



Бобало Ю. Я.,
Бондарев А. П.,
Недоступ Л. А.,
Кіселичник М. Д.,
Заярнюк П. М.

ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ОБМЕЖЕННІ ДРЕЙФУ ВИЗНАЧАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

Запропоновано метод прогнозування параметричної надійності радіоелектронної апаратури при двосторонньому обмеженні дрейфу визначального параметра. В статті наведено аналітичні і графічні залежності для визначення параметрів викидів випадкового процесу зміни визначального параметра радіоелектронної апаратури за допусковий рівень, розроблені на основі теорії викидів.

Ключові слова: параметрична надійність, прогнозування надійності, мерехтливі відмови, викиди, дрейф визначального параметра.

1. Вступ

Важливою складовою надійності є так звана параметрична надійність, яка характеризує здатність пристрою відповідати технічним характеристикам і не просто виконувати покладені на нього функції, а здійснювати це із заданою якістю. Параметрична надійність визначається імовірнісними показниками відповідності визначальних параметрів заданим значенням і прогнозуванням їх зміни.

У свою чергу визначальні параметри радіоелектронної апаратури (РЕА) змінюються у часі (дрейфують) під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів, в результаті старіння та зношування матеріалів та елементів. Процес зміни визначальних параметрів є випадковим.

Випадкові процеси дрейфів параметрів РЕА є різними за своїм характером. Квазідетерміновані мають велику складову зміни у певному напрямку, квазістаціонарні мають велику стаціонарну випадкову складову.

У випадку квазідетермінованих дрейфів параметрів надійність РЕА легко прогнозується з використанням методу квантильних зон [1]. Процеси, що є стаціонарними, або квазістаціонарними спрогнозувати за допомогою цього методу квантильних зон не вдасться, оскільки їх квантильні зони не будуть перетинати допускові рівні. Такі процеси характеризуються короткочасними викидами за допусковий рівень, при цьому пристрій може вважатись працездатним, чи навпаки, в залежності від його функцій, і спрогнозувати надійність апаратури в такому випадку досить важко.

Відмови через короткочасні відхилення визначального параметра від заданого значення мають значний негативний вплив на безвідмовність у випадках сумісної роботи пристроїв і у прецизійній РЕА, що свідчить про актуальність даної роботи.

2. Аналіз літературних даних

Поодинокі короткочасні викиди за допусковий рівень називаються збоями, а їх послідовність — мерехтливими відмовами. Оскільки реальні, близькі до стаціонарних, випадкові процеси є квазістаціонарними, параметри збоїв

можуть суттєво різнитись на різних проміжках часу роботи пристрою і, відповідно, впливати на характеристики мерехтливих відмов.

Задачу прогнозування мерехтливих відмов, а саме: імовірність виникнення збоїв, їх кількість та середню тривалість, — дозволяє вирішити математичний апарат теорії викидів випадкових процесів.

Отримання вичерпних імовірнісних характеристик викидів випадкової функції (імовірностей заданого числа викидів протягом заданого проміжку часу, закону розподілу часу перебування випадкової функції вище заданого рівня) в загальному випадку представляє значні математичні труднощі, проте обчислення таких характеристик, як середнє число викидів, в одиницю часу, середній час перебування вище заданого рівня не є ускладненим.

Теорія викидів відома і досить добре опрацьована у області процесів із нормальним законом розподілу. Загальні формули були отримані ще в 1944–1945 р.р. Райсом [2, 3]. Основні здобутки у цій області належать Свешнікову А. А. [4] та Тіхонову В. І. [5]. Положення цієї теорії розглядаються також в інших серйозних наукових працях [6–10].

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом даного дослідження було прогнозування параметричної надійності при стаціонарних та квазістаціонарних процесах дрейфу визначального параметра РЕА.

