

Volodymyr Mirnenko, Petro Yablonskyi, Serhii Kitik (2019) Zastosuvannya dyfuziyno-nemonotonnoho rozpodilu dlya modelyuvannya protsesu ekspluatatsiyi radioelektronnoyi tekhniki, [Application of diffusion-non-monoton distribution to model the radio-electronic equipment operation process]. *Social development & Security*. 9(6), 102 – 111.
DOI: <http://doi.org/10.33445/sds.2019.9.6.8>

Застосування дифузійно-немонотонного розподілу для моделювання процесу експлуатації радіоелектронної техніки

Володимир Мірненко *, Петро Яблонський **, Сергій Кітік***

* Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського,
пр-кт Повітрофлотський, 28, м. Київ, 03049, Україна,
e-mail: mirnenkovi@gmail.com,
д.т.н., професор, Заслужений працівник освіти України,
Завідувач кафедри логістики Повітряних Сил.

** Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського,
пр-кт Повітрофлотський, 28, м. Київ, 03049, Україна,
e-mail: teyka1943@gmail.com,
к.т.н., доцент,
Професор кафедри логістики Повітряних Сил.

*** Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського,
пр-кт Повітрофлотський, 28, м. Київ, 03049, Україна,
e-mail: kitiksv@gmail.com,
Ад'юнкт кафедри логістики Повітряних Сил.



Article history:

Received: November 20, 2019
1st Revision: December 25, 2019
Accepted: December 30, 2019

Анотація: Появу надійності як прикладної математичної дисципліни пов'язують з 50-60 роками минулого століття, коли в різних галузях техніки почали створюватися великі і складні технічні системи. У зв'язку з цим виникла гостра проблема надійності, тобто забезпечення функціонування і працездатності цих складних і високовартісних систем. Усе різноманіття досліджень надійності спрямоване на рішення

наступних трьох проблем : оцінка і прогнозування надійності виробів на етапах проектування (априорні методи); експериментальна оцінка показників надійності, тобто підтвердження проектного рівня надійності за результатами випробувань або експлуатації (апостеріорні методи); вжиття заходів по досягненню і забезпеченню заданого рівня надійності шляхом оптимізації стратегії технічного обслуговування, резервування, об'єму запасних частин і так далі (оптимізаційні завдання). Традиційно склалося деяке розділення в напрямках теорії і практики надійності машин (механічних об'єктів, технічних систем, що містять механічні вузли) і апаратури (виробів електронної техніки, технічних пристроїв, що містять електронні і радіоелементи). Основні завдання надійності машин і апаратури – встановлення закономірностей виникнення відмов і оцінка кількісних показників надійності – можуть вирішуватися двома різними шляхами. До теперішнього часу в теорії і практиці надійності найбільший розвиток отримав напрям, заснований на використанні тільки імовірнісних концепцій (суто імовірнісна теорія). Другий шлях встановлення кількісних показників надійності на відміну від суто імовірнісного підходу заснований на вивченні механо-фізико-хімічних властивостей і деяких фізичних параметрів виробів, що характеризують технічний стан останніх, з використанням імовірнісних методів. Методологія встановлення кількісних

показників надійності на підставі вивчення певних фізичних параметрів, що характеризують технічний стан виробів, полягає у виявленні кінетичних закономірностей деградаційних процесів (побудова математичних моделей процесів деградації) і визначенні аналітичного зв'язку цих закономірностей з показниками надійності. В статті розглянуті питання застосування дифузійно-немонотонного розподілу для моделювання процесу експлуатації радіоелектронної техніки. Особлива увага приділяється визначенню точкових оцінок параметрів розподілу за результатами експлуатаційних спостережень.

Ключові слова: дифузійно-немонотонний закон розподілу, радіоелектронна техніка, точкові оцінки, параметр масштабу і форми.

1. Постановка проблеми

1.1. Новизна дослідження.

В теперішній час найбільш уживаними законами розподілу відмов радіоелектронної техніки є: експоненційний, логарифмічно-нормальний, закон розподілу Вейбула. Кожний з цих законів має визначену область застосування, яка рекомендована державним стандартом України, і певні обмеження. За останнє десятиліття все частіше застосовуються ймовірісно-фізичні моделі надійності на відміну від чисто ймовірісних моделей. Ймовірісно-фізичний підхід заснований на використанні законів розподілу відмов, що обумовлюються фізичними процесами деградації виробів. При цьому фізичні процеси деградації виробів розглядаються як випадкові процеси. До ймовірісно-фізичних моделей відмов відносяться дифузійні розподіли (DM – дифузійно-монотонний і DN – дифузійно-немонотонний розподіл, що передбачені державним стандартом України [1, 2].

