

© Кириченко О.С.

## ВПЛИВ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПА НА ЯКІСТЬ КЕРУВАННЯ КУРСОМ СУДНА

У роботі проаналізовано вплив показників надійності системи термостабілізації волоконно-оптичного гіроскопа на якість керування курсом судна в умовах тривалої експлуатації. Показано наявність суперечливих вимог при виборі робочого режиму термоелектричного модуля: підвищення струму сприяє інтенсифікації ефекту Пельтьє та покращенню теплової стабільності чутливих елементів гіроскопа, але водночас призводить до зростання температурних і термомеханічних навантажень, що прискорюють деградаційні процеси в матеріалах і з'єднаннях модуля. Розглянуто фізично обґрунтовані моделі відмов, які враховують температурний фактор за законом Арреніуса та вплив механічних напружень за степеневим законом. Запропоновано комплексний підхід, що пов'яже робочий струм термоелектричного модуля з імовірністю безвідмовної роботи протягом рейсу, середнім напруженням до відмови та подальшими навігаційними наслідками. Проведено кількісне моделювання для термоелектричного модуля ТЕС1-01102 у діапазоні струмів 0-2 А з урахуванням характерних суднових умов експлуатації. Встановлено, що підвищення струму зумовлює нелінійне зростання коефіцієнта прискорення деградації та суттєве скорочення ресурсу модуля навіть у межах допустимих режимів. Досліджено вплив деградації системи термостабілізації на дрейф нульового зсуву гіроскопа, який у процесі інтегрування трансформується в похибку курсу та бічне відхилення судна від заданої лінії шляху. Показано, що за навігаційний інтервал активного руху тривалістю 6 год величина бічного відхилення може досягати десятків метрів. Отримані залежності мають узагальнений характер і можуть бути використані для оцінювання допустимих режимів роботи термоелектричних систем термостабілізації в інерціальних навігаційних комплексах суднового призначення. Отримані результати дозволяють інженерно обґрунтувати вибір робочої точки регулятора з урахуванням компромісу між ефективністю термостабілізації, надійністю та навігаційною точністю для різних типів морських і річкових суден.

**Ключові слова:** інерціальна навігаційна система; термоелектричний модуль; ефект Пельтьє; термомеханічні напруження; середнє напруження; дрейф нуля; бічне відхилення.

**Постановка проблеми.** Сучасні суднові навігаційні комплекси широко використовують волоконно-оптичні гіроскопи як базові елементи інерціальних навігаційних систем, що забезпечують визначення кутового положення та курсу судна з високою точністю і надійністю [1-4]. Особливості експлуатації таких систем у морському середовищі, зокрема тривалі рейси, змінні теплові навантаження, вібрації та обмежені можливості технічного обслуговування, висувують підвищені вимоги до стабільності характеристик гіроскопів і допоміжних систем [5].

Одним із основних факторів, що впливають на точність волоконно-оптичних гіроскопів, є температурна стабільність чутливого елемента та електронних компонентів. Для забезпечення стабільного теплового режиму все ширше застосовуються термоелектричні модулі на основі ефекту Пельтьє, які дозволяють реалізувати компактні та безінерційні системи термостабілізації [6, 7]. Разом із тим підвищення ефективності термоелектричного охолодження за рахунок збільшення робочого струму супроводжується зростанням температурних і термомеханічних навантажень, що може призводити до прискореної деградації елементів модуля та зниження його ресурсу [8, 9].

Таким чином, виникає наукове протиріччя між вимогами до високої точності навігаційних вимірювань, що потребують інтенсивних режимів термостабілізації, та необхідністю забезпечення прийняттого рівня надійності й ресурсу термоелектричних модулів за умов тривалої суднової експлуатації.

На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на енергетичну оптимізацію термоелектричних модулів за холодильним коефіцієнтом (COP) або ізольований аналіз дрейфів чутливих елементів інерціальної навігації, у даній роботі обґрунтовано системний підхід до оцінки ефективності систем термостабілізації. Запропонований підхід поєднує термомеханічні моделі надійності термоелектричних модулів із кінематичними моделями формування навігаційних похибок, встановлюючи функціональний зв'язок між прискоренням деградації виконавчих елементів та імовірнісними характеристиками точності утримання судна на заданій траєкторії руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фундаментальні засади побудови та функціонування волоконно-оптичних гіроскопів, а також їх застосування в інерціальних і інтегрованих навігаційних системах детально розглянуто у класичних монографіях і навчальних посібниках [1-4]. У цих роботах показано, що температурні впливи є одним із визначальних чинників формування систематичних похибок інерціальних датчиків.

Дослідження термоелектричних ефектів, конструкцій термоелектричних модулів та шляхів підвищення їх енергетичної ефективності широко представлені в роботах [6-10]. У них розглянуто як фізичні основи ефекту Пельтьє, так і чисельні та експериментальні методи аналізу робочих характеристик мініатюрних термоелектричних охолоджувачів. Окрему увагу приділено впливу тепловідведення та режимів конвекції на температурний стан модуля.

Питання надійності термоелектричних модулів, зокрема за умов термоциклічних навантажень, досліджуються в роботах [11-14], де застосовуються підходи фізики відмов, прискорених випробувань і статистичного аналізу ресурсу електронних компонентів. Показано, що температурний фактор і термомеханічні напруження є домінуючими механізмами деградації.

Методи аналізу похибок інерціальних датчиків і їх впливу на навігаційні параметри розглянуто в роботі [15], тоді як питання структурної побудови та узгодження навігаційних систем, а також оцінки навігаційних похибок у морських застосуваннях висвітлено в [16, 17]. Експериментальні та теоретичні аспекти теплопередачі в умовах нерівномірних теплових потоків, а також їх вплив на працездатність і теплову стабільність високотемпературних теплових систем розглянуто в роботі [18].

Чисельне моделювання теплових і термомеханічних процесів у термоелектричних модулях і суміжних елементах суднового електрообладнання розглянуто в роботах [19-21], де показано можливості 3D-моделювання для оцінки температурних полів і напружень. Питання термомеханічної надійності термоелектричних модулів на основі матеріалів  $Bi_2Te_3$  досліджено в [22].

**Метою роботи** є кількісна оцінка впливу показників надійності термостабілізації волоконно-оптичного гіроскопа на якість керування курсом судна шляхом побудови аналітичного зв'язку між робочим струмом термоелектричного модуля, показниками безвідмовності та довговічності в межах рейсу і навігаційними похибками, зокрема похибкою курсу та бічним відхиленням судна від заданої лінії шляху.

**Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження.** У межах даної роботи волоконно-оптичний гіроскоп розглядається як узагальнений представник класу судових інерціальних датчиків, а система термостабілізації – як типовий термоелектричний вузол на основі ефекту Пельтьє. Для аналізу використано результати чисельного моделювання робочих характеристик термоелектричного модуля, раніше отримані для систем термостабілізації гіроскопів судової навігації [6].

Оцінка надійності проводиться з використанням мультиплікативної моделі прискорення деградації, яка враховує температурний фактор за законом Арреніуса та вплив термомеханічних напружень за степеневим законом, що відповідає підходам фізики відмов і прискорених випробувань електронних компонентів [11-14]. Отримані залежності коефіцієнта прискорення деградації та середнього напрацювання до відмови аналізуються в прив'язці до робочого струму термоелектричного модуля.

Подальший аналіз пов'язує зміну теплового режиму та деградацію модуля з ростом дрейфу нульового зсуву гіроскопа, який шляхом інтегрування призводить до накопичення похибки курсу і бічного відхилення судна від заданої траєкторії руху, що узгоджується з класичними моделями

інерціальної навігації [15-17]. Таким чином, встановлюється причинно-наслідковий ланцюг між режимом роботи термоелектричної системи, її надійністю та навігаційними показниками судна.

Функція безвідмовної роботи термоелектричного модуля в умовах рейсової експлуатації при фіксованому режимі струму описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dR(t, I)}{dt} = -\lambda(I)R(t, I); R(0, I) = 1, \quad (1)$$

де  $R(t, I)$  – функція імовірності безвідмовної роботи термоелектричного модуля до моменту часу у межах рейсу;  $t$  – напрацювання термоелектричного модуля, год;  $I$  – робочий струм термоелектричного модуля, А;  $\lambda(I)$  – інтенсивність відмов термоелектричного модуля при струмі  $I$ , 1/год.

Розв'язок цього рівняння має експоненційний вигляд:

$$R(t, I) = \exp(-\lambda(I)t), \quad (2)$$

де  $t$  – напрацювання, год.

Середнє напрацювання до відмови (Mean Time Between Failures, MTBF) термоелектричного модуля при струмі визначається як:

$$MTBF(I) = \int_0^{\infty} R(t, I) dt = \frac{1}{\lambda(I)}. \quad (3)$$

Фізично обґрунтовану залежність інтенсивності відмов термоелектричного модуля від навантаження представимо через еталонний режим та коефіцієнти прискорення деградації:

$$\lambda(I) = \lambda_{ref} AF(I) = \lambda_{ref} AF_T(I) AF_{\sigma}(I), \quad (4)$$

де  $\lambda_{ref}$  – інтенсивність відмов у еталонному режимі струму  $I_{ref}$ , 1/год;  $AF(I)$  – загальний коефіцієнт прискорення деградації;  $AF_T(I)$  – температурний множник прискорення деградації;  $AF_{\sigma}(I)$  – множник, що враховує вплив термомеханічних напружень.

Температурний множник  $AF_T(I)$  описується законом Арреніуса:

$$AF_T(I) = \exp\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(I)}\right)\right], \quad (5)$$

де  $E_a$  – енергія активації домінуючого деградаційного механізму, еВ;  $k_B$  – стала Больцмана, еВ/К;  $T_{ref}$  – абсолютна температура в еталонному режимі, К;  $T(I)$  – абсолютна температура критичної області термоелектричного модуля при струмі  $I$ , К.

Абсолютна температура визначається за співвідношенням:

$$T(I) = t_{hot}(I) + 273,15, \quad (6)$$

де  $t_{hot}$  – температура гарячої сторони термоелектричного модуля, °С.

Вплив термомеханічних напружень  $AF_{\sigma}(I)$  враховується степеневим законом:

$$AF_{\sigma}(I) = \left(\frac{\sigma(I)}{\sigma_{ref}}\right)^n, \quad (7)$$

де  $\sigma(I)$  – еквівалентні напруження в структурі термоелектричного модуля при струмі  $I$ , Па;  $\sigma_{ref}$  – еквівалентні напруження в еталонному режимі, Па;  $n$  – показник чутливості деградації до напружень.

Параметри  $E_a$  та показник  $n$  у роботі трактуються як ефективні, що відображають домінантні механізми старіння у межах єдиної моделі прискорення. Такий підхід є стандартним у надійності (фізично обґрунтований підхід до аналізу відмов; методи прискорених випробувань на надійність) і забезпечує коректну порівняльну чутливість показників до температури  $T$  і напружень  $\sigma$ .

Загальний коефіцієнт прискорення деградації  $AF(I)$ :

$$AF(I) = AF_T(I) AF_{\sigma}(I). \quad (8)$$

Деградація термоелектричного модуля знижує ефективність термостабілізації навігаційного датчика, що проявляється у зростанні температурної нестабільності чутливого елемента. Для

узгодження моделі деградації з навігаційною моделлю вважатимемо, що температурна похибка пропорційна загальному коефіцієнту прискорення деградації та визначається згідно з формулою:

$$\Delta T(I) = \Delta T_{ref} AF(I), \quad (9)$$

де  $\Delta T_{ref}$  – еталонний перепад температур у системі термостабілізації при номінальному режимі роботи;  $AF(I)$  – загальний коефіцієнт прискорення деградації, визначений формулами (5)-(8).

Розглянемо абсолютні показники безвідмовності та довговічності в рейсі. Еталонна інтенсивність відмов  $\lambda_{ref}$  задається через еталонний MTBF:

$$\lambda_{ref} = \frac{1}{MTBF_{ref}}, \quad (10)$$

де  $MTBF_{ref}$  – еталонне середнє напрацювання до відмови, год.

Середнє напрацювання до відмови MTBF (год) при струмі  $I$ :

$$MTBF(I) = \frac{1}{\lambda(I)} = \frac{MTBF_{ref}}{AF(I)}, \quad (11)$$

де  $MTBF_{ref}$  – еталонний MTBF;  $AF(I)$  – коефіцієнт прискорення деградації.

Імовірність безвідмовної роботи протягом рейсу тривалістю  $t_r$  (год):

$$R(t_r, I) = \exp(-\lambda(I)t_r), \quad (12)$$

де  $R(t_r, I)$  – імовірність безвідмовної роботи термоелектричного модуля протягом рейсу;  $t_r$  – тривалість рейсу, год.

