

ПОРІВНЯННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ МОДУЛІВ З РІЗНИМИ СХЕМАМИ СПОЛУЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

На основі немонотонно-дифузійного закону розподілу часу відмов запропоновано аналітичний вираз закону розподілу часу відмов окремого термоелемента, який докорінно відрізняється від традиційно використовуваного простого експоненціального закону зі сталою інтенсивністю відмов. Обчислено середнє напрацювання на відмову, 95%-й ресурс та еквівалентну інтенсивність відмов термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельним та паралельно-послідовним сполученням термоелементів, та проведено їх порівняння з відповідними показниками модулів з суто послідовним електричним сполученням термоелементів.

Ключові слова: надійність, показники надійності, контакти, схеми сполучення термоелементів.

Одним з ключових питань якості та надійності мікроелектронних і термоелектричних пристроїв є питання якості їхніх контактних систем і вузлів. У термоелектриці основні фізичні явища мають саме контактну природу, а основний об'єм напівпровідникового матеріалу термоелектричних гілок є пасивним. Якість контактної системи відіграє особливу роль в термоелектриці. З точки зору споживчих характеристик термоелектричних генераторних і охолоджувальних модулів особливу роль відіграють електричний та тепловий опори контакту «метал — напівпровідник». Питанням зниження електричного контактного опору приділяється значна увага: його величина має бути тим меншою, чим менша довжина термоелектричної гілки вздовж напрямку градієнта температури, й очевидно, що це є особливо важливим для мініатюрних термоелектричних пристроїв.

У літературі розглянуто досить багато способів зниження контактного опору [1—5], зокрема механічна та хімічна обробка поверхні напівпровідника, вибір матеріалу припою й антидифузійного контактного шару, електрохімічне або суто хімічне (безструмове) нанесення антидифузійних шарів, вибір режиму паяння тощо. Окрім того, значна увага приділяється очищенню контактних поверхонь від оксидних плівок, наприклад шляхом бомбардування поверхні іонами інертного газу. Інтенсивно досліджуються процеси, які проходять у контактних структурах при їх старінні за підвищеної температури, а також зміни фазового складу та структури перехідних контактних шарів. Ці зміни з часом ведуть до утворення інтерметалідів, наприклад телуридів нікелю, наявність і зростання яких зумовлює не лише збільшення електричного та теплового контактних опорів, а й появу порожнин і тріщин у перехідних контактних шарах, які призводять до механічного руйнування контактних структур і розриву

електричних кіл термоелементів, а отже, й термоелектричних модулів в цілому. Особливу роль ці процеси відіграють у генераторних термоелектричних модулях, оскільки внаслідок закону Ареніуса в них вони проходять з більшою швидкістю.

Іншим напрямком підвищення надійності термоелектричних генераторних модулів відносно явищ, які ведуть до розриву електричних кіл термоелементів, є підвищення міцності термоелектричних матеріалів, з одного боку, і зниження механічних напруг у термоелектричних гілках, з іншого. Збільшення міцності термоелектричних матеріалів досягається зміною технології їх вирощування, зокрема заміною зонного плавлення у циліндричних контейнерах на вирощування методом Бріджмена у щільних контейнерах з плоскими щілинами [6]. Цей шлях призводить також і до зменшення витрати матеріалу на виготовлення термоелектричних гілок. Однак при цьому погіршується притаманна зонному плавленню висока однорідність розподілу значень термоелектричних параметрів уздовж зливка. Зниження механічних напруг у термоелектричних гілках досягається спеціальним вибором геометрії термоелектричних гілок і способу їх розташування [7], обмеженням їх можливого переміщення шляхом застосування спеціальних каркасів [8], узгодження між собою параметрів термоелектричного матеріалу, зокрема таких як міцність, коефіцієнт лінійного розширення, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та теплопровідність [9], або шляхом нанесення спеціального зміцнювального покриття [10].

Але існує й інший важливий напрямок підвищення надійності термоелектричних генераторних модулів — застосування замість найбільш ненадійної суто послідовної схеми електричного сполучення термоелементів інших варіантів, а саме послідовно-

паралельних та паралельно-послідових схем, які передбачають резервування. Це питання побіжно розглянуто у монографії [11] і більш детально у роботах [12—15]. Основним недоліком цих досліджень є застосування у процесі розрахунків “готових”, узятих з літератури, значень ймовірностей збереження цілісності термоелектричних гілок і контактів або сталих значень відповідної інтенсивності відмов.