1.2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналізуючи роботи по надійності останніх років [3, 4, 5], можна зробити висновок, що основна маса робіт з цієї проблеми присвячена постановці і рішенням всякого роду оптимізаційних завдань, а також завданням, пов'язаним з проблемою інтервального оцінювання показників надійності за результатами випробувань або експлуатації. Багато робіт присвячені вдосконаленню експоненціальної моделі за рахунок різного роду емпіричних коефіцієнтів. Практично основна маса завдань надійності вирішується з використанням однопараметричного експоненціального розподілу. Це і є головною причиною неадекватності рішень завдань надійності. Однопараметричні моделі, з одного боку, спрощує рішення завдань надійності, з іншого боку, накладає на модель ряд істотних обмежень і робить її дуже грубо наближеною.

Нині для типових (стандартизованих) планів випробувань відбувається завищення реального рівня надійності (середнього напрацювання) в 2 і більше разів для, а для високонадійних виробів типу інтегральних мікросхем, напівпровідникових приладів прогноз середнього ресурсу завищується в 50–500 і більше разів.

1.3. Постановка завдання

Дифузійні розподіли надійності мають певну перевагу перед виключно ймовірнісними моделями, тому що їх параметри можуть бути оцінені на основі статистики відмов, а також на основі аналізу характеристик фізичного процесу, що призводить до відмови.

Мета статті. Дослідження можливості застосування дифузійно-немонотонного розподілу для моделювання процесу експлуатації радіоелектронної техніки.

Об'єктом дослідження є залежність показників дифузійно-немонотонного розподілу від його параметрів.

2. Виклад основного матеріалу

Розглянемо фізичні процеси деградації, що притаманні складовим радіоелектронної техніки. Для механічних складових типовими є механічне зношування, руйнування через втому, корозія та старіння. Такі фізичні процеси описуються випадковим процесом з монотонними (незворотними) реалізаціями, тому розподіл відмов буде апроксимуватися дифузійно-монотонним розподілом (*DM*-розподіл). В той же час, в електронних складових зміни деяких фізичних параметрів мають немонотонний характер, наприклад, при електроміграції в металах, у випадку генерації та переміщенні зарядів на поверхні кристалів напівпровідникових структур. Таким чином, процеси деградації виробів радіоелектронної техніки в наслідок електричних явищ будуть мати і немонотонні реалізації. Тому, в загальному випадку доцільно розглядати деградацію виробів радіоелектронної техніки як процес з немонотонними реалізаціями та апроксимувати розподіл відмов дифузійно-немонотонним розподілом (*DN*-розподіл).

Дифузійно-немонотонний розподіл є достатньо перспективним і рідко уживаним через його математичну складність. Наведемо основні характеристики дифузійно-немонотонного розподілу:

$$\text{щільність розподілу } f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]; \quad (1)$$

$$\text{функція розподілу } F(t) = DN(t, \mu, v) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right) + \exp[2v^{-2}]\Phi\left(-\frac{t+\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right); \quad (2)$$

$$\text{імовірність безвідмовної роботи } P(t) = \Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp(2v^{-2})\Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu t}}\right); \quad (3)$$

$$\text{інтенсивність відмов } \lambda(t) = \frac{(vt\sqrt{2\pi})\sqrt{\mu} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu t}}\right)}, \quad (4)$$

