

УДК 681.2.084; 681.2.088

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.1.58749

С.В. ІВАНОВ

Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДІВ НАМОТКИ ВОЛОКНА ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПА В УМОВАХ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ

Background. The paper is devoted to the study of the effectiveness of different types of coil fiber winding of fiber optic gyro (FOG) in reducing of the impact of Shupe effect under temperature changes.

Objective. The objective of the study is to evaluate the effectiveness of different types of FOG fiber coil winding under temperature changes.

Methods. Based on the analysis of existing types of winding, and formulae for non-reciprocal phase shift calculation, a method for evaluation of the impact of temperature gradient on coils with different types of winding is created. Method mentioned is applied to 9 different types of coil winding.

Results. The dependencies of zero shift vs time for nine types of winding under the impact of axial, radial temperature gradients and combinations thereof are obtained.

Conclusion. Overall, use of quadruple windings seems to be optimal; for low precision sensors one can recommend centered unipolar winding while ensuring good thermal and vibration insulation of the coil. The use of pads (or frameless coils) is justified when simple winding is used (e.g., in devices for short-living objects, for automotive industry, etc.), or for high-precision sensors.

Keywords: fiber-optic gyroscope; fiber winding; Shupe effect.

Вступ

Одним із джерел похибок інтерферометричного волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ) є ефект Шупе – поява паразитного сигналу на виході гіроскопа при зміні зовнішньої температури, а також унаслідок самопрогріву приладу та дії механічних навантажень [1]. Для зменшення впливу цього ефекту, крім термостатування приладу [2] й алгоритмічної компенсації похибок у вихідному сигналі ВОГ, застосовують спеціальні види намоток у комбінації з просочувальною сумішшю, що сприяє зменшенню паразитного зсуву фази.

Найпоширенішою у ВОГ є квадрупольна намотка, методам її намотування та варіаціям присвячено багато публікацій та патентів, зокрема [3–6]. Квадрупольна намотка дає змогу істотно зменшити радіальний градієнт температури за рахунок симетрії дії температури на контур відносно намотки. Модифікована квадрупольна обмотка, описана в [4, 5], дає можливість зменшити кількість згинів волокна і похибку вимірювання внаслідок неоднорідностей волокна. Центрована квадрупольна [6] та октупольна [7] намотки є симетричними відносно дії як радіального, так і бічного градієнта температури.

Публікацій, присвячених намотці котушки ВОГ та компенсації температурних похибок, безліч. Проте одні з них, наприклад [8], присвячені створенню моделі, спрямованої на під-

вищення якості намотки котушки, а інші – аналізу похибок як таких [9, 10] або ж похибок, пов'язаних із впливом температури на джерело випромінювання [11]. Дисертаційна робота [12] присвячена компенсації похибок ВОГ, викликаних зміною температури, але в ній аналіз ефективності різних видів намотки відсутній. Вплив температури на котушку з намоткою без перехрещування витків (CF, cross-over-free coil, – квадрупольна намотка з переходами між шарами, винесеними за котушку) та з квадрупольною намоткою досліджується відповідно в [13] і [14], але в цих працях відсутній аналіз інших видів намотки.

Отже, на жаль, жодна з цих праць не містить аналізу й оцінки ефективності різних намоток в умовах зміни температури.

Постановка задачі

Метою роботи є оцінка ефективності видів намотки волокна котушки ВОГ в умовах зміни температури.

Види намоток

На рис. 1 показано основні види намоток, що застосовуються при виготовленні котушок ВОГ. Кожна намотка має n шарів по m витків; стрілками показано порядок ходу променів у витках намотки при прямому обході контуру, середину волокна контуру ВОГ позначено хрес-