Метою цього дослідження є порівняння стандартизованих показників надійності термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельною та паралельно-послідовою схемами електричного сполучення термоелементів за даними ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів із суто послідовною схемою електричного сполучення термоелементів.

Методика досліджень

Із загальних міркувань теорії надійності, математичною базою якої виступає теорія ймовірності, відомо, що одним зі способів створення надійних систем з ненадійних компонентів є резервування. В процесі створення термоелектричних генераторних модулів (ТЕГМ) воно може здійснюватись шляхом використання замість суто послідовної схеми електричного сполучення термоелементів послідовно-паралельної або паралельно-послідовної схеми. Як правило, такого роду схеми розробляються та використовуються для того, щоб відмова одного або декількох термоелементів не призвела до виходу з ладу генераторного модуля в цілому.

Найчастіше відмова термоелемента стається в разі розриву його електричного кола безпосередньо у термоелектричній напівпровідниковій гілці або у контактній області. Такі розриви можуть бути миттєвими (наприклад, за наявності підвищених механічних навантажень) або поступовими внаслідок деградації як матеріалу гілок, так і контактної структури (головним чином, перехідних контактних шарів) під впливом одночасної дії градієнта температури й електричного струму. Тому для визначення ресурсних показників ТЕГМ з довільною схемою електричного сполучення термоелементів в разі наявності поступово діючих факторів, що зумовлюють розрив електричного кола термоелемента, необхідно знати часову залежність ймовірності безвідмовної роботи термоелемента. Як правило, для цього пропонується найпростіша експоненціальна залежність [11, с. 21] $P(t) = \exp(-\lambda t)$, (1) де t — час; λ — інтенсивність відмов.

Однак, як було показано нами у [15], істотно краще використовувати немонотонно-дифузійний закон, згідно з яким часова залежність ймовірності безвідмовної роботи термоелектричного генераторного модуля визначається співвідношенням

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

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;

v — параметр, який явним чином характеризує розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів ТЕГМ.

Наведений закон був отриманий співробітниками Інституту проблем математичних машин НАН України і стандартизований у 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 закону за даними ресурсних випробувань деталізований у національному стандарті України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов».

Для використання закону (2) необхідно за результатами ресурсних випробувань знайти його параметри, які б відповідали повній відмові модулів. Для цього використаємо закон Вейбула

$$V = V_0 \exp \left[- (t / \tau_d)^{\delta_d} \right], \quad (3)$$

де початкове значення V_0 якогось з нормованих параметрів, наприклад потужності, параметр масштабу τ_d і параметр форми δ_d для кожного модуля є своїми, і за формулою

$$t_f = \tau_d \left[-\ln(1 - \delta_N) \right]^{1/\delta_d}, \quad (4)$$

задаючи відносну втрату потужності δ_N , визначимо прогнозований час t_f повної відмови кожного модуля, поклавши $\delta_N = 0,9$, оскільки прийняти $\delta_N = 1$ ми не можемо. Тобто таким, що повністю відмовив, вважатимемо ТЕГМ, який втратив 90% початкової вихідної потужності.

Методику ресурсних випробувань, на основі яких виконувалось прогнозування, детально описано у [16].

Результати проведених обчислень наведено у таблиці.

Прогнозована часова залежність ймовірності безвідмовної роботи термоелектричних генераторних модулів з суто послідовною схемою сполучення термоелементів стосовно розриву їхнього електричного кола

Напрацювання, 10 ⁴ год	1,075	1,285	1,385	1,389	1,654	3,163	10,12	34,23	504
Ймовірність безвідмовної роботи	8/9	7/9	2/3	5/9	4/9	1/3	2/9	1/9	0

Згладжування даних таблиці методом найменших квадратів дало такі значення параметрів закону (2): $v = 2,276$, $\mu = 7,969 \cdot 10^4$ год, при цьому значення 95%-го ресурсу склало $3,967 \cdot 10^3$ год, а еквівалентна інтенсивність відмов $\lambda = 2,56 \cdot 10^{-5}$ год. Сума квадратів відхилень табличних даних від апроксимувальної кривої склала 0,085. Щодо відносно невеликого отриманого значення 95%-го ресурсу слід зазначити, що протягом ресурсних випробувань сталась відмова лише одного модуля з 9, і вона, судячи з характеру часової залежності вихідної потужності, сталась наприкінці випробувань саме внаслідок руйнування контактної структури протягом короткого часу. Від початку випробувань при цьому минуло 9720 год, тож відносна похибка прогнозування за деградаційною кривою складає близько 10,6%, що цілком прийнятно. А знаючи часову залежність ймовірності безвідмовної роботи генераторного модуля з суто послідовною схемою електричного сполучення термоелементів в цілому відносно дій або впливів, які ведуть до порушення цілісності електричних кіл термоелементів, неважко знайти і часову залежність безвідмовної роботи окремого термоелемента. Справді, за суто послідовної схеми електричного сполучення термоелементів повна відмова ТЕГМ в цілому настає в разі розриву електричного кола хоча б одного або декількох термоелементів. Тому за теоремою множення ймовірностей ймовірність безвідмовної роботи термоелемента дорівнює