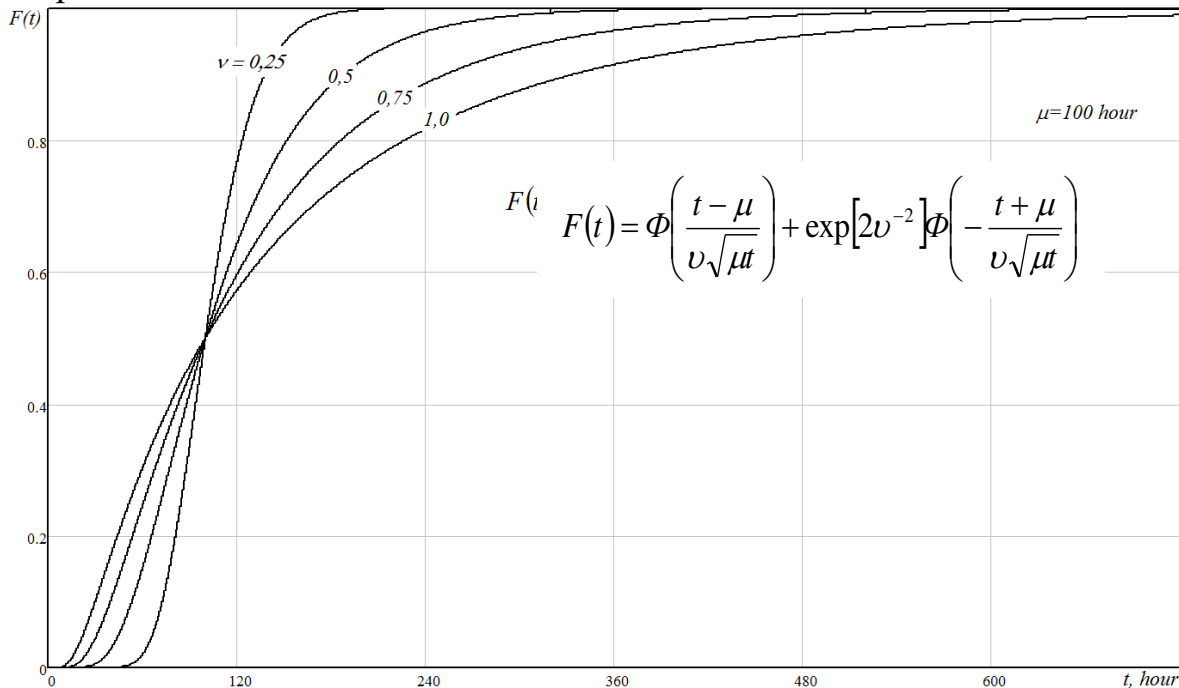
де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ - функція Лапласа;

математичне сподівання $\mu(t) = \mu$;

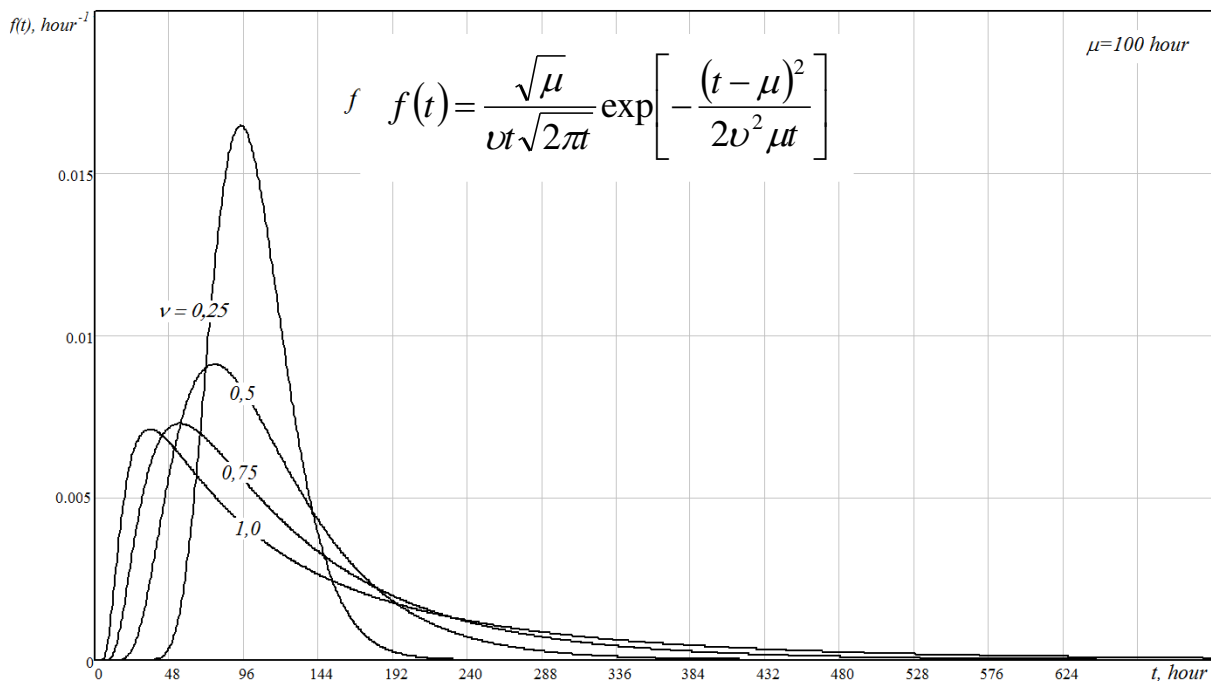
дисперсія $D(t) = \mu^2 \nu^2$;

