

УДК 644.1+004.9:517.9

**В. В. Бушер**, доктор техн. наук,  
**В. Я. Ярмолович**

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРЦИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

***Аннотация.** В работе проведен анализ процесса и результатов измерения параметров суперконденсаторов в различных режимах, учитывающий их нелинейные зависимости от тока и напряжения. Предложен метод ускоренного тестирования батарей суперконденсаторов, облегчающий разработчикам и потребителям идентификацию их параметров, основанный на чередовании процессов заряда и разряда суперконденсаторов с паузами стабилизации ступенчато изменяющегося напряжения.*

***Ключевые слова:** суперконденсатор, дробно-дифференциальные уравнения, параметры суперконденсаторов, тестирование, идентификация, система рекуперции кинетической энергии.*

**В. В. Бушер**, доктор техн. наук,  
**В. Я. Ярмолович**

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРЦІЇ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

***Анотація.** У роботі проведено аналіз процесу та результатів вимірювання параметрів суперконденсаторів в різних режимах, враховуючи їх нелінійні залежності від струму і напруги. Запропоновано метод прискореного тестування батарей суперконденсаторів, що полегшує розробникам і споживачам ідентифікацію їх параметрів, заснований на чергуванні процесів заряду і розряду суперконденсаторів з паузами стабілізації східчасто змінюваної напруги.*

***Ключові слова:** суперконденсатор, дрібно-диференціальні рівняння, параметри суперконденсаторів, тестування, ідентифікація, система рекуперації кінетичної енергії.*

**V. V. Buser, ScD,**  
**V. Y. Yarmolovich**

### THE IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF SUPERCAPACITOR PARAMETERS IDENTIFICATION FOR KINETIC ENERGY RECOVERY SYSTEMS

***Abstract.** The article describes the analysis of the process and results of the supercapacitor parameters measurement in various modes taking into account their non-linear dependence on current and voltage. The method of accelerated testing of supercapacitors batteries is offered, which enables developers and users to easily identify their parameters. It is based on the alternation of charge and discharge processes of supercapacitors with the pauses of stabilization of step-changing voltage.*

***Keywords:** supercapacitor, fractional differential equations, parameters of supercapacitors, testing, identification, kinetic energy recovery system.*

**Введение.** В настоящее время все более важным становится использование во многих областях техники электрохимических конденсаторов, называемых также суперконденсаторами (СК). Технологии их создания стремительно развиваются, но пока они остаются низковольтными устройствами. В системах бортового питания электромобилей необходимы высоковольтные конденсаторы, получаемые путем последовательного соединения нескольких десятков СК в батарею.

Для устранения перенапряжений отдельных СК при заряде/разряде их параметры должны быть идентичны. Поэтому возникает проблема идентификации пара-

метров СК, которая не может быть выполнена также, как для обычных конденсаторов.

Причина этого кроется в принципе работы суперконденсаторов – накопление заряда происходит в так называемом двойном электрическом слое (ДЭС), характеризующимся диффузионными процессами, которые в динамических режимах описываются дробно-дифференциальными уравнениями [1,2]. Именно этот слой может оказывать существенное влияние на процесс измерения параметров в импульсном режиме [3]. Также известно, что параметры СК могут изменяться в процессе эксплуатации, однако причины таких изменений детально не исследо-

ванны.

При использовании готовых батарей в электромобилях также возникает необходимость идентификации параметров батарей, так как для повышения коэффициента полезного действия систем рекуперации кинетической энергии требуется оптимизация совместной работы суперконденсаторов и аккумуляторов, основанная на достоверной информации об их параметрах, основным из которых является емкость СК [4].

**Цель работы** – создание метода идентификации параметров суперконденсаторов в различных режимах, основанного на анализе нелинейных зависимостей емкости суперконденсаторов от напряжения и тока заряда/разряда, который позволит сократить затраты времени разработчикам и потребителям на тестирование батарей СК.