$$P = \left[\Phi_0 \left(\frac{1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}} \right) - \exp \frac{2}{v^2} \Phi_0 \left(\frac{-1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}} \right) \right]^{1/N}, \quad (5)$$

де N — кількість термоелементів у термоелектричному генераторному модулі.

З врахуванням наведених вище параметрів закону (2) при $N = 128$ було отримано представлену на **рис. 1** часову залежність P у вигляді $P(x)$, де $x \equiv t/\mu$ (до речі, ця залежність дуже нагадує криву виживання людських популяцій).

Як видно з рис. 1, спочатку ймовірність безвідмовної роботи досить швидко знижується, що відповідає періоду припрацювання, коли відбраковують-

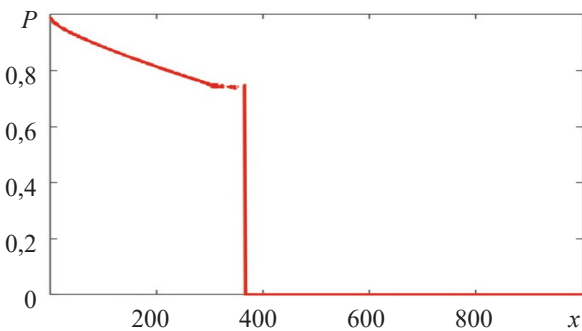


Рис. 1. Часова залежність ймовірності безвідмовної роботи одиничного термоелемента

ся ТЕГМ, а отже, і термоелементи з істотними технологічними дефектами (найімовірніше, дефектами контактних структур), причому цей період відносно короткий. Потім настає відносно довгий “корисний” період, який з врахуванням знайденого значення $\mu = 7,969 \cdot 10^4$ год дорівнює приблизно $3,03 \cdot 10^7$ год, але тут часова залежність ймовірності безвідмовної роботи відрізняється від закону (1), після чого настають масові відмови, які теж відбуваються протягом дуже короткого проміжку часу. Часову залежність ймовірності безвідмовної роботи одного термоелемента, знайдену на підставі результатів ресурсних випробувань ТЕГМ з суто послідовним електричним сполученням термоелементів, використаємо для визначення ресурсних показників генераторних модулів з послідовно-паралельним та паралельно-послідовним сполученням термоелементів.

Схема з послідовно-паралельним сполученням термоелементів

Із загальних міркувань зрозуміло, що найбільш надійною щодо чинників, які ведуть до розриву електричного кола термоелемента, є схема, у якій термоелементи сполучено суто паралельно. Але така схема не застосовується через те, що електрична напруга, яку здатен розвинути один термоелемент, занадто мала для практичного застосування. Тому застосовують послідовно-паралельну схему, в якій паралельно сполучаються ряди послідовно з'єднаних термоелементів. Оскільки працездатність такої схеми є подією, протилежною повній непрацездатності схеми, знайдемо спочатку її ймовірність. Послідовний ряд з N термоелементів є працездатним, коли працездатні всі його елементи, тому ймовірність його непрацездатного стану дорівнює $1 - P^N$. Отже, оскільки своєю чергою схема з M таких паралельних рядів непрацездатна тоді, коли вони всі непрацездатні, ймовірність непрацездатного стану цієї схеми визначається як

$$Q_1 = (1 - P^N)^M, \quad (6)$$

отже, ймовірність її працездатного стану дорівнює

$$P_1 = 1 - (1 - P^N)^M. \quad (7)$$

Середнє напрацювання такої схеми на відмову дорівнює

$$MTBF = \int_0^{\infty} P_1 dt, \quad (8)$$

а γ -відсотковий ресурс визначається як час, за якого ймовірність P_1 стає рівною $\gamma/100$.

Еквівалентна інтенсивність відмов такої схеми визначається як величина, обернена часу, за якого ймовірність P_1 стає рівною $1/e$, тобто $1/2,71828$.