коефіцієнт варіації $\nu(t) = \nu$.

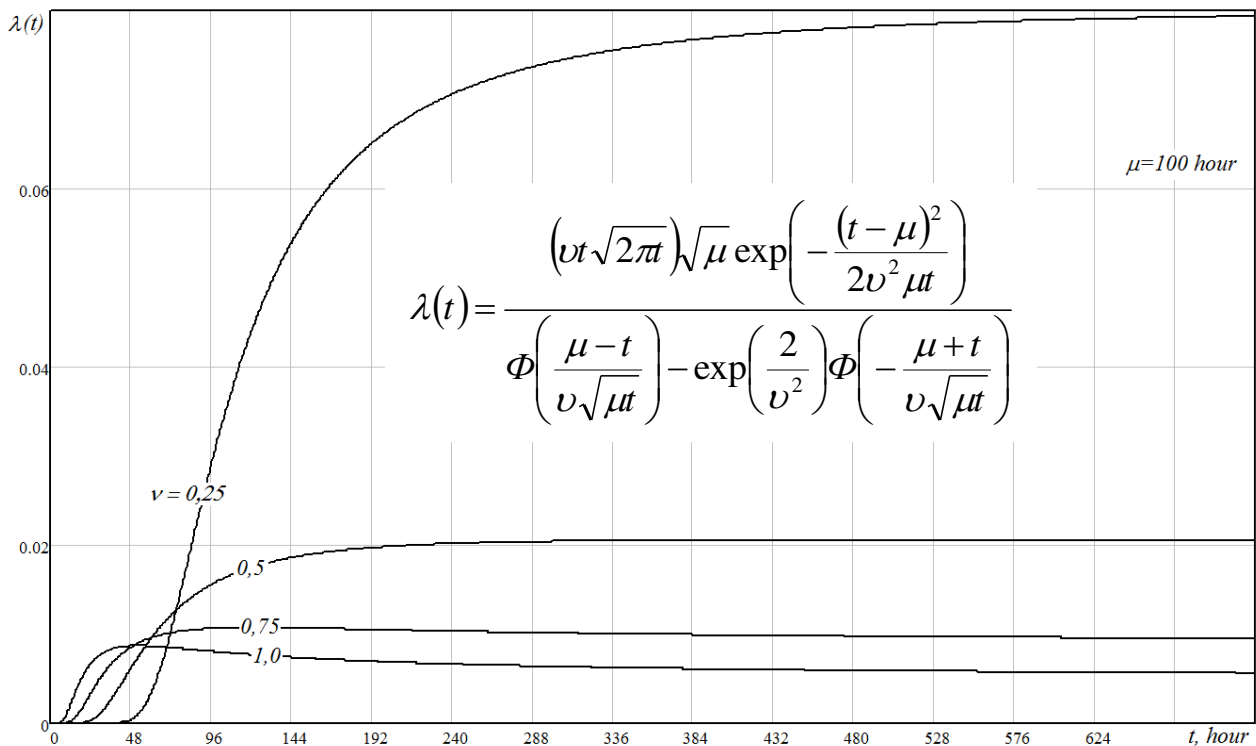
Для двопараметричного DN -розподілу математичне сподівання називають параметром масштабу, а коефіцієнт варіації – параметром форми. Оскільки даний закон в наукових дослідженнях застосовується рідко, наведемо графічне зображення залежностей 1-4 відповідно.



