

УДК 612.117.5.

ISSN 1729-4428

І.Т. Когут<sup>1</sup>, Т.М. Дем'янчук<sup>2</sup>, М.Д. Прокопів<sup>2</sup>

## Комп'ютерне моделювання процесів заряду-розряду в послідовно-з'єднаних секціях в акумуляторних батареях

<sup>1</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна, [igor.kohut@pnu.edu.ua](mailto:igor.kohut@pnu.edu.ua)

<sup>2</sup>ТОВ «ЕМВ-ЕНЕРГО» Науково-виробничий департамент АСУ ТП, м. Київ, Україна, [tamataka@ukr.net](mailto:tamataka@ukr.net)

Проведено теоретичний аналіз початкових процесів заряду й розряду у послідовних з'єднаних секціях акумуляторної батареї під дією прямокутних імпульсів, зокрема, досліджено їх вплив на рівномірність накопичення і віддачі енергії. Показано нерівномірність накопичення і віддачі енергії між секціями. Наведено еквівалентну електричну схему як однієї, так і послідовно з'єднаних секцій акумуляторної батареї. На основі еквівалентних електричних схем, проведено комп'ютерне моделювання процесів заряду-розряду у пакеті прикладних програм LT SPICE. Результати комп'ютерного моделювання підтвержують результати теоретичного аналізу. Отримані результати можна використати для компоновки секцій в акумуляторних батареях, а також у розробках як зарядних пристроїв, так і приладів контролю стану акумуляторів.

**Ключові слова:** акумулятор, послідовне з'єднання секцій в акумуляторній батареї, моделювання, процеси заряду - розряду.

Подано до редакції 25.08.2023; прийнято друку 14.12.2023.

### Вступ

Послідовне з'єднання секцій в акумуляторних батареях широко використовується у різних галузях. Дослідження взаємодії секцій при заряді чи розряді акумуляторних батарей представляють інтерес, бо допомагають продовжити термін їх працездатності. Процеси заряду-розряду описано в літературі, зокрема, в [1-5], а також приводяться як еквівалентні електричні схеми однієї секції акумуляторної батареї (АКБ), так і процеси, які проходять в кожній секції АКБ під час її заряду. Відмічено, що при подачі зарядного імпульсу напруги, на послідовно - з'єднаних секціях АКБ, присутня затримка заряду у кожній з секцій. Проте, не наведено результатів впливу цієї затримки на накопичення енергії в кожній із секцій.

Дана робота присвячена власне аналізу і дослідженню впливу затримки заряду кожної із секцій АКБ на величину накопичення енергії у секціях.

### I. Теоретичний аналіз початкових процесів-заряду-розряду послідовно з'єднаних секцій акумуляторної батареї.

**Початкова стадія зарядки.** На початковій стадії заряду, струм протікає від додатного електроду, через першу секцію, до від'ємного електроду першої секції. При цьому, цей процес протікає не миттєво, а з певною затримкою, обумовленою, як початковим впорядкуванням іонів (позитивних і негативних), так і іншими процесами.

Ефективним методом заряду АКБ є імпульсний метод [7-9]. У цих методах, при подачі зарядного імпульсу напруги в момент  $t_0$  (Рис.1) на додатний електрод першої секції, струм заряду потече через цю секцію з затримкою  $T_3$ , і в момент часу  $t_1$  з'явиться на від'ємному електроді цієї секції. Тобто  $T_3 = t_1 - t_0$ .

Аналогічно процес буде проходити і в наступних

секціях АКБ. Розглянемо ці процеси за умови, що всі секції АКБ мають однакові параметри.