Для оцінки довговічності введемо міру накопиченого пошкодження:

$$\frac{dD(t)}{dt} = v_{ref} AF(I); D(0) = 0, \quad (13)$$

де  $D(t)$  – міра накопичення пошкодження;  $v_{ref}$  – еталонна швидкість деградації, 1/год;  $t$  – час, год.

Ресурс  $T_{res}$  (год) термоелектричного модуля при струмі  $I$ :

$$T_{res}(I) = \frac{1}{v_{ref} AF(I)} = \frac{T_{res,ref}}{AF(I)}, \quad (14)$$

де  $v_{ref}$  – еталонна швидкість деградації (частка вичерпання ресурсу за годину), 1/год;  $T_{res,ref}$  – еталонний ресурс (тривалість безвідмовної роботи за еталонних умов), год.

Запропонована модель є фізично обґрунтованою інженерною апроксимацією, призначеною для відносної оцінки впливу робочих режимів на ресурсні показники термоелектричного модуля. Абсолютні значення MTBF та  $T_{res}$  можуть бути уточнені шляхом калібрування параметрів за експериментальними або паспортними даними.

Розглянемо навігаційну модель накопичення похибки курсу та бічного (поперечного) відхилення судна Cross-Track Error (ХТЕ) від заданої лінії шляху (запланованої траєкторії руху) як наслідок деградації термоелектричного модуля в умовах інтенсивної експлуатації. Зниження ефективності охолодження призводить до того, що у квазістаціонарному режимі похибка термостабілізації  $\Delta T$  викликає дрейф нульового зсуву гіроскопа  $b$ :

$$b \approx k_b \Delta T, \quad (15)$$

де  $b$  – нульовий зсув (bias) вимірювання кутової швидкості гіроскопа (систематична складова похибки), рад/с;  $k_b$  – температурний коефіцієнт нульового зсуву (bias), що характеризує чутливість гіроскопа до температурних відхилень, (рад/с)/К;  $\Delta T$  – температурна похибка термостабілізації чутливого вузла гіроскопа, К.

Похибка курсу визначається інтегруванням зсуву нуля (bias):

$$\frac{de_{\psi}(\tau)}{d\tau} = b; e_{\psi}(0) = 0, \quad (16)$$

де  $e_{\psi}(t)$  – похибка курсу (heading error), рад;  $\tau$  – поточний час навігаційного інтервалу, с.

Під навігаційним інтервалом розуміється інтервал активного руху судна зі сталою або квазісталою швидкістю  $v > 0$ , протягом якого відбувається накопичення похибки курсу та формується бічне відхилення від заданої лінії шляху.

Умова  $e_{\psi}(0)=0$  означає, що на початку інтервалу похибка курсу приймається нульовою (початкова орієнтація судна відкоригована/задана).

З формули (16) похибка курсу  $e_{\psi}(t)$ :

$$e_{\psi}(\tau) = k_b \Delta T \tau. \quad (17)$$

Бічне відхилення від лінії шляху визначається як інтеграл бокової складової швидкості судна, яка за малих курсових похибок апроксимується як  $v_{\perp} \approx v e_{\psi}$ :

$$XTE(t_p) \approx \int_0^{t_p} v e_{\psi} d\tau, \quad (18)$$

де  $t_n$  – тривалість навігаційного інтервалу, с;  $v$  – швидкість судна, м/с.

Після підстановки залежності (17) в (18) отримаємо:

$$XTE(t_p) = \frac{1}{2} v k_b \Delta T t_p^2. \quad (19)$$

У формулі (19) множник 1/2 враховує поступове (лінійне) накопичення похибки курсу від нуля до  $e_{\psi}(t_p)$ . Також, еквівалентно можна записати:

$$XTE(t_p) = \frac{1}{2} S e_{\psi}(t_p), \quad (20)$$

де  $S = v t_p$  – пройдена відстань за навігаційний інтервал.

Для порівняння, у разі припущення миттєвого виникнення похибки курсу з амплітудою  $e_{\psi}(t_p)$  на початку інтервалу (миттєва поява похибки на старті), отримаємо верхню оцінку XTE без множника 1/2:

$$XTE(t_p) \approx S e_{\psi}(t_p). \quad (21)$$

Навігаційна модель сформульована для квазістаціонарного теплового режиму та систематичної складової похибок. Отримані оцінки мають консервативний характер і придатні для аналізу впливу термостабілізації на навігаційну точність.

Для числової ілюстрації впливу режиму навантаження термоелектричного модуля на показники надійності та навігаційні наслідки використано розрахункові залежності температури гарячої сторони  $t_{hot}(I)$  та еквівалентних термомеханічних напружень  $\sigma(I)$ , отримані для допустимого діапазону струму  $I \in [0; 2]$  А в умовах заданого теплообміну (примусова конвекція, теплове випромінювання) та матеріалів конструкції (керамічні пластини корпусу  $Al_2O_3$ , геометрія TEC1-01102) [6]. У межах цього діапазону значення  $t_{hot}(I)$  та  $\sigma(I)$  є не «аварійними», а фізично допустимими (тобто такими, що відповідають робочій області без миттєвого виходу за граничні умови), однак саме вони визначають швидкість накопичення пошкодження та, відповідно, відмінності у безвідмовності й довговічності при тривалій експлуатації. Таким чином, у розрахунку підлягає встановленню не факт працездатності в межах допустимого струму, а кількісна чутливість показників надійності до вибору робочої точки через ланцюг причинності. Спрощену узагальнену схему всієї моделі, що відображає причинно-наслідкові зв'язки між основними фізичними та експлуатаційними параметрами, наведено у вигляді виразу:

$$I \Rightarrow (t_{hot}(I), \sigma(I)) \Rightarrow AF(I) \Rightarrow \lambda(I), MTBF(I), T_{res}(I) \Rightarrow \Delta T \Rightarrow b \Rightarrow e_{\psi} \Rightarrow XTE, \quad (22)$$

де  $I$  – струм термоелектричного модуля, А;  $t_{hot}(I)$  – температура гарячої сторони, °С;  $\sigma(I)$  – еквівалентні напруження, Па;  $AF(I)$  – коефіцієнт прискорення деградації;  $\lambda(I)$  – інтенсивність відмов, 1/год;  $MTBF(I)$  – середнє напрацювання до відмови, год;  $T_{res}(I)$  – ресурс, год;  $\Delta T$  – похибка термостабілізації, К;  $b$  – нульовий зсув (bias) гіроскопа, рад/с;  $e_{\psi}$  – похибка курсу, рад; XTE – бічне відхилення від лінії шляху (Cross-Track Error), м.