Графіки залежності $MTBF$, 95%-го ресурсу та еквівалентної інтенсивності відмов від N для різних значень M наведено на **рис. 2**. Тут видно, що резер-

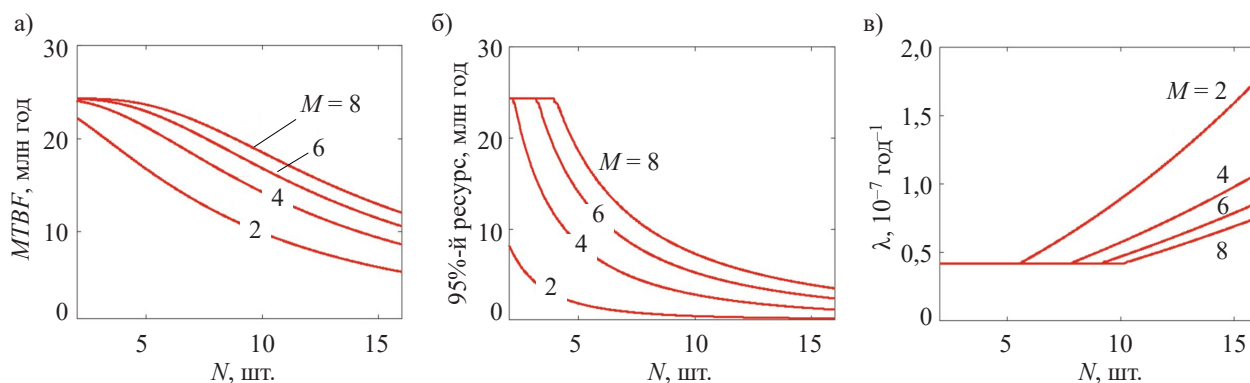


Рис. 2. Залежності середнього напрацювання на відмову (а), 95%-го ресурсу (б) та еквівалентної інтенсивності відмов (в) термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельною схемою сполучення термоелементів від кількості N термоелементів у ряду за різної кількості M паралельних рядів (вказано на рисунках)

ування істотно підвищує ресурсні показники термоелектричних генераторних модулів. Очевидно, що зі збільшенням кількості термоелементів у ряду величина $MTBF$ та 95%-й ресурс ТЕГМ будуть зменшуватись, еквівалентна інтенсивність відмов зростатиме, і навпаки. Виходить, що застосувавши замість схеми зі 128 суто послідовно сполучених термоелементів схему, яка містить, наприклад, 8 паралельних рядів з 16 послідовно сполучених термоелементів, можна збільшити середнє напрацювання на відмову з 79690 год до 12 млн год, тобто у 150 разів, 95%-й ресурс з 3697 год до 3 млн год, тобто у понад 800 разів, а еквівалентну інтенсивність відмов знизити з $2,56 \cdot 10^{-5}$ до приблизно $8 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹, тобто у 320 разів.

Схема з паралельно-послідовним сполученням термоелементів

Розглянемо термоелектричний генераторний модуль, що складається з N послідовно сполучених груп термоелементів, кожна з яких містить M паралельно сполучених термоелементів. Такий ТЕГМ буде працездатним, якщо всі N груп працездатні. Ймовірність працездатного стану такої групи дорівнює

$$P_g = 1 - (1 - P)^M, \tag{9}$$

тому ймовірність працездатного стану термоелектричного генераторного модуля в цілому дорівнює

$$P_2 = [1 - (1 - P)^M]^N. \tag{10}$$

Тепер стандартизовані показники надійності термоелектричного генераторного модуля знаходяться так само, як і для попередньої схеми, але замість ймовірності P_1 використовується P_2 . Результати відповідних розрахунків наведено на **рис. 3**.

Аналіз показує, що використовуючи замість 128 суто послідовно сполучених термоелементів 16 послідовно сполучених груп, кожна з яких складається з 8 паралельно сполучених термоелементів, можна підвищити середнє напрацювання на відмову до 24 млн год, тобто у 300 разів, 95%-й ресурс до 15 млн год, тобто у 4000 разів, а еквівалентну інтенсивність відмов знизити до $4 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹, тобто у 640 разів. Таким чином, паралельно-послідовна схема є надійнішою не тільки за схему з суто послідовно сполученими термоелементами, але й за послідовно-паралельну.