Метою було розроблення методу прогнозування надійності при збоях та мерехтливих відмовах, викликаних виходами визначальних параметрів за допускові рівні.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити *наступні задачі*:

1. На основі математичного апарату теорії викидів розробити аналітичні залежності для розрахунку кількісних показників збоїв та мерехтливих відмов.
2. Вибрати моделі випадкових процесів, провести для них розрахунок параметрів викидів та побудувати графічні залежності.
3. Оцінити точність та працездатність методу.

4. Аналітичний апарат теорії викидів та моделі для його дослідження

Метод прогнозування надійності РЕА за визначальними параметрами для будь-яких характеристик випадкових процесів дрейфів параметрів у випадку одностороннього обмеження зверху був розроблений авторами статті в попередніх дослідженнях [11]. В даній роботі розглянуто можливість прогнозування викидів при двосторонньому обмеженні.

Так, кількість викидів за час T визначаємо за наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} n_p(T) &= \int_0^T \int_0^\infty v \cdot f(x = \Delta_2, v, t) dv dt \text{ — для додатних викидів,} \\ n_n(T) &= \int_0^T \int_{-\infty}^0 v \cdot f(x = \Delta_1, v, t) dv dt \text{ — для від'ємних викидів,} \\ n(T) &= n_p(T) + n_n(T), \end{aligned} \quad (1)$$

де $n(T)$ — кількість викидів протягом часу T ; x — значення випадкового параметра; v — швидкість зміни випадкового параметра; Δ_1, Δ_2 — нижній та верхній допускові рівні.

Відмінність від попереднього методу полягає у необхідності проведення розрахунків для двох допускових рівнів з урахуванням напрямків викидів та визначення їх загальної кількості.

Визначення середньої тривалості викидів проводимо за рівняннями (2):

$$\begin{aligned} t_{vyk,p}(T) &= \int_0^T \int_{\Delta_2}^\infty f(x, t) dx dt, \\ t_{vyk,n}(T) &= \int_0^T \int_{-\infty}^{\Delta_1} f(x, t) dx dt, \\ t_{vyk}(T) &= t_{vyk,p}(T) + t_{vyk,n}(T). \end{aligned} \quad (2)$$

У свою чергу тривалість одного викиду визначаємо через співвідношення загальної тривалості викидів до їх кількості. Проте треба зауважити, що середня тривалість викиду з урахуванням і додатних і від'ємних викидів розраховується через співвідношення загальної тривалості усіх викидів до їх загальної кількості, і не може бути визначена через середні тривалості додатних і від'ємних викидів:

$$\begin{aligned} t_{ser,p}(T) &= \frac{t_{vyk,p}(T)}{n_p(T)}, \quad t_{ser,n}(T) = \frac{t_{vyk,n}(T)}{n_n(T)}, \\ t_{ser}(T) &= \frac{t_{vyk}(T)}{n(T)} = \frac{t_{vyk,p}(T) + t_{vyk,n}(T)}{n_p(T) + n_n(T)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Отримані залежності дозволяють спрогнозувати тривалість викидів, їх кількість та тривалість одного викиду на проміжку від 0 до T за умови відомого закону розподілу випадкової величини x та швидкості її зміни v в залежності від часу.

Для дослідження розробленого методу було побудовано ряд математичних моделей випадкових процесів,

що дають змогу описати стаціонарні, квазістаціонарні та квазидетерміновані випадкові процеси, параметри цих моделей наведені нижче.

5. Дослідження моделей прогнозування параметрів викидів

З літературних джерел відомо, що в більшості випадків закони розподілу параметру та його швидкості можна вважати незалежними. Тоді загальний закон розподілу можна розписати як добуток двох законів розподілів:

$$f(x, v) = f(x) \cdot f(v). \quad (4)$$

Розглядаючи розподіл у часі як деяку функціональну залежність, отримуємо:

$$f(x, v, t) = f(x, t) \cdot f(v, t). \quad (5)$$

Найчастіше закон розподілу швидкості можна описати або законом розподілу ідентичним закону розподілу параметра, або нормальним законом розподілу. В обох випадках математичне очікування для швидкості дорівнює нулю, якщо процес стаціонарний. У випадку нестационарного процесу математичне очікування швидкості можна записати як похідну від регресії випадкового процесу (математичного очікування $m_x(t)$) по часу:

$$m_v(t) = \frac{dm_x(t)}{dt}. \quad (6)$$

Квадратичне відхилення для швидкості визначається через кореляційну функцію. Відомим є те, що кореляційна функція при $\tau = 0$ рівна дисперсії випадкового параметра. Також відомо, що при нормальному законі розподілу кореляційна функція для швидкості є другою похідною зі знаком «-» по τ від кореляційної функції для самого процесу:

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = D_x = K_x(0), \\ K_v(\tau) = -\frac{d^2 K_x(\tau)}{d\tau^2}, \\ \sigma_v^2 = D_v = K_v(0). \end{cases} \quad (7)$$

Оскільки кореляційна функція авторів роботи цікавить тільки в околі точки $\tau = 0$, можна не вдаватися у всі складові кореляційної функції, а описати її лише огинаючою, вибравши будь-який вигляд з відомих найбільш імовірних:

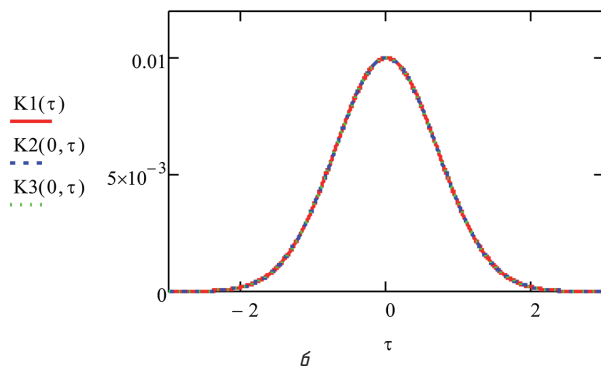
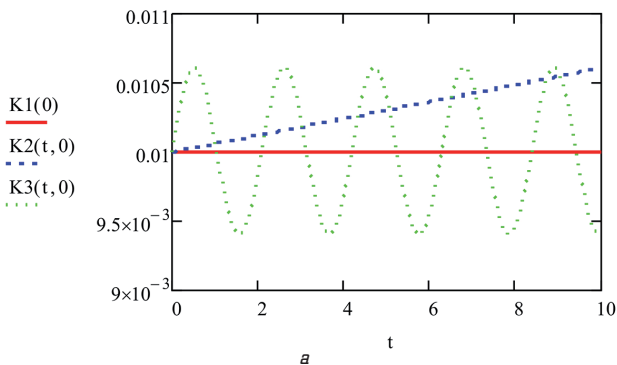
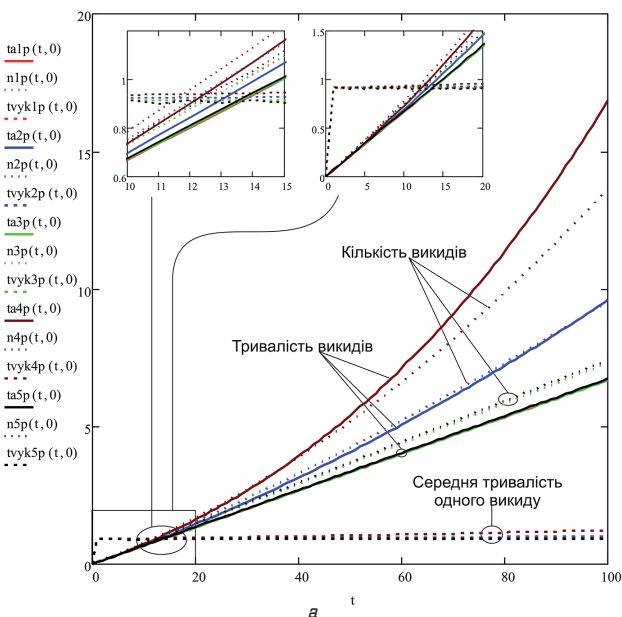
$$\begin{aligned} K(\tau) &= \sigma^2 \cdot \exp(-a \cdot \tau^2), \quad K(\tau) = \sigma^2 \cdot \exp(-a^2 \cdot \tau^2), \\ K(\tau) &= \sigma^2 \cdot \exp(-a \cdot |\tau|). \end{aligned} \quad (8)$$

З наведених видів для дослідження вибрано наступну функцію $K(\tau) = \sigma^2 \cdot \exp(-a^2 \cdot \tau^2)$. Графічне відображення вибраної кореляційної функції для процесів представлених у табл. 1 наведено на рис. 1.

