5. Обедзинський, Ю. К. Фоточутливі гетероструктури і фільтри інфрачервоного діапазону на монокристалах CdSb, In_4Se_3 [Текст] / Ю. К. Обедзинський, Б. М. Грицюк, В. В. Стрєбєжев, В. М. Стребежев, І. М. Юрійчук // Восточно-Европейский журнал передових технологий. – 2012. – № 6/12(60). – С.44-46.
6. Gritsyuk, B. M. IR-photodetectors on CdSb, In_4Se_3, In_4Te_3-epitaxial barrier structures [Text] / B. M. Gritsyuk, O. V. Galochkin, A. I. Rarenko, V. N. Strebezhev // Proceedings of the SPIE. – 2003. –V.5065. – P. 139-145.
7. Vorobets, G. I. Laser manipulation of clasters, structural defects and nanoaggregates in barrier structures on silicon and binary semiconductors [Text] / G. I. Vorobets, O. I. Vorobets, V. N. Strebegev // Applied Surface Science. – 2005. – V.247. – P.590-601.
8. Losovyj, Ya. B. The anisotropic band structure of layered In_4Se_3 (001) [Text] / Ya. B. Losovyj, L. Makinistian, E. A. Albanesi, A. G. Petukhov, Jing Liu, P. Galiy, O. R. Dveriy, P. A. Dowben // Journal of applied physics. – 2008. – V.104. – P. 083713-1-083713-7.
9. Makinistian, L. Ab initio calculations and ellipsometry measurements of the optical properties of the layered semiconductor In_4Se_3 [Text] / L. Makinistian, E. A. Albanesi, N. V. Gonzalez Lemus, A. G. Petukhov, D. Schmidt, E. Schubert, Ya. B. Losovyj, P. Galiy, P. A. Dowben // Phys.Rev.B. – 2010. – V.81, №7. – P. 075217-1–075217-8.
10. Benramdane, N., Misho, R. H. Structural and optical properties of In_4Se_3 thin films obtained by flash evaporation [Text] / N. Benramdane, R. H. Misho // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1995. – V.37, N3-4. – P. 367-377.
11. Xingfu, Li. Anisotropic optical and thermoelectric properties of In_4Se_3 and In_4Te_3 [Text] / Li Xingfu, Xu Bin, Yu Gongqi, Li Xue, Yi Lin // Journal of applied physics. – 2013. – V.113. – P. 203502.

УДК 621.396

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕРЕХТЛИВИХ ВІДМОВ ПОБУДОВАНОГО НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ВИКИДІВ

Л. А. Недоступ
Доктор технічних наук, професор*
E-mail: lnedostup@polynet.lviv.ua
М. Д. Кіселичник
Доктор технічних наук, професор*
E-mail: mkiselychnyk@polynet.lviv.ua
П. М. Заярнюк
Аспірант*
E-mail: zayarnyukpm@gmail.com
*Кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Ст. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

На основі теорії викидів випадкових процесів запропоновано метод прогнозування параметричної надійності РЕА. В статті наведено аналітичні і графічні залежності для визначення параметрів випадкового процесу зміни визначального параметра РЕА: кількості викидів, середньої тривалості одного викиду та загальної тривалості викидів. Запропонований метод дозволяє врахувати мерехтливі відмови та спрогнозувати надійність для стаціонарних і нестаціонарних процесів

Ключові слова: викиди, мерехтливі відмови, надійність, прогнозування надійності, теорія викидів

На основе теории выбросов случайных процессов предложен метод прогнозирования параметрической надежности РЭА. В статье приведены аналитические и графические зависимости для определения параметров случайного процесса изменения определяющего параметра РЭА: количества выбросов, средней продолжительности одного выброса и общей продолжительности выбросов. Предложенный метод позволяет учесть перемежающиеся отказы и спрогнозировать надежность для стационарных и нестационарных процессов

Ключевые слова: выбросы, перемежающиеся отказы, надежность, прогнозирование надежности, теория выбросов

1. Вступ

Одним з видів відмов РЕА є мерехтливі відмови. Такі відмови складно прогнозувати, оскільки вони за своєю сутністю характеризуються випадковою природою і можуть бути ергодичними і неергодичними, стаціонарними у широкому або вузькому розумінні. Мерехтливі відмови суттєво впливають на параметричну надійність пристрою у випадку стаціонарних процесів дрейфів параметрів РЕА, в яких відбуваються виходи випадкового процесу за допусковий рівень та наступного повернення в допустимі межі.

