

Д. ф.-м. н. П. В. ГОРСЬКИЙ

Україна, м. Чернівці, Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

E-mail: gena.grim@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ МОДУЛІВ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

Обґрунтовується необхідність застосування дифузійно-немонотонного розподілу напрацювання до відмови для опрацювання результатів ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів з метою визначення їхніх стандартизованих показників надійності та відносних похибок отриманих значень. Пропонується точкові оцінки параметрів закону, а саме середнє напрацювання на відмову та параметр варіації швидкості деградаційних процесів, визначати шляхом згладжування часової залежності імовірності безвідмовної роботи методом найменших квадратів. Це дозволяє досягти істотно меншої похибки визначення стандартизованих показників надійності, ніж у разі використання методу максимальної правдоподібності.

Ключові слова: надійність, термоелектричний модуль, напрацювання до відмови, дифузійно-немонотонний розподіл, метод максимальної правдоподібності, метод найменших квадратів, відносна похибка.

Надійність термоелектричних генераторів, а отже, і генераторних модулів відіграє не меншу роль, ніж їхні споживчі характеристики, оскільки термоелектричні генератори використовуються як джерела живлення у космосі, медицині, військовій справі тощо. Оскільки термоелектричні генераторні модулі не підлягають ремонту або заміні, то зрозуміло, що їхня надійність має істотно перевищувати проєктну надійність тих систем, складовими частинами яких вони є. Це означає, що і споживачам, і виробникам цих модулів необхідно мати у своєму розпорядженні максимально достовірну інформацію про їхню надійність. Водночас у фахових наукових виданнях власне проблемам надійності термоелектричних генераторних модулів приділяється явно недостатньо уваги, на відміну від надійності термоелектричних охолоджувачів [1]. Існує багато праць, присвячених дослідженням залежності інтенсивності відмов термоелектричних охолоджувачів від режимів роботи та від геометрії термоелектричних гілок, а також удосконаленню методів її експериментального визначення. Що ж стосується термоелектричних генераторних модулів, то у літературі увага в основному приділяється не показникам їх надійності, а фізиці відмов і проблемам підвищення надійності модулів. Серед цих проблем — запобігання деградації термоелектричних напівпровідникових матеріалів внаслідок втрати ними летких складових, у тому числі шляхом повного або часткового захисту поверхні термоелектричних гілок [2, 3], підвищення термічної і механічної стійкості контактних структур [4], спеціальний вибір геометрії термоелектричних гілок і способу їх розташування [5], обмежен-

ня їх можливого переміщення шляхом застосування спеціальних каркасів між гілками [6], узгодження між собою параметрів термоелектричного матеріалу, зокрема його міцності, коефіцієнта лінійного розширення, модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та теплопровідності [7]. Необхідність такого узгодження, зокрема, накладає певні обмеження на добротність термоелектричного матеріалу. Наприклад, мала теплопровідність, яка, безумовно, є корисною з точки зору добротності й, отже, споживчих параметрів модуля, різко збільшує градієнт температури, що призводить до зростання механічних напружень у гілках. Але у перелічених працях не йдеться або не завжди йдеться про те, якою саме мірою вказані заходи підвищують надійність, тобто знижують інтенсивність відмов термоелектричних генераторних модулів. Таким чином, доволі часто фізика відмов та їх статистика, яка якраз і є фундаментом теорії надійності у її сучасному розумінні та основою для розрахунку показників надійності, існують ніби відокремлено одна від одної. З іншого боку, розв'язання цієї проблеми для випадку термоелектричних генераторних модулів, на нашу думку, слід починати з пошуку найбільш підходящого для них закону розподілу напрацювання до відмови.

Метою представленого дослідження було знаходження або нового, або з-поміж існуючих такого закону розподілу напрацювання до відмови, який не лише був би придатним для розрахунку стандартизованих показників надійності термоелектричних генераторних модулів та їхніх відносних похибок, але й вказував, хоча б непрямим чином, на можливі шляхи поліпшення цих показників.

