

DOI: 10.18372/2310-5461.40.13273

УДК 621.396.6.049.75 (045)

В. В. Костановський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
ДК «Укроборонпром» ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0002-3766-4455
e-mail: reliability100@i.ua;

О. Д. Козачук
ДК «Укроборонпром» ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0003-0905-1093
e-mail: kozaichyk@gmail.com

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ УНІВЕРСАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВІДМОВ ЯКА АПРОКСИМУЄ УЗАГАЛЬНЕНУ КРИВУ ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Вступ

Процес розробки радіоелектронної апаратури (РЕА) супроводжується прогнозуванням показників надійності на етапах розробки технічного завдання, ескізного, технічного та робочих проєктів. Виконання наближеного, орієнтовного та уточненого розрахунків надійності РЕА проводиться на основі використання довідкових даних про інтенсивності відмов виробів електронної техніки (ВЕТ).

Постановка проблеми

Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 27.005-97 [1] для розрахунку, оцінки та контролю показників надійності ВЕТ найбільш переважними є моделі відмов таких розподілів: експоненціального (Е), Вейбула (W), дифузійного монотонного (DM) і дифузійного немонотонного (DN).

Однак, тільки для експоненціального розподілу (Е-моделі) визначаються і видаються статистичні дані про характеристики надійності ВЕТ, що дозволяє проводити розрахунки надійності РЕА на ранніх стадіях проєктування [2].

У процесі технічного і робочого проєктування РЕА розробникам необхідно виконувати розрахунки показників надійності та кількості запасних частин (ЗП) з урахуванням як катастрофічних (раптових) відмов, так і процесів старіння і зносу ВЕТ (поступових відмов).

Також відомо, що в офіційних довідниках по надійності ВЕТ наводиться додаткова інформація про розподіл відмов за видами (раптовими та поступовими) і показниками довговічності ВЕТ (мінімальне напрацювання та гамма-процентний ресурс) [3; 4].

Тому є актуальним вирішення проблеми ідентифікації параметрів універсальної математичної

моделі, яка апроксимує узагальнену криву інтенсивності відмов ВЕТ на основі довідкових даних про надійність.

Аналіз досліджень і публікацій

Тривалість життєвого циклу будь-якого ВЕТ характеризується узагальненою кривою зміни інтенсивності відмов [5; 9].

На рис. 1 зображена класична узагальнена крива зміни інтенсивності відмов ВЕТ у часі, яка має ванно-образну форму — «корито», при цьому тривалість життєвого циклу поділяється на чотири нерівних періоду.

Протягом першого періоду (на відріжку часу від 0 до t_1) виявляються ранні відмови через конструктивні або виробничі дефекти.

Елементи, які містять дефекти, відмовляють протягом першого періоду — приробітку.

Протягом другого періоду (на відріжку часу від t_1 до t_2) проявляються раптові відмови, викликані випадковим збільшенням внутрішніх навантажень в системі або гранично важкими умовами роботи системи.

Третій період (третя ділянка кривої на відріжку часу від t_2 до t_3) характеризується спільним проявом раптових і поступових відмов.

Другий і третій періоди характеризують нормальну експлуатацію ВЕТ. Четвертий, останній період ($t > t_3$) — це період швидкого старіння або зносу.

До цього часу в електронних елементах відбуваються незворотні фізико-хімічні зміни, вони швидко старіють, зношуються, їх надійність знижується, тобто інтенсивність відмов різко зростає.

Четверта ділянка кривої характеризується значною (катастрофічною) перевагою поступових відмов.

