

УДК 621.317

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.081>

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ СЕНСОР ДЛЯ ЛІНІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ

І.О. Брагинець*, канд.техн.наук, **Ю.О. Масюренко****, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: masjuriv@icd.org.ua

Запропоновано просту за конструкцією схему сенсора для безконтактних стаціонарних лінійних вимірювань з оптичними волокнами як світловодами. Схема даного сенсора дає змогу також конструктивно виконати голівку сенсора у вигляді вимірювального зонда з оптичного волокна, що забезпечить проведення експрес-контролю положення контрольованого об'єкта у просторі. Проведено світлоенергетичний розрахунок оптичної схеми вказаного сенсора з урахуванням параметрів його оптичних елементів та оцінено співвідношення сигнал-шум на виході фотоприймача. Обрано та обґрунтовано для запропонованої схеми сенсора застосування частотно-фазового методу обробки сигналів на виході фотоприймача для вимірювання відстані до контрольованого об'єкта та оцінки його положення у просторі. Проведено аналітичні моделювання перетворювальних процесів у частотно-фазовій системі, які підтвердили можливість визначення повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора з використанням запропонованого волоконно-оптичного сенсора. Бібл. 15, рис. 1.

Ключові слова: лазер, оптоволокно, розсіяне світло, дифузне відбиття, лінійна частотна модуляція, спектральний аналіз.

У багатьох галузях техніки визначення геометричних розмірів об'єктів для їхнього налагодження, оцінка стану поверхні об'єктів та положення останніх у просторі пов'язано з проведенням безконтактних лінійних вимірювань. Особливо це стосується об'єктів зі складною конструкцією, великогабаритних об'єктів, що обертаються або об'єктів, нагрітих до високої температури (більше 1000 °С). Для вирішення зазначених проблем успішно застосовуються оптичні методи вимірювання відстані від встановленого обладнання до контрольованого об'єкта та оцінки його переміщення. Найбільша точність вимірювання у разі практичної реалізації вказаних методів забезпечується у випадку використання як джерела світла, яке направляється на об'єкт, лазерних когерентних випромінювачів. При цьому оптичні вимірювальні системи (ОВС) створюють на базі високоточних лазерних далекомірів, побудованих із застосуванням фазових, частотних або частотно-фазових методів вимірювання відстані до дифузно-відбиваючих поверхонь.

У деяких випадках необхідно проводити не тільки зовнішній контроль згаданих вище об'єктів, а також оцінювати геометричні параметри та положення їхніх внутрішніх елементів, доступ до яких обмежений. Наприклад, актуальною задачею є контроль повітряного зазору між ротором та статором у гідро- та турбогенераторах для забезпечення їхньої безаварійної роботи. Залежно від типу генератора зазор може складати від 5 до 30 мм, а похибка його вимірювання не повинна перевищувати 0,05...0,1 мм. Однак у разі використання промислових лазерних сенсорів переміщень [1, 2] треба враховувати незручності при розміщенні їх на статорі генераторів через особливості конструкції останніх. Крім того, на точність вимірювання зазору будуть впливати підвищена температура у зоні розташування сенсора та високий рівень електромагнітних завад, а на сам сенсор вологість, спричинена через використання системи охолодження в генераторах. За цих причин неможливо реалізувати потенційно високу точність (похибка не більше 0,1 мм) вказаних сенсорів, до складу яких, крім оптичної схеми, входять електронні вимірювальні перетворювачі. Використання високоточних лазерних ОВС [3], які працюють на деякій відстані від об'єкта, потребує чіткої орієнтації лазерного променя на поверхню ротора та забезпечення безперервності лазерного випромінювання на дистанції в робочому режимі генератора. Тому для підведення лазерного випромінювання та приймання відбитого від контрольованої поверхні світлового сигналу доцільно використовувати оптичні волокна (ОВ). У такому разі до складу волоконно-оптичного сенсора (ВОС) входять лазерний випромінювач, передавальне та приймальне оптичні волоконні лінії (ОВЛ) і фотоприймач [4, 5]. Додатковими оптичними елементами сенсора можуть бути з'єднувачі,

© Брагинець І.О., Масюренко Ю.О., 2019

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-9528-5808>; ** <https://orcid.org/0000-0003-4209-1126>

роз'єднувачі, об'єктиви, лінзи та ін. За чутливий елемент сенсора вважають саму відбиваючу поверхню ротора [4], а жорсткі вимоги до вибору довжини як передавальних, так і приймальних ОВЛ відсутні. Ця обставина дає змогу віддалити від контрольованого об'єкта електронне обладнання для передачі та обробки оптичних сигналів на задану відстань з метою зменшення впливу на точність вимірювання зазору факторів, які виникають у процесі експлуатації об'єкта.