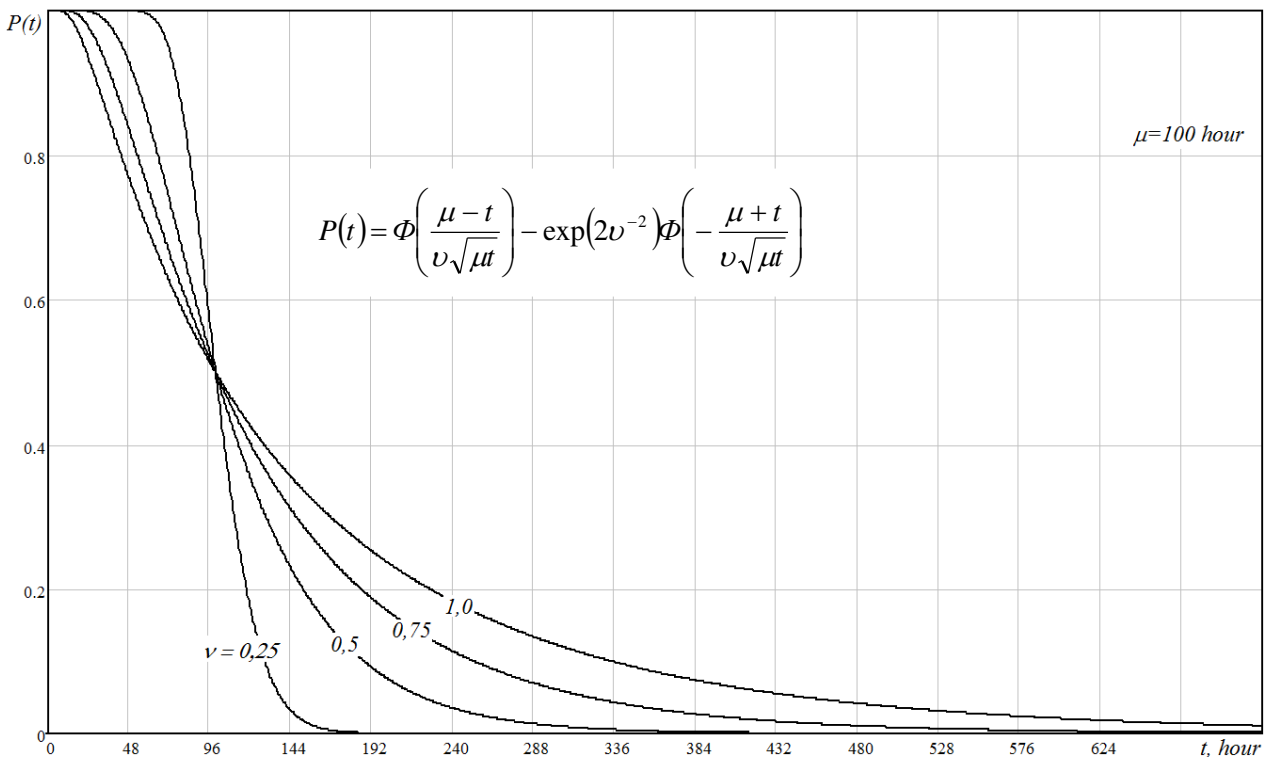
Мал.1. Залежність функції $F(t)$ DN -розподілу від часу при різних значеннях коефіцієнту варіації ν



Мал.2. Залежність щільності $f(t)$ DN -розподілу від часу при різних значеннях коефіцієнту варіації ν



Мал.3. Залежність інтенсивності відмов $\lambda(t)$ DN -розподілу від часу при різних значеннях коефіцієнту варіації ν



Мал.4. Залежність імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ від часу при різних значеннях коефіцієнту варіації ν

З наведених на мал.1–4 графіків видно, що всі залежності змінюються у відповідності до їх властивостей. Так, наприклад, функція розподілу змінюється від 0 до 1 і немає від’ємних значень при $t > 0$. Імовірність безвідмовної роботи

змінюється від 1 до 0. При цьому при збільшенні коефіцієнту варіації v ймовірність безвідмовної роботи зменшується швидше до часу, що дорівнює 96 год., а далі це зменшення відбувається повільніше, ніж при інших значеннях v . Щільність розподілу, як для будь-якого закону, має властивості, що площа під нею дорівнює одиниці.

Для кожного значення коефіцієнта варіації існує максимальне значення щільності. Особливо яскраво це видно для $v = 0,25$.

Залежність інтенсивності відмов від поточного часу показує, що для значення v , яке дорівнює 0,25, інтенсивність відмов суттєво зростає при $t > 48$ год. Для значень v від 0,5 до 1 інтенсивність відмов при $t > 96$ год., практично не змінюється до $t = 360$ год.