Тоді для другої секції

$$T_3 = t_2 - t_1$$

Для n-секції

$$T_3 = t_n - t_{n-1}$$

Напруга  $U_n$  на кожній, з секцій, становить:

$$U_n = E_n + \int f(e_n)de + R_n \int f(i_3)di$$

в інтервалі  $T_1 = t_k - t_0$  для першої секції, в інтервалі  $T_2 = t_k - t_1$  для другої секції й аналогічно для решти секцій. Тобто для n-ї секції в інтервалі

$$T_n = t_k - t_{n-1}.$$

де:  $E_n$  – електрорушійна сила (е.р.с.) на кожній з секцій до початку зарядки,  $e_n$  – величина приросту е.р.с. на кожній із секцій, під час зарядки, відповідно в інтервалах  $T_1, T_2$  і до  $T_n, R_n$  – внутрішній опір секції АКБ,  $i_3$  – струм зарядки в цих же інтервалах,  $t_k$  – момент часу, коли виключається зарядка АКБ. Отже, напруга на кожній наступній секції, крім першої, починає зростати із затримкою  $T_3$  (Рис.1).

Після закінчення зарядки АКБ, в момент часу  $t_b$ , без навантаження (без струму розряду), в інтервалі  $T_b = t_b - t_k$ , напруга на кожній з секцій є меншою від напруги в момент часу  $t_k$  на величину  $\int f(i_3)$ .

Кожна з секцій за час зарядки накопичує енергію:

$$W_m = T_m \int f(i_3)(E_n + \int f(e_n) - R_n \int f(i_3))$$

де m - номер секції від 1 до n.

Тобто в інтервалі  $T_m = T_1$  для першої секції,  $T_m = T_2$  для другої, і так само для решти секцій до  $T_m = T_n$  для n-ї секції. У першій секції накопичиться енергії більше, ніж у другій. Ця різниця становитиме:

$$W_c = T_3 \int f(i_3)(E_n + \int f(e_n) - R_n \int f(i_3))$$

Аналогічно у другій секції накопичується на  $W_c$  енергії більше, а ніж у третій, і так само в наступних

секціях. А n-а секція накопичить найменше енергії.

При  $T_k \gg T_3$ , де  $T_k = t_k - t_n$ , ця різниця в накопиченній енергії не є суттєвою. Але, при великій кількості циклів зарядки-розрядки АКБ, вона накопичується і може вплинути на робочий стан секцій АКБ.

**Початкова стадія розряду АКБ.** При розряді АКБ струмом  $i_p$ , в початковій стадії, процес затримки струму в кожній із секцій є аналогічним, як і при зарядці. Струм розряду протікає з додатного електроду першої секції АКБ в навантаження, тому першою активізується якраз перша секція. Позначимо цю затримку як  $T_p = t_1 - t_0$ .

Аналогічно процес затримки буде і в наступних секціях. Для другої  $T_p = t_2 - t_1$ , для n-ї секції  $T_3 = t_n - t_{n-1}$ .

Напруга для кожної з n- секцій дорівнює:

$$U_n = E_b - \int f(e_p) - R_n \int f(i_p);$$

де:  $e_p$  – величина спаду е.р.с. на кожній з секцій, під час розряду, відповідно в інтервалах  $T_1, T_2$  і до  $T_n, I_p$  – струм розряду в цих же інтервалах,  $t_k$  - момент часу, коли виключається розряд (навантаження) АКБ. Напруга на кожній наступній секції, окрім першої, починає зменшуватись із затримкою  $T_3$  (Рис. 2).

Після закінчення розряду АКБ, в момент часу  $t_b$ , коли відсутнє навантаження в інтервалі  $T_b = t_b - t_k$ , напруга на кожній з секцій більша від від напруги в момент часу  $t_k$  на величину  $R_n \int f(i_p)$ .

Кожна із секцій, під час розряду, витратить енергію:

$$W_m = T_m \int f(i_p)(E_b - \int f(e_p) - R_n \int f(i_p));$$

Перша секція втрачає енергії більше, аніж друга, і ця різниця дорівнює:

$$W_c = T_3 \int f(i_p)(E_b - \int f(e_p) - R_n \int f(i_p));$$

і n-а секція втратить найменше енергії.

Після закінчення розряду АКБ, в момент часу  $t_b$ , коли відсутнє навантаження в інтервалі  $T_b = t_b - t_k$ , напруга на кожній з секцій більша від від напруги в момент часу  $t_k$  на величину  $R_n \int f(i_p)$ .

