

DOI: 10.63527/1607-8829-2025-3-92-100

Горський П.В.^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0003-4658-0584>),
Горський Г.П.^{2,3}

¹Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна;

³ВСП Фаховий коледж Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича, вул. Банкова, 1, Чернівці, 58002, Україна

Автор-кореспондент: Горський П.В., e-mail: gena.grim@gmail.com

Про необхідність удосконалення стандарту MIL-883E

Обґрунтовано необхідність удосконалення стандарту MIL-883 з метою більш точного визначення показників надійності термоелектричних генераторів (ТЕГ). Показано, що рекомендований цим стандартом закон розподілу часу відмов впливає з припущення про сталість швидкості відносної деградації параметрів випробовуваних виробів. Даються рекомендації щодо використання стандарту MIL-883E до випробування термоелектричних генераторів (ТЕГ). Показано, що використання дифузійно-немонотонного розподілу часу відмов замість логарифмічно нормального дозволяє істотно знизити відносні похибки, визначення показників надійності ТЕГ та закономірно перейти до функції імовірності безвідмовної роботи окремого термоелемента.

Ключові слова: швидкість відносної деградації параметрів виробів, логарифмічно нормальний закон розподілу часу відмов, коефіцієнт варіації швидкості відносної деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів, дифузійно-немонотонний закон розподілу часу відмов, відносні похибки визначення показників надійності.

1. Вступ

Знання закону розподілу часу відмов термоелектричних генераторних модулів відіграє ключову роль у визначенні їх показників надійності. А вони досить часто є важливішими за робочі характеристики, що і зумовило актуальність даної роботи. Основним стандартом, частково адаптованим до термоелектрики є військовий стандарт MIL-883E [2]. Основним модельним припущенням для встановлення регламентованого згаданим стандартом розподілу часу відмов було припущення про лінійний закон

Цитування: Горський П.В., Горський Г.П. (2025). Про необхідність удосконалення стандарту MIL-883E. Термоелектрика, (3), 94–103. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-3-92-100>

відносної деградації β параметрів інтегральних мікросхем та напівпровідникових приладів у часі. та про сталість [1]. Математичний вираз лінійної моделі відносної деградації параметрів такий:

$$\left(\frac{a_0 - a_1}{a_0}\right) = \beta t \quad (1)$$

де t – час, a_0 та a_1 – відповідно початкове та кінцеве значення певного параметру випробуваного виробу. Кінцеве значення є ні чим іншим, як встановленим НТД на виріб критерієм його придатності, відхилення від якого розглядається як відмова. З (1) ясно, що за фіксованих значень β та a_1 , час досягнення одних і тих самих відмов визначається початковими параметрами виробів. Нехай технологічний процес виготовлення виробів забезпечує не лише ідеальну відтворюваність їх початкових параметрів та величин β . Тоді розподіл часу відмов буде таким самим, як розподіл початкових параметрів виробів, тобто внаслідок закону великих чисел нормальним або логарифмічно нормальним [1]. Цей розподіл зручний тим, що не вимагає спеціальної процедури нормування. Саме з його використанням визначаються показники надійності у мікроелектроніці [1]. Виходячи з такого розподілу часу відмов, стандарт MIL-883E [2] потребує удосконалення тому, що розподіл часу відмов термоелектричних генераторних модулів не є логарифмічно нормальним. Показниками надійності у відповідності зі згаданим стандартом є терміни досягнення у випробовуваній вибірці 50% та 16% (точніше 15,7%) відмов. та логарифм відношення цих термінів. Перший з цих термінів дорівнює середньому напрацюванню випробовуваних виробів на відмову, а згаданий логарифм характеризує ступінь відхилення щільності розподілу часу відмов від δ – функції, тобто відхилення часової залежності функції імовірності безвідмовної роботи від ідеального прямокутника, яка є ідеальною з точки зору теорії надійності. Розсіювання швидкостей відносної деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів враховує дифузійно-немонотонний закон розподілу часу відмов, розроблений Інститутом проблем математичних машин НАНУ [3]. Зауважимо, що за відсутності варіації швидкості відносної деградації параметрів виробів втрачають зміст такі показники надійності, як еквівалентна стала інтенсивність відмов та γ – відсотковий ресурс та відпадає питання про достовірність і відносні похибки визначення показників надійності у рамках дифузійно-немонотонного розподілу часу відмов [3] функція імовірності безвідмовної роботи має вигляд:

$$P(t) = \Phi_0 \left(\frac{1 - \frac{t}{\mu}}{v \sqrt{t/\mu}} \right) - \exp \left(\frac{2}{v^2} \right) \Phi_0 \left(\frac{1 - \frac{t}{\mu}}{v \sqrt{t/\mu}} \right) \quad (2)$$