Оскільки побудовані в [6] залежності  $t_{hot}(I)$  та  $\sigma(I)$  є монотонними і суттєво нелінійними на інтервалі 0...2 А, практична задача експлуатації полягає у виборі робочої точки, яка, з одного боку забезпечує потрібну холодопродуктивність/термостабільність, а з іншого – не спричиняє надмірного прискорення деградації. Саме тому для порівняльної оцінки обрано два репрезентативні режими  $I_1$  та  $I_2$  із допустимого діапазону, а не довільні «крайні» точки. По-перше, ці режими відповідають реальному принципу роботи регулятора термостабілізації: він підтримує температуру, змінюючи струм у певній

робочій області, тому порівняння близьких значень струму є фізично й експлуатаційно обґрунтованим. По-друге, вибір  $I_1$  та  $I_2$  дозволяє показати критично важливий для практики ефект: навіть відносно невелике збільшення струму в межах допустимого діапазону може призвести до помітного зростання  $t_{hot}(I)$  та  $\sigma(I)$ , а через них – до істотної різниці в  $AF(I)$ ,  $MTBF(I)$  і  $T_{res}(I)$ , що безпосередньо відповідає змісту дослідження якості та надійності на стадіях експлуатації у транспортних системах.

Необхідно зазначити, що включення еквівалентних напружень  $\sigma(I)$  у модель надійності є принципово важливим для технічних засобів транспорту, оскільки відмови термоелектричних модулів у реальних умовах найчастіше мають термомеханічну природу: деградація пайок і контактів, мікротріщини керамічних пластин, втомні пошкодження напівпровідникових ніжок унаслідок циклування температур і нерівномірного поля деформацій. Тобто  $\sigma(I)$  не є «додатковим» параметром, а виступає інтегральною характеристикою напруженого стану, що зв'язує тепловий режим із довговічністю та ремонтпридатністю (через очікувану частоту відмов і потребу в заміні модуля як ремонтної операції) у межах транспортної експлуатації. Саме тому дані  $\sigma(I)$ , отримані в допустимому діапазоні струмів 0...2 А, є релевантними для оцінки безвідмовності й довговічності, вони відображають не момент руйнування, а різницю в швидкості накопичення пошкодження за різних робочих точок.

Прийнято два режими струму з робочої області регулятора:  $I_1=0,6$  А;  $I_2=0,75$ . Відповідні значення для температури гарячої сторони модуля та еквівалентних напружень беруться з результатів попередньої роботи [6]:

$$t_{hot}(I_1) = 32,2 \text{ }^\circ\text{C}; \sigma(I_1) = 6,6 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$t_{hot}(I_2) = 35,1 \text{ }^\circ\text{C}; \sigma(I_2) = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Обчислюється абсолютна температура гарячої сторони для кожного режиму:

$$T_1 = t_{hot}(I_1) + 273,15 = 32,2 + 273,15 \approx 305,4 \text{ К};$$

$$T_2 = t_{hot}(I_2) + 273,15 = 35,1 + 273,15 \approx 308,3 \text{ К}.$$

Еталонний режим приймається як  $I_{ref}=I_1$ , отже  $T_{ref}=T_1$  та  $\sigma_{ref}=\sigma(I_1)$ . Це дозволяє оцінити прискорення деградації для  $I_2$  відносно квазіоптимальної робочої точки.

Обчислюється температурний множник прискорення деградації за законом Арреніуса:

$$AF_T(I_2) = \exp\left[\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] = \exp\left[\frac{0,7}{8,617 \cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{305,4} - \frac{1}{308,3}\right)\right] \approx \exp(0,25) \approx 1,29.$$

Числова підстановка (прийнято  $E_a=0,7$  еВ;  $k_B=8,617 \cdot 10^{-5}$  еВ/К):

$$AF_\sigma(I_2) = \left(\frac{\sigma(I_2)}{\sigma(I_1)}\right)^n = \left(\frac{8,5 \cdot 10^6}{6,6 \cdot 10^6}\right)^3 \approx 1,29^3 \approx 2,15,$$

де  $n=3$  – прийнятий показник чутливості деградації до напружень.

Обчислюється загальний коефіцієнт прискорення деградації:

$$AF(I) = AF_T(I_2)AF_\sigma(I_2) = 1,29 \cdot 2,15 \approx 2,8.$$

Обчислюється еталонна інтенсивність відмов  $\lambda_{ref}$  (для  $I_1$ ) за заданим еталонним напрацюванням до відмови  $MTBF_{ref}$  (прийнято  $MTBF_{ref}=50000$  год):

$$\lambda_{ref} = \frac{1}{MTBF_{ref}} = \frac{1}{50000} = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}.$$

Обчислюється інтенсивність відмов у режимі  $I_2$ :

$$\lambda(I_2) = \lambda_{ref} AF(I) = 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 2,8 \approx 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}.$$

Обчислюється середнє напрацювання до відмови в режимі  $I_2$ :

$$MTBF(I_2) = \frac{1}{\lambda(I_2)} = \frac{MTBF_{ref}}{AF(I_2)} = \frac{50000}{2,8} \approx 1,8 \cdot 10^4 \text{ год},$$

Обчислюється імовірність безвідмовної роботи протягом рейсу тривалістю  $t_r=240$  год (10 діб):

$$R(t_r, I_1) = \exp(-\lambda(I_1) t_r) = \exp(-2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 240) = \exp(0,0048) \approx 0,995;$$

$$R(t_r, I_2) = \exp(-\lambda(I_2) t_r) = \exp(-5,6 \cdot 10^{-5} \cdot 240) = \exp(0,0134) \approx 0,987.$$

Обчислюється ресурс (довговічність)  $T_{res}$  термоелектричного модуля у режимі  $I$  через еталонний ресурс  $T_{res,ref}=40000$  год:

$$T_{res}(I_1) = 40000 \text{ год};$$

$$T_{res}(I_2) = \frac{T_{res,ref}}{AF(I_2)} = \frac{40000}{2,8} \approx 1,4 \cdot 10^4 \text{ год}.$$

Для навігаційної частини приймаються температурні похибки термостабілізації:

$$\Delta T_1 = 0,1 \text{ К}; \Delta T_2 = 0,5 \text{ К},$$

а температурний коефіцієнт дрейфу нульового зсуву гіроскопа (bias)  $k_b$  задається як:

$$k_b = 0,05 \frac{\text{°/год}}{\text{°C}}.$$

Обчислюється перехід коефіцієнта  $k_b$  до SI:

$$k_b^{SI} = 0,05 \frac{\pi}{180} \frac{1}{3600} \approx 2,42 \cdot 10^{-7} \frac{\text{рад/с}}{\text{К}}.$$

Обчислюється коефіцієнт bias  $k_b$  (зсув нуля) вимірювання кутової швидкості, зумовлений похибкою термостабілізації:

$$b_1 = k_b^{SI} \Delta T_1 = 2,42 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 = 2,42 \cdot 10^{-8} \text{ рад/с};$$

$$b_2 = k_b^{SI} \Delta T_2 = 2,42 \cdot 10^{-7} \cdot 0,5 = 1,21 \cdot 10^{-7} \text{ рад/с}.$$

Обчислюється похибка курсу наприкінці навігаційного інтервалу активного руху:

$$e_{\psi}(\tau) = b\tau,$$

де  $\tau$  – час активного руху.