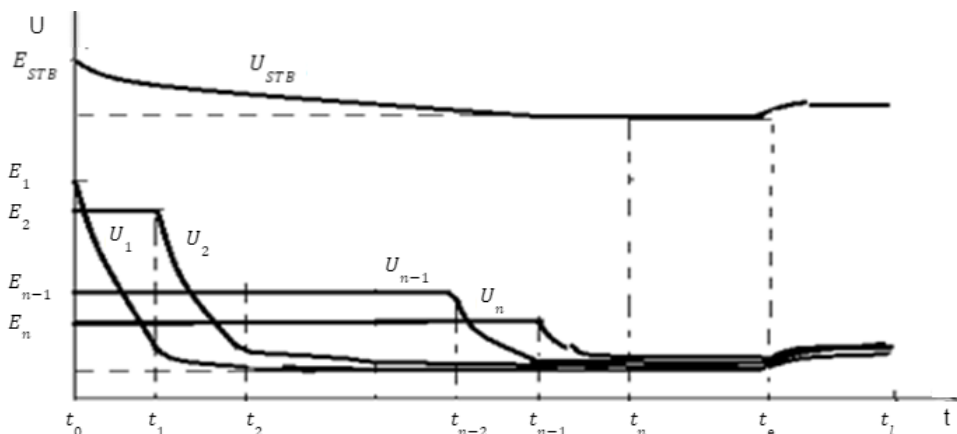


Рис. 1. Діаграма зміни напруги на секціях і АКБ в процесі зарядки.

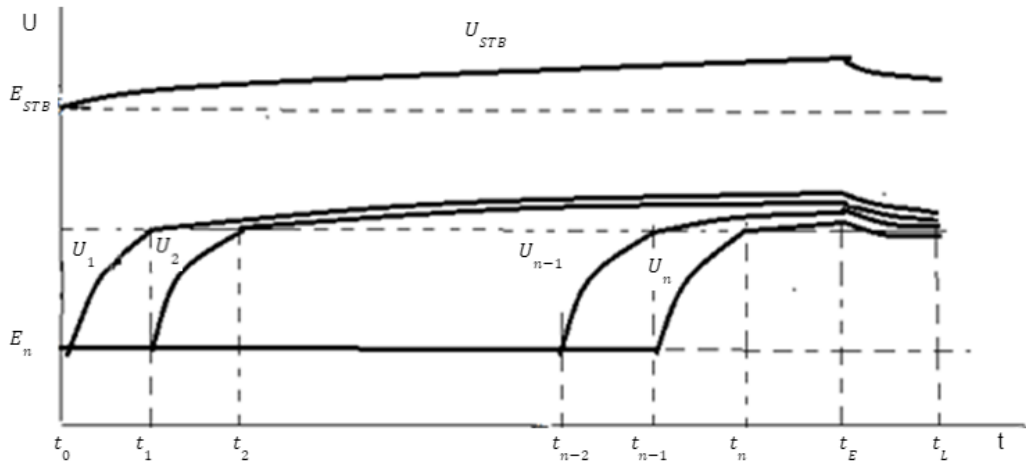


Рис. 2. Діаграма зміни напруги на АКБ і на кожній секції при розряді.

Аналогічно друга секція втратить на  $W_c$  енергії більше, ніж третя, і так само в наступних секціях.

При  $T_k \gg T_3$  ця різниця у витраті енергії не суттєва. Але, при великій кількості циклів зарядки-розрядки АКБ вона може накопичуватися і вплинути на робочий стан секцій.

## II. Комп'ютерне моделювання процесів заряду-розряду в АКБ.

Комп'ютерне моделювання процесів заряду-розряду було проведено в пакеті прикладних програм LT SPICE [6]. Для цього на основі аналізу відомих схем заміщення електричних схем АКБ [10-12], було запропоновано еквівалентну електричну схему як однієї секції (Рис. 3) так і послідовно з'єднаних секцій АКБ (Рис. 5) [13-16], адаптованих для моделювання в LT SPICE.