У [6] описано ОВС фазового типу для вимірювання повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора. В цьому сенсорі передавальне та приймальне оптичні волокна встановлюють відносно нормалі до контрольованої поверхні ротора під однаковим кутом, значення якого залежить від номінального значення зазору та відстані між центрами осердь передавального та приймального волокон. Повітряний зазор обчислюється з використанням геометричних параметрів сенсора та результатів вимірювання відстані, яку проходить лазерне випромінювання з виходу передавального волокна до поверхні ротора і після відбиття від ротора – у зворотному напрямку до входу в приймальне волокно.

Незважаючи на досить високу розрахункову точність вимірювання зазору (похибка не перебільшує 0,05 мм), описаний сенсор має деякі недоліки. По-перше, його досить складно встановлювати на об'єкті через необхідність забезпечення точності (при розміщенні волокон) заданих кутів та їхньої стабільності. По-друге, сенсор має обмежений діапазон вимірювання зазору, для розширення якого треба застосовувати ще один, додатковий, сенсор з іншими геометричними параметрами. Крім того, розглянутий сенсор має нелінійну вихідну характеристику, що може призвести до додаткової похибки вимірювання зазору, яка складає 0,1 мм.

Мета даної роботи – запропонувати для лінійних вимірювань відносно просту за конструкцією схему сенсора з використанням оптичних волокон як світловодів, провести світлоенергетичний розрахунок оптичної схеми сенсора та оцінити співвідношення сигнал–шум на виході фотоприймача, обрати та обґрунтувати для такої схеми метод обробки сигналів для вимірювання відстані до контрольованого об'єкта та оцінки його положення у просторі.

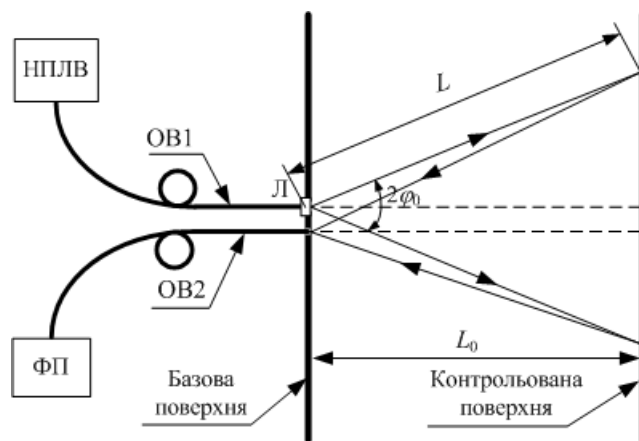
Відповідно до поставленої мети нами запропоновано оптичну схему сенсора для лінійних вимірювань, показану на рисунку. На схемі прийнято наступні умовні позначення: НПЛВ – напівпровідниковий лазерний випромінювач; ОВ1 – передавальне оптоволокно; Л – мікролінза (об'єктив); ОВ2 – приймальне оптоволокно; Ф – фотоприймач; ВО – вимірювальний об'єкт; БП – базова поверхня; КП – контрольована поверхня. Оптоволокна ОВ1 та ОВ2 розташовані по нормалі до контрольованої поверхні КП, причому в торці ОВ1 встановлено лінзу Л для розсіювання світла під кутом $2\varphi_0$. Значення останнього визначається з урахуванням числової апертури застосованого типу приймального оптоволокна.

На відміну від оптичної схеми ВОС, розглянутого у [6], в запропонованій схемі передавальне ОВ1 та приймальне ОВ2 оптичні волокна розташовані по нормалі до контрольованої поверхні. Як оптичне волокно доцільно використати стандартне багатомодове волокно з діаметром осердя $2a = 50$ мкм та діаметром оболонки 125 мкм [5]. Вибір багатомодового волокна обумовлено високою ефективністю його з'єднання з джерелом лазерного випромінювання та відносною простотою з'єднання волокон між собою. У процесі розрахунків запропонованої оптичної схеми вважаємо, що відбите від контрольованої поверхні світлове випромінювання підкоряється закону Ламберта. Максимальне можливе значення кута θ_{\max} , під яким світло може входити у приймальне волокно для його повного внутрішнього відбивання, або числова апертура NA (Numerical Aperture) дорівнює [4]

$$\theta_{\max} = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (1)$$

де n_1 – коефіцієнт переломлення світла осердя; Δ – відносна різниця коефіцієнтів переломлення світла оболонки n_2 та осердя n_1 , $\Delta = (n_1 - n_2)/n_2$. Тоді, наприклад, за $n_1=1,47$ та $\Delta = 0,01$ значення θ_{\max} складає 0,21 рад або 12° [4].

Після відбивання випромінювання від контрольованої поверхні останню можна розглядати як випромінювач для приймального волокна ОВ2. Розрахуємо значення діаметра світлової плями на



контрольованій поверхні та її кутовий розмір. У даному випадку поле інтенсивності світлового потоку, який виходить із передавального оптоволокна ОВ1, можна представити гаусовою функцією, а його кут розходження у повітрі дорівнює [7]

$$\varphi_p = \lambda / \pi \Omega, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювача, вважаємо $\lambda = 0,85$ мкм; Ω – мінімальний діаметр гаусова пучка.