Для тривалості  $\tau_p=6$  год отримаємо:

$$\tau_p = 6 \cdot 3600 = 2,16 \cdot 10^4 \text{ с};$$

$$e_{\psi,1}(\tau_p) = b_1 \tau_p = 2,42 \cdot 10^{-8} \cdot 2,16 \cdot 10^4 \approx 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ рад};$$

$$e_{\psi,2}(\tau_p) = b_2 \tau_p = 1,21 \cdot 10^{-7} \cdot 2,16 \cdot 10^4 \approx 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ рад}.$$

Обчислюється швидкість  $v$  у SI для швидкості судна  $v_c=10$  вузлів та пройдена відстань  $S$  за інтервал:

$$v = v_c \cdot 0,5144 = 5,14 \text{ м/с};$$

$$S = 5,14 \cdot 2,16 \cdot 10^4 \approx 1,11 \cdot 10^5 \text{ м}.$$

Обчислюється Cross-Track Error (ХТЕ) як бічне відхилення від лінії шляху з урахуванням лінійного наростання похибки курсу (множник 1/2):

$$ХТЕ_1 = \frac{1}{2} S e_{\psi,1}(\tau_p) = \frac{1}{2} 1,11 \cdot 10^5 \cdot 5,2 \cdot 10^{-4} \approx 2,9 \cdot 10^1 \text{ м} \approx 29 \text{ м};$$

$$ХТЕ_2 = \frac{1}{2} S e_{\psi,2}(\tau_p) = \frac{1}{2} 1,11 \cdot 10^5 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \approx 1,45 \cdot 10^2 \text{ м} \approx 145 \text{ м}.$$

Також, наведемо верхню (worst-case) консервативну оцінку ХТЕ (миттєва поява похибки на початку інтервалу):

$$ХТЕ_1^{\max} = S e_{\psi,1}(\tau_p) = 1,11 \cdot 10^5 \cdot 5,2 \cdot 10^{-4} \approx 5,8 \cdot 10^1 \text{ м} \approx 58 \text{ м};$$

$$ХТЕ_2^{\max} = S e_{\psi,2}(\tau_p) = 1,11 \cdot 10^5 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \approx 2,9 \cdot 10^2 \text{ м} \approx 291 \text{ м}.$$

При переході від квазіоптимального режиму  $I_1$  до підвищеного режиму  $I_2$  коефіцієнт прискорення деградації зростає до  $AF(I_2) \approx 2,8$ , що призводить до скорочення МТВФ та ресурсу приблизно у 2,8 рази, а у навігаційній частині – до пропорційного зростання bias, похибки курсу та ХТЕ за однакових умов руху. Це підтверджує, що вибір робочої точки регулятора термостабілізації термоелектричного модуля є експлуатаційно важливим фактором як для показників надійності (безвідмовність, довговічність), так і для якості керування курсом судна через накопичення бічного відхилення (Cross-Track Error) на навігаційному інтервалі активного руху.

На рис. 1 показано залежності показників надійності та навігаційних похибок від робочого струму термоелектричного модуля, що відображають причинно-наслідковий зв'язок між деградацією модуля та навігаційними наслідками. Слід зазначити, що оцінка показників надійності виконується на характерному рейсовому інтервалі  $t_r=240$  год, тоді як навігаційні похибки аналізуються на типовому інтервалі активного руху  $t_n=6$  год, що відповідає різним часовим масштабам деградаційних та навігаційних процесів.

Залежності, наведені на рис. 1, відображають послідовний причинно-наслідковий ланцюг впливу робочого струму  $I$  термоелектричного модуля на показники надійності та навігаційні наслідки. Як видно з рис. 1, а, зі зростанням  $I$  спостерігається суттєве нелінійне збільшення коефіцієнта прискорення деградації  $AF(I)$ , що в досліджуваному діапазоні зростає у кілька разів і свідчить про активізацію термічно та термомеханічно зумовлених механізмів старіння. Це безпосередньо відображається на функції надійності  $R(t_r, I)$  (рис. 1, б): для типового рейсу тривалістю  $t_r=240$  год підвищення струму, яке забезпечує інтенсифікацію ефекту Пельтьє та покращення теплових характеристик, водночас супроводжується поступовим зниженням імовірності безвідмовної роботи, що вказує на існування компромісу між ефективністю термоелектричного охолодження та довготривалою надійністю модуля.