де μ – середнє напрацювання на відмову, v – безрозмірний коефіцієнт варіації швидкості відносної деградації параметрів випробовуваних термоелектричних генераторних модулів, функція Φ_0 визначається формулою (3). За нульового коефіцієнта v варіації швидкості відносної деградації параметрів випробовуваних термоелектричних генераторних модулів,

часова залежність імовірності їх безвідмовної роботи $P(t)$ вироджується у ідеальний прямокутник довжиною μ і висотою 1. Зі зростанням ν її відхилення від ідеального прямокутника істотно зростає, тому і зростають похибки визначення показників надійності. Недолік пропонованого згаданим ДСТУ[3] методу максимальної правдоподібності полягає в тому, що він оперує виключно термінами відмов і не прогнозує часової залежності імовірності безвідмовної роботи випробовуваних виробів; оцінки параметрів μ та ν дифузійно-немонотонного закону розподілу часу відмов безпосередньо визначаються через експериментальні значення термінів відмов без врахування спостережуваних імовірностей їх реалізації, а відповідні аналітичні формули їх розрахунку виведено методом максимальної правдоподібності. Однак, наші дослідження показали, що апроксимована таким шляхом часова залежність імовірності безвідмовної роботи випробовуваних термоелектричних генераторних модулів істотно відхиляється від результатів прогнозування та експериментальних даних, тому отримані методом максимальної правдоподібності оцінки параметрів дифузійно-немонотонного закону розподілу часу відмов розглядаються нами як початкові наближення, які підлягають уточненню методом найменших квадратів. Відповідна система рівнянь відносно згаданих параметрів розв'язується ітераційним методом Ньютона. Кількість ітерацій вибирається так, щоб отримати істотне зниження суми квадратів відхилень точок апроксимованої часової залежності імовірності безвідмовної роботи від експериментальних даних та результатів прогнозування з уточненими значеннями параметрів закону порівняно з параметрами, отриманими методом максимальної правдоподібності. Наші дослідження показали, що справді мало місце істотно краще узгодження функції імовірності безвідмовної роботи, апроксимованої методом найменших квадратів, з експериментальними даними та результатами прогнозування. Виявилось, що уточнене значення ν є дещо меншим за отримане методом максимальної правдоподібності, внаслідок чого відносна похибка визначення 95% ресурсу випробовуваних термоелектричних генераторних модулів за довірчої імовірності 0.99 знизилась з 66% до 26.5% в той час, як згаданим вище ДСТУ [3], виключно за узгодженням із замовником допускається максимальна відносна похибка 40%. Функція Φ_0 у формулі (2) визначається так:

$$\Phi_0(z) = 0.5\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2z}}{2}\right) + 0.5, \quad (3)$$

де $\operatorname{erf}(\dots)$ так званий інтеграл помилок.

Зауважимо, що притаманне термоелектричним генераторним модулям розсіювання швидкостей відносної деградації їх параметрів враховує не лише дифузійно-немонотонний закон розподілу часу відмов, а й дифузійно-монотонний закон[3].

Ці закони відрізняються між собою лише характером залежності щільності імовірності безвідмовної роботи від коефіцієнта варіації швидкості відносної деградації параметрів випробовуваних виробів та математичними формулами для обчислення початкових наближень параметрів законів методом максимальної правдоподібності.

Спостережувані у процесі випробувань термоелектричних генераторних модулів ймовірності реалізації конкретних термінів відмов у рамках даного методу в не враховуються з необхідною точністю.

2. Результати досліджень та їх обговорення

Розглянемо застосування викладених підходів на прикладі прогнозування термінів відмов за деградаційною моделлю Вейбулла, математичний вираз якої для довільного параметру термоелектричного генераторного модуля наступний:

$$V(t) = V_0 \times \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\delta\right) \quad (4)$$

де V_0 – початкове значення параметру-критерію придатності термоелектричного генераторного модуля, δ – параметр форми, τ – параметр масштабу які визначаються за експериментальними даними методом найменших квадратів. Вихідна потужність та ККД випробовуваних термоелектричних генераторних модулів вимірювались кожні 180 год. В результаті прогнозування термінів втрати ними 20% вихідної потужності та ККД отрималась таблична залежність імовірності їх реалізації (див. таблицю 1).