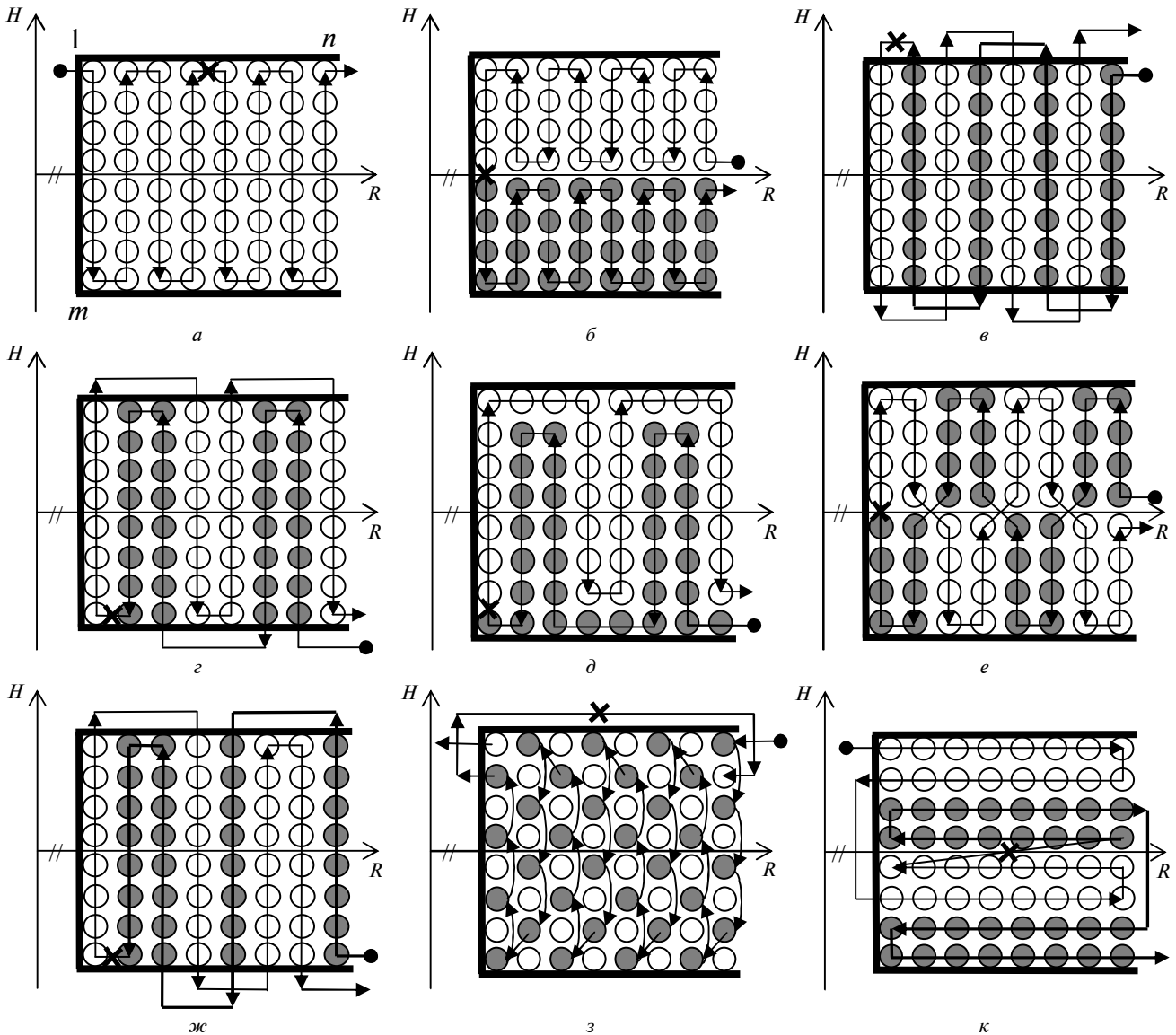


Рис. 1. Види намотки котушки ВОГ: а – проста (однополюсна); б – однополюсна центрована; в – дипольна; г – квадрупольна; д – модифікована квадрупольна за [4]; е – квадрупольна центрована за [6]; ж – октупольна за [7]; з – біфілярна (хід променя другим плечем не показано); к – без перехресування витків за [13]

том, а плечі намотки виділено різними кольорами. Жирною крапкою позначено точку вводу у волокно хвилі, що обходить контур у прямому напрямку.

Проста (однополюсна центрована) намотка (рис. 1, а) є стандартною для датчиків низької точності внаслідок її простоти. Основний недолік – чутливість до радіальних та осьових температурних градієнтів температури. Однополюсна центрована намотка (рис. 1, б) дає змогу позбавитись впливу радіального температурного градієнта, оскільки його вплив на її волокно є симетричним.

Дипольна намотка (рис. 1, в) є ще однією спробою позбавитись впливу радіального градієнта; її недолік – несиметричність плечей намотки відносно середини волокна. Подальшим її розвитком є квадрупольна намотка (рис. 1, г). Квадрупольна намотка намотується блоками по 4 витки, такий блок називається квадруполем; різниця довжин плечей квадрупольної намотки відносно центра волокна є меншою, ніж у дипольної. Модифікована квадрупольна намотка, описана в [4, 5], дає змогу зменшити кількість згинів волокна і похибку вимірювання.

Принциповий недолік квадрупольної та дипольної намоток – чутливість котушки з такими намотками до осьового градієнта температури. Цього недоліку позбавлені центрована квадрупольна (рис. 1, *e*) та октупольна намотки (рис. 1, *ж*). Центрована квадрупольна намотка, проте, має інші недоліки – складність намотування та наявність перегинів і напруження волокна при перекиданні з блока в блок при намотці, що призводить до виникнення додаткових похибок. Октупольна намотка є повторенням комбінації двох квадруполів, у яких два центральних шари намотано з різних половин волокна; основний її недолік – складність виготовлення.

Біфілярна намотка (рис. 1, *з*) намотана складеним удвоє волокном, після чого його розрізано на дві половини і кінець першого плеча зварено з початком другого. Недоліком цієї намотки є необхідність узгодження осей поляризації частин волокна при їх зварюванні.

Єдина намотка, виконана в шарах, паралельних не осі котушки, а її фланцям, – намотка без перехрещення витків (CF winding, cross-over-free winding) (рис. 1, *к*). Недоліком такої намотки є складність її виготовлення. З точки зору виготовлення вона є найскладнішою з усіх; більше того, стандартні намоточні машини для її намотування непридатні. Безумовною перевагою цієї намотки є зменшення похибок, пов'язаних із поляризацією – внаслідок відсутності перехрещення витків і перегинів волокна.

Розглянемо тепер методику розрахунку і порівняємо ефективність намоток.