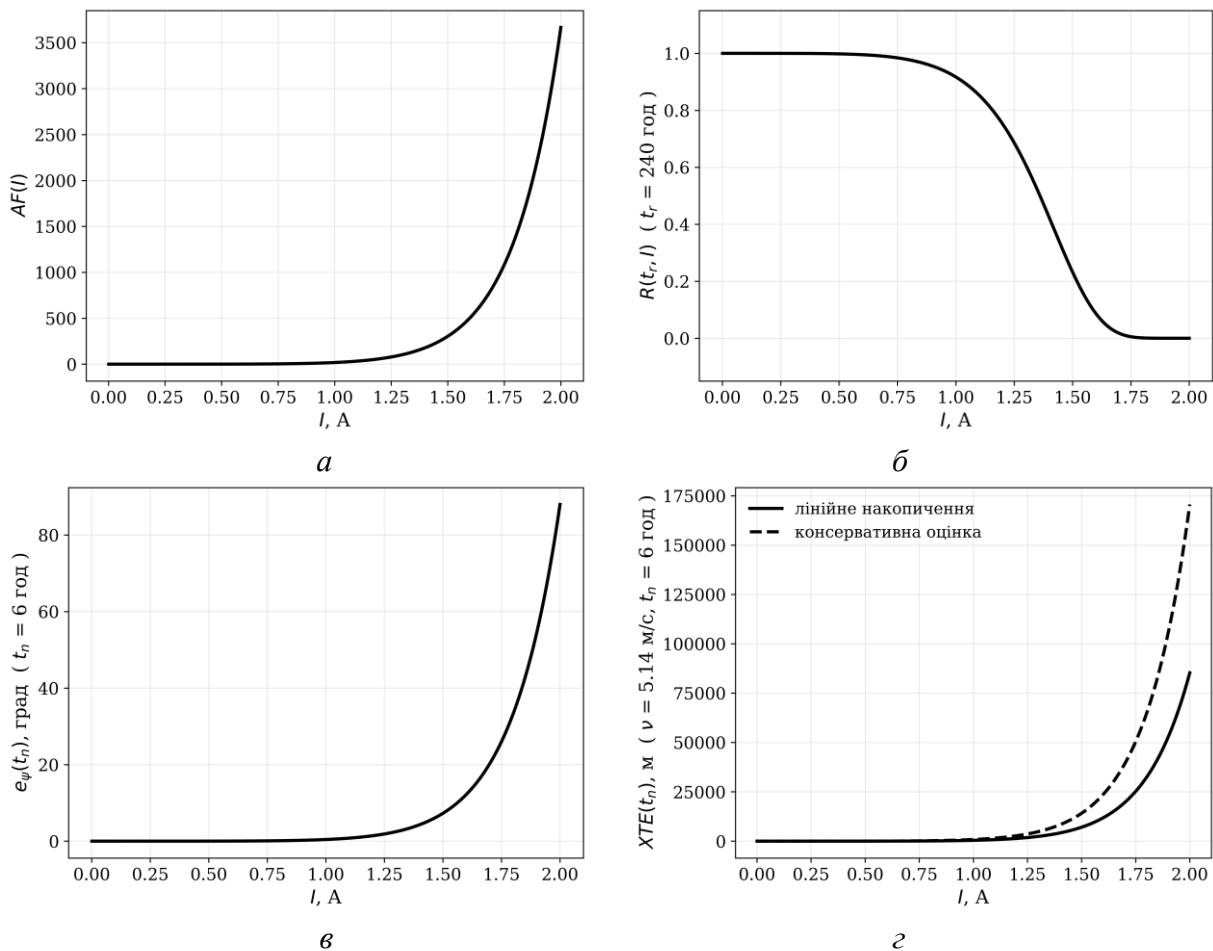


Рисунок 1 – Залежності показників надійності  $\{AF, R\}$  та навігаційних похибок  $\{e_{\psi}, XTE\}$  від робочого струму  $I$ : а – коефіцієнт прискорення деградації  $AF(I)$ ; б – імовірність безвідмовної роботи  $R(t_r, I)$  протягом рейсу; в – похибка курсу  $e_{\psi}(t_n, I)$  наприкінці навігаційного інтервалу; з – бічне відхилення від лінії шляху  $XTE(t_n, I)$

Накопичений вплив деградаційних процесів призводить до зростання систематичної похибки курсу  $e_{\psi}(t_n, I)$  (рис. 1, в), яка за навігаційний інтервал  $t_n=6$  год може досягати одиниць і десятків градусів, що відображає істотне погіршення умов термостабілізації навігаційного датчика. Такі великі значення курсової похибки відповідають граничним режимам деградації та тривалій автономній роботі

інерціальної навігаційної системи без зовнішніх корекцій і не характеризують типовий експлуатаційний стан. Інтегрування цієї похибки за часом в процесі руху судна зі швидкістю  $v \approx 5,1$  м/с (10 вузлів) зумовлює зростання бічного відхилення від лінії шляху  $XTE(t_n, I)$  (рис. 1,  $z$ ). У робочому діапазоні струмів до  $I \approx 1,5$  А отримані значення ХТЕ перебувають у межах десятків метрів (близько 10-15 м), що відповідає реалістичним експлуатаційним сценаріям судноводіння за відсутності зовнішніх корекцій. Однакова форма кривих на рис. 1,  $a$  та рис. 1,  $b$  пояснюється лінійною пропорційністю похибки курсу коефіцієнта прискорення деградації при фіксованому навігаційному інтервалі, що зумовлює відмінність лише у масштабі вертикальної осі. Слід зазначити, що для розглянутого термоелектричного модуля ТЕС1-01102 максимальний робочий струм у проведеному аналізі становить 2 А, тому значення 1,5 А відповідає 75 % верхньої межі допустимого діапазону струмів (0-2 А). Саме в цій області відповідні ділянки кривих курсової похибки  $e_\psi(I)$  (рис. 1,  $b$ ) та бічного відхилення  $XTE(I)$  (рис. 1,  $z$ ) демонструють фізично обґрунтовані та практично спостережувані рівні навігаційних похибок. Водночас при подальшому зростанні робочого струму понад цю межу система термостабілізації входить у зону різкого нелінійного зростання коефіцієнта прискорення деградації, що зумовлює стрибкоподібне збільшення оцінюваного бічного відхилення. Аналогічно, відповідна ділянка кривої курсової похибки  $e_\psi(I)$  характеризує різке зростання систематичної похибки курсу, що відображає втрату ефективності термостабілізації гіроскопа. Отримані за консервативною схемою інтегрування за часом великі значення ХТЕ відповідають граничному теоретичному сценарію без корекції курсу та слугують верхньою оцінкою можливих навігаційних наслідків деградації, а не типовому експлуатаційному режиму. Під консервативною схемою інтегрування розуміється підхід, за якого похибка курсу вважається максимальною протягом усього навігаційного інтервалу, що забезпечує верхню оцінку можливого бічного відхилення. Сценарій з такими великими значеннями ХТЕ показано спеціально як межу застосовності системи, тобто не як рекомендацію, а як попередження про недоцільність використання термоелектричної стабілізації для навігації без корекції при підвищених струмах.

Отримані залежності мають прикладне значення для широкого кола суден, на яких використовуються інерціальні навігаційні системи з термоелектричною термостабілізацією гіроскопів, і де вибір робочого режиму термоелектричних модулів визначається не лише енергетичними, але й надійнісними та навігаційними обмеженнями.