Висновки

Закон розподілу часу відмов одиничного термоелемента, отриманий на основі прогнозування часу

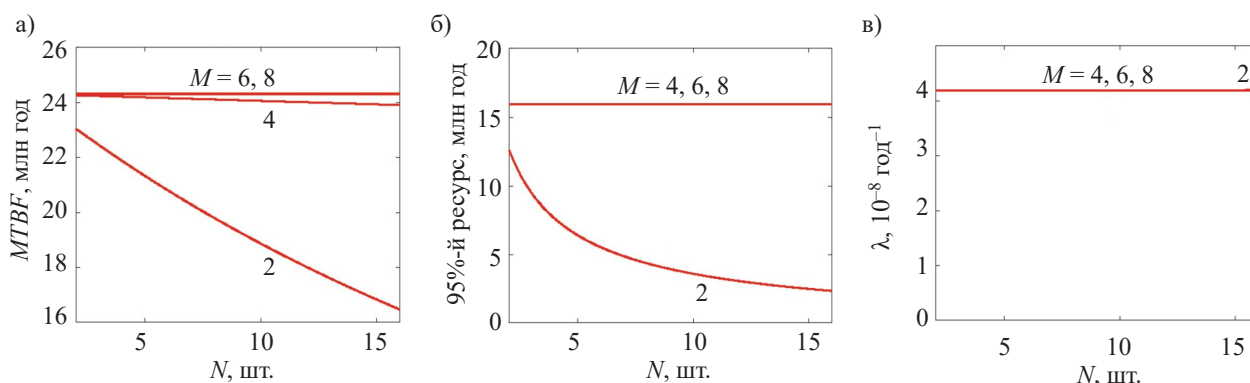


Рис. 3. Залежності середнього напрацювання на відмову (а), 95%-го ресурсу (б) та еквівалентної інтенсивності відмов (в) термоелектричних генераторних модулів з паралельно-послідовною схемою сполучення термоелементів від кількості N термоелементів у ряду за різної кількості M паралельних рядів (вказано на рисунках)

повної відмови термоелектричних генераторних модулів з суто послідовною схемою сполучення термоелементів, дозволив визначити стандартизовані показники надійності термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельними та паралельно-послідовними схемами електричного сполучення термоелементів, які передбачають резервування. Встановлено, що ці схеми забезпечують суттєво, у сотні разів, вищі показники надійності термоелектричних генераторних модулів, ніж суто послідовне електричне сполучення. При цьому паралельно-послідовна схема є в рази надійнішою за послідовно-паралельну.

Таким чином, наведена методика розрахунків дозволяє наближено спрогнозувати надійність термоелектричних генераторних модулів з будь-яким сполученням термоелементів і вибрати таку схему, яка істотно підвищує надійність завдяки резервуванню. Однак питання про те, як при цьому не знизити істотним чином, наприклад, вихідну потужність модуля, потребує додаткового поглибленого дослідження.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Semenyuk V. Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers. *J. Electron. Mater.*, 2019, vol. 48, p. 1870–1876. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6785-5>
2. Gupta R.P. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi₂Te₃-based thermoelectric devices. *J. Electron. Mater.*, 2013, vol. 42, p. 1608–1612. <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2806-6>
3. Сабо С.П. Технологія халькогенних термоелементів. Фізичні основи. Розділ 3. Технологія комутації віток термоелемента. Продовження. 3.5. Електрохімічна металізація. *Термоелектрика*, 2011, № 1, с. 26–35.
4. Aswal D.K., Basu R., Singh A. Key issues in development of thermoelectric power generators: high figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects, *Energy Convers. Manag.*, 2016, vol. 114, p. 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.065>
5. 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>
6. Горський П.В., Разінков В.В. Вплив геометрії контейнера на орієнтацію та ступінь паралельності площин спайності монокристалів телуриду вісмуту. *Термоелектрика*, 2018, №5, с. 22–32.
7. Karri N.K., Mo C. Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *J. Electron. Mater.*, 2018, p. 3127–3135. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5934-6>
8. 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.
9. 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, p. 3678–3686. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600128>
10. Гришин В.И., Котлов Д.В. *Способ изготовления полупроводниковых ветвей для термоэлектрического модуля и термоэлектрический модуль. Изобретение № 216.012.С0Е3*, 10.05.2014.
11. Котырло Г.К., Лобунец Ю.Н. *Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1980, 328 с.
12. Львович Я.Е. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА*. Москва, Радио и связь, 1986, 192 с.
13. Левин Б.Р. *Элементы теории надежности. Учебное пособие. Выпуск первый*. Москва, Редакционно-издательский отдел ВЗЭИС, 1969, 144 с.
14. Анатичук Л.І., Лусте О.Я. Вплив деградації на ресурсні можливості термоелектричних матеріалів. *Термоелектрика*, 2017, № 5, 84–96.
15. Горський П.В. Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів. *Труди МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, Одеса, 2022, с. 38–39.
16. Горський П.В. Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів за експериментальними даними. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, №1–3, с. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.50>

Дата надходження рукопису до редакції 19.07 2022 р.