Зауважимо, що у даній статті ми не використовували аналітичний вираз (2), виведений розробниками [3], а перейшли до нього шляхом чисельного інтегрування за часом відповідної щільності розподілу часу відмов, наведеної у [3]. За нульового значення коефіцієнта варіації швидкості відносної деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів згадана щільність розподілу часу відмов вироджується у δ -функцію, а часова залежність імовірності безвідмовної роботи випробовуваних термоелектричних генераторних модулів – у ідеальний прямокутник.

Таблиця 1

Часова залежність імовірності безвідмовної роботи випробовуваних термоелектричних генераторних модулів, визначена за деградаційною моделлю Вейбулла

$P(t)$	8/9	7/9	2/3	5/9	4/9	1/3	2/9	1/9	0
t год	9725	10690	11140	11220	11760	12230	16660	22660	66780

Апроксимація цієї залежності за дифузійно-немонотонним законом розподілу часу відмов методом найменших квадратів дала такі стандартизовані показники надійності випробовуваних термоелектричних генераторних модулів: середнє напрацювання на відмову 11770 год з відносною похибкою визначення 11.9%; 95% ресурс складає 9170 год з відносною похибкою визначення 26.5%, за довірчої імовірності 0.99. Отримана методом максимальної правдоподібності апроксимаційна часова залежність функції імовірності безвідмовної роботи різко відхиляється від результатів прогнозування порівняно з апроксимаційною залежністю, визначеною методом найменших квадратів, що видно з рис. 1 та 2.