Таким чином, у роботі розглянуто вплив режиму струму термоелектричного модуля в межах допустимого діапазону на деградаційні процеси, показники надійності та навігаційну точність судна. Підвищення струму супроводжується зростанням температури та термомеханічних напружень, що призводить до прискорення деградації термоелектричного модуля. Для кількісного опису цього ефекту використано фактор прискорення деградації, сформований на основі температурної моделі Арреніуса, який дозволяє узгоджено оцінювати як імовірність безвідмовної роботи на інтервалі напрацювання, так і накопичення навігаційної похибки на характерному інтервалі автономного руху судна.

Загальна структура причинно-наслідкових зв'язків між режимом струму, деградаційними процесами та навігаційною похибкою узагальнено відображено у виразі (22). Нижче наведено фізичну та експлуатаційну інтерпретацію цієї схеми з урахуванням отриманих числових результатів (при інтервалі напрацювання  $t_r=240$  год і інтервалі автономного руху  $t_n=6$  год):

$$I \rightarrow T(I), \sigma(I) \rightarrow AF(I) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R(t_r, I), t_r = 240 \text{ год;} \\ \Delta T(I), e_\psi(t_n, I), XTE(t_n, I), t_n = 6 \text{ год} \end{array} \right\}. \quad (23)$$

Логічні зв'язки між режимом струму, деградаційними процесами та навігаційною похибкою узагальнено у вигляді блок-схеми на рис. 2.

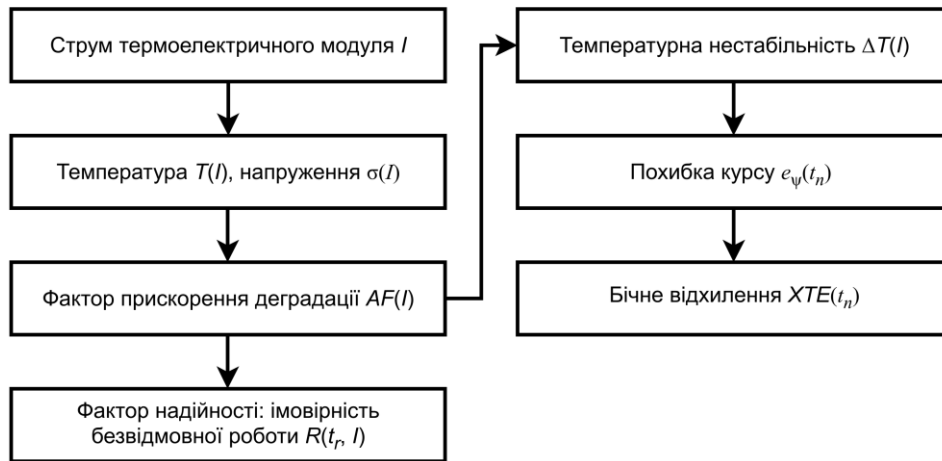


Рисунок 2 – Узагальнена блок-схема впливу режиму струму термоелектричного модуля в системі термостабілізації гіроскопа на деградаційні процеси, показники надійності та навігаційну похибку судна

Незважаючи на допустимий діапазон робочих струмів термоелектричного модуля, підвищені режими призводять до прискорення деградаційних процесів, що описується фактором прискорення на основі температурної моделі Арреніуса. Цей фактор визначає як імовірність безвідмовної роботи на інтервалі напрацювання, так і погіршення умов термостабілізації навігаційного датчика, що проявляється у зростанні навігаційної похибки на характерному інтервалі автономного руху судна.

**Висновок.** Запропоновано аналітичний підхід до оцінки ресурсу системи термостабілізації волоконно-оптичного гіроскопа, який, на відміну від традиційних енергетичних критеріїв, враховує вплив термомеханічних напружень на показники надійності та навігаційної точності. Показано, що перехід від номінального режиму роботи термоелектричного модуля (0,6 А) до форсованого (0,75 А) призводить до зростання коефіцієнта прискорення деградації приблизно у 2,8 рази, що супроводжується суттєвим скороченням прогнозованого середнього напрацювання до відмови (MTBF). На прикладі рейсу тривалістю 240 год встановлено, що підвищення робочого струму задля інтенсифікації охолодження супроводжується зниженням розрахункової імовірності безвідмовної роботи системи. Кількісний аналіз навігаційної складової показав, що деградація параметрів термостабілізації призводить до зростання систематичної похибки курсу, яка за інтервал активного руху 6 год трансформується у бічне відхилення судна від заданої траєкторії руху на рівні десятків метрів. Отримані результати підтверджують, що вибір робочої точки термоелектричного модуля має здійснюватися на основі компромісу між глибиною охолодження, допустимим рівнем деградації та вимогами до навігаційної точності.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Lefèvre H. The Fiber-Optic Gyroscope. 3rd ed. Norwood (MA): Artech House, 2022. 550 p.
2. Titterton D., Weston J. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/PBRA017E>
3. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed. Boston: Artech House, 2013. 776 p.
4. Farrell J. A., Barth M. The Global Positioning System and Inertial Navigation. New York: McGraw-Hill, 1999. 392 p.
5. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 575 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
6. Кириченко О.С., Клочков Ю.П., Мельник В.Ю., Коломієць Д.П., Вечурко О.М., Шевченко В.І. Моделювання робочих характеристик термоелектричного модуля для волоконно-оптичних гіроскопів суднової навігації. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 36(75). № 5. С. 262-270. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/36>

7. Rowe D. M. (Ed.). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1008 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420038903>
8. Goldsmid H. J. *Introduction to Thermoelectricity*. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. xviii + 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
9. Snyder G. J., Ursell T. S. Thermoelectric efficiency and compatibility. *Physical Review Letters*. 2003. Vol. 91. No. 14. Art. 148301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.148301>
10. Riffat S. B., Ma X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. No. 8. P. 913-935. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
11. Yan J., Liu Z., Wang Y., Shen L. A performance degradation and lifetime prediction model for thermoelectric device under thermal cycling. *Applied Thermal Engineering*. 2025. (in press). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126655>
12. Indmeskine F. E., Saintis L., Kobi A. Review on accelerated life testing plan to develop predictive reliability models for electronic components based on design-of-experiments. *Quality and Reliability Engineering International*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3330>
13. Guo Z., Chen H., Hu Y., Jiang J., Ye X. Reliability prediction of electronic components based on physics of failure with manufacturing parameters fluctuations. *Microelectronics Reliability*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2025.115662>
14. Collins D. H., Huzurbazar A. V. Highly accelerated life testing (HALT): A review from a statistical perspective. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/wics.70000>
15. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors errors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. Vol. 57. No. 1. P. 140-149. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908635>
16. Kaplan, Elliott D.; Hegarty, Christopher J. (Eds.) *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. 3rd Edition. Norwood, Massachusetts (MA): Artech House, 2017. 1064 p.
17. Mueen S. M., Almutairi A. (Eds.). *Machine Health Monitoring and Fault Diagnosis Techniques*. Basel: MDPI Books, 2023. 374 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-7333-5>
18. Zhou L., Meng F., Sun Y. Numerical study on infrared detectors cooling by multi-stage thermoelectric cooler combined with microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121817>
19. Gong T., Gao L., Wu Y., Zhang L., Yin S., Li J. Numerical simulation on a compact thermoelectric cooler for the optimized design. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 160. Art. 114082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.047>
20. Кириченко О.С., Костюченко В.І., Захаров Д.О. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. № 1(6). С. 60-63.
21. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бутрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2018. Т. 29(68). № 6. С. 58-63.
22. Nguyen Y. N., Son I. Thermomechanical stability of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based thermoelectric modules employing variant diffusion barriers. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107404>