Таблиця 1

Характеристики моделей випадкових процесів та допусккові рівні

1	$\sigma_x(t) = \sigma_0 = \text{const}$	$m(t) = m_0 = 0$	$\Delta_1 = \text{const}, \Delta_2 = \text{const}$
2	$\sigma_x(t) = \sigma_0(1 + k_1 \cdot t)$	$m(t) = m_0 = 0$	$\Delta_1 = \text{const}, \Delta_2 = \text{const}$
3	$\sigma_x(t) = \sigma_0(1 + k_2 + \sin(l \cdot t))$	$m(t) = m_0 = 0$	$\Delta_1 = \text{const}, \Delta_2 = \text{const}$
4	$\sigma_x(t) = \sigma_0 = \text{const}$	$m(t) = m_0 + k_5 \cdot t$	$\Delta_1 = \text{const}, \Delta_2(t) = \Delta_2(1 + k_3 \cdot \sin(l \cdot t))$
5	$\sigma_x(t) = \sigma_0 = \text{const}$	$m(t) = m_0(1 + k_4 \cdot \sin(l \cdot t))$	$\Delta_1 = \text{const}, \Delta_2 = \text{const}$

Рис. 1. Кореляційна функція випадкового процесу дрейфу параметра для 3-х випадків у області τ (а), та у часовій області (б)

Для подальшого дослідження даного методу використано п'ять варіантів моделей часових залежностей параметрів випадкового процесу та допусккових рівнів, характеристики яких представлено у табл. 1. Перші три варіанти відрізняються зміною квадратичного відхилення параметра у часі і відповідно всіх інших характеристик, які пов'язані з ним. Два останні випадки — зі змінним допускним рівнем та змінним математичним очікуванням.

Такі п'ять варіантів дозволяють дослідити можливість прогнозування при різних характерах дрейфів випадкових параметрів, як у випадку стаціонарного, так і нестаціонарного процесу, для процесів із наявною періодичною складовою, або для процесів із постійним дрейфом.

Для дослідження методу використано нормальний закон розподілу випадкового параметра та нормальний закон розподілу швидкості зміни випадкового параметра.

У табл. 2 представлені початкові дані, вибрані для дослідження.

Таблиця 2

Вибрані параметри випадкового процесу

$\sigma_0 =$	0,1	$m_0 =$	0	$l =$	3	$k_1 =$	0,003	$k_3 =$	0,02	$k_5 =$	0,001
$A =$	1	$\Delta_1 =$	-0,1	$\Delta_2 =$	0,15	$k_2 =$	0,03	$k_4 =$	0,01	—	—

Для вказаних п'яти варіантів будуємо математичні моделі розрахунку параметрів викидів випадкових процесів з використанням вказаних вище залежностей.

У зв'язку з недосконалістю програмного забезпечення межі інтегрування нескінченність замінюємо на фіксоване значення z , яке залежить від обраного закону розподілу та визначається в залежності від математичного очікування m_0 , та квадратичного відхилення σ :

$z_1 = m_0 + k\sigma$ — для верхньої межі інтегрування,

$z_2 = m_0 - k\sigma$ — для нижньої межі інтегрування.

Чим більше значення k , тим вища точність, і більший час розрахунку, тому рекомендуємо приймати k в межах від 10 до 100. При проведенні моделювання вибрано $k = 10$, що забезпечує точність обчислень до 7-го знаку.