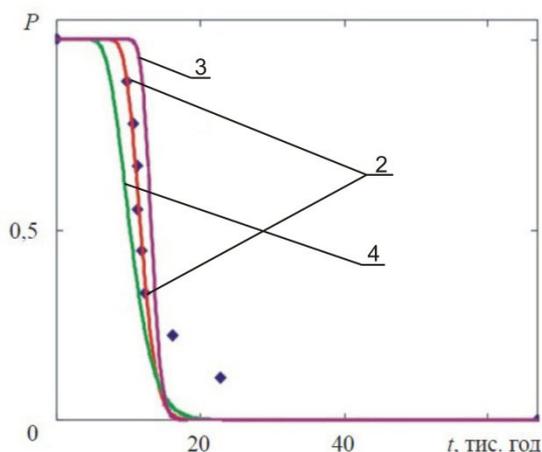


Рис. 1

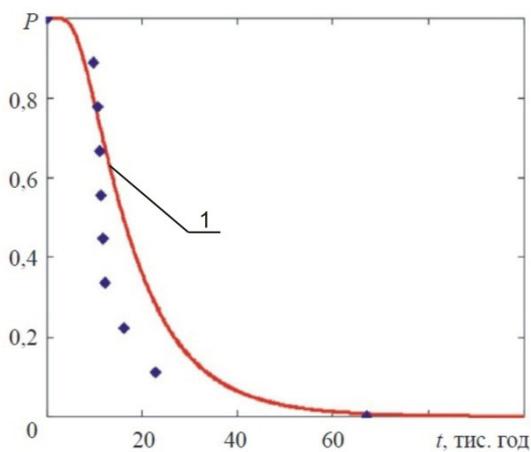


Рис. 2

На рис 1: 2 – крива імовірності безвідмовної роботи випробуваних термоелектричних генераторних модулів, апроксимована за методом найменших квадратів; 3 і 4 – граничні криві з урахуванням похибок визначення показників надійності випробуваних термоелектричних генераторних модулів за довірчої імовірності 0.99. На рис. 2 – крива 1 імовірність безвідмовної роботи, апроксимована за методом максимальної правдоподібності. Точки на обох рисунках – результати прогнозування термінів відмов за деградаційною моделлю Вейбулла. Порівняння результатів прогнозування термінів відмов за деградаційною моделлю Вейбулла з їх спостережуваними на стадії припрацювання термоелектричних генераторних модулів значеннями дає відносну розбіжність, яка не перевищує 10.6%. Таку точність прогнозування можна вважати прийнятною. Еквівалентна стала інтенсивність відмов випробуваних термоелектричних генераторних модулів склала $\lambda = 8.172 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ з відносною похибкою 10.5%. На перший погляд така інтенсивність відмов термоелектричних генераторних модулів видається значною, але вона відповідає інтенсивності відмов одного термоелемента рівній $6.435 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$, а це приблизно у 3.1 рази менше за наведене у літературних джерелах [4] значення, яке дорівнює $2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$. Зазначена вище інтенсивність λ відмов випробуваних термоелектричних генераторних модулів в цілому відносно втрати ними 20% вихідної потужності знаходиться у межах $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4} \text{ год}^{-1}$, що відповідає вимогам стандартів IEC607-49-23 та JEDEC JESD-22A104. Зазначені стандарти передбачають термін служби термоелектричних генераторних модулів від 10 тис.год. до 20 тис.год. З рисунків 1 та 2 видно, що апроксимована методом найменших квадратів крива імовірності безвідмовної роботи випробуваних термоелектричних генераторних модулів проходить через більшу кількість точок, а граничні криві імовірності безвідмовної роботи випробуваних термоелектричних генераторних модулів лежать достатньо близько одна від одної, що забезпечує достатню точність та достовірність визначення показників надійності. Зауважимо, що наведена у даній статті інтенсивність відмов є прийнятною для застосування випробуваних термоелектричних генераторних модулів у промисловості та

побуті. Для прогнозування термінів відмов термоелектричних генераторних модулів з терміном служби понад 100 тис.год. для військових та космічних застосувань доцільно використовувати не деградаційну модель Вейбулла, а її більш загальну модифікацію [5], яка враховує наявність їх граничного ресурсу, який відповідає повній втраті працездатності випробуваних термоелектричних генераторних модулів. Імовірності реалізації різних значень граничного ресурсу у випробуваній вибірці знайдені шляхом апроксимації спостережуваних часових залежностей вихідної потужності та ККД випробуваних термоелектричних генераторних модулів методом найменших квадратів наведено у таблиці 2. Апроксимація цієї функції розподілу часу повних відмов випробуваних термоелектричних генераторних модулів у відповідності з дифузійно-немонотонним законом розподілу часу відмов (2), здійснена методом найменших квадратів, (рис. 3) дозволила визначити такі показники граничної ресурсної стійкості матеріалів, використаних у випробуваних термоелектричних генераторних модулях [5]: середнє напрацювання на повну відмову (середній граничний ресурс) $2.91 \cdot 10^6$ год з відносною похибкою 5.3% за довірчої імовірності 0.95; 95% граничний ресурс $2.61 \cdot 10^6$ год з відносною похибкою 12.9% за тієї ж довірчої імовірності еквівалентну сталу інтенсивність відмов $\lambda = 3.38 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ з відносною похибкою 15.1%. Така еквівалентна стала інтенсивність відмов відповідає мінімально досяжній еквівалентній сталій інтенсивності відмов одного термоелемента рівній $2.64 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$, що цілком прийнятно для практичного застосування випробуваних термоелектричних генераторних модулів.

Таблиця 2

t , год	$2.624 \cdot 10^6$	$2.934 \cdot 10^6$	$2.992 \cdot 10^6$	$3.335 \cdot 10^6$
$P(t)$	0.75	0.5	0.25	0

Зауважимо, що введення еквівалентної сталої інтенсивності відмов до переліку стандартизованих показників надійності термоелектричних генераторних модулів доцільне і обґрунтоване тому, що за будь-якої не ідеально прямокутної часової залежності імовірності безвідмовної роботи випробуваних термоелектричних генераторних модулів існує відрахований від моменту початку випробувань проміжок часу, протягом якого кількість придатних термоелектричних генераторних модулів зменшиться у 2.71828 рази. Величина, обернена до тривалості цього проміжку дорівнює еквівалентній сталій інтенсивності відмов випробуваних термоелектричних генераторних модулів. Отримані показники ресурсної стійкості матеріалів правомірно називати інтегральними, оскільки їх важко обґрунтовано приписати окремим матеріалам, які істотно відрізняються один від одного за ресурсною стійкістю.

Зауважимо, що відмови термоелектричних генераторних модулів під час прискорених випробувань не можна пояснити пошаровим розтріскуванням термоелектричних гілок під дією поперечних відносно градієнта температури термомеханічних напружень, релаксації

яких сприяє регульоване і контрольоване притискання випробовуваних термоелектричних перетворювачів енергії до гарячого теплообмінника.

