



УДК 623.6-523.8:623.4.017

В.В. КОСТАНОВСЬКИЙ*, О.Д. КОЗАЧУК*

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕКТРОРАДІОВИРОБІВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ ПРО ВІДМОВИ

*Національний авіаційний університет, Київ, Україна

***Анотація.** Запропоновані математичні моделі безвідмовності і довговічності електрорадіовиробів з використанням суперпозицій експоненціального та розподілу Вейбула, експоненціального та дифузійного немонотонного розподілів, які дозволяють побудувати нові математичні моделі надійності електронної апаратури, що враховують раптові і поступові відмови електрорадіовиробів.*

***Ключові слова:** моделі, безвідмовність, довговічність, електрорадіовироби, розподіл, експоненціальний, дифузійний немонотонний, Вейбула, відмови, раптові, поступові, імовірність, інтенсивність.*

***Аннотация.** Предложены математические модели безотказности и долговечности электрорадиоизделий с использованием суперпозиций экспоненциального и распределения Вейбулла, экспоненциального и диффузионного немонотонного распределений, которые позволяют построить новые математические модели надежности электронной аппаратуры, учитывающие внезапные и постепенные отказы электрорадиоизделий.*

***Ключевые слова:** модели, безотказность, долговечность, электрорадиоизделия, распределение, экспоненциальное, диффузионное немонотонное, Вейбулла, отказы, внезапные, постепенные, вероятность, интенсивность.*

***Abstract.** The mathematical models of reliability and durability of electronic and radio components using the superpositions of exponential and Weibull distribution, exponential and diffusion non-monotonic distributions, which allow to build a new mathematical models of reliability of electronic equipment, taking into account the sudden and gradual failures of electronic and radio components.*

***Keywords:** models, reliability, durability, electronic and radio components, distribution, exponential, diffusion, non-monotonic, Weibull, failures, sudden, gradual, probability, intensity.*

1. Вступ

Для проведення прогнозування показників надійності електронної апаратури у процесі проектування використовується довідкова статистична інформація про інтенсивності раптових та поступових відмов і гамма-процентний ресурс електрорадіовиробів (ЕРВ), представлена в довідниках щодо надійності і технічних умов [1–3]. Для спрощення розрахунків показників надійності електронної апаратури застосовується гіпотеза про постійність інтенсивності відмов і експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи ЕРВ. Шляхом нескладних розрахунків це дозволяє визначати показники безвідмовності – інтенсивності відмов ЕРВ і середнє напрацювання до відмови електронних модулів. Однак такий підхід дає можливість проводити тільки порівняння різних варіантів структурних схем для побудови системи на ранніх стадіях проектування електронної апаратури і виконувати орієнтовні оцінки показників безвідмовності апаратури, але не дозволяє прогнозувати показники безвідмовності і довговічності з урахуванням раптових і поступових відмов. Метод аналізу надійності апаратури за рахунок раптових відмов за проектуванням електрон-

них систем, регламентований комплексами державних військових стандартів «Мороз-5», «Клімат-6» [4, 5], широко використовується в даний час на підприємствах оборонної промисловості.

Однак даний метод абсолютно не враховує поступові відмови ЕРВ за рахунок явищ зносу та старіння і не дозволяє прогнозувати показники безвідмовності і довговічності (ресурсу і терміну служби) електронної апаратури. На сучасному етапі розвитку науки і техніки впровадження комп'ютерної техніки та мережі Інтернету на підприємствах оборонної промисловості дозволяє прогнозувати показники безвідмовності і довговічності ЕРВ з використанням більш складних, ніж експоненціальний закон розподілу, математичних моделей надійності. Математична модель надійності, що враховує поступові відмови ЕРВ, запропонована професором В.П. Стрельниковим у працях [6, 7]. Однак дана модель не враховує раптові відмови на початковому періоді експлуатації та показники ресурсу ЕРВ – мінімальне напруження і гамма-відсотковий ресурс.

2. Постановка задачі

Тривалість життєвого циклу будь-якого ЕРВ характеризується узагальненою кривою зміни інтенсивності відмов [8]. На рис. 1 зображена класична крива зміни інтенсивності відмов ЕРВ у часі, яка має форму «корита». За рахунок цього тривалість життєвого циклу ЕРВ ділиться на три ділянки.

Перша ділянка кривої визначає період приробітку ЕРВ – період I (зі спадаючою інтенсивністю відмов, вона характеризується приробітними відмовами ЕРВ), це початковий період; друга ділянка кривої (під час практичної сталості інтенсивності відмов) визначає період нормальної експлуатації – період II (мають місце раптові відмови і поступові відмови); третя ділянка кривої визначає період зносу і старіння – період III (значна перевага поступових відмов). Основними характеристиками, що визначають криву інтенсивності відмов, є:

– експлуатаційна інтенсивність повних (раптових і поступових) відмов

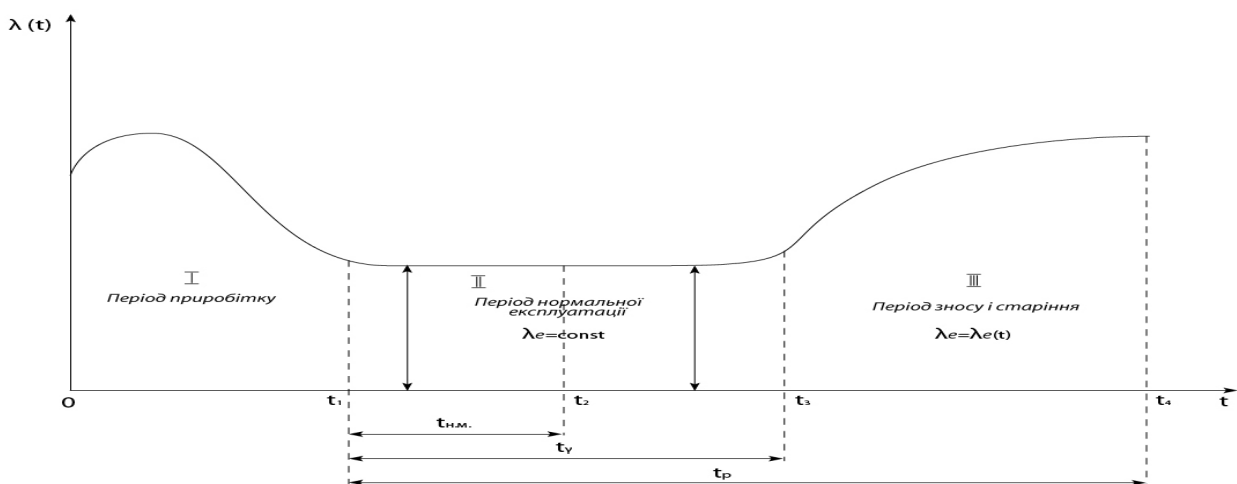
$$\lambda_E = \lambda_{Eppp} + \lambda_{Eпост},$$


Рис. 1. Типова крива інтенсивності відмов ЕРВ

– гамма-процентний ресурс t_γ (під час періоду нормальної експлуатації $\gamma = 0,95$ – для основного масиву ЕРВ, рідко $\gamma = 0,90$ – для невеликого масиву ЕРВ);

– мінімальний наробіток $t_{нм.}$, зазвичай дорівнює половині гамма-процентного ресурсу;

– розподіл відмов за видами: раптові % та поступові % у загальній експлуатаційній інтенсивності відмов ЕРВ (табл. 1).

Таблиця 1. Розподіл відмов типів ЕРВ за постійними і раптовими видами

Тип електрорадіовиробів	Розподіл відмов за видами, %	
	Раптові	Поступові
Діоди кремнієві	20	80
Транзистори кремнієві	20	80
Тиристори	18	82
Діоди НВЧ	56	44
Транзистори НВЧ: – малої та середньої потужності;	48	52
– великої потужності	35	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);	41	59
– оксидно-електролітичні	76	24
Трансформатори	20	80
З'єднувачі низькочастотні для об'ємного монтажу	31	69
З'єднання (пайки)	0	100
Плати друковані для об'ємного монтажу з металевим наскрізним отвором	0	100

Тривалість другого періоду (нормальної експлуатації ЕРВ) обмежується гамма-відсотковим ресурсом. Третій період обмежується часом життя ЕРВ (середнім ресурсом), тривалість його визначається різницею між середнім і гамма-відсотковим ресурсом.

Період нормальної експлуатації (гамма-процентного ресурсу) зазвичай ділиться на два приблизно рівних періоди. Перший – початковий період, характеризується постійним значенням експлуатаційної інтенсивності відмов і обмежується мінімальним наробітком. Другий – завершальний період, характеризується поступовим зростанням інтенсивності відмов за рахунок переваги явищ старіння та зносу. Отже, для адекватного математичного опису процесу нормальної експлуатації і старіння ЕРВ (другого і третього періодів життєвого циклу) необхідна побудова математичної моделі надійності ЕРВ, що враховує прояв раптових і поступових відмов.

3. Побудова математичних моделей безвідмовності і довговічності ЕРВ

Розглянемо докладніше математичні моделі надійності (безвідмовності і довговічності) ЕРВ, що враховують незалежний прояв раптових і поступових відмов ЕРВ, які дозволять урахувати довідкові дані до надійності, наведені в довідниках щодо надійності ЕРВ і технічних умов [1–3].

Апроксимуємо ймовірність безвідмовної роботи (ІБР) ЕРВ добутком ІБР, що враховує раптові відмови, та ІБР, що враховує поступові відмови,

$$P_{EPB}(t) = P_{EPB_РАПТ.}(t) \times P_{EPB_ПОСТ.}(t). \quad (1)$$

Для цього розподіл часу безвідмовної роботи ЕРВ представимо суперпозицією двох класичних розподілів: експоненціального (для обліку раптових відмов) і Вейбула або дифузійного немонотонного (для обліку поступових відмов).

3.1. Модель ЕР*ВР – апроксимація ІБР ЕРВ добутком ІБР для експоненціального розподілу та для розподілу Вейбула

Імовірність безвідмовної роботи ЕРВ апроксимується добутком ІБР для експоненціального розподілу та розподілу Вейбула [9]:

$$P_{EPB}(t) \approx P_{EPB_E*B}(t), \quad (2)$$

$$P_{EPB_E*B}(t) = P_{EPB_E}(t) \times P_{EPB_B}(t). \quad (3)$$

Для забезпечення розподілу точної апроксимації ймовірність $P_{EPB_E*B}(t)$ повинна співпадати із імовірністю $P_{EPB}(t)$ як мінімум для трьох моментів часу, тобто повинні дотримуватися таких трьох умов:

$$1\text{-ша умова} - t_1 = 0, P_{EPB_E*B}(t_1 = 0) = 1, \quad (4)$$

$$2\text{-га умова} - t_2 = t_{нм}, P_{EPB_E*B}(t_2 = t_{нм}) = \exp(-\lambda_E t_{нм}), \quad (5)$$

$$3\text{-я умова} - t_3 = T_\gamma, P_{EPB_E*B}(t_3 = T_\gamma) = \gamma, \quad (6)$$

