квадратів. Експериментальна діаграма комплексного опору ЕК після його зарядження та її апроксимація з використанням узагальненої математичної моделі (5) зображена на рис. 9.

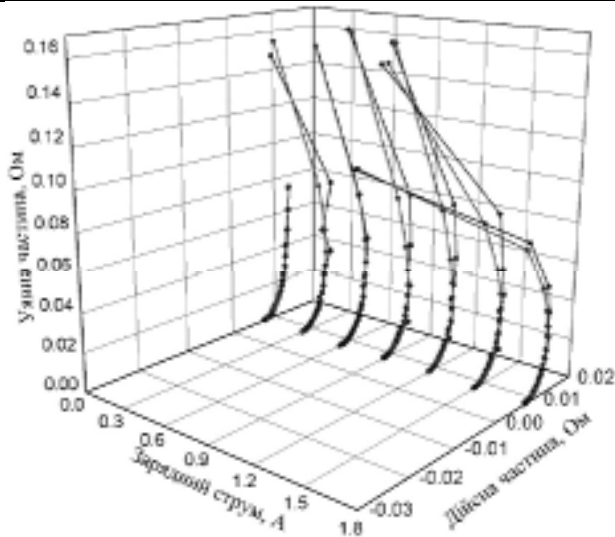


Рис. 9. Експериментальна діаграма комплексного опору ЕК після його заряджання та її апроксимація

В результаті апроксимації отримано значення дробових коефіцієнтів в залежності від зарядного струму (рис. 10).

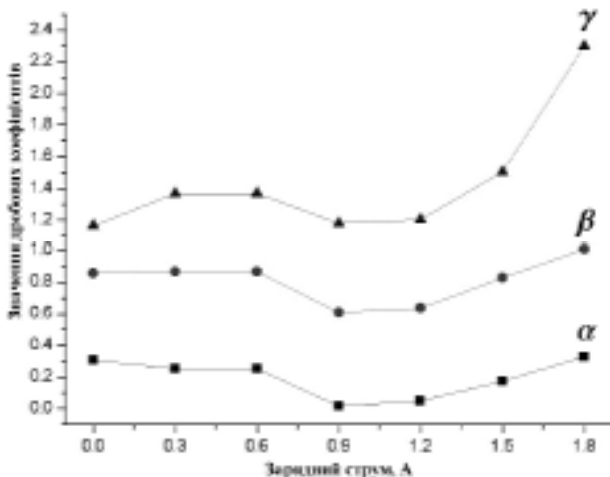


Рис. 10. Графік залежності дробових коефіцієнтів α , β , γ від зарядного струму

Аналіз отриманих графіків (рис. 10) показує, що при малих значеннях зарядного струму (до 1,2 А) спостерігається незначна зміна дробових коефіцієнтів. При зростанні зарядного струму більше 1,5 А дробові коефіцієнти збільшуються.

Експериментальна діаграма комплексного опору ЕК після його розряджання та її апроксимація із використанням узагальненої математичної моделі (5) зображена на рис. 11.

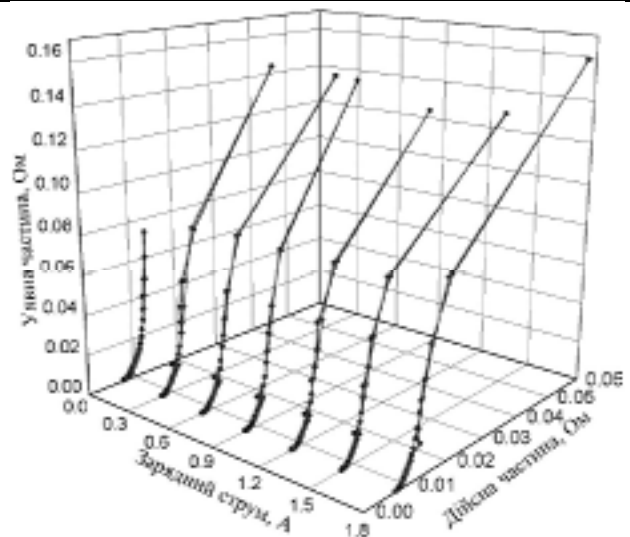


Рис. 11. Експериментальна діаграма комплексного опору ЕК після його розряджання та її апроксимація

В результаті апроксимації отримано значення дробових коефіцієнтів в залежності від зарядного струму (рис. 12).