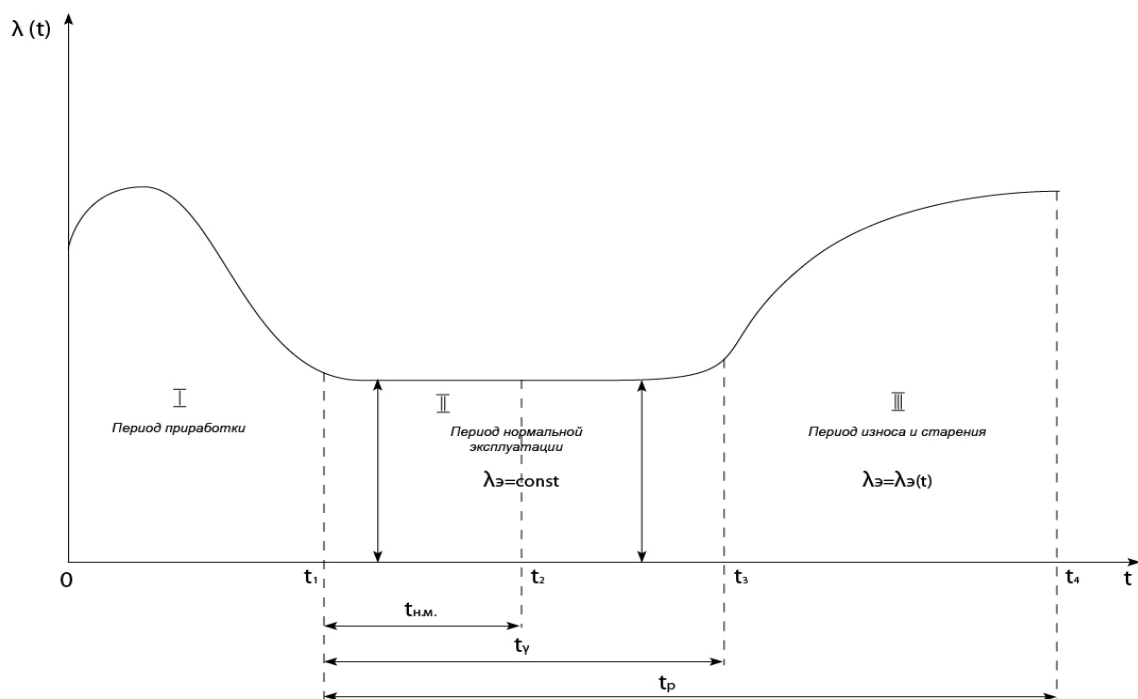


Рис. 1. Узагальнена крива інтенсивності відмов ВЕТ

Основні характеристики надійності ВЕТ, представлені на узагальненій кривій інтенсивності відмов (рис. 1):

– експлуатаційна інтенсивність повних (раптових і поступових) відмов ВЕТ:

$$\lambda_{\text{експ. відм}} = \lambda_{\text{повн. відм}} \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{повн. відм}} = \lambda_{\text{рапт. відм}} + \lambda_{\text{пост. відм}}$$

– гамма-процентний ресурс — T_γ , при $\gamma = 0,95$;

– для більшого (основного) масиву ВЕТ (рідко при $\gamma = 0,90$ — для невеликого масиву ВЕТ);

– мінімальний наробіток — $t_{\text{н.м}}$ (протягом якого проводяться випробування ВЕТ на довговічність).

Із рис. 1 можна зробити висновок, що:

а) тривалість нормальної експлуатації ВЕТ обмежується його гамма-відсотковим ресурсом;

б) тривалість третьої ділянки кривої обмежується тривалістю життя ВЕТ (середнього наробітку до відмови, тобто середнім ресурсом);

в) тривалість третьої ділянки визначається різницею між середнім і гамма-відсотковим ресурсом.

Таким чином, період нормальної експлуатації (гамма-процентного ресурсу) ВЕТ поділяється на два підперіоди. Перший, початковий підперіод характеризується постійністю значення експлуатаційної інтенсивності відмов і обмежується мінімальним наробітком. Другий, завершальний, підперіод характеризується поступовим зростанням інтенсивності відмов за рахунок переваги явищ старіння та зносу і обмежується гамма-відсотковим ресурсом.

У табл. 1 показано представлений у довіднику по надійності ВЕТ [3] розподіл відмов основних типів ВЕТ за видами відмов: раптові відмови і поступові відмови (у % від загальної експлуатаційної інтенсивності відмов).

Побудова математичних моделей надійності ВЕТ, що враховують одночасно показники безвідмовності і довговічності, можливо за використанням комбінації двох розподілів.

Ученими І. Б. Герцбахом і Х. Б. Кордонським у праці [6] для опису відмов, які проявляються під дією двох незалежних чинників, запропонована результуюча модель, яка являє собою композицію (перемноження) цих розподілів.

У праці описана схема миттєвих пошкоджень (раптових відмов), тобто відмови з вини «пікових навантажень», і схема накопичуваних пошкоджень (поступових відмов), що призводить до нормального розподілу.

Подібне накладення двох причин відмов описується розподілом мінімуму експоненціально і нормально розподіленої випадкових величин.

За кордоном фахівцями з надійності широко використовують для опису моделей відмов ВЕТ і РЕА традиційні безперервні і дискретні розподіли випадкових величин [7].