## REFERENCES

1. Lefèvre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. 3rd ed. Norwood (MA): Artech House, 2022. 550 p.
2. Titterton D., Weston J. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/PBRA017E>
3. Groves P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2013. 776 p.
4. Farrell J. A., Barth M. *The Global Positioning System and Inertial Navigation*. New York: McGraw-Hill, 1999. 392 p.
5. Fossen T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 575 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
6. Kyrychenko O.S., Klochkov Yu.P., Melnyk V.Iu., Kolomiets D.P., Vechurko O.M., Shevchenko V.I. Modeliuvannia robochykh kharakterystyk termoelektrychnoho modulia dlia volokonno-optychnykh hiroskopiv sudnovoi navihatsii. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*. 2025. T. 36(75). № 5. S. 262-270. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/36>

7. Rowe D. M. (Ed.). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1008 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420038903>
8. Goldsmid H. J. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. xviii + 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
9. Snyder G. J., Ursell T. S. Thermoelectric efficiency and compatibility. Physical Review Letters. 2003. Vol. 91. No. 14. Art. 148301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.148301>
10. Riffat S. B., Ma X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. No. 8. P. 913-935. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
11. Yan J., Liu Z., Wang Y., Shen L. A performance degradation and lifetime prediction model for thermoelectric device under thermal cycling. Applied Thermal Engineering. 2025. (in press). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126655>
12. Indmeskine F. E., Saintis L., Kobi A. Review on accelerated life testing plan to develop predictive reliability models for electronic components based on design-of-experiments. Quality and Reliability Engineering International. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3330>
13. Guo Z., Chen H., Hu Y., Jiang J., Ye X. Reliability prediction of electronic components based on physics of failure with manufacturing parameters fluctuations. Microelectronics Reliability. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2025.115662>
14. Collins D. H., Huzurbazar A. V. Highly accelerated life testing (HALT): A review from a statistical perspective. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/wics.70000>
15. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors errors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2008. Vol. 57. No. 1. P. 140-149. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908635>
16. Kaplan, Elliott D.; Hegarty, Christopher J. (Eds.) Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd Edition. Norwood, Massachusetts (MA): Artech House, 2017. 1064 p.
17. Muyeen S. M., Almutairi A. (Eds.). Machine Health Monitoring and Fault Diagnosis Techniques. Basel: MDPI Books, 2023. 374 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-7333-5>
18. Zhou L., Meng F., Sun Y. Numerical study on infrared detectors cooling by multi-stage thermoelectric cooler combined with microchannel heat sink. Applied Thermal Engineering. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121817>
19. Gong T., Gao L., Wu Y., Zhang L., Yin S., Li J. Numerical simulation on a compact thermoelectric cooler for the optimized design. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 160. Art. 114082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.047>
20. Kyrychenko O.S., Kostiuchenko V.I., Zakharov D.O. Modeliuvannia stacionarnykh teplovykh poliv strumoprovodnykh shyn riznoho profilu. Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK. 2017. № 1(6). S. 60-63.
21. Kyrychenko O.S., Biliuk I.S., Shareiko D.Iu., Fomenko A.M., Havrylov S.O., Buhrim L.I. Chyselne trymirne modeliuvannia termoelektrychnoho okholodzhuвача vymiriuvalnoho elektroustatkuvannia avtomatychnykh system. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. 2018. T. 29(68). № 6. S. 58-63.
22. Nguyen Y. N., Son I. Thermomechanical stability of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based thermoelectric modules employing variant diffusion barriers. Journal of Alloys and Compounds. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107404>

### **Kyrychenko O.S.**

## **INFLUENCE OF THERMOELECTRIC STABILIZATION RELIABILITY OF A FIBER-OPTIC GYROSCOPE ON SHIP COURSE CONTROL QUALITY**

*The paper analyzes the influence of reliability characteristics of a thermoelectric stabilization system for a fiber-optic gyroscope on the quality of ship course control under long-term operating conditions. The presence of conflicting requirements in selecting the operating mode of a thermoelectric module is demonstrated: an increase in operating current enhances the Peltier effect and improves thermal stability of the sensitive gyroscope elements, but simultaneously leads to higher temperature-induced and thermomechanical loads, which accelerate degradation processes in the module materials and interconnections. Physically substantiated failure models are considered, accounting for the temperature factor described by the Arrhenius law and the effect of mechanical stresses represented by a power-law relationship. A comprehensive approach is proposed that relates the operating current of the thermoelectric module to the probability of failure-free operation during a voyage, the mean time to failure, and the resulting navigation consequences. Quantitative modeling is*

*performed for the TEC1-01102 thermoelectric module over the current range of 0-2 A, taking into account typical marine operating conditions. It is established that an increase in current results in a nonlinear growth of the degradation acceleration factor and a significant reduction in module lifetime, even within permissible operating regimes. The influence of thermoelectric stabilization degradation on the gyroscope bias drift is investigated, showing that this drift is integrated over time into heading error and lateral deviation of the vessel from the intended track. It is demonstrated that for a navigation interval of active motion lasting 6 h, the lateral deviation may reach several tens of meters. The obtained dependencies have a generalized character and can be used to assess allowable operating regimes of thermoelectric stabilization systems in shipborne inertial navigation complexes. The results provide an engineering basis for selecting the controller operating point while considering the trade-off between thermal stabilization efficiency, reliability, and navigation accuracy for various types of marine and inland vessels.*

**Keywords:** *inertial navigation system; thermoelectric module; Peltier effect; thermomechanical stresses; mean time between failures (MTBF); bias drift; lateral deviation.*

*Стаття прийнята 15.09.2025*