Таким чином, постає необхідність у прогнозуванні мерехтливих відмов, а саме у визначенні їх кількості та тривалості одного викиду. Основою такого прогнозування є математичний апарат теорії викидів [1 – 3].

2. Аналіз літератури

Вважається, що теорію викидів започаткував Райс ще у 1944-1945 р.р. [4]. Над розробкою теорії викидів працювало багато відомих науковців [5 – 10]. В роботах А. А. Свєшнікова представлені основні її рівняння. Однак дослідження застосування її проводилось лише для гаусівського нормального процесу, а розрахунки здійснювались через спектральні густини. Подальші дослідження проведено В. І. Тихоновим, який увів поняття випадку змінного допускового рівня. Таким чином, теорія викидів достатньо відома і опрацьована, проте не досліджена у випадках нестаціонарних випадкових процесів.

3. Теоретичні засади

Існуюча теорія викидів дозволяє визначити імовірності знаходження випадкового параметру поза допусковим рівнем та перетину випадковим процесом допускового рівня на деякому інтервалі часу Δt та перейти до кількості і тривалості викидів [11]. Ввесь інтервал часу T розбивається на підінтервали таким чином, що в кожному інтервалі може статись не більше одного викиду. Після чого кожен з інтервалів перевіряється на наявність викиду, і підраховується кількість інтервалів, в яких відбулись викиди. Визначення викиду здійснюється наступним шляхом: спочатку визначається, чи перетинав випадковий параметр на даному проміжку допусковий рівень, і, якщо так, перевіряється, яка у нього була швидкість впродовж інтервалу (додатна - перетин знизу вверх, від'ємна - зверху вниз).

В результаті переходу від дискретних фіксованих значень до імовірнісних показників отримуються залежності від тривимірного закону розподілу.

- для додатних викидів

$$n(T)=\int_0^T\int_0^\infty v\cdot f(x=\Delta,v,t)dvdt\,, \tag{1}$$

- для від'ємних викидів

$$n(T)=\int_0^T\int_{-\infty}^0 v\cdot f(x=\Delta,v,t)dvdt\,, \tag{2}$$

Визначення загальної тривалості викидів на певному проміжку здійснюється наступним чином: розбивши загальний інтервал на підінтервали і знаючи у кожному з підінтервалів імовірність знаходження випадкового процесу вище певного допускового рівня, знаходиться тривалість викидів у кожному з підінтервалів і підсумовується:

$$t_{вик}(T)=\sum_1^n \Delta t_i\cdot P_i[x>\Delta]\,,\ i=1,2..n. \tag{3}$$

Імовірність знаходження випадкового процесу вище допускового рівня необхідно замінити на інтеграл від щільності розподілу випадкового процесу і врахувати можливість часової залежності:

$$P[x>\Delta](t)=\int_\Delta^\infty f(x,t)dx, \tag{4}$$

Такій заміна дозволяє перейти від суми до інтегралу. Отримується наступний вираз:

$$t_{вик}(T)=\int_0^T\int_\Delta^\infty f(x,t)dxdt. \tag{5}$$

У свою чергу тривалість одного викиду визначається через відношення загальної тривалості викидів до їх кількості:

$$t_{сер}(T)=\frac{t_{вик}(T)}{n(T)}\,. \tag{6}$$

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 її швидкості v в залежності від часу. Тобто, виникає необхідність визначення тривимірного закону розподілу параметра: за значенням параметра та швидкістю його зміни з урахуванням їх змін у часі. Часова залежність закону розподілу, як правило, зводиться до змін математичних очікувань та квадратичних відхилень, як за значенням, так і за швидкістю. Закон розподілу перетворюється у двомірний із залежними квадратичними відхиленнями та математичними очікуваннями.

З літературних джерел відомо, що у більшості випадків двомірний закон можна прийняти як незалежні між собою закони розподілу по значенню та швидкості [11]. Таким чином, результуючий закон розподілу має вигляд перемножених між собою обох одномірних законів розподілу. Але закон розподілу за швидкістю побудувати також не дуже просто, а враховуючи, що статистика зміни процесу знімається через певні інтервали часу, а не безперервно, це взагалі майже неможливо.