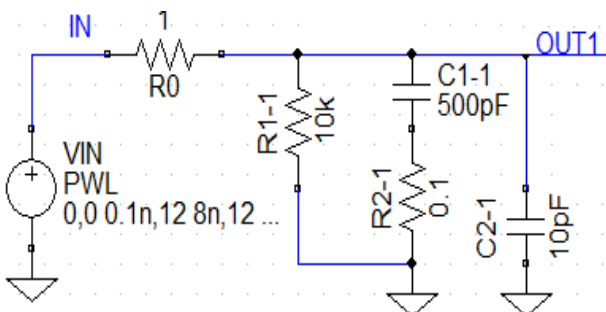


Рис. 3. Еквівалентна електрична схема заряду-розряду однієї секції АКБ імпульсом напруги.

Еквівалентна електрична схема містить резистор  $R1-1$ , що є еквівалентом загального опору секції, включаючи опір струмів втрат,  $R2-1$  відповідає внутрішньому опору, а конденсатор  $C1-1$  ємності секції АКБ. Конденсатор  $C2-1$  імітує початкову затримку струму заряду секцією АКБ. Резистор  $R0$  - еквівалентний опір джерела напруги. Сигнали  $IN$  і  $OUT1$  відповідно вхідний і вихідний сигнали джерела  $IN$  PWL з частково-лінійною апроксимацією опису моделюючого сигналу. Для моделювання було задано прямокутний імпульс з тривалістю переднього і

заднього фронтів  $0,1$  нс, тривалістю імпульсу  $8$  нс та амплітудою  $12$  В. На схемі вказані номінали елементів  $R0$ ,  $R1$ ,  $R2$ ,  $C1$  і  $C2$ , які були використані при моделюванні.

Для еквівалентної електричної схеми (рис.5) сигнали  $OUT1-OUT6$  показують результати моделювання часових діаграм напруги відповідно на секціях АКБ 1 – 6.

Еквівалентна електрична схема містить резистор  $R1$ , що є еквівалентом загального опору секції, включаючи опір струмів втрат,  $R2$  відповідає внутрішньому опору, конденсатор  $C1$  ємності секції АКБ, а конденсатор  $C2$  імітує початкову затримку струму заряду секцією АКБ. Резистор  $R0$  еквівалентний опір джерела напруги. Сигнали  $IN$  і  $OUT1$  відповідно вхідний і вихідний сигнали джерела  $VIN$  PWL з частково-лінійною апроксимацією опису моделюючого сигналу. Для моделювання було використано прямокутний імпульс з тривалістю переднього і заднього фронтів  $0,1$  нс, тривалістю імпульсу  $8$  нс та амплітудою  $12$  В.

Протікання процесу заряду відбувається при зміні вхідного імпульсу напруги  $VIN$  від  $0$  до  $12$  В за час  $0,1$  нс та на вершині імпульсу амплітудою  $12$  В (квазіпостійна напруга зарядного імпульсу для цього прикладу) тривалістю  $8$  нс. При зміні напруги вхідного імпульсу від  $12$  В до  $0$  за час  $0,1$  нс (задній фронт) відбуваються процеси розряду секції АКБ. Резистор  $R0$ , окрім відображення функції внутрішнього опору джерела, ще й електрично розділяє вузли електричної еквівалентної схеми  $IN$  і  $OUT1$ , які очевидно не можуть бути одним і тим же вузлом схеми в процесі комп'ютерного моделювання.

Результати комп'ютерного моделювання процесів заряду-розряду однієї секції АКБ у вигляді часових змін напруги та перехідних процесів у вигляді зміни струмів, які протікають через елементи  $R1$ ,  $R2$  і  $C1$  зображено на рис. 4 (Plot.1), та сумарного струму перехідного процесу через секцію зображено на рис.4 (Plot.2). Зліва на рис. 4 подані позначення кривих часової діаграми.