Так американським професором Д. В. Кесесіоглу [8] розглянуто застосування п'яти нетрадиційних моделей відмов у вигляді суперпозиції різних розподілів (експоненціального, Вейбула тощо) для апроксимації узагальненої (ванно-подібної) кривої інтенсивності відмов РЕА.

Таблиця 1

Розподіл відмов основних типів ВЕТ за видами відмов

Тип ВЕТ	Розподіл відмов за видами відмов, %	
	Раптові	Поступові
Діоди кремнієві	20	80
Транзистори кремнієві	20	80
Тиристоры	18	82
Діоди НВЧ	56	44
Транзистори НВЧ: – малої і середньої потужності; – великої потужності	48 35	52 65
Випромінювачі напівпровідникові	62	38
Оптопара	62	38
Мікросхеми оптоелектронні	50	50
Індикатори напівпровідникові	67	33
Резистори постійні недротяні	5	95
Конденсатори : – керамічні (напруга 1600 В та менше) – оксидно-електролітні	41 76	59 24
Трансформатори	20	80
З'єднувачі низькочастотні для об'ємного монтажу	31	69
З'єднання (пайки)	–	100
Плати друковані для об'ємного монтажу з металевим наскрізним отвором	–	100

Метою цієї роботи є:

– розроблення методу ідентифікації параметрів універсальної математичної моделі відмов яка апроксимує узагальнену криву інтенсивності відмов ВЕТ за довідковими даними про надійність;

– розроблення і дослідження універсальної моделі відмов ВЕТ на основі композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів.

Розроблення методу ідентифікації параметрів універсальної математичної моделі відмов яка апроксимує узагальнену криву інтенсивності відмов ВЕТ за довідковими даними про надійність

Для розробки універсальних моделей відмов можуть використовуватися композиції (перемноження) розподілів, які містять два розподіли:

– для апроксимації раптових відмов — експоненціальний розподіл;

– для апроксимації поступових відмов — одне з наступних розподілів — дифузійний монотонний, дифузійний немонотонний, Вейбула і відсічений нормальний.

У процесі ідентифікації узагальненої кривої експлуатаційної інтенсивності відмов визначаються аналітичні залежності параметрів універсальної моделі відмов від довідкових характеристик надійності ВЕТ: інтенсивностей раптових і поступових відмов, імовірності гамма (γ), мінімального наробітку ($t_{н.м}$) і гамма-відсоткового ресурсу (T_γ) [5; 9].

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) для запропонованої авторами універсальної моделі відмов (УМВ) визначається добутком двох ІБР (1) і (2) розподілів, що характеризують, відповідно, раптові (1) і поступові (2) відмови:

$$P_{\text{ВЕТ}}(t) \approx P_{\text{УМВ}}(t); \quad (2)$$

$$P_{\text{УМВ}}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t).$$

Для забезпечення досить точної апроксимації узагальненої кривої інтенсивності відмов ВЕТ необхідно забезпечити дотримання не менш як трьох обов'язкових умов (для трьох моментів часу), тобто необхідно забезпечити виконання таких умов:

1-ша умова:

$$t_1 = 0; P_{\text{УМВ}}(t_1 = 0) = 1; \lambda_{\text{ВЕТ. УМВ}}(t_1 = 0) = \lambda_{\text{рапт. відм}}; \quad (3)$$

2-га умова:

$$t_2 = t_{н.м}; \lambda_{\text{УМВ}}(t_2 = t_{н.м}) = \lambda_{\text{повн. відм}}; \quad (4)$$

3-тя умова:

$$t_3 = T_\gamma; P_{\text{УМВ}}(t_3 = T_\gamma) = \gamma. \quad (5)$$

Для визначення значень показників другого розподілу відмов використовуються умови апроксимації узагальненої кривої інтенсивності відмов ВЕТ — друге (4) і третє (5), оскільки перша умова апроксимації (3) є умовою нормування. Тоді, отримуємо систему з двох нелінійних (трансцендентних) рівнянь щодо значень параметрів другого розподілу відмов.

Розробка і дослідження універсальної математичної моделі відмов ВЕТ, на основі композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів

Імовірність безвідмовної роботи універсальної моделі відмов (E-DN) визначається перемноженням ІБР експоненціального розподілу (E) і дифузійного немонотонного розподілу (DN):

$$P_{\text{ВЕТ}}(t) \approx P_{\text{E-DN}}(t); \quad (6)$$

$$P_{\text{E-DN}}(t) = P_E(t) P_{\text{DN}}(t).$$

Аналітичний вираз ІБР, щільності розподілу часу безвідмовної роботи і інтенсивності відмов для композиції двох моделей надійності ВЕТ представлені у формулах (7)–(10).