Також повинні дотримуватися 4-ої умови апроксимації:

$$\Lambda_{EPB_E*B}(t_1 = 0) = \lambda_{Eпанн.} \quad (7)$$

Примітка 1. Для неекспоненціальних математичних моделей, що використовують як вихідні дані гамма-процентний ресурс T_γ , обов'язкове виконання такого обмеження для значення експлуатаційної інтенсивності відмов:

$$\lambda_E < -\frac{\ln \gamma}{T_\gamma}. \quad (8)$$

Аналітичні вирази математичної моделі ЕР*ВР мають вигляд для ІБР ЕРВ:

$$P_{EPB_E*B}(t) = \exp\{-[\lambda_{Eпанн.} t + (\frac{b_m t}{T_{0B}})^m]\} : \quad (9)$$

– для щільності розподілу безвідмовної роботи ЕРВ має вигляд:

$$f_{EPB_E*B}(t) = [\lambda_{Eпанн.} + \frac{m}{t} (\frac{b_m t}{T_{0B}})^{m-1}] \exp\{-[\lambda_{Eпанн.} t + (\frac{b_m t}{T_{0B}})^m]\}; \quad (10)$$

– для інтенсивності відмов ЕРВ:

$$\Lambda_{EPB_E*B}(t) = \lambda_{Eпанн.} + \frac{m}{t} (\frac{b_m t}{T_{0B}})^{m-1}. \quad (11)$$

Для визначення параметра форми m та середнього наробітку до відмови T_{0B} застосовуються друга (5) і третя (6) умови апроксимації, тому що перша і четверта умови виконуються автоматично (7, 9).

Після цього, застосовуючи другу умову (5), отримуємо перше рівняння системи рівнянь відносно m і T_{0B} :

$$P_{EPB_E^*B}(t_{HM}) = \exp[-(\lambda_{Eпант} t + \lambda_{Еност.})t_{HM}]. \quad (12)$$

За третьою умовою (6) отримуємо друге рівняння системи рівнянь відносно m і T_{0B} :

$$P_{EPB_E^*B}(t_\gamma) = \gamma. \quad (13)$$

Підставляємо у перше рівняння (12) системи вираз (7) для $P_{EPB_E^*B}(t)$ та отримуємо новий аналітичний вираз для першого рівняння:

$$\exp[-(\lambda_{Eпант} t + \lambda_{Еност.})t_{HM}] = \exp(-\lambda_{Eпант.} t_{HM}) \times \exp[-(\frac{b_m t_{HM}}{T_{0B}})^m]. \quad (14)$$

Після спрощення виразу (13) і (14) отримуємо систему двох рівнянь відносно m і T_{0B} :

$$\begin{cases} \exp(-\lambda_{Еност.} t_{HM}) = \exp[-(\frac{b_m t_{HM}}{T_{0B}})^m] \\ \gamma = \exp\{-[\lambda_{Eпант.} t_\gamma + (\frac{b_m t_\gamma}{T_{0B}})^m]\} \end{cases}. \quad (15)$$

Система рівнянь (15) після логарифмування перетворюється і набуває такого вигляду:

$$\begin{cases} \lambda_{Еност.} t_{HM} = (\frac{b_m t_{HM}}{T_{0B}})^m \\ -\ln \gamma = \lambda_{Eпант.} t_\gamma + (\frac{b_m t_\gamma}{T_{0B}})^m \end{cases}. \quad (16)$$

Після повторного логарифмування система рівнянь (16) спрощується:

$$\begin{cases} \ln(\lambda_{Еност.} t_{HM}) = m[\ln(b_m t_{HM}) - \ln T_{0B}] \\ \ln[-(\ln \gamma + \lambda_{Eпант.} t_\gamma)] = m[\ln(b_m t_\gamma) - \ln T_{0B}] \end{cases}. \quad (17)$$

Відраховуємо від першого рівняння системи (17) друге рівняння, отримуємо лінійне рівняння відносно похідної m :

$$\ln(\lambda_{Еност.} t_{HM}) - \ln[-(\ln \gamma + \lambda_{Eпант.} t_\gamma)] = m[\ln(b_m t_{HM}) - \ln(b_m t_\gamma)]. \quad (18)$$

Після вирішення рівняння (18) отримуємо аналітичне рівняння для параметра форми m :

$$m = \frac{\ln(\lambda_{Еност.} t_{HM}) - \ln[-(\ln \gamma + \lambda_{Eпант.} t_\gamma)]}{\ln(b_m t_{HM}) - \ln(b_m t_\gamma)}. \quad (19)$$

Підставляємо значення похідної m у друге рівняння системи рівнянь (16) і отримуємо аналітичний вираз для середнього наробітку до відмови:

$$T_{0B} = \frac{b_m t_{HM}}{(\lambda_{Елост.} t_{HM})^{1/m}}. \quad (20)$$

Аналогічно можливо отримати аналітичний вираз для T_{0B} за першим рівнянням системи (17):

$$T_{0B} = \frac{b_m t_\gamma}{[-(\ln \gamma + \lambda_{Ерант.} t_\gamma)]^{1/m}}. \quad (21)$$

Примітка 2. Значення T_{0B} у цій моделі обмежуються такими значеннями:

$$T_{0B} < \frac{b_m T_\gamma}{\ln \gamma}. \quad (22)$$

3.2. Модель ЕР*ДНР – апроксимація ІБР ЕРВ добутком ІБР експоненціального та ІБР дифузійного немонотонного розподілу

ІБР ЕРВ, що представлена добутком ІБР для експоненціального та дифузійного немонотонного розподілу (ДНР):

$$P_{ЕРВ}(t) \approx P_{ЕРВ_Е*ДН}(t), \quad (23)$$

$$P_{ЕРВ_Е*ДН}(t) = P_{ЕРВ_Е}(t) \times P_{ЕРВ_ДН}(t). \quad (24)$$

Аналітичний вираз моделі ЕР*ДНР для ІБР ЕРВ має вигляд:

$$P_{ЕРВ_Е*ДН}(t) = \exp(-\lambda_{Ерант.} t) \left[\Phi\left(\frac{T_{0ДН} - t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_E^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0ДН} + t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right) \right]. \quad (25)$$