Обмеженість традиційних підходів до розрахунку показників надійності

Зазвичай вважається, що процес відмов одностипних інтегральних мікросхем, напівпровідникових приладів та термоелектричних модулів, як охолоджувальних, так і генераторних, певною мірою подібний до розпаду радіоактивних ізотопів, і тому імовірність безвідмовної роботи таких приладів описується експоненціальним законом

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \tag{1}$$

де t — час; λ — інтенсивність відмов.

Певна помилковість та обмеженість такого підходу, на наш погляд, полягає ось в чому. Радіоактивні ядра одного і того самого ізотопу є тотожними квантовомеханічно і введення для них певної сталої часу процесу радіоактивного розпаду є обґрунтованим. Прилади ж, навіть одного й того самого типоміналу, не є тотожними ні за початковими значеннями критеріїв придатності, ні за швидкістю відносної деградації внаслідок неминучої нестабільності технологічних процесів їх виготовлення. Автор цього дослідження вважає, що ця неминуча нестабільність значною мірою зумовлюється другим і третім початками термодинаміки, хоча таке твердження і може видатись не беззаперечним. Таким чином, для адекватного опису надійності та розрахунку її показників і, що не менш важливо, відносних похибок їх визначення потрібні такі закони розподілу напрацювання до відмови, які б явно враховували згадану нетотожність. З іншого боку, повністю відмовлятися від концепції сталої інтенсивності відмов теж недоцільно, оскільки вона є зручним, ефективним і наочним інструментом оцінки надійності складних систем, особливо таких, які складаються з різнорідних елементів. Також вона дозволяє аналізувати, наприклад, вплив особливостей конструкції та режимів роботи приладів, зокрема термоелектричних охолоджувачів, на їхню надійність.

Природним узагальненням закону надійності (1) виступає закон Вейбула

$$P(t) = \exp[-(t/\tau)^\delta], \tag{2}$$

де τ , δ — параметри масштабу та форми відповідно.

У вищезгаданому сенсі цей закон вже кращий, оскільки на неоднаковість приладів вказує параметр форми. Справді, коли δ прямує до нескінченності, маємо $P(t) = 1$ для $t < \tau$ та $P(t) = 0$ для $t > \tau$. Таким чином, виходить, що всі прилади відмовляють через один і той самий проміжок часу τ , а до того всі вони працюють безвідмовно. А це якраз і є “ідеальний” випадок з точки зору надійності, особливо якщо згаданий проміжок часу є набагато більшим, ніж гарантований термін служби систем, складовими частинами яких є такі прилади. Таким чином, з “погляду” закону (2), технологія виготовлення складних приладів має бути направлена на досягнення якомога більших значень як τ , так і δ . З іншого боку зрозуміло, що час

τ не може бути безмежно великим, оскільки за таких умов експлуатації приладу його гранична ресурсна стійкість визначається ресурсною стійкістю найменш стійких матеріалів та елементів.

З приводу закону Вейбула слід зробити деяке зауваження. Серед фахівців з теорії надійності побутує думка, що період експлуатації сукупності одностипних приладів можна поділити на частини, аналогічні періодам зародження й вимирання певного покоління людей [8, с. 17]. Так, період відбракування приладів з явними грубими технологічними дефектами, тобто період припрацювання, відповідає “дитячій смертності”, період стабільного функціонування відповідає сталій, досить малій інтенсивності відмов, а період масових відмов — їх інтенсивності, що різко зростає. Зрозуміло, що у рамках такої концепції гарантійний термін служби приладів призначається саме на ділянці малої сталої інтенсивності відмов далеко від моменту настання масових відмов. Правда, на сьогодні ніхто не довів придатність саме такого закону розподілу напрацювання до відмови навіть для інтегральних мікросхем і напівпровідникових приладів, не кажучи вже про термоелектричні прилади. Особливо це стосується наявності ділянки сталої інтенсивності відмов. Аналітичного виразу цього закону також не існує. Єдине, що можна вважати встановленим — це те, що початкова ділянка такого розподілу напрацювання до відмови з прийнятною точністю описується законом Вейбула з малими значеннями параметрів τ та δ . Автор цієї статті не дотримується такого закону розподілу напрацювання до відмови, тому що на практиці внаслідок відсутності відповідного аналітичного виразу такий закон не використовується для розрахунку показників надійності. Тим паче що в “корисному періоді”, початок якого віддалений від кінця періоду припрацювання, а кінець — від початку періоду масових відмов, цей закон зводиться до традиційного і часто використовуваного експоненціального закону розподілу напрацювання до відмови