Щільність розподілу

$$f_{E-DN}(t) = \exp(-\lambda_{\text{рапт. відм}} t) \left\{ \lambda_{\text{рапт. відм}} \left[\Phi \left(\frac{T_{0_DN} - t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi \left(-\frac{T_{0_DN} + t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) \right] + \frac{\sqrt{T_{0_DN}}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(t - T_{0_DN})^2}{2v^2 T_{0_DN} t} \right] \right\}. \quad (7)$$

Модель відмов (функція розподілу)

$$F_{E-DN}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{\text{рапт. відм}} t) \left[\Phi \left(\frac{T_{0_DN} - t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi \left(-\frac{T_{0_DN} + t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) \right]. \quad (8)$$

Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)

$$P_{E-DN}(t) = \exp(-\lambda_{\text{рапт. відм}} t) \left[\Phi \left(\frac{T_{0_DN} - t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi \left(-\frac{T_{0_DN} + t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) \right]. \quad (9)$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda_{E-DN}(t) = \lambda_{\text{рапт. відм}} + \frac{\frac{\sqrt{T_{0_DN}}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(t - T_{0_DN})^2}{2v^2 T_{0_DN} t} \right]}{\left[\Phi \left(\frac{T_{0_DN} - t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi \left(-\frac{T_{0_DN} + t}{v\sqrt{T_{0_DN} t}} \right) \right]}. \quad (10)$$

Використовуючи умови апроксимації узагальненої кривої інтенсивності відмов ВЕТ, отримуємо систему з двох нелінійних (трансцендентних) рівнянь щодо значень середнього напрацювання до відмови і коефіцієнта варіації для DN-розподілу, відповідно — T_{0_DN}, v

$$\lambda_{E-DN}(t_{\text{н.м}}) = \lambda_{\text{рапт. відм}} + \frac{\frac{\sqrt{T_{0_DN}}}{vt\sqrt{2\pi t_{\text{н.м}}}} \exp \left[-\frac{(t_{\text{н.м}} - T_{0_DN})^2}{2v^2 T_{0_DN} t_{\text{н.м}}} \right]}{\left[\Phi \left(\frac{T_{0_DN} - t_{\text{н.м}}}{v\sqrt{T_{0_DN} t_{\text{н.м}}}} \right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi \left(-\frac{T_{0_DN} + t_{\text{н.м}}}{v\sqrt{T_{0_DN} t_{\text{н.м}}}} \right) \right]}. \quad (11)$$

$$\gamma = \exp(-\lambda_{\text{рапт. відм}} T_\gamma) \left[\Phi \left(\frac{T_{0_DN} - T_\gamma}{v\sqrt{T_{0_DN} T_\gamma}} \right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi \left(-\frac{T_{0_DN} + T_\gamma}{v\sqrt{T_{0_DN} T_\gamma}} \right) \right]$$

Уведемо позначення:

$$t_{\text{н.м}} = zT_\gamma, x = \frac{T_\gamma}{T_{0_DN}}, zx = \frac{t_{\text{н.м}}}{T_{0_DN}}, \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{повн. відм}} = \lambda_{\text{рапт. відм}} + \lambda_{\text{пост. відм}};$$

$$\lambda_{\text{рапт. відм}} = \alpha_1 \lambda_{\text{повн. відм}}; \quad (13)$$

$$\lambda_{\text{пост. відм}} = \alpha_2 \lambda_{\text{повн. відм}}; \alpha_1 + \alpha_2 = 1,$$

тоді система нелінійних рівнянь (11) спрощується таким чином:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{повн.відм}} T_\gamma &= \frac{\frac{1}{vz\sqrt{2\pi zx}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2zx}\right]}{\alpha_2 \left[\Phi\left(\frac{1-zx}{v\sqrt{zx}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+zx}{v\sqrt{zx}}\right) \right]} \\ \lambda_{\text{повн.відм}} T_\gamma &= -\frac{\left\{ \ln \left[\Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{x}}\right) \right] - \ln \gamma \right\}}{\alpha_1} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Прирівнюємо праві частини першого і другого рівнянь один одному, тоді з системи двох нелінійних рівнянь (14) виходить одне нелінійне рівняння (15). Дане рівняння розв'язується чисельними методами щодо змінної x для різних значень $v, \gamma, z, \alpha_1, \alpha_2$. Далі за відомим значенням змінної визначається середнє напрацювання до відмови за формулою (16).