У різних джерелах в якості прикладів приводяться наступні випадки: 1. Закон розподілу за швидкістю є нормальним; 2. Закон розподілу за швидкістю є ідентичним закону розподілу за значенням.

В більшості випадків закони розподілу параметра та його швидкості можна вважати незалежними тоді загальний закон розподілу можна розписати як добуток двох законів розподілу:

$$f(x,v)=f(x)\cdot f(v)\,, \tag{7}$$

а розподіл у часі, в свою чергу, виливається у деяку функціональну залежність в результаті чого отримуємо:

$$f(x,v,t)=f(x,t)\cdot f(v,t)\,. \tag{8}$$

Таке спрощення дозволяє знаючи обидва закони розподілу визначити загальний, але постає питання у визначені закону розподілу швидкості, що суттєво ускладнює весь процес прогнозування оскільки необхідно додатково знімати статистику швидкості і будувати закон розподілу швидкості, або знов зробити допущення і спрощення.

4. Опис випадкового процесу дрейфу параметра

Закон розподілу швидкості, в більшості випадків, можна описати або законом розподілу ідентичним закону розподілу параметра, або нормальним законом розподілу [5, 8]. І в першому і в другому випадку математичне очікування для швидкості рівне нулю, оскільки процес вважаємо стаціонарним. У випадку нестаціонарного процесу математичне очікування швидкості можна записати як похідну від регресії випадкового процесу по часу:

$$m_v(t)=\frac{dm_x(t)}{dt}\,. \tag{9}$$

Необхідно зазначити, що виникають додаткові ускладнення, пов'язані з необхідністю визначення кореляційної функції. За допомогою кореляційної функції можна визначити середнє квадратичне відхилення за швидкістю зміни параметра. Кореляційна функція для швидкості є другою похідною зі знаком «-» по тау від кореляційної функції для самого процесу, і відповідає системі рівнянь [1, 3]:

$$\begin{cases}\sigma_x^2=D_x=K_x(0)\\ K_v(\tau)=-\dfrac{d^2K_x(\tau)}{d\tau^2}\\ \sigma_v^2=D_v=K_v(0)\end{cases}. \tag{10}$$

Така залежність справджується лише для нормального закону розподілу [5, 8].

Оскільки кореляційна функція нас 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 представлених у джерелах найбільш імовірних виглядів:

$$\begin{gathered}K(\tau)=\sigma^2\cdot\exp(-a\cdot\tau^2)\\ K(\tau)=\sigma^2\cdot\exp(-a^2\cdot\tau^2)\,.\\ K(\tau)=\sigma^2\cdot\exp(-a\cdot|\tau|)\end{gathered} \tag{11}$$

З представлених, для дослідження вибрано варіант два: $K(\tau)=\sigma^2\cdot\exp(-a^2\cdot\tau^2)$.

Графічне відображення вибраної кореляційної функції наведено на рис. 1.

5. Розрахунок параметрів викидів випадкових процесів

Для подальшого дослідження даного методу використано п'ять варіантів часових залежностей характеристик випадкового процесу.

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 математичним очікуванням.

- $\sigma_x(t)=\sigma_0=\text{const}$, $m(t)=m_0=0$, $\Delta=\Delta_0=\text{const}$;
- $\sigma_x(t)=\sigma_0\cdot(1+k_1\cdot t)$, $m(t)=m_0=0$, $\Delta=\Delta_0=\text{const}$;
- $\sigma_x(t)=\sigma_0\cdot(1+k_2\cdot\sin(l\cdot t))$, $m(t)=m_0=0$, $\Delta=\Delta_0=\text{const}$;
- $\sigma_x(t)=\sigma_0=\text{const}$, $m(t)=m_0+k_3\cdot t$, $\Delta(t)=\Delta_0=\text{const}$;
- $\sigma_x(t)=\sigma_0=\text{const}$, $m(t)=m_0\cdot(1+k_4\cdot\sin(l\cdot t))$, $\Delta=\Delta_0=\text{const}$.

Такі п'ять варіантів дозволяють дослідити можливість прогнозування у різних випадках: для стаціонарних процесів, для нестаціонарних процесів, 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. 1 наведені початкові дані, вибрані для дослідження.