Можливий закон, що описує деградацію термоелектричних генераторних модулів, і основний висновок з нього

Вважається, що відносна деградація параметрів інтегральних мікросхем та напівпровідникових приладів з часом описується лінійним законом [9, с. 18], тому справедливе співвідношення

$$\Delta V/V_0 = \beta \Delta t, \tag{3}$$

де ΔV , V_0 — абсолютна зміна деякого параметра V та його початкове значення відповідно;

β — швидкість деградації, яка може бути додатною (наприклад, для струму споживання) або від’ємною (наприклад, для вихідної напруги логічної одиниці у звичайній логіці);

Δt — проміжок часу від початку експлуатації (випробувань).

При цьому вважається, що для кожного типоміналу мікросхем або напівпровідникових приладів величина β є сталою. Звідси виходить, що якби ознакою відмови вважалась відносна деградація параметра (параметрів), то всі прилади одного й того самого типоміналу відмовляли б одночасно. Тоді при достатньо малих значеннях β , а для інтегральних схем і напівпровідникових елементів здебільшого воно так і є, то був би вже згаданий ідеальний з точки зору надійності випадок. Але у стандартах та ТУ на ці прилади зазвичай ознакою відмови вказується досягнення параметрами певних абсолютних граничних значень. Це означає, що розподіл напрацювання до відмови визначається розсіюванням початкових параметрів цих приладів, і отже, як правило, внаслідок лінійного закону відносної деградації він вважається нормальним або логарифмічно нормальним. З останнім розподілом працювати простіше, оскільки при зміні напрацювання до відмови від нуля до нескінченності його логарифм пробігає усьо числові вісь, і в цьому випадку на неоднаковість приладів вказує дисперсія логарифма. Стандарт США MIL – STD – 883E. 31 December 1996 Superseding у цьому випадку рекомендує визначати час досягнення 50% відмов, який дорівнює середньому напрацюванню на відмову, і час досягнення 16% (точніше 15,7%) відмов, який і характеризує дисперсію. Показниками надійності у цьому випадку вважаються час досягнення 50% відмов і абсолютне значення логарифма відношення згаданих величин часу. Зрозуміло, що чим більші обидва ці показники, тим надійнішими є прилади. Але результати ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів, виконані в Інституті термоелектрики НАН та МОН України, свідчать, що відносне зменшення максимальної вихідної потужності цих модулів, яке і береться за критерій відмови, не підпорядковується лінійному закону (3), а значить, для опису їх деградації потрібна інша залежність, що буде являти собою узагальнення закону (3). Справді, переходячи у рівнянні (3) від скінчених приростів до нескінченно малих, отримаємо диференціальне рівняння

$$dV/V = \beta dt, \tag{4}$$

розв'язком якого є звичайна експонента:

$$V = V_0 \exp \beta t. \tag{5}$$

Знак коефіцієнта β залежить від того, збільшується чи зменшується відповідний параметр в процесі деградації.