$$\frac{\frac{1}{vz\sqrt{2\pi zx}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2zx}\right]}{\alpha_2 \left[\Phi\left(\frac{1-zx}{v\sqrt{zx}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+zx}{v\sqrt{zx}}\right) \right]} + \frac{\left\{ \Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{x}}\right) \right\} - \ln \gamma}{\alpha_1} = 0 \quad (15)$$

$$T_{0_DN} = \frac{T_\gamma}{x} \quad (16)$$

На рис. 2 представлена номограма для визначення коефіцієнта варіації DN-розподілу залежно від твору експлуатаційної інтенсивності повних відмов ВЕТ на гамма-процентний ресурс при різних співвідношеннях експлуатаційної інтенсивності раптових і поступових відмов (α_1 і α_2). На рис. 3 представлена номограма для визначення нормованої (за гамма-відсоткового ресурсу) напрацювання до відмови ВЕТ залежно від коефіцієнта варіації DN-розподілу.

Використовуючи номограми на рис. 2 і 3, для обраних з довідника по надійності ВЕТ [3] статистичних даних про безвідмовність і довговічність конкретного виду ВЕТ: експлуатаційної повної інтенсивності відмов — λ_E , співвідношеннях експлуатаційної інтенсивності раптових і поступових відмов (α_1 і α_2), мінімального наробітку — $t_{н.м.}$, імовірності гамма — γ і гамма-відсоткового ресурсу — T_γ послідовно визначаються такі параметри DN-розподілу:

– перемноження експлуатаційної інтенсивності повних відмов на гамма-процентний ресурс $\lambda_E \times T_\gamma$;

– коефіцієнт варіації v за номограмою на рис. 2;

– нормований (за гамма-відсотковим ресурсом) середній наробіток до відмови T_{0_DN} / T_γ за номограмою на рис. 3;

– середній наробіток до відмови T_{0_DN} .

Для визначення середнього наробітку до відмови ВЕТ для композиції розподілів E·DN (з урахуванням прояву раптових і поступових відмов), доцільно використовувати відому формулу:

$$T_{0_E\cdot DN} = \int_0^\infty \exp(-\lambda_{\text{рапт.отк}} t) \times \left[\Phi\left(\frac{T_{0_DN} - t}{v\sqrt{T_{0_DN}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0_DN} + t}{v\sqrt{T_{0_DN}t}}\right) \right] dt \quad (17)$$

Представлений у формулі (17) інтеграл можна обчислити наближено чисельними методами з використанням поліномів Лагерра. На рис. 4 представлена номограма для обчислення нормованого (за гамма-відсотковим ресурсом) середнього наробітку до відмови ВЕТ для композиції розподілів E*DN. Як видно з номограм на рис. 3 і 4 середній наробіток до відмови УМВ ВЕТ зростає зі збільшенням відсотка раптових відмов і збільшенням коефіцієнта варіації. Це цілком зрозуміло, тому що відсоток поступових відмов ВЕТ визначається гамма-відсотковим ресурсом.

З цього випливає, що в універсальній моделі відмов показники надійності ВЕТ в цілому визначаються (обмежуються) відсотком поступових відмов.

Висновки

Розглянутий в роботі метод ідентифікації параметрів універсальної моделі відмов ВЕТ можна застосовувати тільки під час використання вихідних даних, які подаються в довідниках по надійності ВЕТ. Даний метод ідентифікації можна використовувати за довільними початковими даними. В універсальних моделях відмов ВЕТ визначальну роль відіграють поступові відмови.

Запропонований у роботі метод ідентифікації параметрів універсальної математичної моделі відмов ВЕТ дозволяє розробникам РЕА розробляти математичні моделі надійності радіоелектронних систем і проводити розрахунки показників безвідмовності, довговічності та ЗПП в процесі їх проектування.