**Материалы исследований.** Работа базируется на модели СК, состоящей из трех последовательно соединенных элементов: традиционных – емкости  $C$  и внутреннего сопротивления  $R$ , а также дробно-интегрирующего звена с порядком интегрирования  $\mu$ , в общем случае находящимся в пределах  $0 < \mu < 1$ . Модель характеризуется группами параметров при заряде и разряде  $R_{\pm}, C_{\pm}, B_{\pm}, \mu_{\pm}$  [5, 6]. Зависимость напряжения на клеммах СК от тока заряда/разряда в такой модели вычисляется в операторной форме по следующему уравнению:

$$U(p) = \left( R + \frac{1}{Cp} + \frac{1}{Bp^{\mu}} \right) I(p). \quad (1)$$

Известный метод тестирования параметров СК предполагает заряд СК постоянным по величине током от минимального напряжения до максимального, затем стабилизацию напряжения до тех пор, пока величина тока не станет близкой нулю (рис. 1). Далее СК разряжают таким же по величине током и вновь ожидают снижения тока при стабилизации напряжения. В ходе тестирования используют несколько циклов с различными величинами тока. Этот метод тестирования позволяет получить зависимости параметров СК от тока [7, 8].

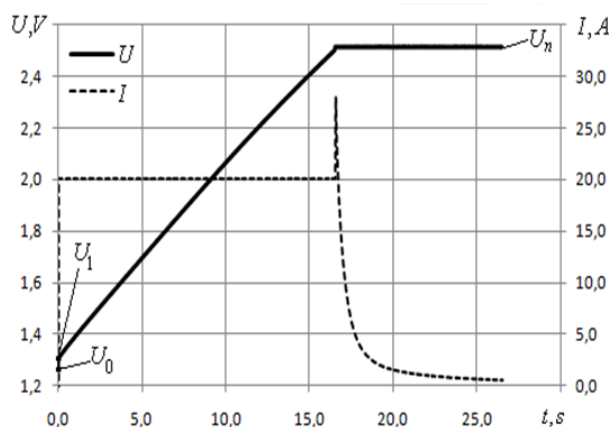


Рис. 1. Тест суперконденсатора

Однако известно, что параметры СК нелинейно зависят как от тока, так и от напряжения. Поэтому для более точной идентификации параметров СК были проведены экспериментальные исследования СК с паспортной емкостью 3000 F, в ходе которых повторялись циклы заряда от управляемого источника тока и стабилизации напряжения с шагом 0,1 V от минимального  $U_{\min}$  до максимального  $U_{\max}$ , а затем разряда и стабилизации с таким же шагом (рис. 2). Такие режимы соответствуют работе СК в составе систем рекуперации кинетической энергии в автономных электротранспортных средствах. Серии опытов состояли из 10 циклов со ступенчатым изменением тока заряда/разряда от 20 до 100 А.

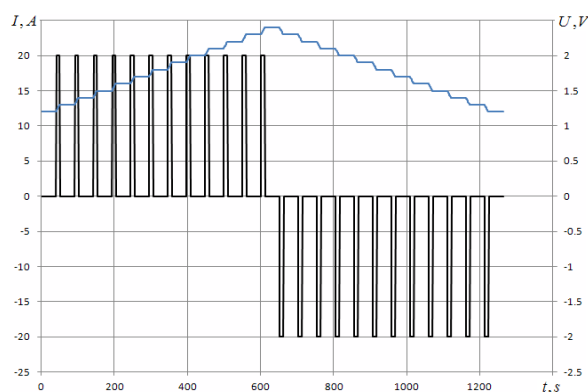


Рис. 2. Тест суперконденсатора со ступенчатым изменением напряжения

Запись результатов измерения тока и напряжения с точностью 0,01 А и 0,001V осуществлялась с шагом 0,01 с. Высокая точ-