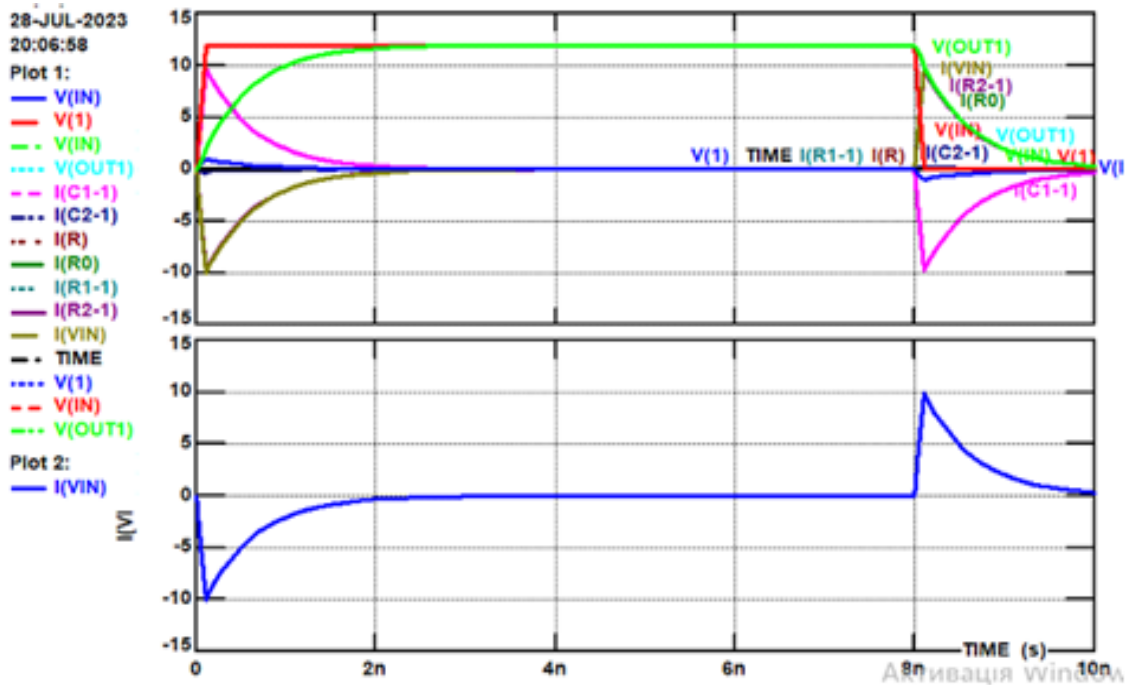


Рис. 4. Часові діаграми моделювання процесів заряду-розряду однієї секції АКБ.

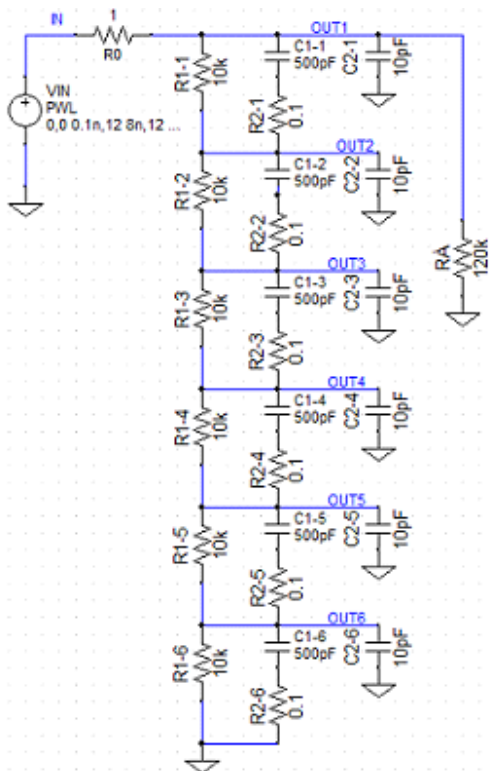
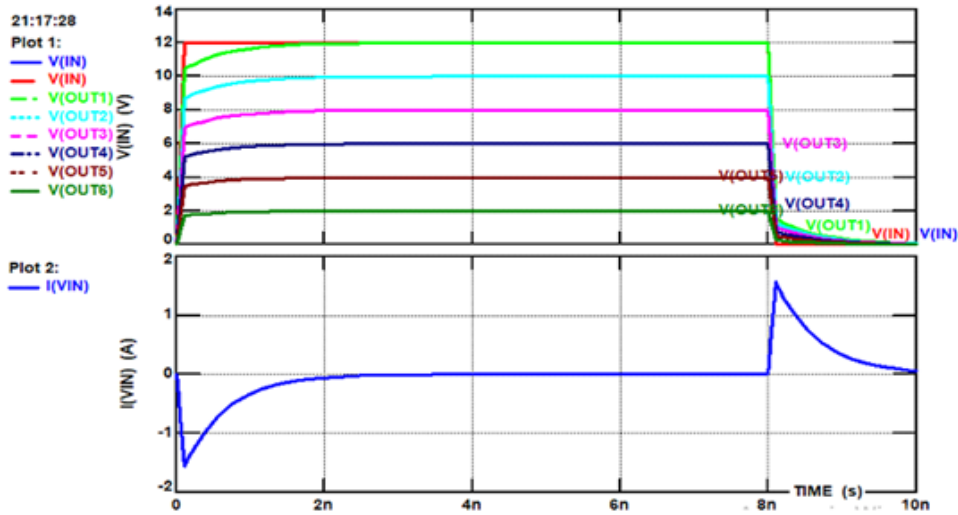