Умови моделювання і методика розрахунку

Як відомо [15], кожна ділянка волокна dl вносить у набіг фази для обох зустрічних хвиль приріст, рівний

$$d\varphi = \beta \cdot dl,$$

де $\beta = \frac{2\pi n_f}{\lambda}$ – стала поширення світла у волокні, n_f – коефіцієнт заломлення волокна, λ – довжина хвилі випромінювання, введеного в контур. Якщо температура T ділянки волокна dl змінюється в часі, то приріст фази за час τ у будь-якій точці волокна може бути виражений так:

$$d\varphi_T \approx \left[\frac{d\beta}{dT} dl + \beta \cdot \alpha(l) dl \right] \left(\frac{\partial T}{\partial t} \tau \right), \quad (1)$$

де $\alpha(l)$ – лінійний коефіцієнт теплового розширення волокна, залежність якого від координати l викликана тим, що каркас котушки може бути зроблений з алюмінію, а не кераміки, і внутрішні шари волокна розтягуються сильніше. Перший доданок (1) відповідає приросту фази, викликаному зміною β -ділянки волокна dl при зміні температури на 1 К, другий – приросту фази від зміни довжини ділянки dl при зміні температури на 1 К. Множник $\frac{\partial T}{\partial t} \tau$ відповідає зміні температури за час τ , рівний різниці часу між проходженням заданої точки зустрічними хвилями:

$$\tau = \frac{2l - L}{c} n_f, \quad (2)$$

де c – швидкість світла у вакуумі.

Невзаємне зміщення фази, зумовлене ефектом Шупе, можна знайти інтегруванням (1) з урахуванням (2) по довжині волокна:

$$\varphi_T = \frac{2\pi n_f}{\lambda c} \int_0^L \left(\frac{dn_f}{dT} + n_f \alpha(l) \right) (2l - L) \frac{\delta T}{\delta t} dl, \quad (3)$$

де l – відстань, яку проходить світло від початку волокна до поточної його точки, L – повна довжина волокна в нормальних умовах. У робочому діапазоні температур коефіцієнт заломлення залежить від температури лінійно:

$$n_f = n_{f_0} + \eta T, \quad (4)$$

де n_{f_0} – номінальне значення показника заломлення, η – температурний коефіцієнт показника заломлення. Отже, знехтувавши членами другого і вищих порядків мализни відносно η , (3) з урахуванням (4) можна записати як

$$\varphi_T = \frac{2\pi n_{f_0}}{\lambda c} \int_0^L (\eta + n_{f_0} \alpha(l)) (2l - L) \frac{\delta T}{\delta t} dl. \quad (5)$$

З (5) видно, що, оскільки функція під інтегралом непарна, симетричні відносно середини волокна зміни температури компенсують дію одна одної, що дає змогу зменшити вплив ефекту Шупе за рахунок використання спеціальних видів намотки волокна.

Безпосереднє обчислення інтеграла (5) є складною задачею, тому при моделюванні дії градієнтів температури на котушку ВОГ з різними намотками було зроблено низку припущень:

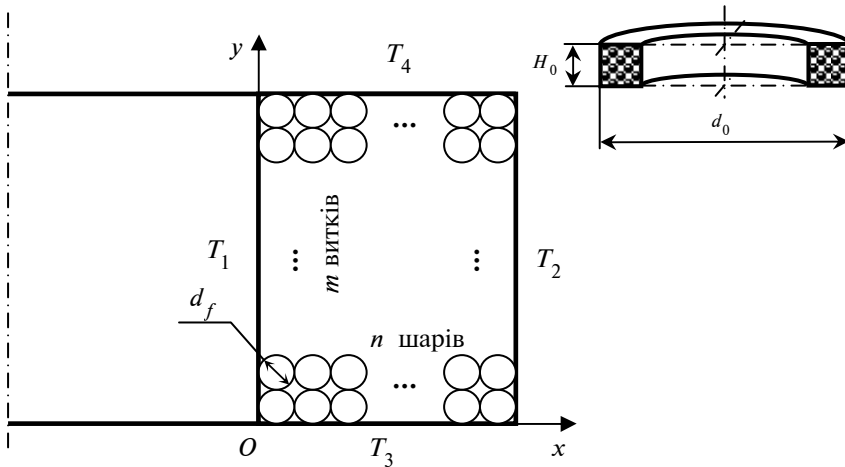


Рис. 2. Розрахункова схема

1) дія тепла на котушку симетрична відносно її осі, тобто розподіл температури в одному поперечному перерізі повністю визначає розподіл по всій котушці;

2) котушку просочено компаундом з коефіцієнтом теплового розширення (к.т.р.), близьким до к.т.р. кварцового скла, тобто переріз можна розглядати як однорідну кварцову пластинку;

3) витки волокна апроксимовано кільцями волокна відповідного середнього радіуса;

4) витки намотки розміщені так, як показано на рис. 2;

5) каркас котушки – алюмінієвий, тому для витків першого шару $\alpha_1 = \alpha_{Al} = 2 \cdot 10^{-5} 1/K$, для всіх інших $\alpha_i = \alpha_{кв} = 5 \cdot 10^{-7} 1/K (i > 1)$;

6) впливом фланців каркаса котушки на волокно знехтувано.