ность измерения позволила по полученным данным  $U_i, I_i, i \in [0, n]$  при скачке тока в момент времени  $t = i\Delta t$  ( $i = 1...2$ ) и по окончании процессов заряда и разряда, когда ток близок к нулю и диффузионные процессы в СК практически завершены, идентифицировать активное сопротивление и емкость СК для каждого режима:

$$C = \frac{\int_0^t I(t)dt}{\Delta U} \approx \frac{\sum_{i=k}^n I_i \Delta t}{U_n - U_k}, \quad (2)$$

$$R = \frac{U_k - U_0 - \sum_{i=1}^k \frac{I_i \Delta t}{C}}{I_k - I_0},$$

где  $k = 1...2$  соответствует количеству интервалов, в течение которых фактически происходит скачок тока (см. рис. 1). После расчета  $C, R$  осуществляется процесс идентификации параметров дробно-интегрирующей составляющей, который детально описан в [3–5]. Эта группа параметров влияет на энергетическую эффективность систем рекуперации кинетической энергии, однако не используется при подборе СК [10].

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости  $C = f(U)$  при заряде и разряде, показанные на рис. 3, 4, и  $C = f(I)$  для различных значений напряжений (рис. 5). Как видно из аппроксимации экспериментальных значений, все кривые с достаточной точностью описываются полиномами второго порядка.

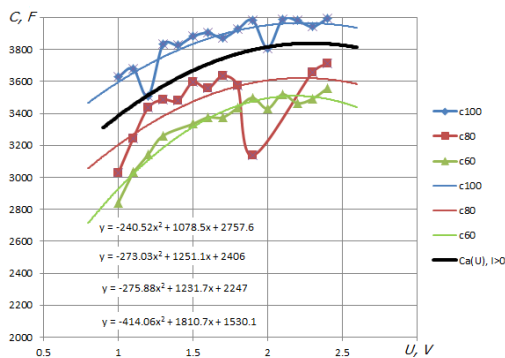


Рис 3. Зависимости  $C = f(U)$  при заряде СК

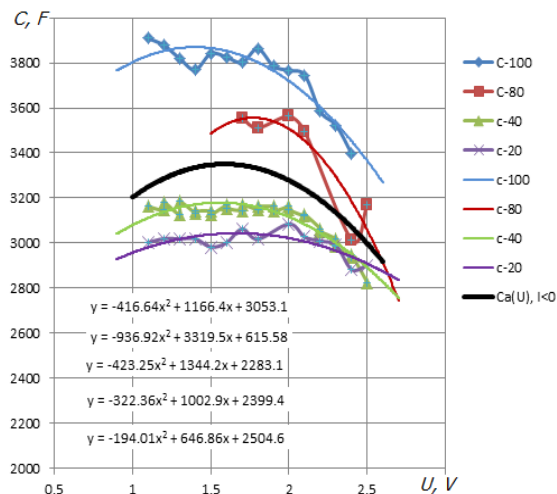


Рис. 4. Зависимости  $C = f(U)$  при разряде СК

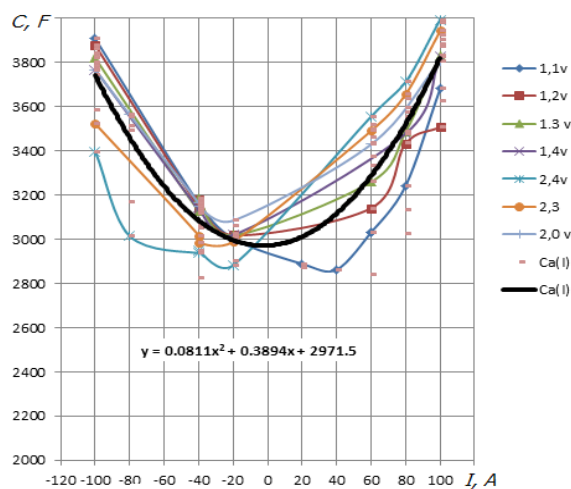


Рис. 5. Зависимости  $C = f(I)$  при заряде и разряде СК

Следовательно, для их построения достаточно знать координаты трех точек, что, позволяет вместо проведения циклов заряда и разряда различными токами от 1 до 2,5 V с шагом 0,1 V, выполнить трехступенчатое изменение напряжения от минимального до максимального, чередуя циклы заряда/разряда. Для полного цикла исследования токами от 20 до 100 А с шагом 20 А диаграммы токов и напряжений показаны на рис. 7. По оси абсцисс отмечено относительное время  $t/C$ .