Рис. 5. Еквівалентна електрична схема заряду-розряду 6-ти послідовно – з'єднаних секцій АКБ імпульсом напруги (аналог 6-ти секційного автомобільного акумулятора).

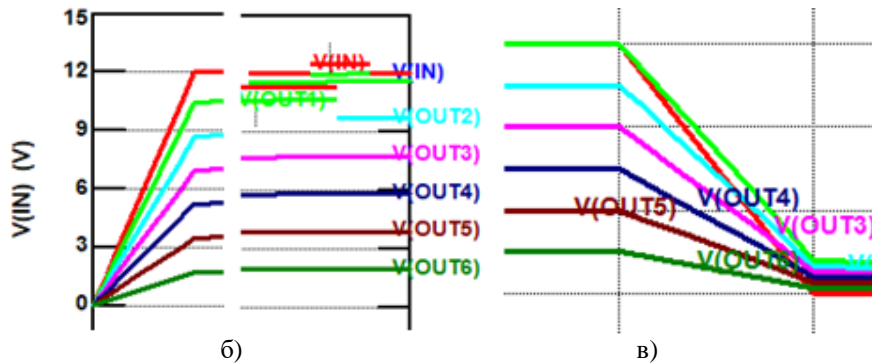
Запропонована еквівалентна електрична схема (рис. 5) АКБ є зручною для оцінки перерозподілу напруг між секціями в процесі заряду-розряду, при зміні параметрів і характеристик кожної секції. Наприклад, при зміні ємності другої секції C1-2 на +/- 20%, а саме, 600 і 400пФ, різниця напруг між OUT1 і OUT2 та OUT2 і OUT3 становитиме відповідно 2,2 і

1,8 В. Це вказує на погіршення експлуатаційних умов роботи окремих секцій АКБ та їх негативний вплив на надійність. За результатами комп'ютерного моделювання, для однакових параметрів секцій еквівалентної електричної схеми АКБ, ці різниці напруг між усіма секціями є теж однаковими (рис. 6). Окрім моделювань з використанням генератора імпульсів напруги Vin, було проведено також моделювання однієї секції АКБ від джерела постійної напруги VDD з введенням керуючих n-канальних МОН – транзисторів M2 і M3. Спрощену еквівалентну електричну схему моделювання процесів заряду-розряду однієї секції АКБ з керуючими МОН-транзисторами зображено на рис. 7.

Розділення між процесами заряду і розряду здійснюється транзисторами M2 і M3 таким чином, що коли транзистор M2 є відкритим, то в цей проміжок часу транзистор M3 є закритим. А ці режими задаються відповідно сигналами IN і IN-OUT. Для отримання результатів аналогічно попереднім, для цієї схеми напруга живлення VDD становила 12,3 В, що необхідно для компенсації падіння напруги на МОН - транзисторі з пороговою напругою 0,3 В. Такий елемент може знайти застосування для створення інтегральних ємнісних елементів, наприклад, сенсорних мікросистем-на-кристалі [17], для інтегральних ємнісних подільників напруги, згладжуючих елементів. Для реалізації елементів схеми управління в інтегральному виконанні можливе використання n- канальних МОН- транзисторів як стандартного типу, так і зі структурами «кремній-на-ізоляторі» (КНИ), включаючи їх тривимірні структури [18], для резисторів і конденсаторів оптимальними є полікремнієві плівки [19].