За вказаних вище припущень інтеграл (2) можна замінити сумою зсувів фази по витках:

$$\varphi_T = \frac{2\pi n_{fo}}{\lambda c} \sum_{i=1}^{n \cdot m} (\eta + n_{fo} \alpha_i) l_i \left(2 \sum_{k=1}^j l_k - L \right) \frac{\delta T}{\delta t}, \quad (6)$$

Таблиця. Граничні умови рівняння теплопровідності

Випадок моделювання	Границя перерізу			
	внутрішня	зовнішня	нижня	верхня
Радіальний градієнт	$T_1 = 293 \text{ К}$	$\frac{dT_2}{dx} = 0,05 \frac{\text{К}}{\text{м}}$	$T_3 = 293 \text{ К}$	$T_4 = 293 \text{ К}$
Осьовий градієнт	$T_1 = 293 \text{ К}$	$T_2 = 293 \text{ К}$	$T_3 = 293 \text{ К}$	$\frac{dT_4}{dy} = 0,05 \frac{\text{К}}{\text{м}}$
Осьовий і радіальний градієнти	$T_1 = 293 \text{ К}$	$\frac{dT_2}{dx} = 0,05 \frac{\text{К}}{\text{м}}$	$T_3 = 293 \text{ К}$	$\frac{dT_4}{dy} = 0,05 \frac{\text{К}}{\text{м}}$

де n – кількість шарів, m – кількість витків у шарі, l_i – довжина i -го витка, α_i – коефіцієнт лінійного розширення волокна для i -го витка. Порядок витків у сумі (3) визначається порядком проходження світла через витки конкретної обмотки. Порядок проходження світлової хвилі визначено згідно з рис. 1; наприклад, для дипольної обмотки порядок проходження хвилі через витки такий (перше число в дужках – шар, друге – виток): $(n; 1) \dots (n; m), (n - 2; m) \dots (n - 2; 1), \dots, (2; m) \dots (2; 1), (1; 1) \dots (1; m), \dots (n - 1; 1) \dots (n - 1; m)$.

Введемо систему координат Oxy , як показано на рис. 2. Поширення тепла по однорідній пластині з кварцового скла описується двовимірним стаціонарним рівнянням теплопровідності:

$$r(x, y) C(x, y) \frac{dT}{dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = f(x, y), \quad (7)$$

де $r(x, y) = 2800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – функція густини речовини,

$C(x, y) = 800 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – функція теплоємності речовини,

$k(x, y) = 70 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ – функція теплопровідності речовини,

$f(x, y)$ – функція щільності потужності джерел тепла, розміщених на пластині; оскільки джерела тепла в ко-

тушці відсутні, то $f(x, y) = 0$. Внутрішній діаметр котушки $d_0 = 68$ мм, висота $H_0 = 25$ мм, діаметр волокна $d_f = 260$ мкм, у котушці $n = 24$ шари по $m = 96$ витків кожен. Початковою умовою при моделюванні була рівність у момент $t = 0$ температури по всій площі перерізу 293 К, граничні умови Діріхле та Неймана для кожного з випадків моделювання вказано в таблиці.

Розв'язання рівняння (7) було проведено методом сіток [16] у середовищі MATLAB; температура волокна кожного витка взята згідно з температурою точки пластини з координатами

центра жили світловода на рис. 2; координати центра жили k -го витка l -го шару визначаються як $x = d_f/2 + d_f(l - 1)$, $y = d_f/2 + d_f(m - k)$, зсув нуля розраховано з використанням (6). Результати моделювання наведено нижче.

Результати моделювання

Графіки зсуву нуля ВОГ з різними намотками при дії радіального градієнта, осьового градієнта та комбінації обох градієнтів показано на рис. 3, 4 і 5 відповідно. Для зручності графіки змасштабовано так, щоб можна було оцінити зсуви нуля для всіх видів намотки.

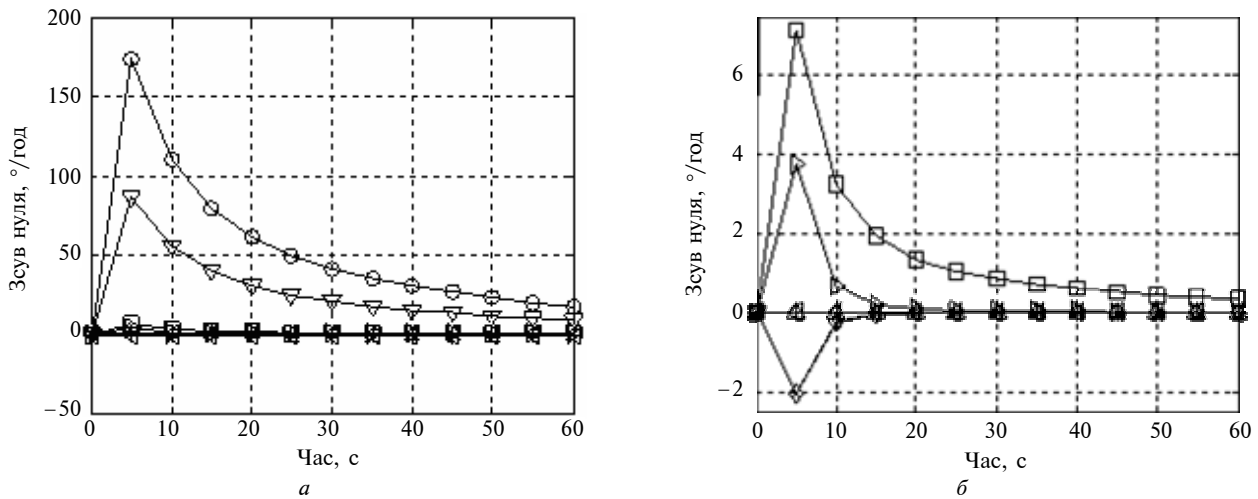


Рис. 3. Зсув нуля при дії радіального градієнта на котушку: *a* – графік зсуву нуля в діапазоні $-50-200$ °/год; *б* – масштабована частина графіка *a* біля нуля; намотка котушки: \circ – проста (однополюсна), \square – дипольна, \times – квадрупольна, \diamond – модифікована квадрупольна, ∇ – біфілярна, \triangle – центрована квадрупольна, $+$ – центрована однополюсна, \rightarrow – октупольна, \leftarrow – без перехрещування витків