Такий закон теж є спрощеним, але він допускає природне узагальнення

$$V = V_0 \exp \left[-(t / \tau_d)^{\delta_d} \right]. \tag{6}$$

Таким чином ми знову приходимо до закону Вейбула, в якому τ_d та δ_d — відповідно, стала часу та параметр форми закону деградації вихідної потужності. Знак “мінус” у формулі взято тому, що у ході деградації генерована максимальна потужність термоелектричного модуля, як правило, зменшується. Закон деградації (6) дозволяє спрогнозувати напрацювання до відмови у тому випадку, якщо за час, відведений для ресурсних випробувань, частина приладів не відмовила. З цією метою для кожного такого термоелектричного генераторного модуля спочатку методом найменших квадратів за результатами вимірів генерованої максимальної вихідної потужності знаходяться параметри τ_d та δ_d . Далі за заданою відносною втратою потужності δ_N знаходиться прогнозоване напрацювання до відмови термоелектричного генераторного модуля

$$t_f = \tau_d \left[-\ln(1 - \delta_N) \right]^{1/\delta_d}. \tag{7}$$

Методика ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів

Вибірка з дев'яти модулів функціонувала протягом 12060 годин за температури гарячої та холодної сторони 50 та 300 °С відповідно в режимі генерації електричної енергії на узгоджене навантаження. Електричну потужність та ККД вимірювали кожні 180 годин. Ознакою відмови вважалась втрата 20% потужності. Протягом усього часу випробувань сталась відмова лише одного модуля після 9720 годин, тому для прогнозування напрацювання до відмови інших модулів довелося, використовуючи теоретичну деградаційну криву залежності (6), згладити часові залежності їхньої вихідної потужності методом найменших квадратів, після чого за формулою (7) спрогнозувати можливе напрацювання до відмови. При цьому для модуля, відмову якого було зафіксовано, прогнозоване напрацювання до відмови склало 9725 годин. Отримані результати прогнозування представлено у таблиці.

З метою підбору закону, який би найкраще описував представлену в таблиці часову залежність імовірності безвідмовної роботи, методом найменших квадратів були випробувані експоненціальний, Вейбула, нормальний, логарифмічно-нормальний, модифі-

Результати ресурсних випробувань вибірки з дев'яти генераторних модулів

Напрацювання, год	9725	10690	11140	11220	11760	12230	16080	22660	66780
Імовірність безвідмовної роботи	8/9	7/9	2/3	5/9	4/9	1/3	2/9	1/9	0

кований медико-демографічний та немонотонно-дифузійний закони. Застосування їх дало такі результати.

Для простого експоненціального закону, який описується формулою (1), було отримане значення $\lambda = 5,547 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, при цьому сума квадратів відхилень експериментальних точок від теоретичної кривої склала $\Delta = 0,263$.

Для закону Вейбула, який описується формулою (2), значення параметрів склали $\tau = 12050 \text{ год}$, $\delta = 10,12$, при цьому було отримано $\Delta = 0,068$.

Для нормального закону, який описується формулою

$$P(t) = 1 - \frac{\int_0^t \exp\left[-(t-a)^2 / (2\sigma^2)\right]}{\int_0^\infty \exp\left[-(t-a)^2 / (2\sigma^2)\right]} dy, \quad (8)$$

значення параметрів склали $a = 11600 \text{ год}$, $\sigma = 1405 \text{ год}$, при цьому було отримано $\Delta = 0,067$.

Для логарифмічно нормального закону, який описується формулою

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln t} \exp\left[-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2}\right] dy, \quad (9)$$

значення параметрів склали $a = 9,362$, $\sigma = 0,143$, при цьому було отримано $\Delta = 0,065$.

Для модифікованого медико-демографічного закону, який, як вважається до сьогодні, виконується для мікроелектронних виробів з грубими технологічними дефектами, а також поблизу напрацювання до масових відмов і аналітичного виразу якого немає, у цій роботі запропоновано формулу

$$P(t) = \exp\left[-\frac{(t/t_0)^\alpha}{\gamma(1-t/t_0)^\beta}\right], \quad (10)$$

і значення його параметрів склали $\alpha = 6,973$; $\beta = 0,284$; $\gamma = 8,041 \cdot 10^{-6}$; $t_0 = 66780 \text{ год}$, при цьому було отримано $\Delta = 0,082$. В інтервалі часу $t \ll t_0$ справедливим є закон Вейбула, причому значення параметра форми α є істотно більшим за одиницю, що вказує на відсутність у дослідженій вибірці термоелектричних генераторних модулів з грубими технологічними дефектами, які б відмовляли протягом короткого часу. Величина t_0 у цьому випадку характеризує граничний ресурс модулів. Вона не видається значною, але, на жаль, можливостей проведення випробувань протягом більшого часу немає.