а)



б)

в)

Рис. 6. Результати комп'ютерного моделювання процесів заряду-розряду послідовно-з'єднаних 6-ти секцій АКБ (а), Демонстрація послідовності затримок заряду від секції 1 до 6 (б), та послідовності затримок розряду від секції 6 до 1 (в).

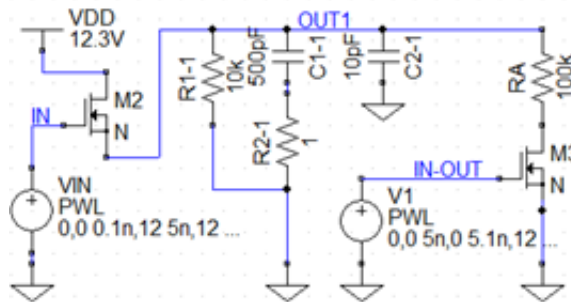


Рис. 7. Еквівалентна електрична схема моделювання процесів заряду-розряду секції АКБ з транзисторним керуванням.

## Висновки

В результаті проведеного дослідження показано взаємодію послідовно з'єднаних секцій в акумуляторних батареях в процесах їх зарядки та розрядки.

Відмічено, що при подачі зарядного імпульсу напруги, на послідовно - з'єднаних секціях АКБ, присутня затримка заряду й розряду у кожній із секцій. Теоретично проаналізовано результати впливу цієї затримки на накопичення енергії в кожній із секцій. Так як на величину накопиченої енергії впливає і внутрішній опір секції, то часткову

компенсацію нерівномірного накопичення енергії можна забезпечити підбором секцій АКБ по внутрішньому опору, в порядку його зменшення, від першої секції до наступних (Прим. При комплектації Li-іон АКБ проводиться контроль внутрішнього опору секцій).

Запропоновано ємнісно-резистивну еквівалентну електричну схему для аналізу та комп'ютерного моделювання процесів заряду й розряду як в окремій секції АКБ, так і для послідовно - з'єднаних секцій. Результати комп'ютерного моделювання в пакеті прикладних програм LT SPICE підтверджують наявність часових затримок для послідовно з'єднаних секцій АКБ, а також показують на перерозподіл напруг між секціями при зміні їх параметрів.



Оптимальний режим роботи АКБ із послідовно-з'єднаних секцій буде забезпечений при однакових параметрах елементів еквівалентної електричної схеми кожної із секцій АКБ.

Отримані результати можуть бути корисними у дослідженнях надійності та виготовленні АКБ, розробленні інтегральних емнісних елементів як аналогів інтегральних мікроджерел живлення,

вбудованих у сенсорні мікросистем-на-кристалі.