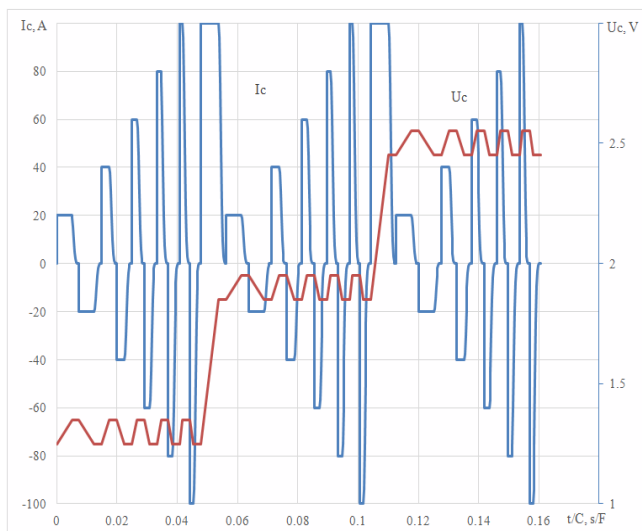


Рис. 7. Модифицированный метод тестирования суперконденсаторов

По сравнению с базовым вариантом исследования (см. рис. 2) продолжительность тестирования сокращается в 2,5...3 раза.

**Выводы.** В работе проведен анализ базового метода тестирования суперконденсаторов, включающего в себя процессы заряда и разряда СК от минимального до максимального напряжения ступенчато изменяющимся током, чередующиеся с паузами стабилизации напряжения. Предложено дополнить метод ступенчатым изменением напряжения суперконденсатора. Это позволило получить зависимости параметров суперконденсатора как от тока, так и от напряжения, и выявить параболический характер этих зависимостей. С учетом полученных результатов разработан метод, сочетающий процессы заряда и разряда при трех уровнях напряжения суперконденсатора, который характеризуется сокращенной в 2,5...3 раза длительностью процесса тестирования.

Предложенный метод может быть использован не только для тестирования отдельных суперконденсаторов, но и для определения фактических параметров их батарей в составе систем рекуперации кинетической энергии электромобилей. Повышение коэффициента полезного действия этих систем и, как следствие, увеличение пробега электромобиля, невозможно без оптимизации взаимодействия суперконденсаторов и аккумуляторов, основанной на точном знании параметров отдельных компонентов.

### Список использованной литературы:

1. Dzielinski A. Ultracapacitor Modelling and Control Using Discrete Fractional Order State-Space Model [Text] / Dzielinski A., Sierociuk D. // Acta Montanistica Slovaca. – 2008. – Vol. 13, №1. – P.136–145.
2. Quintana J. J. Identification of the Fractional Impedance of Ultracapacitors [Text] / Quintana J. J., Ramos A., Nuez I. // Proceedings of the 2nd IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications. – Porto, Portugal. – 2006. – P.127–136.
3. Busher V. Modeling and Identification of Systems with Fractional Order Integral and Differential [Text] / V. Busher, V. Yarmolovich // Electrotechnical and Computer Systems. – Odessa : Nauka i Technika publ., 2014. – №15(91). – P. 52–56.  
<http://etks.opu.ua/core/getfile.php?id=512>  
 DOI 10.15276/etks.15.91.2014.9.
4. Busher V. V. Control of charge of supercapacitor's battery as device with diffusion properties [Text] / V. V. Busher // Computational Problems of Electrical Engineering – Lviv: «Lvivska politehnika», 2012. – Vol. 2, No1. – P.1–5.
5. Busher V. V. Modeling of supercapacitors with fractionally integrated section in SIMULINK [Text] / V. V. Busher, V. V. Martynyuk, E. V. Naydenko, P. E. Khristo. // Journal Electrotechnic and computer systems. – Kiev: Technica, Ukraine. – 2011, No 04(80) – P.89–92.
6. Мартынюк В. В. Модель суперконденсатора с дробно-интегрирующим элементом и метод идентификации ее параметров [Текст] / В. В. Мартынюк, В. В. Бушер // Приводная техника. – М. : НПФ «ОБРИС», 2011. – №5(93). – С.27–33.
7. Busher V. Supercapacitors in kinetic energy recovery system of electric cars [El. resource] / V. Busher, V. Sitnikov // CD-ROM 80 min / 700 Mb, – ICREPS-13, – 2.pdf. – 5 p.
8. Lajnef W. Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources [Text] / Lajnef W., Vinassa J.-M., Briat O., Azzopardi S., Woirgard E. // Journal of Power Sources. – 2007. – V.168. – P.553–560.