При збільшенні поточного часу інтенсивність відмов повинна зростати.

Таким чином, наведені на мал. 1–4 графіки основних характеристик DN -розподілу показують, всі вони відповідають вимогам, що до них висуваються, і їх можна використовувати для моделювання.

Якщо визначена функція розподілу і її параметри, тоді обчислюються всі необхідні показники надійності: середнє напруження до відмови або на відмову, ймовірність безвідмовної роботи, залишковий ресурс тощо.

На практиці певні труднощі виникають під час оцінювання параметрів визначеної функції розподілу. Визначення параметрів DN -розподілу на основі статистичних даних про відмови суттєво залежить від плану випробувань. Для плану [NUN] найбільш ефективним методом визначення вибіркової оцінки параметрів розподілу вважається метод максимальної правдоподібності. Такий метод забезпечує обґрунтовану оцінку, що має найменшу можливу дисперсію і найкращим чином використовує всю інформацію про невідомий параметр, яка міститься у виборці.

Розрахункові формули точкових оцінок параметрів DN -розподілу для плану [NUN] мають наступний вигляд:

$$\mu = S ; \quad (5)$$

$$v = \left(\frac{S - G}{G} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$\text{де } S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i ; G = N \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^N 1}{\sum_{i=1}^N t_i} \right)^{-1}.$$

На практиці через низку техніко-економічних факторів застосування плану випробувань [NUN] є фактично неможливим. В цьому випадку доцільно визначати точкові оцінки параметрів DN -розподілу за результатами експлуатаційних спостережень, використовуючи розрахункові формули для планів [NUr] або [NUT] [6]:

$$1 - \frac{1}{\mu m} \sum_{i=1}^m t_i - (N - m) \left\{ \frac{2e^{\frac{2}{v^2}} \Phi_0 \left(-\frac{\mu + t_m}{v\sqrt{\mu t_m}} \right)}{\left[\Phi_0 \left(\frac{\mu - t_m}{v\sqrt{\mu t_m}} \right) - e^{\frac{2}{v^2}} \Phi_0 \left(-\frac{\mu + t_m}{v\sqrt{\mu t_m}} \right) \right]} \right\} = 0$$

$$v^2 + \frac{1}{\mu m} \sum_{i=1}^m t_i - \frac{\mu}{m} \sum_{i=1}^m (t_i)^{-1} + (N - m) \left\{ \frac{2v\sqrt{\mu} \exp \left(-\frac{[\mu - t_m]^2}{2v^2 \mu t_m} \right)}{m\sqrt{2\pi t_m} \left[\Phi_0 \left(\frac{\mu - t_m}{v\sqrt{\mu t_m}} \right) - e^{\frac{2}{v^2}} \Phi_0 \left(-\frac{\mu + t_m}{v\sqrt{\mu t_m}} \right) \right]} \right\} = 0$$

DN-розподіл представляє собою ймовірнісно-фізичну модель відмов, параметри якої мають певну фізичну інтерпретацію. Так параметр форми v цього розподілу дорівнює коефіцієнту варіації процесу деградації, що призводить до відмови. Це дає можливість оцінити такий параметр на підставі рекомендацій стандартів [7, 8].

3. Висновки і перспективи подальших досліджень

В роботі розглянуті питання застосування дифузійно-немонотонного розподілу для моделювання процесу експлуатації радіоелектронної техніки. Такий розподіл є відносно новим і через його математичну складність він досить рідко застосовується в наукових дослідженнях. Для типових значень параметру масштабу і форми в роботі здійснені розрахунки найбільш уживаних характеристик *DN*-розподілу, а саме: функції розподілу, щільності розподілу, імовірності безвідмовної роботи від поточного часу. Отримані результати співпадають зі стандартними вимогами до таких характеристик.

На практиці дуже актуальними є визначення параметрів *DN*-розподілу при наявності статистичних даних про відмови зразків радіоелектронної техніки. При цьому важливим є наявний план випробувань. Для досить розповсюдженого плану випробувань [NUN] показана залежність оцінок параметрів масштабу і форми від результатів випробувань на надійність. Також доведена можливість визначення точкових оцінок параметрів масштабу і форми за результатами експлуатаційних спостережень з використанням розрахункових формул для планів [NUr] або [NUT].