Для немонотонно-дифузійного закону, розробленого співробітниками Інституту проблем математичних машин НАН України і стандартизованого ДСТУ 3004-95. «Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними», ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97) «Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення», алгоритм

визначення параметрів якого за даними ресурсних випробувань деталізовано у національному стандарті України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов» і який описується формулою

$$P(t) = \Phi_0\left(\frac{1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}}\right) - \exp\left[-\frac{2}{v^2}\right] \cdot \Phi_0\left(\frac{-1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}}\right), \quad (11)$$

де $\Phi_0(z) = 0,5 \operatorname{erf}(\sqrt{2}z/2) + 0,5$, $\operatorname{erf}(\dots)$ — так званий інтеграл похибок, μ — середнє напрацювання на відмову, значення параметрів склали $\mu = 11770 \text{ год}$, $v = 0,146$, при цьому було отримано $\Delta = 0,066$. Важливою особливістю цього закону є та обставина, що параметр v явним чином характеризує розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів. Якщо у формулу (11) підставити $v = 0$, то графік імовірності безвідмовної роботи виродиться у ідеальний прямокутник довжиною μ й висотою 1, тобто ми матимемо “ідеальний” випадок з точки зору надійності, якщо за ознаку відмови візьмемо, наприклад, відносну зміну вихідної потужності термоелектричного генераторного модуля. А за основу побудови таблиці якраз і бралось 20% зниження вихідної потужності. З такої точки зору параметр v може слугувати показником відтворюваності, а отже, і якості технологічного процесу виготовлення термоелектричних генераторних модулів.

Бачимо, що сума квадратів відхилень експериментальних точок від теоретичної кривої для немонотонно-дифузійного закону є істотно меншою, ніж для експоненціального закону та модифікованого медико-демографічного закону і близькою до суми квадратів відхилень для законів Вейбула, нормального та логарифмічно нормального. З такої точки зору формально найкращим є логарифмічно нормальний закон, але зі змістовної точки зору він є справедливим за відсутності розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів. Немонотонно-дифузійний закон з незначно більшою сумою квадратів відхилень є більш змістовно обґрунтованим, оскільки явним чином враховує розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів.

Далі, використовуючи значення μ та v і формули, наведені у проєкті національного стандарту України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов», можна визначити стандартизовані ресурсні показники надійності та відносні похибки їх визначення. Тоді виходить, що середнє напрацювання на відмову для випробуваної вибірки термоелектричних генераторних модулів складає $T_f = 11770 \text{ год}$ з відносною похибкою 11,9%, а 95% ресурсу складає $T_f = 9170 \text{ год}$ з відносною похибкою 26,5%. Похибки визначались

за довірчої імовірності 0,99. Еквівалентна інтенсивність відмов, як величина, обернена часу, протягом якого кількість придатних модулів зменшується у 2,72 раза, складає $\lambda = 8,172 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ з похибкою 10,5% за тієї ж довірчої імовірності. На перший погляд, така еквівалентна інтенсивність відмов видається досить значною, але тут слід мати на увазі, що випробувані термоелектричні генераторні модулі побудовано за найменш надійною схемою — це послідовно сполучені 127 термоелементів. А звідси випливає, що еквівалентна інтенсивність відмов одного термоелемента у режимі генерування електричної енергії складає $\lambda_{te} = 6,435 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$, а це приблизно у 3,1 рази менше мінімального значення, наведеного у [10, с. 276], яке дорівнює $2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$.

Графік імовірності безвідмовної роботи термоелектричних генераторних модулів, побудований за результатами ресурсних випробувань, зображено на **рис. 1**.