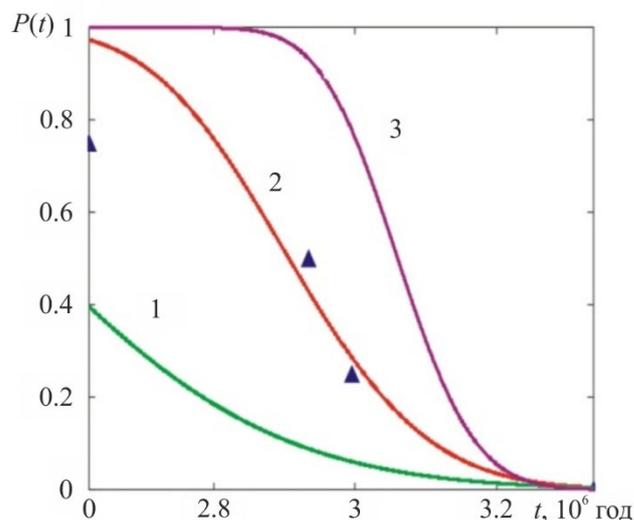


Рис. 3. Залежності ймовірності реалізації певного граничного ресурсу термоелектричних генераторних модулів від величини цього ресурсу: 1 – апроксимована методом максимальної правдоподібності у відповідності з дифузійно-немонотонним законом розподілу часу відмов, 2 – апроксимована методом найменших квадратів. 1,3 – граничні криві з урахуванням похибок за довірчої ймовірності 0,95, трикутники – результати прогнозування граничного ресурсу за ймовірнісною теорією деградації

3. Висновки та рекомендації

Показано, що логарифмічно нормальний закон розподілу часу відмов впливає з модельного припущення про сталість швидкості відносної деградації параметрів, яка не притаманна термоелектричним генераторним модулям. Розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів притаманне термоелектричним генераторним модулям враховує регламентований ДСТУ[3], розробленим Інститутом проблем математичних машин НАНУ дифузійно-немонотонний закон розподілу часу відмов. Попереднє прогнозування термінів відмов термоелектричних генераторних модулів доцільно здійснювати на основі ймовірнісної моделі деградації їх параметрів за певними ознаками відмов. Найпростішу з них – модель Вейбулла доцільно використовувати на стадії припрацювання термоелектричних генераторних модулів для високонадійних термоелектричних систем, а також для оцінювання та прогнозування надійності матеріалів, у тому числі термоелектричних, необхідно використовувати більш загальну деградаційну модель, яка передбачає наявність їх граничного ресурсу [5]. Визначення параметрів деградаційних моделей здійснюється шляхом відповідної апроксимації отриманих у ході випробувань часових залежностей параметрів випробовуваних термоелектричних генераторних модулів методом найменших квадратів. Далі визначені для кожного з випробовуваних термоелектричних генераторних модулів терміни відмов упорядковуються за зростанням, після чого з урахуванням об'єму випробовуваної вибірки

у припущенні поступовості відмов за зразком табл. 1 будується таблиця прогнозованої часової залежності імовірності безвідмовної роботи випробуваних термоелектричних генераторних модулів. Далі у відповідності з дифузійно-немонотонним законом розподілу часу відмов [3] методом максимальної правдоподібності безпосередньо через прогнозовані за деградаційними моделями терміни відмов визначаються оцінки параметрів дифузійно-немонотонного закону розподілу часу відмов, а саме: середнього напрацювання випробуваних термоелектричних генераторних модулів на відмову та коефіцієнту варіації швидкості відносної деградації їх параметрів, які є параметрами дифузійно-немонотонного розподілу часу відмов. Ці оцінки розглядаються нами лише як початкове наближення для апроксимації табличних даних методом найменших квадратів. Відповідна система рівнянь відносно параметрів дифузійно-немонотонного закону розподілу часу відмов розв'язується ітераційним методом Ньютона. Далі за знайденими параметрами дифузійно-немонотонного закону розподілу часу відмов урахуванням об'єму випробуваної вибірки додатково знаходяться γ -відсотковий ресурс випробуваних термоелектричних генераторних модулів та еквівалентна стала інтенсивність їх відмов та відносні похибки визначення цих показників надійності за заданої довірчої імовірності. Основна відмінність застосованого нами підходу до апроксимації функції імовірності безвідмовної роботи випробуваних термоелектричних генераторних модулів полягає в істотному зниженні відносних похибок визначення їх показників надійності за заданої довірчої імовірності. Зазначимо, що дифузійно-немонотонний закон розподілу часу відмов [3] замість логарифмічно нормального [1] у поєднанні з імовірнісною теорією деградації термоелектричних генераторних модулів можна з урахуванням тривалості циклу використати для визначення показників циклічної стійкості термоелектричних генераторних модулів. За необхідності аналізу результатів прискорених випробувань врахуємо, що внаслідок закону Ареніуса від температури залежатимуть і з її зростанням спадатимуть лише абсолютні значення показників надійності випробуваних термоелектричних генераторних модулів, а саме: середнє напрацювання на відмову, γ -відсотковий та граничний ресурси в той же час еквівалентна стала інтенсивність відмов зростатиме. Незалежними від температури залишаться лише коефіцієнт варіації швидкості відносної деградації параметрів випробуваних термоелектричних генераторних модулів, оскільки він за означенням є відносною величиною, і, отже, відносні похибки визначення показників надійності випробуваних термоелектричних генераторних модулів. Важливо зазначити, що використовуючи описаний у даній статті підхід, ми можемо з прийнятною точністю знайти еквівалентну сталу інтенсивність відмов не зважаючи на точність з якою наближення сталої інтенсивності відмов підтверджується експериментальними даними, оскільки саме вона регламентується багатьма міжнародними стандартами і визначає найбільш доцільні сфери застосування випробуваних термоелектричних генераторних модулів. За відомою температурною залежністю еквівалентної сталої інтенсивності відмов, знайденою у процесі прискорених випробувань, у припущенні справедливості закону Ареніуса можна знайти енергію активації дефектів, які спричиняють відмови