Author details (in Russian)

Применение диффузионно-немонотонного распределения для моделирования процесса эксплуатации радиоэлектронной техники

Владимир Мирненко *, Петр Яблонський **, Сергей Китик***

** Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховського,
пр-кт Воздухофлотский, 28, г. Киев, 03049, Украина,
e-mail: mirnenkovi@gmail.com,
д.т.н., профессор, Заслуженный работник образования Украины,
Заведующий кафедры логистики Воздушных Сил.*

***Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховського,
пр-кт Воздухофлотский, 28, г. Киев, 03049, Украина,
e-mail: teyka1943@gmail.com,
к.т.н., доцент,
профессор кафедры логистики Воздушных Сил.*

**** Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховського,
пр-кт Воздухофлотский, 28, г. Киев, 03049, Украина,
e-mail: kitiksv@gmail.com,
адъюнкт кафедры логистики Воздушных Сил.*

Аннотация: Появление надежности как прикладной математической дисциплины связывают с 50-60 годами прошлого века, когда в различных отраслях техники начали создаваться большие и сложные технические системы. В связи с этим возникла острая проблема надежности, то есть обеспечение функционирования и работоспособности этих сложных и дорогостоящих систем. Все многообразие исследований надежности направлено на решение следующих трех проблем: оценка и прогнозирование надежности изделий на этапах проектирования (априорные методы); экспериментальная оценка показателей надежности, то есть подтверждение проектируемого уровня надежности по результатам испытаний или эксплуатации (апостериорные методы); принятие мер по достижению и обеспечению заданного уровня надежности путем оптимизации стратегии технического обслуживания, резервирования, объема запасных частей и т.д. (оптимизационные задачи) Традиционный сложилось некоторое разделение по направлениям теории и практики надежности машин (механических объектов, технических систем, содержащих механические узлы) и аппаратуры (изделий электронной техники, технических устройств, содержащих электронные и радиоэлементы). Основные задачи надежности машин и аппаратуры – установление закономерностей возникновения отказов и оценка количественных показателей надежности – могут решаться двумя разными путями. К настоящему времени в теории и практике надежности наибольшее развитие получило направление, основанный на использовании только вероятностных концепций (чисто вероятностная теория). Второй путь установления количественных показателей надежности в отличие от чисто вероятностного подхода основан на изучении механо-физико-химических свойств и некоторых физических параметров изделий, характеризующих техническое состояние последних, с использованием вероятностных методов. Методология установления количественных показателей надежности на основании изучения определенных физических параметров, характеризующих техническое состояние изделий, заключается в выявлении кинетических закономерностей деградиационных процессов (построение математических моделей процессов деградации) и определении аналитического связи этих закономерностей с показателями надежности. В статье рассмотрены вопросы применения диффузионно-немонотонного распределения для моделирования процесса эксплуатации радиоэлектронной техники. Особое внимание уделяется определению точечных оценок параметров распределения по результатам эксплуатационных наблюдений.

Ключевые слова: диффузионно-немонотонный закон распределения, радиоэлектронная техника, точечные оценки, параметр масштаба и формы.

Author details (in English)

Application of diffusion-non-monoton distribution to model the radio-electronic equipment operation process

Volodymyr Mirnenko*, Petro Yablonsky **, Sergii Kitik***

** The National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi,
Prospect of Vozduhoflotsky, 28, Kyiv, 03049, Ukraine,
e-mail: mirnenkovi@gmail.com,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Education of Ukraine,
Head of the Department of Logistics of the Air Force.*

*** The National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi,
Prospect of Vozduhoflotsky, 28, Kyiv, 03049, Ukraine,
e-mail: teyka1943@gmail.com,
PhD., Associate Professor,
Professor, Department of Logistics, Air Force.*

**** The National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi,
Prospect of Vozduhoflotsky, 28, Kyiv, 03049, Ukraine,
e-mail: kitiksv@gmail.com
Post graduate student of Department.*