Зауважимо, що у національному стандарті України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов» оцінки найбільш правдоподібних значень параметрів немонотонного дифузійного розподілу рекомендується робити не методом найменших квадратів, а безпосередньо, використовуючи співвідношення

$$\mu = N^{-1} \sum_{i=1}^N t_i; \quad (12)$$

$$G = N \left(\sum_{i=1}^N t_i^{-1} \right)^{-1}; \quad (13)$$

$$v = \sqrt{\mu / G - 1}. \quad (14)$$

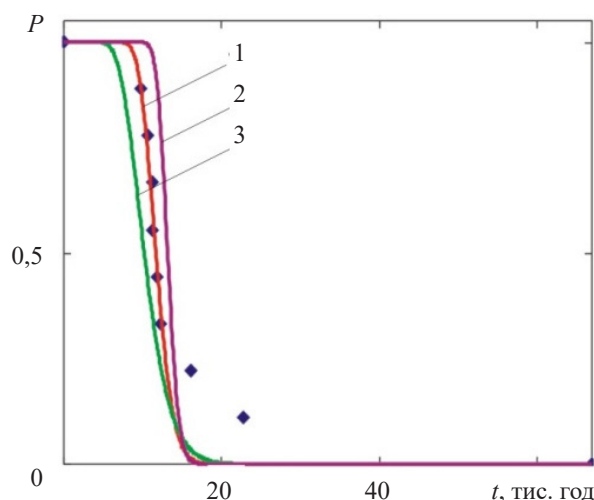


Рис. 1. Часові залежності імовірності безвідмовної роботи: 1 — “найбільш правдоподібна”; 2, 3 — граничні з урахуванням похибок за довірчої імовірності 0,99; точки — експериментальні дані, наведені в таблиці

Відповідно до цих формул параметри дифузійно-немонотонного розподілу складають $\mu = 13190 \text{ год}$, $v = 0,404$. Але у цьому випадку внаслідок істотного зростання коефіцієнта варіації швидкості деградаційних процесів зростає і відносна похибка визначення стандартизованих показників надійності та еквівалентної інтенсивності відмов. Так, за цього коефіцієнта варіації швидкості деградаційних процесів навіть за довірчої імовірності 0,95 відносна похибка визначення 95% ресурсу складе 66%, тоді як стандартом допускається максимальна відносна похибка 40%, причому виключно за узгодженням з замовником випробувань. Причиною цього є істотне відхилення найбільш правдоподібної кривої імовірності безвідмовної роботи від експериментальних даних, що ілюструється **рис. 2**.

Таким чином, виходить, що отримані за “методом максимальної правдоподібності” оцінки параметрів дифузійно-немонотонного розподілу можуть слугувати лише початковим наближенням для якогось з більш точних методів оцінки цих параметрів, зокрема методу найменших квадратів з мінімізацією середньоквадратичного відхилення теоретичної кривої від експериментальних даних ресурсних випробувань, наприклад, методом Ньютона. Саме таким чином і побудовано розроблену нами комп’ютерну програму визначення стандартизованих показників надійності та еквівалентної інтенсивності відмов термоелектричних генераторних модулів включно з відносними похибками отриманих значень цих показників за заздалегідь визначеної довірчої імовірності.

Наостанок варто зробити декілька зауважень змістовного характеру. Коефіцієнт v варіації швидкості деградаційних процесів, взагалі кажучи, відбиває два аспекти: стабільність й, отже, відтворюваність техно-

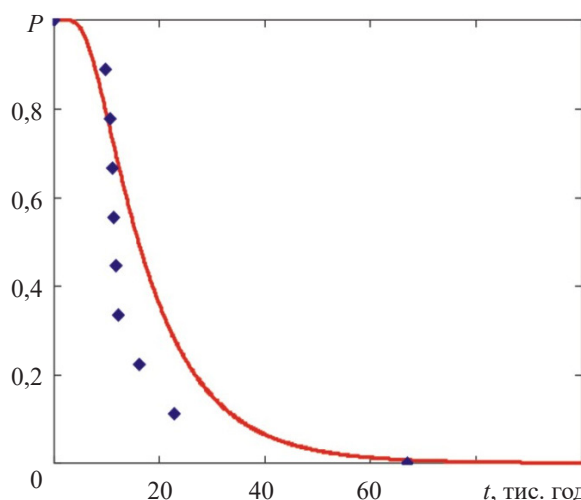


Рис. 2. “Найбільш правдоподібна” крива імовірності безвідмовної роботи (точки — експериментальні дані, наведені в таблиці)