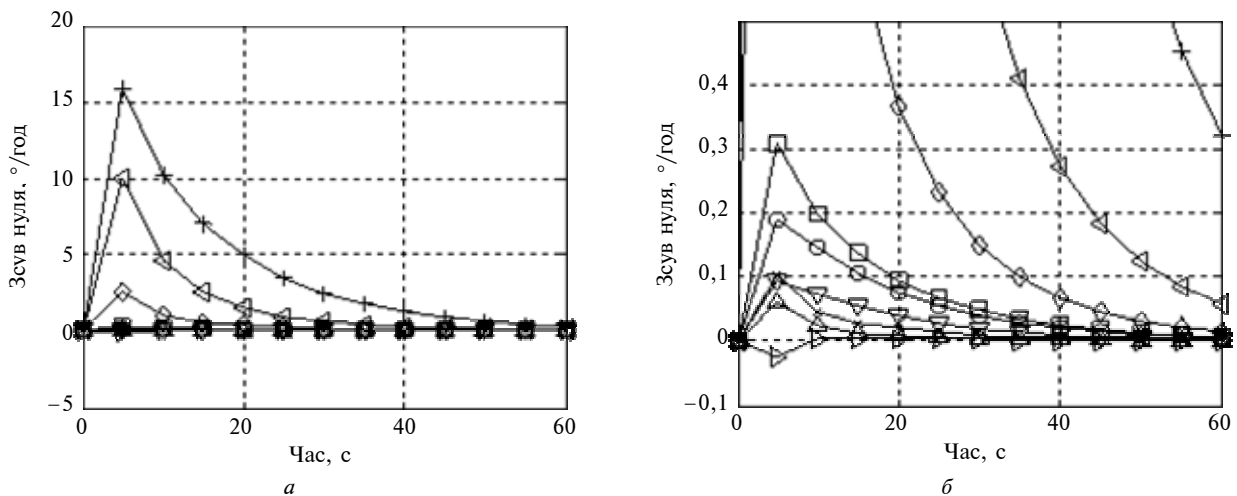


Рис. 4. Зсув нуля при дії осьового градієнта на котушку: *a* – графік зсуву нуля в діапазоні $-5-20$ °/год; *б* – масштабована частина графіка *a* біля нуля; намотка котушки: \circ – проста (однополюсна), \square – дипольна, \times – квадрупольна, \diamond – модифікована квадрупольна, ∇ – біфілярна, \triangle – центрована квадрупольна, $+$ – центрована однополюсна, \rightarrow – октупольна, \leftarrow – без перехрещування витків

Проаналізувавши наведені графіки, можна також сказати, що, незважаючи на загальну високу ефективність квадрупольних намоток, з точки зору боротьби із впливом радіального градієнта найбільш ефективними є центровані намотки – котушки з такими намотками в принципі нечутливі до радіального градієнта. Намотка без перехрещування витків наближається за ефективністю до цих намоток, але все ж є чутливою до радіального градієнта. Загалом, найбільш ефективною з намоток видається центрована квадрупольна, оскільки вона не

лише нечутлива до радіального градієнта, але й забезпечує достатньо низький зсув нуля за наявності осевого градієнта.

Додатково було проведено моделювання дії радіального та осевого градієнтів на котушку з прокладкою між алюмінієвим каркасом і витками намотки. При цьому всі умови розрахунку залишено без змін; єдиний виняток – вважалось, що коефіцієнт теплового розширення першого шару волокна такий же, як і у всіх інших шарів: $\alpha_i = \alpha_{\text{КВ}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}$ ($i = \overline{1, n}$). Результати моделювання наведено на рис. 6.