Аналітичний вираз для щільності розподілу часу безвідмовної роботи ЕРВ має вигляд:

$$f_{ЕРВ_Е*ДН}(t) = \exp(-\lambda_{Ерант.} t) \left\{ \lambda_{Ерант.} \left[\Phi\left(\frac{T_{0ДН} - t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_E^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0ДН} + t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right) \right] + \frac{\sqrt{T_{0ДН}}}{v_E t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - T_{0ДН})^2}{2v_E^2 T_{0ДН} t}\right] \right\}. \quad (26)$$

Аналітичний вираз для інтенсивності відмов ЕРВ має вигляд:

$$\Lambda_{ЕРВ_Е*ДН}(t) = \frac{\lambda_{Ерант.} \left[\Phi\left(\frac{T_{0ДН} - t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_E^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0ДН} + t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right) \right] + \frac{\sqrt{T_{0ДН}}}{v_E t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - T_{0ДН})^2}{2v_E^2 T_{0ДН} t}\right]}{\Phi\left(\frac{T_{0ДН} - t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_E^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0ДН} + t}{v_E \sqrt{T_{0ДН} t}}\right)}. \quad (27)$$

Для забезпечення точної апроксимації ймовірність $P_{ЕРВ_Е*ДН}(t)$ повинна співпадати з ймовірністю $P_{ЕРВ}(t)$ не менше, ніж для трьох моментів часу. Тобто має додержуватися не менше чотирьох обов'язкових умов:

$$1\text{-ша умова} - t_1 = 0, \quad P_{ЕРВ_Е*ДН}(t_1 = 0) = 1, \quad (28)$$

$$2\text{-га умова} - t_2 = t_{nm}, P_{EPB_E^*DH}(t_2 = t_{nm}) = \exp(-\lambda_E t_{nm}), \quad (29)$$

$$3\text{-я умова} - t_3 = T_\gamma, P_{EPB_E^*DH}(t_3 = T_\gamma) = \gamma, \quad (30)$$

$$4\text{-а умова} - \Lambda_{EPB_E^*DH}(t_1 = 0) = \lambda_{E_{рант.}}. \quad (31)$$

Для визначення середнього наробітку до відмови T_{0B} застосовуються друга і третя (29) умови апроксимації, тому що перша і четверта умови завжди виконуються.

Після цього отримуємо систему з двох нелінійних (трансцендентних) рівнянь відносно $T_{0_E^*DH}$ і ν_E :

$$\begin{cases} \ln \lambda_E = \frac{1}{2} [\ln T_{0DH} - \ln(2\pi^{3_{nm}}) - \frac{(t_{nm} - T_{0DH})^2}{t_{nm} T_{0DH}}] \\ \gamma = \exp(-\lambda_{E_{рант.}} t_\gamma) [\Phi(\frac{T_{0DH} - T_\gamma}{\nu_E \sqrt{T_{0DH} T_\gamma}}) - \exp(\frac{2}{\nu_E^2}) \Phi(-\frac{T_{0DH} + T_\gamma}{\nu_E \sqrt{T_{0DH} T_\gamma}})] \end{cases} \quad (32)$$

З першого рівняння системи (32) знаходимо значення T_{0DH} і підставляємо його у друге рівняння системи. Підставивши $x_\gamma = \frac{T_\gamma}{T_{0DH}}$ у друге рівняння системи (32), переходимо до нормованого ДН-розподілу:

$$\frac{\gamma}{\exp(-\lambda_{E_{рант.}} T_\gamma)} = \Phi(\frac{1 - x_\gamma}{\nu_E \sqrt{x_\gamma}}) - \exp(\frac{2}{\nu_E^2}) \Phi(-\frac{1 + x_\gamma}{\nu_E \sqrt{x_\gamma}}). \quad (33)$$

Використовуючи відповідні таблиці ДН-розподілу [6, 7], визначаємо за ймовірністю

$$F(x_\gamma, \nu_E) = 1 - \frac{\gamma}{\exp(-\lambda_{E_{рант.}} T_\gamma)}$$

та значенням квантиля x_γ значення коефіцієнта варіації ЕРВ – ν_E .

3.3. Математичні моделі ймовірності безвідмовної роботи ЕРВ із використанням тільки дифузійного немонотонного розподілу (модель ДНР)

Модель ДНР – апроксимація ІБР ЕРВ дифузійним немонотонним розподілом під час виконання обов'язкової умови:

$$\lambda_{EPB_DH}(t_1 = t_{nm}) = \lambda_E. \quad (34)$$

Це формулювання визначає середній наробіток до відмови для ДН-розподілу T_{0DH} , запропонований професором В.П. Стрельниковим у працях [6, 7].

Для визначення T_{0DH} необхідно вирішити таке трансцендентне рівняння:

$$\ln \lambda_E = \frac{1}{2} [\ln T_{0DH} - \ln(2\pi^{3_{nm}}) - \frac{(t_{nm} - T_{0DH})^2}{t_{nm} T_{0DH}}]. \quad (35)$$

У ДСТУ 2862-94 пропонується номограма для визначення T_{0DH} [7].

4. Приклади застосування математичних моделей безвідмовності та довговічності під час прогнозування показників надійності реальних ЕРВ

Застосовуючи математичні моделі ЕР, ЕР*ВР, ЕР*ДНР, ДНР, необхідно розрахувати ІБР, інтенсивність відмов і середній наробіток до відмови для конденсаторів К53-18А, К50-29 і транзистора ЗП320-А. У табл. 2 показані вихідні дані для розрахунку показників надійності ЕРВ [1].