Опис статті для цитування:

Горський П. В. Порівняння надійності термоелектричних генераторних модулів з різними схемами сполучення термоелементів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 4–6, с. 59–64. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.59>

Cite the article as:

Gorskyi P. V. Comparison of reliability of thermoelectric generator modules with different schemes for connecting thermoelements *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 59–64. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.59>

COMPARISON OF RELIABILITY OF THERMOELECTRIC GENERATOR MODULES WITH DIFFERENT SCHEMES FOR CONNECTING THERMOELEMENTS

The study compares reliability indicators of thermoelectric generator modules using the nonmonotonic-diffusion law of failure time distribution. The authors use the law to propose for the first time an analytical expression of the failure time distribution of an individual thermoelement, which fundamentally differs from the traditional simple exponential law with a constant failure intensity.

The law is used to calculate the mean time between failures (MTBF), the 95% resource and equivalent failure rate of thermoelectric generator modules with series-parallel and parallel-series connection of thermocouples. Considered are the variants of schemes with different number of elements in rows and different number of rows for serial-parallel circuit and with different number of sequential groups and elements in a group for parallel-serial circuit. Coefficients of increase of the average failure time, 95% resource and coefficients of decrease of the equivalent failure intensity for a purely series connection of thermocouples are determined for the considered thermocouple schemes. It is established that these indicators can be improved by more than three orders of magnitude.

Keywords: reliability, reliability indicators, contacts, schemes of thermocouples connection.

REFERENCES

1. Semenyuk V. Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers. *J. Electron. Mater.*, 2019, vol. 48, p. 1870–1876. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6785-5>
2. Gupta R.P. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi₂Te₃-based thermoelectric devices. *J. Electron. Mater.*, 2013, vol. 42, p. 1608–1612. <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2806-6>
3. Sabo E.P. Technology of khalcogene thermoelements. Physical backgrounds. Section 3. Technology of connection of thermoelement legs. Continue. 3.5. Electrochemical metallization. *Thermoelectricity*, 2011, no. 1, pp. 26–35.
4. Aswal D.K., Basu R., Singh A. Key issues in development of thermoelectric power generators: high figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects, *Energy Convers. Manag.*, 2016, vol. 114, p. 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.065>
5. 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>
6. Gorskyi P.V., Razin'kov V.V. The impact of container geometry on the orientation and parallelism rate of the cleavage planes of the bismuth telluride single crystals. *Thermoelectricity*, 2018, no. 5, pp. 22–32.
7. 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>
8. 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.
9. 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>
10. Grishin V.I., Kotlov D.V. *Method for manufacturing semiconductor legs for thermoelectric module and thermoelectric module*. Patent WO/2015/126272. (2015).
11. Kotyrla G.K., Lobunets Yu.N. *Raschet i konstruirovaniye termoelektricheskikh generatorov i teplovyykh nasosov. Spravochnik* [Calculation and design of thermoelectric generators and heat pumps. Handbook]. Kyiv, Naukova Dumka, 1980, 328 p. (Rus)
12. Lvovich Ya.Ye. *Teoreticheskiye osnovy konstruirovaniya, tekhnologii i nadezhnosti REA* [Theoretical foundations of design, technology and reliability of electronic equipment]. Moscow, Radio and communication, 1986, 192 p. (Rus)
13. Levin B.R. *Elementy teorii nadezhnosti. Uchebnoye posobiye. Vypusk pervyy*. [Elements of the theory of reliability. Tutorial. Iss. 1]. Moscow, Editorial and publishing department of VZEIS, 1969, 144 p. (Rus)
14. Anatyshuk L.I., Luste O.J. Impact of degradation on the resource capabilities of thermoelectric materials. *Thermoelectricity*, 2017, no. 5, pp. 84–96.
15. Horskyy P. V. Particular aspects of determining reliability indicators of thermoelectric generator modules. *Proceedings of the Int. Scient.-Pract. Conf. "Modern Information and Electronic Technologies"*, Ukraine, Odesa, 2022, pp. 38–39. (Ukr)
16. 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/TKEA2022.1-3.50> (Ukr)