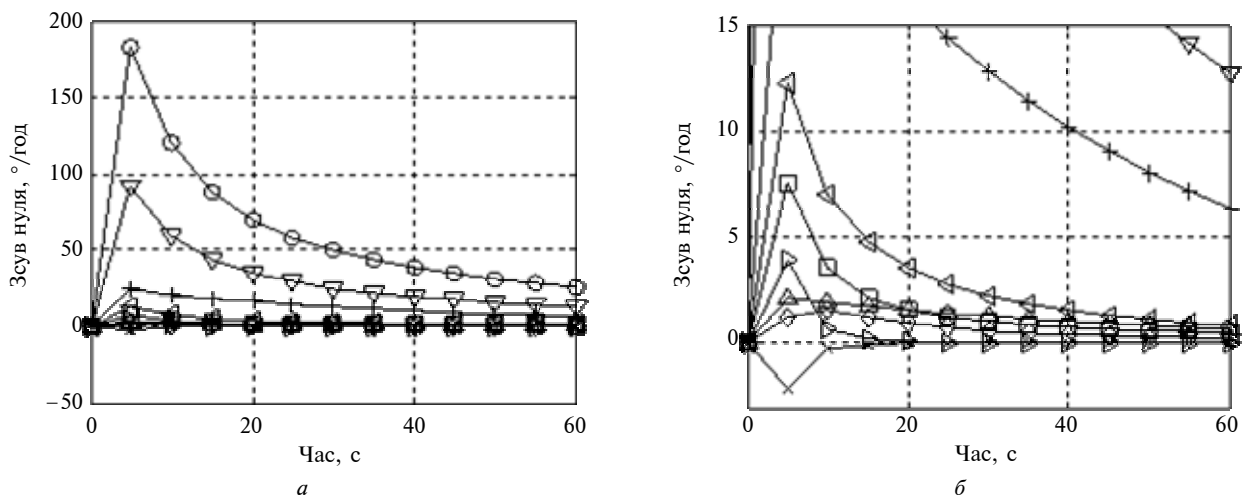


Рис. 5. Зсув нуля при дії радіального і осевого градієнтів на котушку: *a* – графік зсуву нуля в діапазоні $-50\text{--}200$ °/год; *б* – масштабована частина графіка *a* біля нуля; намотка котушки: \circ – проста (однополюсна), \square – дипольна, \times – квадрупольна, \diamond – модифікована квадрупольна, ∇ – біфілярна, \triangle – центрована квадрупольна, $+$ – центрована однополюсна, \triangleright – октупольна, \triangleleft – без перехрещування витків

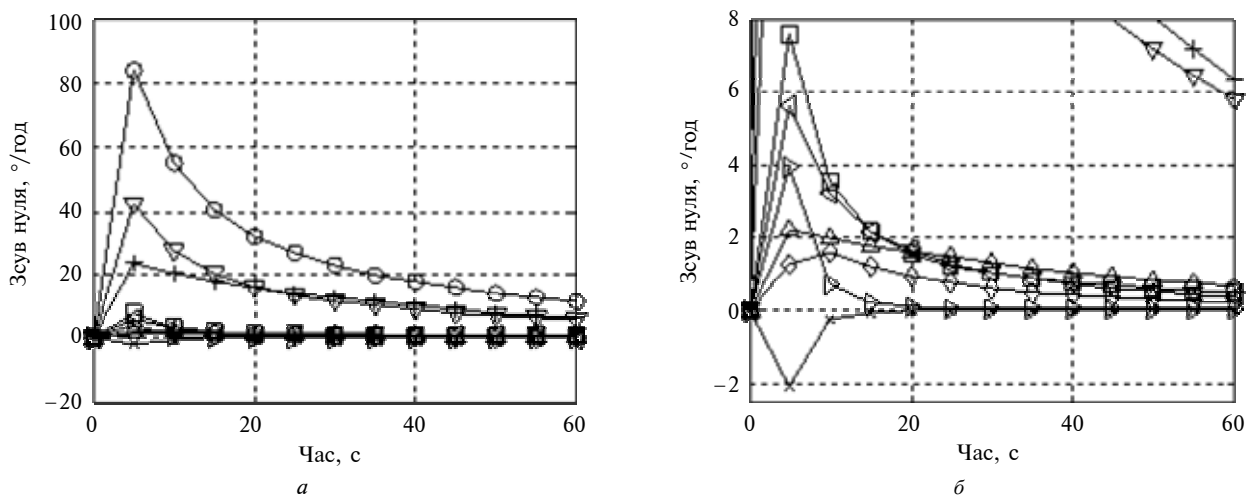


Рис. 6. Зсув нуля при дії радіального і осевого градієнтів на котушку з прокладкою (або безкаркасну котушку): *a* – графік зсуву нуля в діапазоні $-20\text{--}100$ °/год; *б* – масштабована частина графіка *a* біля нуля; намотка котушки: \circ – проста (однополюсна), \square – дипольна, \times – квадрупольна, \diamond – модифікована квадрупольна, ∇ – біфілярна, \triangle – центрована квадрупольна, $+$ – центрована однополюсна, \triangleright – октупольна, \triangleleft – без перехрещування витків

Як видно з порівняння рис. 5 і 6, для простої, біфілярної намотки і намотки без перехрещування витків зсув нуля при використанні прокладки або безкаркасної котушки зменшується приблизно вдвічі. Отже, застосування прокладок або безкаркасної котушки виправдане при виготовленні ВОГ низької точності або при використанні намотки без перехрещування витків. Для інших симетричних відносно впливу радіального та осьового градієнтів намоток застосування прокладки призводить лише до незначного зменшення зсуву нуля, тому використання комбінації складної намотки і спеціальних прокладок виправдане лише для високоточних приладів.

Таким чином, найкращі результати (див. рис. 3–6) при дії радіального градієнта дає центрована квадрупольна намотка, при дії осьового – октупольна, при дії обох градієнтів – підвиди квадрупольної намотки. Слід зазначити, що при забезпеченні хорошої теплоізоляції (якщо осьовий градієнт відсутній) центрована однополюсна намотка має таку ж ефективність, як і більш складна у виготовленні центрована квадрупольна, і вищу, ніж квадрупольна та октупольна намотки. Це дає змогу рекомендувати центровану однополюсну намотку для викорис-

тання у ВОГ низької точності – оскільки технологія її виготовлення досить проста. Намотка без перехрещування витків, незважаючи на заяви авторів [13], досить погано працює за наявності осьового градієнта, а тому, зважаючи на складність її виготовлення, рекомендувати її для виготовлення точних датчиків важко.