Результати моделювання у графічному вигляді наведено на рис. 1–3.

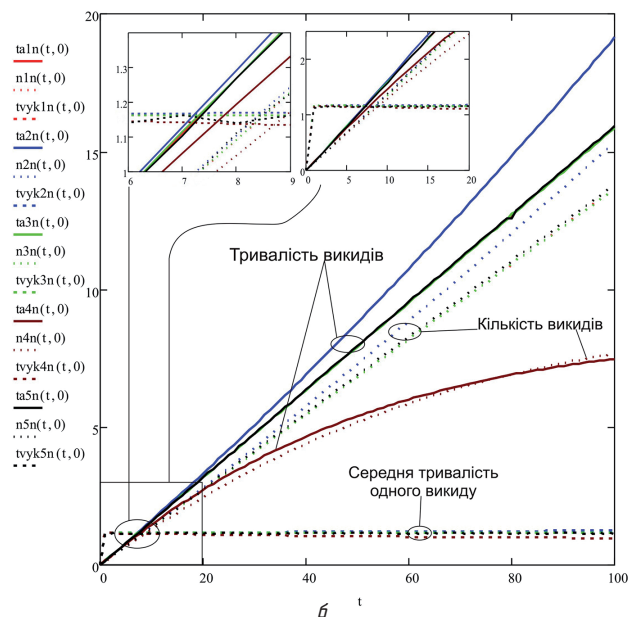


Рис. 2. Часові залежності загальної тривалості викидів, кількості викидів та середньої тривалості одного викиду: а — для верхнього обмеження; б — для нижнього обмеження

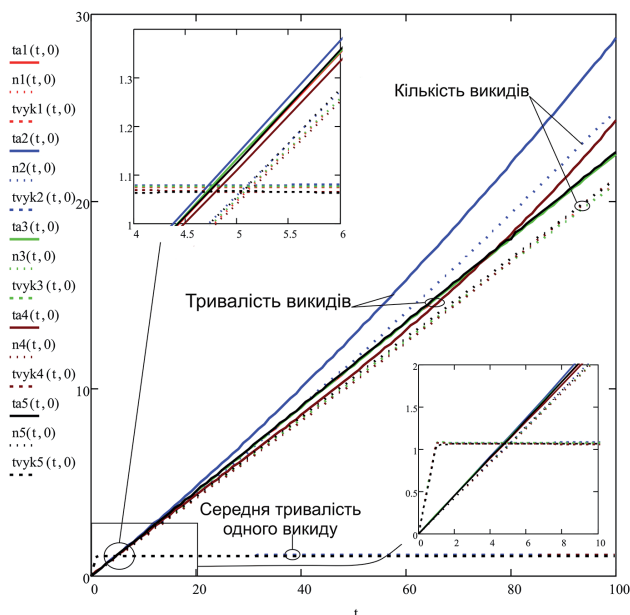


Рис. 3. Часові залежності загальної тривалості викидів, кількості викидів та середньої тривалості одного викиду

Подані залежності дозволяють спрогнозувати кількість викидів, тривалість викидів та середню тривалість одного викиду для перерахованих п'яти випадків. Графічні моделі, побудовані за результатами розрахунків, наведені на рис. 2, 3.

6. Аналіз результатів дослідження моделей прогнозування параметрів викидів

Таким чином, одержані графічні моделі для п'яти варіантів часових залежностей параметрів випадкового процесу із різними характеристиками (табл. 1), які якісно підтверджують придатність розробленого методу.

Найбільший вплив у характеристики викидів вносить змінне квадратичне відхилення, його лінійна зміна призводить до нелінійної зміни тривалості викидів та кількості викидів, що свідчить про накопичувальний характер усіх внесених змін. Найменший вплив вносять періодичні зміни, оскільки вони компенсуються у часі. Також існує деяка компенсація при дрейфі математичного очікування, яка виникає через збільшення числа викидів та їх тривалості через один допускний рівень і зменшення через інший.