Таблиця 2. Вихідні дані для розрахунку показників надійності ЕРВ

Назва ЕРВ	Експлуатаційна інтенсивність за довідником ЕРВ, $\lambda_E \times 10^{-6}$ 1/год.	% раптових відмов	% поступових відмов	Мінімальний наробіток, $t_{\text{нм}}$, тис. год.	Гамма-процентний ресурс, T_γ , тис. год.
Конденсатор К53-18А	0,138	44	56	45	90
Конденсатор К50-29	0,546	19	81	5	10
Транзистор ЗП303-А	0,496	20	80	25	50

У табл. 3 показані результати розрахунку середнього наробітку до відмови для різних моделей надійності ЕРВ.

Таблиця 3. Середній наробіток на відмову, коефіцієнт форми m (для ВР) і коефіцієнт варіації ν (для ДНР) для будь-яких моделей надійності ЕРВ

Тип розподілу	Середній наробіток до відмови, год.				Коефіцієнт форми для розподілу Вейбула – m ; коефіцієнт варіації – ν
	ЕР	ЕР*ВР	ЕР*ДНР	ДНР	
Назва ЕРВ					
Конденсатор К53-18А	7246377	182633	632610	575926	$m=3,72$; $\nu=1,159$
Конденсатор 50-29	1831502	17205	75174,5	72900	$m=4,506$; $\nu=1,234$
Транзистор ЗП320-2А	2016129	176348	294312	282019,9	$m=2,224$; $\nu=1,0335$

На рис. 1, 3, 5 зображені криві ІБР для конденсаторів К53-18А, К50-29 і транзистора ЗП320-А для ЕР, ЕР*ВР, ЕР*ДНР, ДНР. На рис. 2, 4, 6 зображені криві інтенсивності відмов для конденсаторів К53-18А, К50-29 і транзистора ЗП320-А для ЕР, ЕР*ВР, ЕР*ДНР, ДНР.

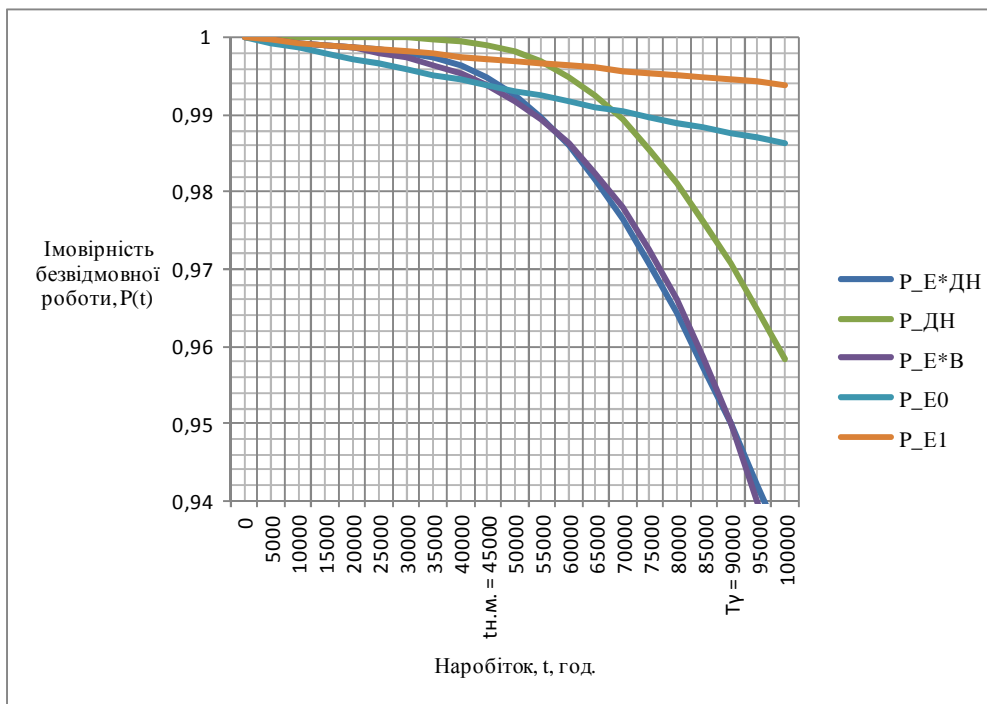


Рис. 1. Імовірність безвідмовної роботи конденсатора K53-18A для п'яти математичних моделей: експоненціальних розподілів – EР0 і EР1, суперпозиції розподілів – EР*BВ і EР*ДНР, дифузійного немонотонного розподілу – ДНР