Висновки

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що загалом оптимальним є використання квадрупольних намоток. Для датчиків низької точності можна рекомендувати центровану однополюсну намотку за умови забезпечення хорошої тепло- та віброізоляції котушки. Застосування прокладки (або безкаркасної котушки) виправдане при використанні простої намотки (наприклад, прилади для короткоживучих об'єктів, для автопромисловості тощо) або для високоточних приладів. Слід додати, що в дійсній роботі не досліджено вплив дефектів намотки (“перескок” волокна, пропуски в намотці, перегини волокна) і вплив складу просочувальної суміші на зсув нуля і точність приладу загалом, що може стати темою подальших досліджень.

Список літератури

1. *Fiber Optic Sensors* / Sh. Yin, P.B. Ruffin, F.T.S. Yu, Eds. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 494 pp.
2. *Громов Д.С.* Тепловая защита и термостабилизация волоконно-оптических гироскопов: Дисс. ... к.т.н.: 01.04.14. – СПб., 2014. – 134 с.
3. *Apparatus and method of winding optical fiber sensor coil for fiber optic gyroscope*: Pat. 7090162 USA, IPC B21C 47/14, H01F 41/06 / Ch.G. Kim, H.J. Yoon, S.G. Kang, W.J. Lee, Korea Advanced Institute of Science and Technology. – № 10/732772, Filed 09.12.2003; Publ. 15.08.2006, U.S. Cl. 242/441.1. – 7 p.
4. *Quadrupole-wound fiber optic sensing coil and method of manufacture thereof*: Pat. 4856900 USA, IPC G01B 9/02 / M. Ivancecic (США), Litton Systems, Inc. – № 57626; Filed 03.06.87; Publ. 15.08.89, US. Cl. 356/350. – 8 p.
5. *Method of manufacture of quadrupole-wound fiber optic sensing coil*: Pat. 5351900 USA, IPC G01B 9/02 / E.M. Torney, Optelecom, Inc. – № 964089; Filed 21.10.92; Publ. 04.10.94, US. Cl. 242/7.03. – 6 p.
6. *Optical fiber gyroscope sensing coil having a reduced sensitivity to temperature variations occurring therein*: Pat. 5465150 USA, IPC G01C 19/72 / A.R. Malvern (GB), British Aerospace PLC. – № 214639; Filed 18.03.94; Publ. 07.11.95, US. Cl. 356/350. – 9 p.
7. *Optical fiber sensor coil using reverse quadrupoles and method of winding same*: Pat. 5475774 USA, IPC G02B 6/02 / R.P. Goettsche, R.A. Bergh, Honeywell Inc. – № 268716; Filed 30.06.94; Publ. 12.12.95, U.S. Cl. 385/12. – 17 p.
8. *Ming J., Gongliu Y.* Research of optical fiber coil winding model based on large-deformation theory of elasticity and its application // Chinese J. Aeronautics. – 2011. – 24. – P. 640–647.
9. *Драницына Е.В., Егоров Д.А.* Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // Навигация и управление движением: Матер. докл. XIV Конф. молодых ученых “Навигация и управление движением”. – СПб: ГНЦ РФ ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электронприбор”, 2012. – С. 447–452.
10. *Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа* / Е.В. Драницына, Д.А. Егоров, А.А. Унтилов и др. // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 4 (79). – С. 10–20.

11. *Влияние температурной нестабильности характеристик источника на показания волоконно-оптического гироскопа* / И.А. Шарков, А.В. Рупасов, В.Е. Стригалева, С.А. Волковский // Научно-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики. – 2013. – № 6 (88). – С. 31–35.
12. *Рупасов А.В.* Исследование метода локального температурного воздействия и его применение для компенсации дрейфа волоконно-оптического гироскопа: Дисс. ... к.т.н.: 05.11.07. – СПб., 2014. – 135 с.
13. *Polarization and drift analysis of thermally symmetric double sided crossover free SM fiber coils* / J. Williams, P. Ruffin, A. Lompadro et al. // Proc. SPIE: Photonic Fiber and Crystal Devices. – 2008. – **7056**. – P. 1–8.
14. *Choi W.-S.* Analysis of temperature dependence of thermally induced transient effect in interferometric fiber-optic gyroscopes // J. Optical Soc. Korea. – 2011. – **15**, № 3. – P. 237–243.
15. *Филатов Ю.В.* Волоконно-оптический гироскоп. – СПб.: ЦНИИ “Электроприбор”, 2005. – 139 с.
16. *Olver P.J.* Introduction to Partial Differential Equations. – New York: Springer, 2014. – 635 p.