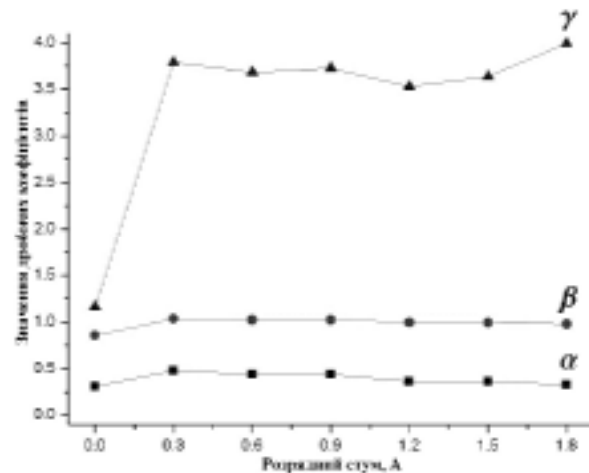


Рис. 12. Графік залежності дробових коефіцієнтів α , β , γ від розрядного струму

Аналіз отриманих графіків (рис. 12) показує, що для дробових коефіцієнтів α та β спостерігається незначна залежність від розрядного струму.

На відміну від попередніх коефіцієнтів дробовий коефіцієнт γ суттєво залежить від розрядного струму. Цей коефіцієнт різко зростає при зміні розрядного струму від 0 до 0,3 А. Далі спостерігається стабілізація значення γ до струму 1,5 А та його подальше зростання при збільшенні розрядного струму.

Висновки

1. Контроль електричних параметрів ЕК у нестационарному режимі дає змогу значно скоротити загальний час проведення контролю електричних параметрів ЕК, що є дуже важливим у технологічному процесі їх виробництва.

2. У процесі контролю електричних параметрів ЕК у нестационарному режимі виникають додаткові похибки в діапазоні ультранизких частот, коли період зондуючого сигналу близький до сталої часу ЕК.

3. Розроблено узагальнену математичну модель ЕК для нестационарного режиму контролю, яка базується на трьох показниках степенів дробових порядків для нижніх, середніх та верхніх частот та відповідних ємностей для цих частотних діапазонів.

4. Визначено вирази імпульсної $h(t)$ та перехідної $G(t)$ характеристик ЕК у нестационарному режимі.

5. Узагальнена математична модель ЕК для нестационарного режиму контролю добре узгоджується із експериментальними даними та дозволяє проводити апроксимацію експериментальної діаграми комплексного опору ЕК після їх заряджання та розряджання.

6. Отримані в результаті апроксимації значення дробових коефіцієнтів в залежності від зарядних та розрядних струмів показують, що суттєва їх зміна спостерігається для струмів більше 1,5 А.

Список використаної літератури

1. Мартинюк, В.В. Модель суперконденсатора с дробно-интегрирующим элементом и метод идентификации ее параметров [Текст] / В. В. Мартинюк, В. В. Бушер // Приводная техника. – М. : НПФ «ОБРИС», 2011. – № 5(93). – С. 27 – 33.

2. Мартинюк, В. В. Швидкий метод вимірювання електричних параметрів електрохімічних конденсаторів / В. В. Мартинюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка. 2012. – № 05 (81). – С.113 – 118.

3. Мартинюк, В. В. Ефект від'ємного активного опору при вимірюванні імпедансних спектрів електрохімічних суперконденсаторів / В. В. Мартинюк // Вимірювальна та об-

числювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 1. – С. 65 – 69.

4. Macdonald, J. R. Complex Nonlinear Least Squares (CNLS) Immittance, Inversion, and Simulation Fitting Program: Manual / J. R. Macdonald. – New York: Solartron Group Limited, – 2005. – 168 p.

Отримано 28.09.2012

References

1. Martyniuk V.V., (2011), Supercapacitor model with fractional integrating element and the method of identification of parameters / V. V. Martyniuk, V.V. Busher // *Drive Technology*. – Moscow : – No. 5 (93). – Pp. 27 – 33 [in Russian].

2. Martyniuk V.V., (2012), Fast method of measuring the electric parameters of electrochemical capacitors / V. V. Martyniuk // *Electrotechnic and computer systems*. – Kiev: *Tehnika*. – No. 05 (81). – Pp. 113 – 118 [in Russian].

3. Martyniuk V., (2003), The effect of negative active resistance when measured impedance spectra of electrochemical supercapacitors / V. Martyniuk // *Measuring and computing in industrial processes*. – No. 1. – Pp. 65 – 69 [in Ukrainian].

4. Macdonald J.R., (2005), Complex Nonlinear Least Squares (CNLS) Immittance, Inversion, and Simulation Fitting Program: Manual / J. R. Macdonald. – New York: *Solartron Group Limited*. – 168 p. [in English].



Мартинюк
Валерій Володимирович,
канд. техн. наук Хмельницького нац. ун-ту
тел. (0382)-222043