7. Висновки

В результаті проведених досліджень:

1. Розроблено метод прогнозування параметричної надійності РЕА за визначальним параметром, який дозволяє прогнозувати із достатньою точністю мерехтливості відмови для стаціонарних, квазістаціонарних та квазідетермінованих процесів дрейфів визначальних параметрів при двосторонньому обмеженні. Похибки при прогнозуванні пов'язані зі спрощеннями та припущеннями при визначенні законів розподілу випадкового процесу.

2. Запропоновано аналітичні залежності для розрахунку кількісних показників збоїв та мерехтливих відмов, побудовано графічні залежності параметрів ви-

кидів у часі для вибраних моделей випадкових процесів дрейфів визначальних параметрів.

3. У порівнянні із методом квантильних зон [1], цей метод є більш функціональним і дозволяє прогнозувати надійність при стаціонарних процесах дрейфів, проте він є складнішим, потребує інформації про закон розподілу швидкості зміни визначального параметра, за відсутності якої вимагає роботи припущення та спрощення. А також, потребує часових затрат при розрахунку навіть на сучасних ЕОМ (наприклад, розрахунок та побудова приведених у статті моделей у програмі MathCad на сучасному ноутбукі займає близько 20–30 хвилин).

Література

- Bobalo, Y. Forecasting the Quasi-Deterministic Parameters' Drifts of Radioelectronics Apparatus on the Basis of Quantile Zones Techniques [Text] / Y. Bobalo, M. Kiselychuk, L. Nedostup, P. Zayarnyuk // Przegląd Elektrotechniczny. — Warszawa: Sigma-Not., 2013. — № 2a. — P. 270–272.
- Rice, S. O. Mathematical Analysis of Random Noise [Text] / S. O. Rice // Bell System Technical Journal. — 1944. — Vol. 23, № 3. — P. 282–332. doi:10.1002/j.1538-7305.1944.tb00874.x
- Rice, S. O. Mathematical Analysis of Random Noise [Text] / S. O. Rice // Bell System Technical Journal. — 1945. — Vol. 24, № 1. — P. 46–156. doi:10.1002/j.1538-7305.1945.tb00453.x
- Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций [Текст] / А. А. Свешников. — М.: Наука, 1968. — 464 с.
- Тихонов, В. И. Выбросы траекторий случайных процессов [Текст] / В. И. Тихонов, В. И. Хименко. — М.: Наука, 1987. — 306 с.
- Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — М.: Наука, 1991. — 384 с.
- Волков, Л. И. Надежность летательных аппаратов [Текст] / Л. И. Волков, А. М. Шышкевич. — М.: Высшая школа, 1975. — 296 с.
- Jazwinski, A. H. Stochastic Processes and Filtering Theory [Text] / A. H. Jazwinski. — Mineola N.Y.: Dover Publications Inc., 2007. — 376 p.
- Cox, D. R. The Theory of Stochastic Processes [Text] / D. R. Cox, H. D. Miller. — CRC Press, 1977. — 408 p.
- Parzen, E. Stochastic Processes [Text] / Emanuel Parzen. — SIAM, 1999. — 324 p. doi:10.1137/1.9781611971125
- Недоступ, Л. А. Дослідження методу прогнозування мерехтливих відмов побудованого на основі теорії викидів [Текст] / Л. А. Недоступ, М. Д. Киселичник, П. М. Зайрюк // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2013. — № 6/12(66). — С. 116–119. — Режим доступу: \www/URL: http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19769

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ОГРАНИЧЕНИИ ДРЕЙФА ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА

Предложен метод прогнозирования параметрической надежности радиоэлектронной аппаратуры при двустороннем ограничении дрейфа определяющего параметра. В статье приведены аналитические и графические зависимости для определения параметров выбросов случайного процесса изменения определяющего параметра радиоэлектронной аппаратуры за допускной уровень, разработанные на основе теории выбросов.

Ключевые слова: параметрическая надежность, прогнозирование надежности, перемежающиеся отказы, выбросы, дрейф определяющего параметра.