References

1. *Fiber Optic Sensors*, Sh. Yin *et al.*, Eds, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008, 494 p.
2. D. Gromov, “Heat protection and thermal stabilization of fiber-optic gyroscopes”, Ph.D. dissertation, ITMO University, Russian Federation, St. Petersburg, 2014 (in Russian).
3. Ch.G. Kim *et al.*, “Apparatus and method of winding optical fiber sensor coil for fiber optic gyroscope”, US Patent 7 090 162, Aug. 15, 2006.
4. M. Ivancevic, “Quadrupole-wound fiber optic sensing coil and method of manufacture thereof”, US Patent 4 856 900, Aug. 15, 1989.
5. E.M. Torney, “Method of manufacture of quadrupole-wound fiber optic sensing coil”, US Patent 5 351 900, Oct. 04, 1994.
6. A.R. Malvern, “Optical fiber gyroscope sensing coil having a reduced sensitivity to temperature variations occurring therein”, US Patent 5 465 150, Nov. 07, 1995.
7. R.P. Goettsche and R.A. Bergh, “Optical fiber sensor coil using reverse quadrupoles and method of winding same”, US Patent 5 475 774, Dec. 12, 1995.
8. J. Ming and Y. Gongliu, “Research of optical fiber coil winding model based on large-deformation theory of elasticity and its application”, *Chinese J. Aeronautics*, vol. 24, pp. 640–647, 2011.
9. E.V. Dranitsina and D.A. Egorov, “Study of fiber optic gyroscope output signal vs temperature dependence in the strapdown inertial measurement module”, in *Proc. XVI Conf. Navigation and Motion Control*, St. Petersburg, Russian Federation, 2012, pp. 447–452 (in Russian).
10. E.V. Dranitsina *et al.*, “Decreasing temperature change influence on fiber optic gyroscope output signal”, *Гироскопия и Навигация*, no. 4 (79), pp. 10–20, 2012 (in Russian).
11. I.A. Sharkov *et al.*, “Influence of thermal instability of the source on fiber-optic gyro output”, *Научно-Технический Вестник Информационных Технологий, Механики и Оптики*, no. 6 (88), pp. 31–35, 2013 (in Russian).
12. A.V. Rupasov, “Study of local thermal influence method and its application to fiber-optic gyroscope drift compensation”, Ph.D. dissertation, ITMO University, Russian Federation, St. Petersburg, 2014 (in Russian).
13. J. Williams *et al.*, “Polarization and drift analysis of thermally symmetric double sided crossover free SM fiber coils”, in *Proc. SPIE: Photonic Fiber and Crystal Devices*, vol. 7056, pp. 1–8, 2008.
14. W.-S. Choi, “Analysis of temperature dependence of thermally induced transient effect in interferometric fiber-optic gyroscopes”, *J. Optical Soc. Korea*, vol. 15, no. 3, pp. 237–243, 2011.
15. Ju.V. Filatov, *Fiber-Optic Gyroscope*. St. Petersburg, Russian Federation: TsNII “Elektroprigor”, 2005, 139 p. (in Russian).
16. P.J. Olver, *Introduction to Partial Differential Equations*. New York: Springer, 2014, 635 p.

С.В. Иванов

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДІВ НАМОТКИ ВОЛОКНА ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПА В УМОВАХ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ

Проблематика. Роботу присвячено дослідженню ефективності різних видів намотки волокна котушки волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ) при зменшенні впливу ефекту Шупе в умовах зміни температури.

Мета дослідження. Метою роботи є оцінка ефективності видів намотки волокна котушки ВОГ в умовах зміни температури.

Методика реалізації. На основі аналізу існуючих видів намотки і формул розрахунку невзаємного зміщення фази розроблено методику оцінки впливу температурних градієнтів на котушки з різними видами намотки. Методику оцінки застосовано до 9 різних видів намотки.

Результати дослідження. Отримано залежності зсуву нуля від часу для 9 видів намотки при дії осьового, радіального градієнтів температури та їх комбінації.

Висновки. Загалом оптимальним є використання квадрупольних намоток; для датчиків низької точності можна рекомендувати центровану однополюсну намотку за умови забезпечення хорошої тепло- та віброізоляції котушки. Застосування прокладки (або бескаркасної котушки) виправдане при використанні простої намотки (наприклад, прилади для короткоживучих об'єктів, для автопромисловості тощо) або для високоточних приладів.

Ключові слова: волоконно-оптичний гіроскоп; намотка волокна; ефект Шупе.

С.В. Иванов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИДОВ НАМОТКИ ВОЛОКНА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Проблематика. Работа посвящена исследованию эффективности различных видов намотки волокна катушки волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) при уменьшении влияния эффекта Шупе в условиях изменения температуры.

Цель исследования. Целью работы является оценка эффективности видов намотки волокна катушки ВОГ в условиях изменения температуры.

Методика реализации. На основе анализа существующих видов намотки и формул расчета невзаимного смещения фазы разработана методика оценки влияния температурных градиентов на катушки с различными видами намотки. Методика оценки применена к 9 различным видам намотки.

Результаты исследования. Получены зависимости смещения нуля от времени для 9 видов намотки при действии осевого, радиального градиентов температуры и их комбинации.

Выводы. В общем оптимальным является использование квадрупольных намоток; для датчиков низкой точности можно рекомендовать центрированную однополюсную намотку при условии обеспечения хорошей тепло- и виброизоляции катушки. Применение прокладки (или бескаркасной катушки) оправдано при использовании простой намотки (например, приборы для короткоживущих объектов, для автопромышленности и т.п.) или для высокоточных приборов.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп; намотка волокна; эффект Шупе.

Рекомендована Радою
НДІ телекомунікацій
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
14 грудня 2015 року