Таблиця 1

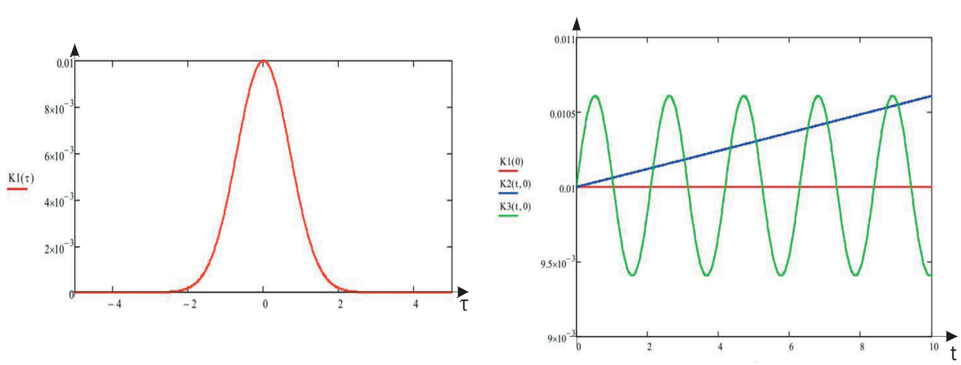
Вибрані параметри випадкового процесу

σ_0=	0.1	m_0=	0	k_1=	0.003	k_3=	0.001	l=	3
a=	1	Δ_0=	0.15	k_2=	0.03	k_4=	0.01		

У відповідності до теоретичних засад побудовані математичні залежності для п'яти випадків за формулами (1, 5, 6, 11), а отримані на основі цих рівнянь графіки залежності представлені на рис. 1 – 3.

Необхідно зауважити що при інтегруванні з межею безмежність вибирається деяке обмежене значення, оскільки будь-який програмний продукт для математичного моделювання нездатний порахувати інтеграли до безмежності, це значення необхідно вибирати виходячи із закону розподілу для якого проводиться інтегрування та приймати значення в межах декількох σ.

Подані залежності дозволяють спрогнозувати кількість викидів, тривалість викидів та середню тривалість одного викиду для перерахованих п'яти випадків. Результати розрахунків приведені на рис. 2, 3.



а б

Рис. 1. Кореляційна функція випадкового процесу дрейфу параметра: а — у області τ; б — у часовій областіt

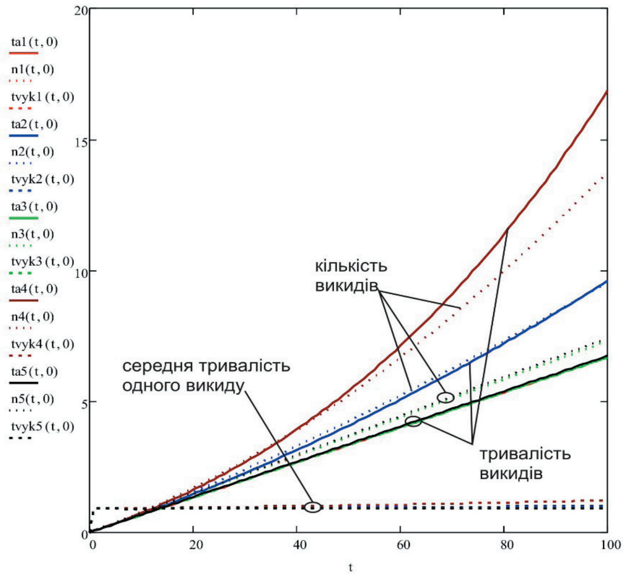


Рис. 2. Часові залежності загальної тривалості викидів, кількості викидів та середньої тривалості одного викиду