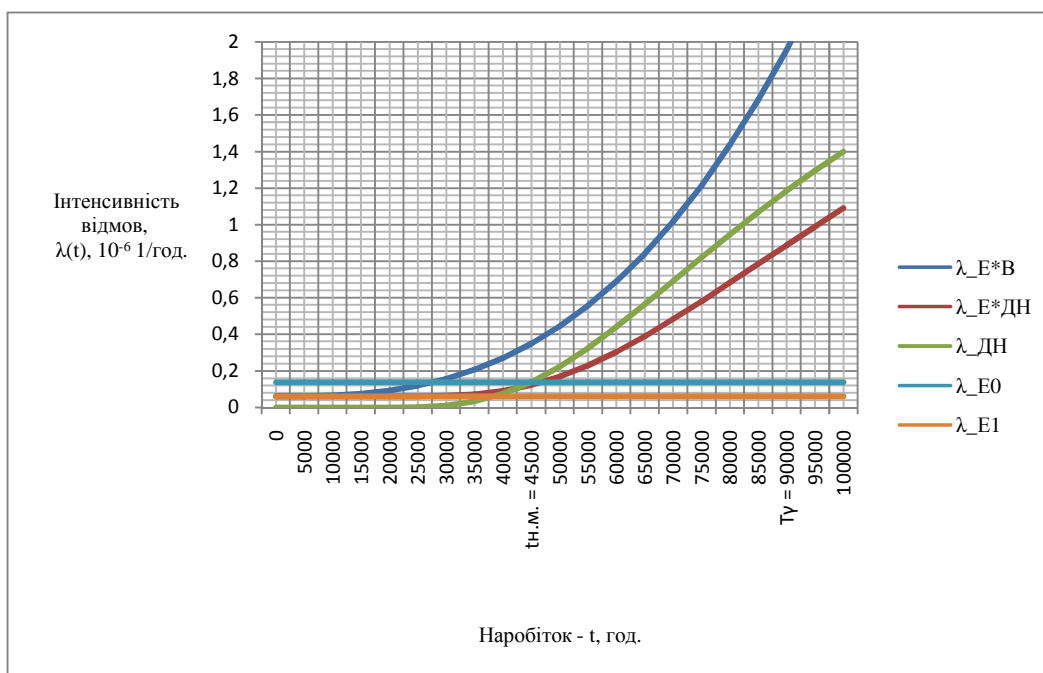


Рис. 2. Інтенсивність відмов конденсатора K53-18A для п'яти математичних моделей: експоненціальних розподілів – EР0, EР1, суперпозиції розподілів – EР*BВ і EР*ДНР, дифузійного немонотонного розподілу – ДНР

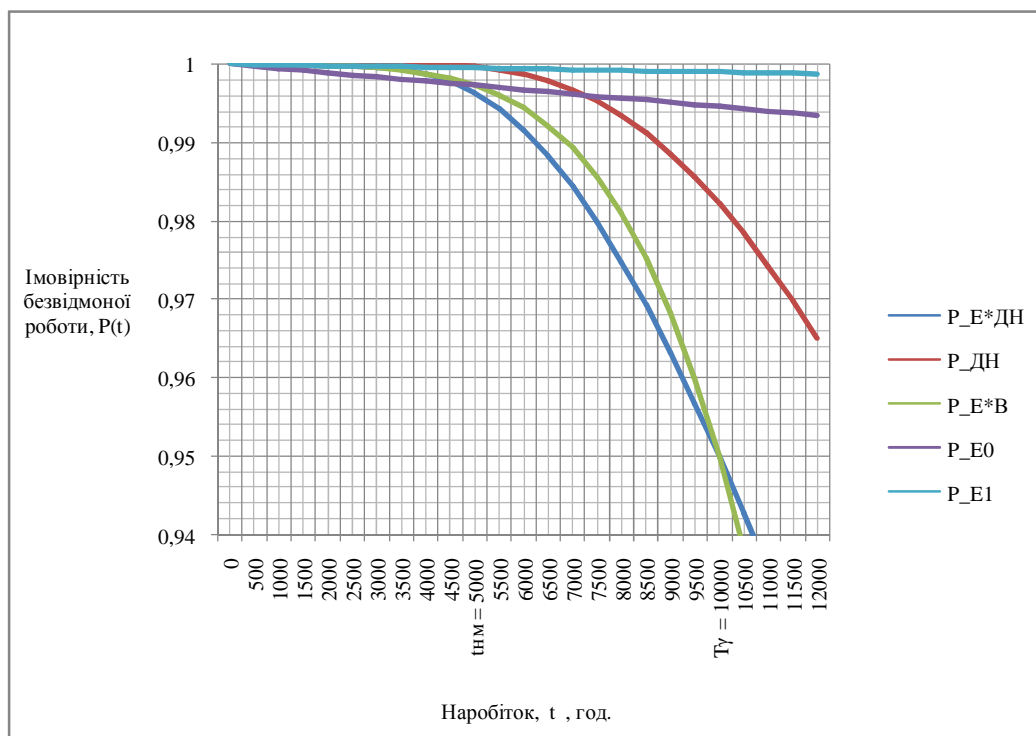


Рис. 3. Імовірність безвідмовної роботи конденсатора К50-29 для п'яти математичних моделей: експоненціальних розподілів – E_0 і E_1 , суперпозиції розподілів – $E_0*P_В$ і $E_0*ДН$, дифузійного немонотонного розподілу – $ДН$

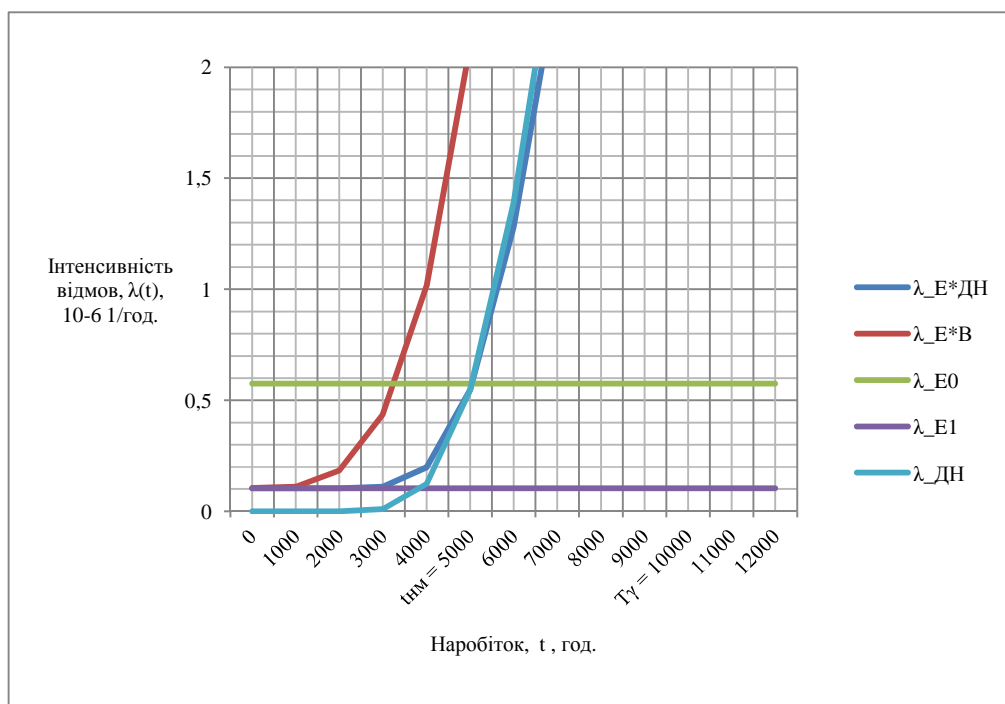


Рис. 4. Інтенсивність відмов конденсатора К50-29 для п'яти математичних моделей: експоненціальних розподілів – E_0 і E_1 , суперпозиції розподілів – $E_0*P_В$ і $E_0*ДН$, дифузійного немонотонного розподілу – $ДН$