логічного процесу виготовлення термоелектричних генераторних модулів і точність контролю параметрів та визначення напрацювання до відмови у процесі випробувань. Цей коефіцієнт тісно пов'язаний з фізичними процесами, які призводять до поступового або раптового (катастрофічного) зменшення генерованої вихідної потужності, та ККД. Для пов'язування статистики відмов з їхньою фізикою необхідно спочатку побудувати фізичні моделі деградації параметрів модулів, математично їх описати та знайти закони відносної деградації цих параметрів. Але навіть вирішення цієї доволі складної проблеми ще не розв'язує повністю завдання знаходження стандартизованих показників надійності, бо у ці моделі, які, вочевидь, за своєю суттю є детерміністськими, треба фізично обгрунтованим чином ввести "фактор випадковості", через який власне і виникає саме питання про надійність і статистику відмов.

Висновки

Дослідження показали, що з-поміж таких законів, як експоненціальний, Вейбула, нормальний, логарифмічно-нормальний, модифікований медикодемографічний та немономонно-дифузійний, розподіл напрацювання до відмови термоелектричних генераторних модулів через значне розсіювання значень швидкості відносної деградації їхніх параметрів найкраще описується немономонно-дифузійним. Його параметрами є середнє напрацювання на відмову та коефіцієнт варіації швидкості деградаційних процесів. При цьому слід зауважити, що хоча суто експоненціальний закон часової зміни відносної кількості придатних виробів для термоелектричних генераторних модулів виконується погано, все ж таки не слід відмовлятися від інтенсивності відмов як інструменту оцінки надійності складних систем, які містять такі модулі, а також термоелектричних генераторних модулів з різними схемами сполучення термоелементів. Цю інтенсивність слід визначати на основі істинного закону розподілу напрацювання до відмови як величину, обернену часу від початку випробувань (експлуатації), протягом якого кількість придатних виробів зменшується у 2,72 раза.

Напрямок подальших досліджень може бути побудова фізичних моделей деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів і їх математичний опис з обгрунтованим долученням фактору випадковості.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Зайков В.П., Мешеряков В.І., Журавльов Ю.І. Вплив середньої об'ємної температури гілок термоелемента на основні параметри, показники надійності та динаміку функціонування термоелектричного теплового насоса. *Термоелектрика*, 2018, № 2, с. 31–46.
2. Гришин В.И., Котлов Д.В. *Способ изготовления полупроводниковых ветвей для термоэлектрического модуля и термоэлектрический модуль*. Публикация ВО/2015/126272
3. Salvo M., Smeacetto F., D'Isanto F. et al. Glass-ceramic oxidation protection of higher manganese silicide thermoelectrics. *Journal of European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, pp. 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.01.007>
4. He R., Shierning C., Nielsch K. Thermoelectric devices: a review of devices, architectures and contact optimization. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, vol. 3, iss. 4, 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>
5. Karri N.K., Mo C. Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*, 2018, vol. 47, pp. 3127–3135. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5934-6>
6. Yan Yi. *Vertical self-defined thermoelectric legs for use in thin-film micro thermo electric generators (μ -TEG)*. Ph.D. diss., Department of Electrical Engineering, University of Michigan, 2019, 216 p.
7. Kim H. S., Wang T., Liu W., Ren Z. Engineering thermal conductivity for balancing between reliability and performance of bulk thermoelectric generators. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, vol. 26, pp. 3678–3686. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600128>
8. Левин Б.Р. *Элементы теории надежности. Учебное пособие*. Москва, редакционно-издательский отдел ВЗЭИС, 1969, 144 с.
9. Львович Я.Е. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА*. Москва, Радио и связь, 1986, 192 с.
10. Котырло Г.К. *Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1980, 328 с.