**Когут І.Т.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

**Дем'яничук Т.М.** – кандидат технічних наук, провідний інженер;

**Прокопів М.Д.** – інженер.

- [1] O.M. Shembel, V.A. Bilogurov, *Basic characteristics of modern chemical current sources of various electrochemical systems*, Modern special equipment. Scientific and practical journal, 2(17), 66 (2009).
- [2] M.B. Shelest, P.I. Haida, *Basics of the structure and operation of storage batteries: teaching. manual* Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy. state University of Sumy: Sumy. state University, 2014. 210 p. fig. Bibliography: 183 (2014) — ISBN 978-966-657-530-5.
- [3] Corelamps, Blog, *Power sources*, <https://corelamps.com/dzherela-hyvlelnia/akumuliator/Pschyklenk>.
- [4] Web-source: Lithium-ion (Li-ion) batteries. Articles of the company “World Radio”: <https://radio-product.com.ua/ua/a260739-litij-ionnye-ion.html>.
- [5] Patent of China CN101510627B. Charging/discharging method for accumulator formation, formation method and device. Web-source: <https://patents.google.com/patent/CN101510627B/en>.
- [6] Patent of China CN101877425B. Web-source: Pulse container formation method for high-capacity lead-acid battery. <https://patents.google.com/patent/CN101877425B/en>.
- [7] Patent of China CN204216176U. Web-source: A kind of pulsed lead acid accumulator maintenance instrument. <https://patents.google.com/patent/CN204216176U/en>.
- [8] Simone Barcellona, Lorenzo Codecasa, Silvia Colnago, Luigi Piegari, *Cycle Aging Effect on the Open Circuit Voltage of Lithium-Ion Battery*, IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 1-6, (2023); <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC57127.2023.10114896>.
- [9] LTspice software. Web-source: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
- [10] Andrey Martyanov, Alexandr Gritsenko, Oksana Kostyuchenkova, *Model for Analyzing Battery Parameters as a Function of Ambient Temperature*, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 119-124 (2021); <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446472>.
- [11] Alamgir Ahmad Khattak, Asad Nawaz Khan, Muhammad Safdar, Abdul Basit, Nauman Ahmad Zaffar, *A Hybrid Electric Circuit Battery Model Capturing Dynamic Battery Characteristics*, IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC), 1-6 (2020); <https://doi.org/10.1109/KPEC47870.2020.9167659>.
- [12] Younes Boujoudar, Hassan Elmoussaoui, Tijani Lamhamdi, *Lithium-Ion batteries modeling using NARX Nonlinear model*, International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 1-6 (2019); <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723705>.
- [13] Le Yi Wang, Feng Lin, Wen Chen, *Controllability, Observability, and Integrated State Estimation and Control of Networked Battery Systems*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 26(5), 1699 (2018); <https://doi.org/10.1109/TCST.2017.2727440>.
- [14] Roger C. Dugan, Jason A. Taylor, Davis Montenegro, *Energy Storage Modeling for Distribution Planning*, IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2), 954 (2017); <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2639455>.
- [15] Tian Xia, Muye Li, Peng Zi, Liting Tian, Xiaohui Qin, Ning An, *Modeling and simulation of Battery Energy Storage System (BESS) used in power system*, 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2120-2125 (2015); <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432597>.
- [16] Dongyi Zhang, Mahyar Zarghami, Tao Liang, Mohammad Vaziri, *A state-space model for integration of battery energy storage systems in bulk power grids*, North American Power Symposium (NAPS), 1-5, (2015); <https://doi.org/10.1109/NAPS.2015.7335179>.
- [17] I. Kogut, V. Holota, T. Benko, V. Pavlysh, Y. Khoverko, *Simulation of Sensor Capacitive Elements Built into the Microsystem-On-Chip*. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2020 - Proceedings, 2020, pp. 211–215, 9088744.
- [18] I.T. Kogut, A.A. Druzhinin, V.I. Holota, *3D SOI elements for system-on-chip applications*, Adv. Mat. Res., 276, 137(2011); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.276.137>.
- [19] A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, I. Kogut, V. Golota, *Nanoscale polysilicon in sensors of physical values at cryogenic temperatures*, J. Mater. Sci: Mater. in Electron., 29(10), 8364(2018); <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8847-0>.

I.T. Kogut<sup>1</sup>, T.M. Demyanchuk<sup>2</sup>, M.D. Prokopiv<sup>2</sup>

## **Computer modeling of charge-discharge processes in series-connected sections in storage batteries**

<sup>1</sup>*Department of Computer Engineering and Electronics, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, [igor.kohut@pnu.edu.ua](mailto:igor.kohut@pnu.edu.ua)*

<sup>2</sup>*LLC "EMV-ENERGO" Research and Production Department of ACS TP, Kyiv, Ukraine, [tamataka@ukr.net](mailto:tamataka@ukr.net)*

A theoretical analysis of the initial charge and discharge processes in consecutive connected sections of the battery under the action of rectangular pulses was carried out, in particular, their influence on the uniformity of energy accumulation and return. The non-uniformity of energy accumulation and return between sections is shown. The equivalent electrical circuit of both single and serially connected battery sections is given. On the basis of equivalent electrical circuits, computer simulation of charge-discharge processes was carried out in the LT SPICE application program package.

**Keywords:** battery, serial connection of sections in a battery, modeling, charge-discharge processes.