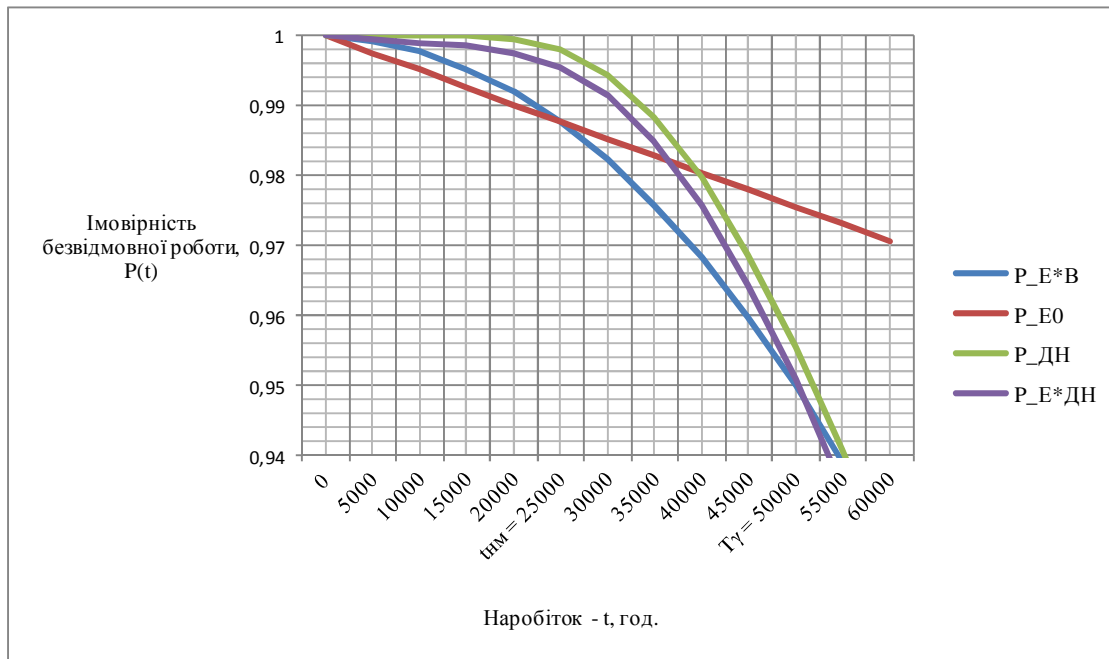


Рис. 5. Імовірність безвідмовної роботи транзистора 3П320А для чотирьох математичних моделей: експоненціальних розподілів – E_0 і E_1 , суперпозиції розподілів – $E_0^*P_В$ і $E_0^*ДН$, дифузійного немонотонного розподілу – ДНР

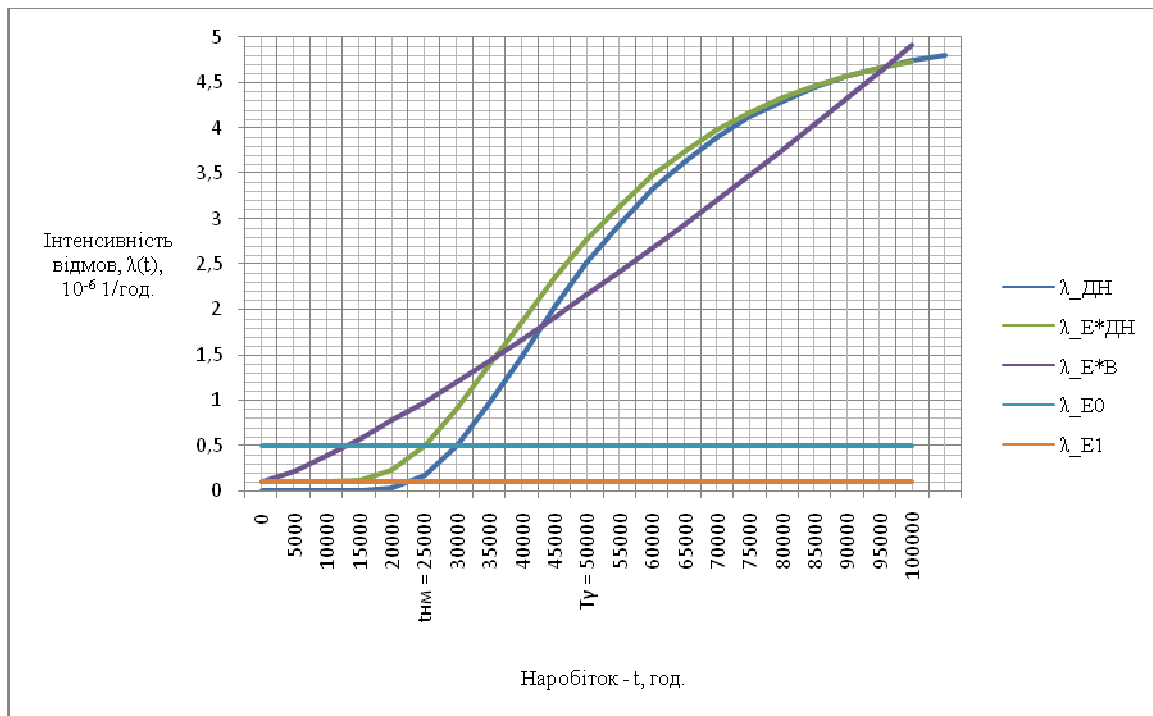


Рис. 6. Інтенсивність відмов транзистора 3П302-А для п'яти математичних моделей: експоненціальних розподілів – E_0 , E_1 , суперпозиції розподілів – $E_0^*P_В$ і $E_0^*ДН$, дифузійного немонотонного розподілу – ДНР