9. Учайкин В. В. Дробно-дифференциальная модель динамической памяти [Текст] / В. В. Учайкин // Математика и механика, 2001. – С.1–14.

10. Бушер В. В. Энергетические показатели и параметры суперконденсаторов в динамических режимах / В. В. Бушер, В. В. Мартынюк, Е. В. Найдено // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2012 – №1. – С.44–50.

Получено 6.10.2015

### References

1. Dzielinski A. Ultracapacitor Modelling and Control Using Discrete Fractional Order State-Space Model, (2008), *Acta Montanistica Slovaca.*, Vol. 13, №1, pp.136–145 (In English).

2. Quintana J. J. Identification of the Fractional Impedance of Ultracapacitors, (2006), *Proceedings of the 2nd IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications*, Porto, Portugal, pp.127–136 (In English).

3. Busher V. V., and Yarmolovich V. J. Modeling and Identification of Systems with Fractional Order Integral and Differential, (2014), *Electrotechnical and Computer Systems Nauka i Technika publ.*, Odessa, No.15(91), pp. 52–56 (In English).

<http://etks.opu.ua/core/getfile.php?id=512> DOI 10.15276/etks. 15.91.2014.9.

4. Busher V. V. Control of charge of supercapacitor's battery as device with diffusion properties, (2012), *Computational Problems of Electrical Engineering "Lvivska politehnika"*, Lviv, Vol. 2, No1, pp.1–5 (In English).

5. Busher V. V. Modeling of supercapacitors with fractionally integrated section in SIMULINK, (2011), *Journal Electro-technic and computer systems Technica*, Kiev, Ukraine, No 04(80), pp.89–92 (In English).

6. Martynyuk V. V., and Busher V. V. Model superkondensatora s drobno-

integriruyushchim elementom i metod identifikacii ee parametrov, [Model of supercapacitor with fractionally integrating element and a method of identifying its parameters], (2011), *Privodnaya tekhnika "OBRIS"*, No. 15(93), pp.27–33 (In Russian).

7. Busher V. V., and Sitnikov V. S. Supercapacitors in kinetic energy recovery system of electric cars, (2013), *CD-ROM 80 min / 700 Mb, – ICREPS-13, – 2.pdf.* – 5 p (In English).

8. Lajnef W. Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources, (2007), *Journal of Power Sources*, V.168, pp.553–560 (In English).

9. Uchaikin V. V. Drobno-differentsyal'naya model' dynamycheskoy pamyaty, [Fractional differential model of dynamic memory], (2001), *Matematyka y mekhanika Publ.*, pp.1–14 (In Russian).

10. Busher V. V. Energeticheskie pokazateli i parametry superkondensatorov v dynamycheskikh rezhimakh, [Energy indicators and parameters of supercapacitors under dynamic conditions], (2012), *Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v tekhnologichnykh procesakh*, Khmelnyckij, Ukraine, No 1, pp. 44–50 (In Russian).



Бушер  
Виктор Владимирович,  
д.т.н, проф. каф.  
ЭМСКУ Одесского нац.  
политехн. ун-та,  
т.+38(050)3908809  
vic-  
tor.v.bousher@gmail.com



Ярмолевич  
Виктория Ярославовна  
ст. преп. каф. ТООЭ  
Одесского  
нац. политехн. ун-та,  
т.+38(050)5140064  
[vyy0147@gmail.com](mailto:vyy0147@gmail.com)