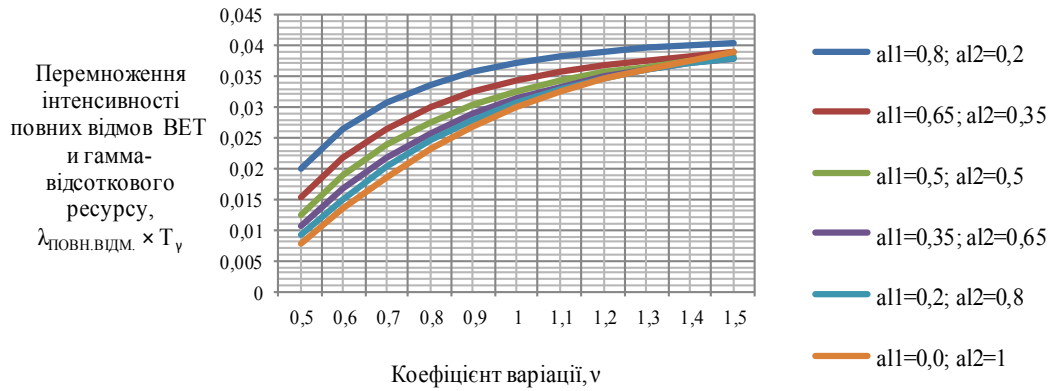


Рис. 2. Номограма для визначення коефіцієнта варіації залежно від інтенсивності повних відмов ВЕТ для композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів при різних значеннях коефіцієнтів α_1 (a_{11}) і α_2 (a_{12}).

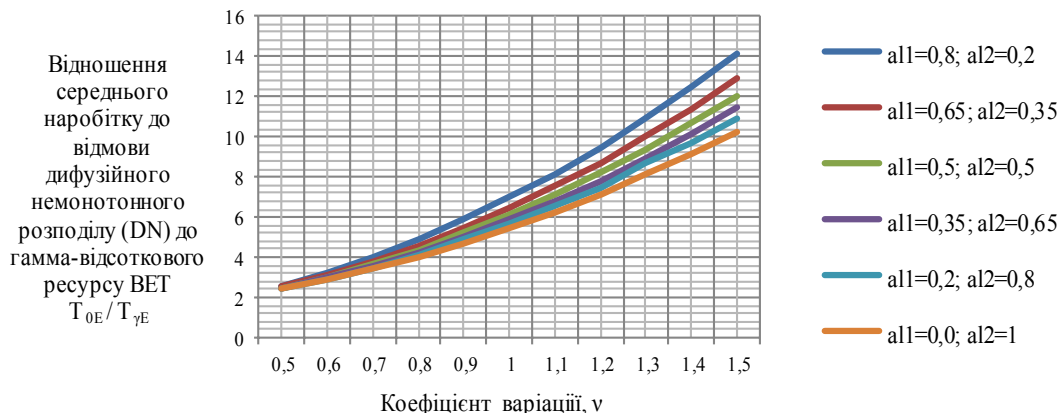


Рис. 3. Номограма для визначення ставлення середнього наробітку до відмови гамма-відсоткового ресурсу ВЕТ для DN-розподілу залежно від коефіцієнта варіації для композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів при різних значеннях коефіцієнтів α_1 (a_{11}) і α_2 (a_{12}).

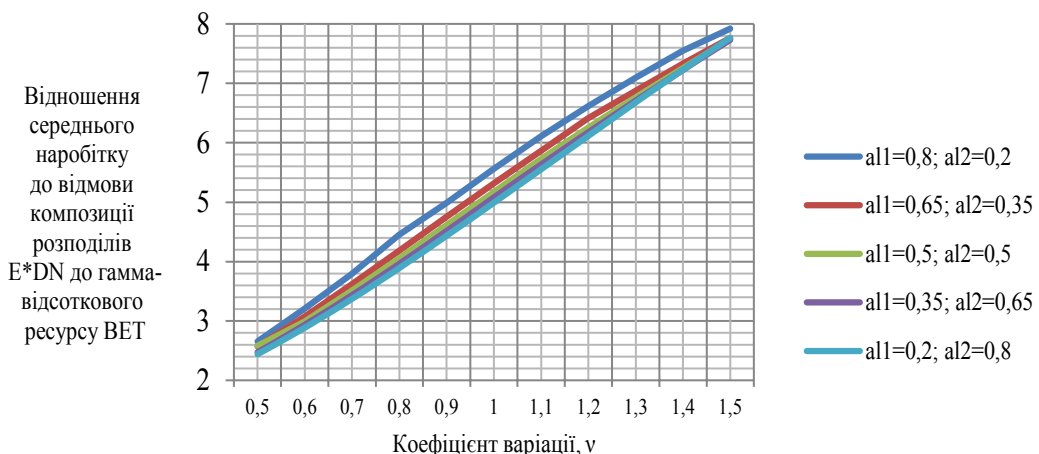


Рис. 4. Номограма для визначення нормованої (за гамма-відсотковим ресурсом) середнього наробітку до відмови для УМВ ВЕТ (композиції розподілів E·DN) залежно від коефіцієнта варіації за різними значеннями коефіцієнтів α_1 (a_{11}) і α_2 (a_{12}).

ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.
2. **Kostanovsky V., Kozachuk O.** Prospects for probabilistic – physical analysis of reliability in the design of radio-electronic systems. *National aviation university electronics and control systems*. Kyiv, 2017. № 1 (51). P. 59 – 67. ISSN 1990 – 5548.
3. Надежность ЭРИ: Справочник. М.: МО РФ. 2006 г. 641 с.
4. РД В 319.01.20-98. Руководящий методический документ. Положение о справочнике. «Надежность электрорадиоизделий». М. : МО РФ, 1999. 641 с.
5. **Шишонов Н. А.** и др. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М. : Сов. Радио, 1964 г. 395 с.
6. **Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б.** Модели отказов: под ред. Б. В. Гнеденко. М. : Сов. радио, 1966. 166 с.
7. **Dimitri B., Kececioglu** Maintainability, Availability and Operational Readiness Engineering Handbook, Volume 1. 1992. 803 p.
8. **Dimitri B., Kececioglu** Reliability Engineering Handbook. Volume 2. ISBN 18523345331, Hoang Pham, PhD Rutgers University Piscataway New Jersey, USA, 576 p.
9. **Костановський В. В., Козачук О. Д.** Математичні моделі прогнозування показників безвідмовності та довговічності електрорадіовиробів на основі статистичних даних про відмови. *Математичні машини і системи*. 2015. №2. С. 157–169.

Костановський В. В., Козачук О. Д.

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ УНІВЕРСАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВІДМОВ ЯКА АПРОКСИМУЄ УЗАГАЛЬНЕНУ КРИВУ ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

У процесі розробки електронних систем на різних етапах розробки показники надійності оцінюються з різним ступенем точності. Уточнений розрахунок надійності на етапі робочого проектування проводиться з урахуванням умов експлуатації, факторів навколишнього середовища та фактичних коефіцієнтів електричного навантаження радіоелементів. «Керівні принципи для розрахунку надійності пристроїв і систем», що діють в даний час на підприємствах, вважають, що всі відмови радіоелементів вважаються катастрофічними (раптовими). Це не враховує процеси зносу елементів і погіршення параметрів, тобто процес поступового виходу з ладу радіоелементів. Отримані оцінки надійності є песимістичними (оцінки показників надійності значно занижені – помилки оцінки варіюються від 30 % до 80 %), що змушує розробників вводити додаткову непотрібну надмірність в структуру проектованої системи. Також значно збільшується необхідна кількість запасних частин для роботи системи.

У роботі запропоновано нову універсальну модель відмов виробів електронного обладнання (далі - радіоелементи), яка враховує раптові і поступові відмови. Універсальна модель побудована з використанням композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілу відмов радіоелементів. Розроблено метод визначення параметрів універсальної моделі відмов, який дозволяє апроксимувати узагальнену криву інтенсивності відмов радіоелементів (узагальнену криву інтенсивності відмов «ванна надійності»). Це дозволяє використовувати статистичні дані щодо надійності, які систематизовані в «Довіднику щодо надійності електронних виробів (радіоелементів)».

Авторами визначені аналітичні вирази для імовірності безвідмовної роботи, функції розподілу, щільності розподілу і частоти відмов універсальної математичної моделі відмов радіоелементів. Для практичного застосування були розроблені три типи номограм. Запропонований метод визначення параметрів універсальної математичної моделі відмов радіоелементів дозволяє розробникам: розробити математичні моделі надійності електронних систем в процесі проектування з урахуванням раптових і поступових відмов елементів; проводити розрахунки показників надійності, довговічності приладів та кількості запасних частин з високою точністю і надійністю; прибрати зайву надмірність під час проектування радіоелектронних систем; знизити до 30-40 відсотків обсягу необхідної кількості запасних частин для технічної експлуатації систем.

Ключові слова: ідентифікація; апроксимація; модель відмов; інтенсивність відмов; середній наробіток до відмови; експоненціальний розподіл; дифузійний немонотонний розподіл.

Kostanovsky V., Kozachyk O.