Розгляд і аналіз представлених на рис. 1, 3, 5 кривих імовірності безвідмовної роботи для п'яти математичних моделей надійності $E_0P_В$ показали, що:

– крива ІБР для EP^*PB перетинається з кривою для EP_0 у момент часу, що відповідає мінімальному наробітку t_{nm} ;

– криві ІБР для EP^*PB , $EP^*ДНР$ перетинаються у момент часу, що відповідає гамма-процентному ресурсу T_γ ;

– крива ІБР для ДНР розташовується вище кривих ІБР для EP^*PB і $EP^*ДНР$.

ІБР для суперпозиції експоненціального розподілу з розподілом Вейбула обмежуються зверху ІБР для експоненціального розподілу EP_1 , що враховує процент раптових відмов, і перетинають ІБР для експоненціального розподілу EP_0 , яка враховує повну експлуатаційну інтенсивність відмов (процент раптових відмов і процент поступових відмов).

Форми кривих ІБР на рис. 1, 3, 5 практично повністю відповідають класичним формам кривих ІБР для EP , BP і ДНР. Найкраще наближення реальної ІБР EPB має ІБР для суперпозиції експоненціального і Вейбула розподілів та ІБР для суперпозиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів, тому що співпадає з реальною ІБР у трьох моментах часу і враховує процент раптових та поступових відмов EPB .

Найгірше (до реальної ІБР) має дифузійний немонотонний розподіл за схемою професора В.П. Стрельнікова, тому що співпадає з реальною ІБР тільки у момент часу, що відповідає мінімальному наробітку, і не враховує гамма-процентний ресурс T_γ та процент раптових відмов EPB .

Розгляд та аналіз зображених на рис. 2, 4, 6 кривих інтенсивності відмов для п'яти математичних моделей надійності EPB показали, що:

– крива інтенсивності відмов для ДНР співпадає з кривою інтенсивності відмов для EP_0 у момент часу, що відповідає мінімальному наробітку t_{nm} ;

– криві інтенсивності відмов для $EP^*ДНР$ розташовуються паралельно одна над другою;

– значення інтенсивності відмов для EP^*BP і $EP^*ДНР$ у початковий момент часу дорівнює $\lambda_{E_{pam}}$;

– значення інтенсивності відмов для ДНР у початковий момент часу дорівнює нулю;

– крива інтенсивності відмов для EP^*BP зростає без обмежень із поступовим збільшенням швидкості зросту;

– криві інтенсивності відмов для $EP^*ДНР$ і ДНР зростають з поступовим сповільненням швидкості зросту.

Форма кривих інтенсивностей відмов на рис. 2, 4, 6 практично повністю відповідає класичним формам кривих інтенсивностей відмов для EP , BP і ДНР.

4. Висновки

У статті розглянуто застосування нових математичних моделей для прогнозування показників безвідмовності і довговічності EPB , побудованих з використанням довідкових даних щодо експлуатаційної інтенсивності раптових і поступових відмов та гамма-процентного ресурсу EPB .

Запропоновані математичні моделі безвідмовності і довговічності EPB з використанням суперпозицій розподілів експоненціального та Вейбула, експоненціального та дифузійного немонотонного дозволяють побудувати нові математичні моделі надійності електронної апаратури, що враховують раптові і поступові відмови EPB .

Запропоновані у статті моделі надійності EPB – EP^*BP і $EP^*ДНР$ у початковий період часу, який визначається мінімальним наробітком, є найбільш ефективними (за значенням імовірності безвідмовної роботи) порівняно з експоненціальним розподілом (модель EP) і дифузійним немонотонним розподілом (ДНР).

Для застосування математичних моделей безвідмовності і довговічності ЕРВ рекомендуються розробка і використання комп'ютерних моделей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Справочник. Надежность электрорадиоизделий. – Санкт-Петербург: РНИИ «Электронстандарт», 2002. – 574 с.
2. ОЖО.464.181 ТУ. Конденсаторы оксидно-электролитические алюминиевые К50-29. РФ.
3. ОЖО.464.136 ТУ. Конденсатор танталовый К53-18. РФ.
4. ГОСТ В 20.57.304-76. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие технические требования, методы контроля и испытаний. Методы оценки соответствия требованиям по надежности / Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – Москва, 1976. – 139 с.
5. ГОСТ РВ 20.39.413-97. Комплексная система общих технических требований. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Требования по надежности / РНИИ «Электронстандарт», РФ. – Санкт-Петербург, 1997. – 7 с.
6. Азарсков В.Н. Надежность систем управления и автоматики: учебн. пособ. / В.Н. Азарсков, В.П. Стрельников. – К.: НАУ, 2004. – 164 с.
7. ДСТУ 2862-94 – Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Держстандарт України. – Київ, 1994. – 47 с.
8. Шкляр В.Н. Надежность систем управления: учебн. пособ. / Шкляр В.Н. – Томск: Томский политехнический университет, 2009. – 126 с.
9. Ефремов Л.В. Практика инженерного анализа надежности судовой техники / Ефремов Л.В. – Ленинград: Судостроение, 1980. – 176 с.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2015