Дата надходження рукопису до редакції 25.04 2022 р.

PARTICULAR ASPECTS OF DETERMINING RELIABILITY INDICATORS
OF THERMOELECTRIC GENERATOR MODULES USING EXPERIMENTAL DATA

Resource tests allowed finding that the relative degradation of output power and efficiency of thermoelectric generator modules is not subject to linear law. This means that the distribution law for the failure time of such modules does not «copy» the distribution of their initial parameters, i.e. is neither normal nor logarithmically normal. Therefore, the aim of this paper is to find or select from among the existing such a failure time distribution law, which would clearly take into account the scattering of the rates of relative degradation of the parameters of thermoelectric generator modules.

The paper substantiates the need to use diffusion-nonmonotonic failure time distribution for processing the results of resource tests of thermoelectric generator modules in order to determine their standardized reliability indicators and relative errors of the obtained values. It is proposed to determine the point estimates of the parameters of the law, namely the average failure time and the parameter of variation of the rate of degradation processes not by formulas obtained by the method of maximum likelihood, but by smoothing the probability of failure-free operation obtained by tests. The least squares method and Newton's method are used. Estimates obtained by the method of maximum likelihood serve as an initial approximation for Newton's method. This allows achieving significantly less error in determining standardized reliability indicators than when using the method of maximum likelihood.

Keywords: reliability, thermoelectric module, failure time, diffusion-nonmonotonic distribution, maximum likelihood method, least squares method, relative error.

REFERENCES

1. Zaykov V.P., Mescheryakov V.I., Zhuravlov Yu. I. Effect of the volumetric average temperature of thermoelement leg on the basic parameters, reliability indicators and dynamics of thermoelectric heat pump operation. *Journal of Thermoelectricity*, 2018, no. 2, pp. 31–45.
2. Grishin V.I., Kotlov D.V. *Method for manufacturing semiconductive branches for a thermoelectric module, and thermoelectric module*. Publication of US20170012195A1
3. Salvo M., Smeacetto F., D'Isanto F. et al. Glass-ceramic oxidation protection of higher manganese silicide thermoelectrics. *Journal of European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, pp. 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.01.007>
4. He R., Shierning C., Nielsch K. Thermoelectric devices: a review of devices, architectures and contact optimization. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, vol. 3, iss. 4, 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>
5. Karri N.K., Mo C. Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*, 2018, vol. 47, pp. 3127–3135. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5934-6>
6. Yan Yi. *Vertical self-defined thermoelectric legs for use in thin-film micro thermo electric generators (μ -TEG)*. Ph.D. diss., Department of Electrical Engineering, University of Michigan, 2019, 216 p.
7. Kim H. S., Wang T., Liu W., Ren Z. Engineering thermal conductivity for balancing between reliability and performance of bulk thermoelectric generators. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, vol. 26, pp. 3678–3686. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600128>
8. Levin B.R. *Elementy teorii nadezhnosti. Uchebnoye posobiye* [Elements of the theory of reliability. Tutorial]. Moscow, VZEIS, 1969, 144 p. (Rus)
9. Lvovich Ya.Ye. *Teoreticheskiye osnovy konstruirovaniya, tekhnologiya i nadezhnosti REA* [Theoretical foundations of design, technology and reliability of electronic equipment]. Moscow, Radio and communication, 1986, 192 p. (Rus)
10. Kotyrla G.K. *Raschet i konstruirovaniye termoelektricheskikh generatorov i teplovykh nasosov. Spravochnik* [Calculation and design of thermoelectric generators and heat pumps. Handbook]. Kyiv, Naukova Dumka, 1980, 328 p. (Rus)

Опис статті для цитування:

Горський П. В. Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів за експериментальними даними. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.50>

Cite the article as:

Gorskyi P. V. Particular aspects of determining reliability indicators of thermoelectric generator modules using experimental data. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.50>