випробуваних термоелектричних генераторних модулів, а за ними ідентифікувати ці дефекти. Якщо вважати, що однакові дефекти мають одну і ту ж енергію активації, то внаслідок закону Ареніуса від температури будуть залежати лише середній та γ -відсотковий ресурси випробуваних термоелектричних генераторних модулів та еквівалентна стала інтенсивність їх відмов тому, що коефіцієнт варіації швидкості відносної деградації їх параметрів, будучи згідно [3] відносною величиною, не буде залежати від температури. Тому і відносні похибки визначення показників надійності випробуваних термоелектричних генераторних модулів також будуть незалежними від температури.

Інформація про авторів

Горський П.В. – Доктор фізико-математичних наук.

Горський Г.П. – Викладач коледжу Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Література

1. Gnedenko B.V. (2010). *Course of probability theory: textbook*. Kyiv: Publishing and printing center "Kyiv University", 464 p.
2. Standard MIL-STD883E-Test method standard–Microcircuits–Washington, U.S. Department of Defense, 1996 https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=35984 domestic analogue – DSTU 8302:2015
3. DSTU 3004-95 Reliability of equipment. Methods of assessing reliability indicators based on experimental data kvs.biz.ua+limmsp.kiev.ua+1. Kyiv: – State Standard of Ukraine – 1995.
4. Kotyrlo G.K., Lobunets Yu.M. (1961). Calculation and design of thermoelectric generators and heat pumps – a reference book K.: Naukova dumka, 36p.
5. Gorskyi P.V. (2023). Probabilistic theory of degradation of thermoelectric generator modules and its use for determining the reliability of thermoelectric materials. *Thermoelectricity*, 2, 49–56.

Submitted: 20.08.2025

P.V. Gorskyi^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0003-4658-0584>),
G.P. Gorskyi^{2,3}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

³VSP Professional College of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 1 Bankova str., Chernivtsi, 58002, Ukraine

On the Necessity to Improve the MIL-883E Standard

The necessity to improve the MIL-883 standard in order to more accurately determine the reliability indicators of thermoelectric generators (TEGs) is substantiated. It is shown that the failure time distribution law recommended by this standard follows from the assumption of a constant rate of relative degradation of the parameters of the tested products. Recommendations are given for the use of the MIL-883E standard for testing thermoelectric generators (TEGs). It is shown that the use of a diffusion-nonmonotonic failure time distribution instead of a logarithmic normal one allows for a significant reduction in relative errors, determination of TEG reliability indicators and a logical transition to the function of the probability of failure-free operation of an individual thermoelement.

Keywords: rate of relative degradation of product parameters, logarithmically normal law of failure time distribution, coefficient of variation of the rate of relative degradation of parameters of thermoelectric generator modules, diffusion-nonmonotonic law of failure time distribution, relative errors in determining reliability indicators.

Надійшла до редакції 20.08.2025