Abstract: The emergence of reliability as an applied mathematical discipline is associated with the 50-60 years of the last century, when large and complex technical systems began to be created in various branches of technology. In this regard, an acute reliability problem arose, that is, ensuring the functioning and operability of these complex and expensive systems. The whole variety of reliability studies is aimed at solving the following three problems: assessment and prediction of product reliability at the design stages (a priori methods); experimental evaluation of reliability indicators, that is, confirmation of the projected level of reliability according to the results of tests or operation (posterior methods); taking measures to achieve and ensure a given level of reliability by optimizing the maintenance strategy, redundancy, spare parts, etc. (optimization problems) The traditional has developed a certain division in the areas of theory and practice of reliability of machines (mechanical objects, technical systems containing mechanical components) and equipment (electronic products, technical devices containing electronic and radio elements). The main tasks of reliability of machines and equipment - the establishment of patterns of failure and the assessment of quantitative indicators of reliability - can be solved in two different ways. To date, the direction based on the use of only probabilistic concepts (purely probabilistic theory) has received the greatest development in the theory and practice of reliability. The second way to establish quantitative indicators of reliability, in contrast to a purely probabilistic approach, is based on the study of mechano-physico-chemical properties and some physical parameters of products characterizing the technical condition of the latter using probabilistic methods. The methodology for establishing quantitative reliability indicators based on the study of certain physical parameters characterizing the technical condition of products consists in identifying the kinetic laws of degradation processes (building mathematical models of degradation processes) and determining the analytical relationship between these laws and reliability indicators. The article discusses the use of diffusion-nonmonotonic distribution for modeling the process of operation of electronic equipment. Particular attention is paid to the determination of point estimates of distribution parameters based on the results of operational observations.

Keywords: diffusion-nonmonotonic distribution law, electronic equipment, point estimates, scale and shape parameter.

Використана література

1. ДСТУ 3433-96 Моделі відмов Основні положення. URL: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html>
2. ДСТУ 3942-2000. Надійність техніки. Плани випробувань для контролю середнього наробітку до відмови (на відмову). Частина 2. Дифузійний розподіл. URL: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html>
3. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. Київ: Логос, 2002. 486 с.
4. Стрельников В. П. Оценка ресурса изделий электронной техники. *Математичні машини і системи*. 2004 №2. С. 186-195.
5. Мирненко В.И. Зависимость показателей надёжности электронных изделий от времени для диффузионно-немонотонного распределения отказов/ Мирненко В.И., Яблонский П.М., Пустовой С.А, Бутенко Н.Ф// *Оралдын Ғылым Жарсысы ЖШС "Уралнаучкнига"* 2014 №41 (120), С. 29–36
6. РД 50-690-89. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным.
7. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунків показників надійності. Загальні вимоги. 1996. 39 с. URL: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html>
8. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальним даними. URL: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html>

References

1. DSTU 3433-96 Modeli vidmov Osnovni polozhennya. Available at: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html> [in Ukraine].
2. DSTU 3942-2000 . Nadiynist' tekhniky. Plany vyprobuvan' dlya kontrolyu seredn'oho narobitku do vidmovy (na vidmovu). Chastyna 2. Dyfuziynnyy rozpodil. Available at: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html> [in Ukraine].
3. Strelnikov V.P.,Fedukhyn A.B. Otsenka y prohnozyrovanye nadezhnosity élektronnykh élementov y system. Kyiv: Lohos, 2002. 486 s. [in Ukraine].
4. Strelnikov V. P. Otsenka resursa yzdelyy élektronnoy tekhniky. *Matematychni mashyny i systemy*. 2004 №2. С. 186-195. [in Ukraine].
5. Myrnenko V. Y. Zavysymost pokazateley nadēzhnosity élektronnykh yzdelyy ot vremeny dlya dyffuzyonno-nemonotonnoho raspredelenyya otkazov/ Myrnenko V.Y., Yablonsky P.M., Pustovoy S.A, Butenko N.F// *Oraldyn Fylym Zharsysy ZHSHS "Uralnauchknyha"* 2014. №41. (120), S.29-36
6. RD 50-690-89. Metody otsenky pokazateley nadezhnosity po éksperymentalnym dannym. [in Ukraine].
7. DSTU 2862-94. Nadiynist tekhniky. Metody rozrakhunkiv pokaznykiv nadiynosti. Zahalni vymohy. 1996. 39 s. Available at: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html> [in Ukraine].
8. DSTU 3004-95. Nadiynist' tekhniky. Metody otsinky pokaznykiv nadiynosti za eksperymentalnym danymy. Available at: <http://document.ua/nadiinosti-stu0000047.html> [in Ukraine].



© 2019 by the authors; Social development & Security, Ukrainian. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CCBY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).