Бобало Юрій Ярославович, доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: bobaloyu@lp.edu.ua.

Бондарев Андрій Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: bondap@ukr.net.

Недоступ Леонід Аврамович, доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: lnedostup@polynet.lviv.ua.

Кіселичник Мирослав Дмитрович, кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: mkiselychnyk@polynet.lviv.ua.

Заярнюк Павло Михайлович, аспірант, кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: zayarnyukpm@gmail.com.

Бобало Юрій Ярославович, доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної радіотехніки та радіоізмерень, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Бондарев Андрій Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної радіотехніки та радіоізмерень, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Недоступ Леонід Аврамович, доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичної радіотехніки та радіоізмерень, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Киселичник Мирослав Дмитрович, кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіоізмерень, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Заярнюк Павло Михайлович, аспірант, кафедра теоретичної радіотехніки та радіоізмерень, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Bobalo Yuriy, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: bobaloyu@lp.edu.ua.

Bondarev Andriy, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: bondap@ukr.net.

Nedostup Leonid, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: lnedostup@polynet.lviv.ua.

Kiselychnyk Myroslav, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: mkiselychnyk@polynet.lviv.ua.

Zayarnyuk Pavlo, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: zayarnyukpm@gmail.com

УДК 621.317.7

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.42517

**Щербань А. П.,
Ларін В. Ю.**

ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЛІТІЙ-ПОЛІМЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

В статті розглянуті основні принципи побудови портативних джерел живлення, зокрема акумуляторів на основі літію. Приведені ілюстрації хімічних процесів, що проходять в них. Також описані конструктивні особливості різних видів акумуляторів на основі літію, а саме літій-іонних та літій-полімерних акумуляторів, особливості їх використання та режими заряджання.

Ключові слова: хімічне джерело струму, літій-полімерний акумулятор, ефект пам'яті, система балансування.

1. Вступ

Акумулятори є електрохімічними системами, в яких реалізуються функції накопичувачів електричної енергії. Акумулятори, як джерело електричної енергії застосовують в пристроях, апаратах або системах, дія яких заснована на автономному принципі функціонування, тобто незалежно від наявності у безпосередньої близькості електричної мережі.

В акумуляторах під час зарядки електрична енергія перетворюється в хімічну і система знаходиться в рівновазі доти, доки між електродами протікає навіть дуже малий струм. При підключенні контактів акумулятора до споживача електричної енергії (елементу з кінцевим електричним опором) відбувається зворотний процес: хімічна енергія перетворюється в електричну — при цьому частина її перетворюється в тепло [1, 2].

Мірою заряду, який акумулятор може накопичити в процесі зарядки, є ємність (це поняття слід відрізняти від електричної ємності конденсаторів), яка вимірюється в ампер-годинах. Корисний заряд, що видає акумулятор, залежить від струму розрядки і початкового ступеня заряду.

На сьогоднішній день поширені акумулятори п'яти різних електрохімічних схем:

— нікель-кадмієві (Ni-Cd);

- нікель-металгідридні (Ni-MH);
- свинцево-кислотні (Sealed Lead Acid, SLA);
- літій-іонні (Li-Ion);
- літій-полімерні (Li-Polymer).

Визначальним фактором для всіх перерахованих елементів живлення є не тільки портативність (тобто невеликий об'єм і вага), але і висока надійність, а також велика тривалість роботи.

Актуальність цієї теми обумовлена особливостями нашого часу, а саме використанням портативних пристроїв у різних сферах життя, починаючи від мобільних телефонів та планшетів і закінчуючи безпілотними повітряними суднами. У будь-якому з цих пристроїв необхідне портативне джерело живлення (акумулятор). А від вибору типу акумулятора будуть залежати особливості використання таких приладів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

За даною темою існує багато публікацій в іноземних виданнях. Але більшість із них приділяє особливу увагу хімічним тонкощам побудови літєвих акумуляторів, натомість оминаючи конструктивні особливості. Наприклад, в статті [3] пропонується використовувати