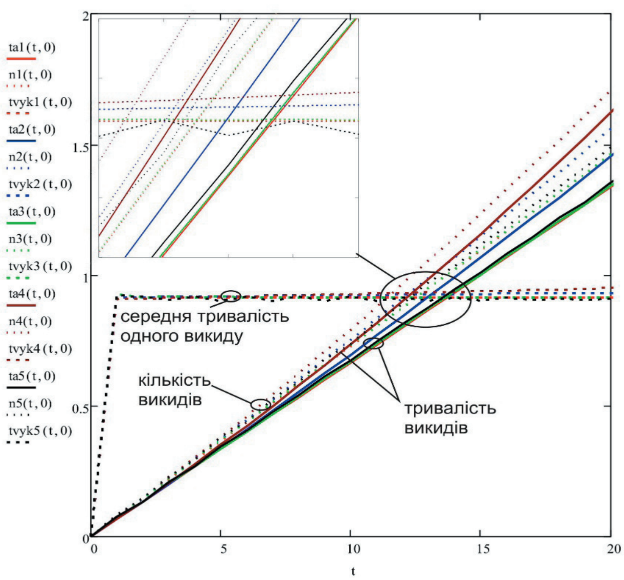


Рис. 3. Часові залежності загальної тривалості викидів, кількості викидів та середньої тривалості одного викиду у збільшеному вигляді

З рис. 2, 3 видно, що для кожного з випадків спостерігається відповідний характер часової залежності для усіх характеристик. Лінійні зміни середнього квадратичного відхилення та математичного очікування призводять до нелінійної зміни тривалості викидів та кількості викидів (синя та коричнева криві відповідно), що свідчить про накопичувальний характер усіх внесених змін.

Головною перевагою розробленого методу є те, що він дозволяє прогнозувати надійність радіоелектронної апаратури як у випадку стаціонарного процесу, так і у випадках процесу з періодичною складовою та квазідетермінованого випадкового процесу. Також перевагою методу є відсутність похибки, що вноситься методом, похибка визначення вноситься лише відповідністю вибраного закону розподілу, кореляційної функції та інших вхідних величин їх дійсним значенням. Суттєвими недоліками є ряд припущень і спрощень, які зменшують точність, та необхідність проводити додаткові розрахунки, які займають досить тривалий час навіть при обробці на сучасних комп'ютерах з використанням відповідних програмних пакетів.

6. Висновок

Представлений метод дозволяє спрогнозувати надійність радіоелектронної апаратури за визначальними параметрами при будь-якому з існуючих характерів випадкових процесів дрейфів параметрів.

Метод прогнозування надійності за допомогою теорії викидів є досить складним для розрахунків як вручну, так і за допомогою ЕОМ. Він вимагає інформації щодо законів розподілу значення параметра та швидкості зміни параметра, а використання спрощень і припущень використовувати лише статистичні дані значення випадкового параметру в окремі моменти часу призводить до зменшення точності.

Метод дозволяє врахувати мерехтливі відмови та спрогнозувати надійність як для стаціонарних процесів, так і процесів нестаціонарних.

В даній статті представлено метод для випадку одностороннього обмеження зверху, проте він може бути модифікований і для випадку з двохстороннім обмеженням.

Література

1. Гудков, М. В. Методика прогнозування надійності радіоелектронного обладнання при експлуатації за станом з контролем параметрів / М. В. Гудков // Системи озброєння та військова техніка – 2010. - N4(24). – С. 32 – 35.
2. Sumich D. An assessment of HF NVIS radio system reliability / D. Sumich, R. Vlasich // 4-th Intern. Conference on Rorts and Waterways - 2009. – P. 1 - 10.
3. Nedostup L. Predicting the reliability of radio-electronic devises by the monitoring of production defectiveness // Electronic Review – 2012. - R88NR,3a, - P. 33-36.
4. Rise, S. O. MathematicalAnalysesofRandomNoise / S. O. Rise // Bell. Syst. Thech. J. – 1944,1945 (23,24).
5. Тихонов, В. И. Выбросы случайных процессов/ В. И. Тихонов – М.: Наука, 1970. – 392 с.
6. Тихонов, В. И. Выбросы траекторий случайных процессов / В. И. Тихонов, В. И. Хименко - М.: Наука, 1987. – 306 с.
7. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
8. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников - М.: Наука, 1968. – 464 с.
9. Свешников, А. А. Основы теории ошибок / А. А. Свешников – Ленинград: Изд.Лен.унив., 1972. – 122 с.
10. Волков, Л. И. Надежность летательных аппаратов / Л. И. Волков, А. М. Шишкевич - М.: Высшая школа, 1975. - 296 с.
11. Недоступ, Л. А. Основи надійності радіоелектронних пристроїв / Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселичник, Ю. Я. Бобало - Львів: ВДУ «ЛП» 1998. – 219 с.