THE METHOD OF IDENTIFYING THE PARAMETERS OF THE UNIVERSAL MODEL OF FAILURES APPROXIMATING THE GENERALIZED CURVE OF THE FAILURE RATE OF ELECTRONIC PRODUCTS

In the process of developing electronic systems at different stages of development, reliability indicators are evaluated with varying degrees of accuracy. Refined calculation of reliability at the stage of detailed design is carried out taking into account operating conditions, environmental factors and actual coefficients of the electrical load of radio elements. The “guidelines for calculating the reliability of devices and systems” currently in force in enterprises con-

sider that all failures of radio elements are considered catastrophic (sudden). This does not take into account the processes of deterioration of elements and deterioration of parameters, that is, the process of gradual failure of radioelements. The resulting reliability estimates are pessimistic (the estimates of reliability indicators are significantly underestimated — evaluation errors range from 30% to 80%), which forces developers to introduce additional unnecessary redundancy into the structure of the designed system. The required number of spare parts for system operation also increases significantly.

Therefore, the authors propose a new universal model of failures of products of electronic equipment (hereinafter referred to as radio elements), which takes into account sudden and gradual failures. The universal model is constructed using a composition of exponential and diffusive non-monotonic distribution of failures of radio elements. A method has been developed for determining the parameters of the universal failure model, which allows approximating the generalized curve of the intensity of failures of radio elements (the generalized failure curve of the “reliability bath”). This allows the use of reliability statistics, which are systematized in the “Reliability Guide for Electronic Products (Radio Elements)”.

The authors have determined analytical expressions for the probability of trouble-free operation, the distribution function, the distribution density and the failure rate of the universal mathematical model of radio element failures. For practical application, three types of nomograms were developed.

The proposed method for determining the parameters of the universal mathematical model of failures of radioelements allows developers: to develop mathematical models of the reliability of electronic systems in the design process, taking into account sudden and gradual failures of elements; to carry out calculations of indicators of reliability, durability of devices and the number of spare parts with high accuracy and reliability; remove excess redundancy in the design of electronic systems; reduce to 30–40 percent the volume of the required number of spare parts for the technical operation of systems.

Keywords: identification; approximation; bounce model; bounce rate; average work up to failure; exponential distribution; diffusion nonmonotonic distribution.

Костановский В. В., Козачук О. Д.

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ, КОТОРАЯ АППРОКСИМИРУЕТ ОБОБЩЕННУЮ КРИВУЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В процессе разработки электронных систем на разных этапах разработки показатели надежности оцениваются с различной степенью точности. Уточненный расчет надежности на этапе рабочего проектирования проводится с учетом условий эксплуатации, факторов окружающей среды и фактических коэффициентов электрической нагрузки радиоэлементов. «Руководящие принципы для расчета надежности устройств и систем», действующие в настоящее время на предприятиях, считают, что все отказы радиоэлементов считаются катастрофическими (внезапными). Это не учитывает процессы износа элементов и ухудшения параметров, то есть процесс постепенного выхода из строя радиоэлементов. Получаемые оценки надежности являются пессимистическими (оценки показателей надежности значительно занижены - ошибки оценки варьируются от 30 % до 80 %), что вынуждает разработчиков вводить дополнительную ненужную избыточность в структуру проектируемой системы. Также значительно увеличивается необходимое количество запасных частей для работы системы.

В работе предложена новая универсальную модель отказов изделий электронного оборудования (далее - радиоэлементы), которая учитывает внезапные и постепенные отказы. Универсальная модель построена с использованием композиции экспоненциального и диффузионного немонотонного распределения отказов радиоэлементов. Разработан метод определения параметров универсальной модели отказов, который позволяет аппроксимировать обобщенную кривую интенсивности отказов радиоэлементов (обобщенную кривую интенсивности отказов «корыто»). Это позволяет использовать статистические данные о надежности, которые систематизированы в «Справочнике по надежности электронных изделий (радиоэлементов)».

Авторами определены аналитические выражения для вероятности безотказной работы, функции распределения, плотности распределения и частоты отказов универсальной математической модели отказов радиоэлементов. Для практического применения были разработаны три типа номограмм.

Предложенный метод определения параметров универсальной математической модели отказов радиоэлементов позволяет разработчикам: разработать математические модели надежности электронных систем в процессе проектирования с учетом внезапных и постепенных отказов элементов; проводить расчеты показателей надежности, долговечности приборов и количества запасных частей с высокой точностью и надежностью; убрать лишнюю избыточность при проектировании радиоэлектронных систем; снизить до 30-40 процентов объемы потребного количества запасных частей для технической эксплуатации систем.

Ключевые слова: идентификация; аппроксимация; модель отказов; интенсивность отказов; средняя наработка на отказ; экспоненциальное распределение; диффузное немонотонное распределение.

Стаття надійшла до редакції 29.10.2018 р.
Прийнято до друку 10.12.2018 р.