Значення Ω можна знайти через приведену частоту розповсюдження світлового випромінювання $\nu = 2\pi a \lambda^{-1} \theta_{\max}$ [4]. Після підстановки у цей вираз числових значень співмножників, які до нього входять, знаходимо, що $\nu \approx 39$. Тоді згідно з графіками, наведеними у [7], $\Omega \approx a$, а кут розходження $\varphi_p \approx 0,0108$ рад. Якщо, наприклад, номінальне значення зазору $L_0 = 10$ мм, то діаметр світлової плями на контрольованій поверхні $D = 2a + 2\varphi_p L_0 = 0,266$ мм, а її кутовий розмір $\theta_n = D/L_0 \approx 0,0266$ рад, тобто $\theta_n < \theta_{\max}$.

Проведемо світлоенергетичний розрахунок оптичної схеми запропонованого сенсора та оцінимо співвідношення сигнал–шум на виході фотоприймача Ф. З урахуванням того, що $\theta_n < \theta_{\max}$, за формулою із [8] визначимо частку потужності оптичного випромінювання, яка після відбивання від контрольованої поверхні потрапляє через приймальне волокно ОВ2 на площадку фотоприймача Ф

$$P_{\text{відб}} = \frac{(2a)^2 \chi}{\pi L_0^2} \cdot P_{\text{випр}}, \quad (3)$$

де χ – коефіцієнт відбивання, для сталі $\chi \approx 0,6$; $P_{\text{випр}}$ – випромінювана потужність.

За лазерний випромінювач для сенсора можна вибрати випромінювач ІЛПН-115 інфрачервоного діапазону, що найбільш пристосований для з'єднання з оптоволоконним [9]. Вказаний випромінювач із довжиною хвилі 0,85 мкм має середню потужність $P_{\text{випр}} = 30$ мВт. Після підстановки у (3) чисельних даних отримуємо $P_{\text{відб}} \approx 0,146$ мкВт.

Фотоприймач Ф запропонованого сенсора доцільно будувати на базі лавинного фотодіода ФДЗ11Л, характеристики якого наведено в [10]. У цьому випадку значення струму фотодіода, який виникає під дією оптичної потужності $P_{\text{відб}}$ досліджуваного сигналу, дорівнює [11]

$$I_c = S \cdot M \cdot P_{\text{відб}}, \quad (4)$$

де S – струмова монохроматична чутливість фотодіода, $S = 18$ А/Вт; M – коефіцієнт лавинного множення, $M = 20$ (оптимальне значення). Після підстановки у (4) числових значень величин, які входять до нього, отримуємо $I_c = 18 \cdot 20 \cdot 0,146 \cdot 10^{-6} \approx 52,5$ мкА. Відповідно напруга на навантаженні фотоприймача, яке в даному разі прийнято $R_n = 1,0$ кОм, дорівнює $U_c = I_c \cdot R_n = 52,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^3 = 52,5$ мВ.

Для оцінки співвідношення сигнал–шум необхідно визначити середньоквадратичне значення (СКЗ) сумарного шуму на виході фотоприймача Ф. Останній, в основному, включає в себе складові, обумовлені дробовими шумами фотодіода та тепловими шумами опору навантаження фотоприймача. Середньоквадратичне значення струму, обумовленого дією дробових шумів, дорівнює [4]

$$I_{\text{дш}} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_0 \cdot M^2 \cdot F_{\text{ш}} \cdot \Delta f}, \quad (5)$$

де e – заряд електрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; I_0 – середній струм через фотодіод (у даному разі $I_0 \approx I_c$); $F_{\text{ш}}$ – коефіцієнт шуму, $F_{\text{ш}} = M^x$, де (у конкретному випадку) $x \approx 0,5$; Δf – частотна смуга вимірювання, $\Delta f = 80$ кГц. Після підстановки у (5) числових значень величин, які в нього входять, маємо

$I_{\text{дш}} = \sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 52,5 \cdot 10^{-6} \cdot 20^2 \cdot 20^{0,5} \cdot 8 \cdot 10^4} = 49,2 \cdot 10^{-9}$ А. Тоді середньоквадратичне значення напруги дробових шумів $U_{\text{дш}} = I_{\text{дш}} \cdot R_n = 49,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^3 = 49,2$ мкВ.

Середньоквадратичне значення напруги теплових шумів у смугі частот $\Delta f = 80$ кГц визначається за формулою [4]

$$U_{\text{тш}} = \sqrt{4k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R_n}, \quad (6)$$

де k – стала Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт·с/град; T – температура резистора R_n у градусах Кельвіна, приймаємо $T = 296$ К. Після підстановки у (6) числових значень отримуємо

$$U_{\text{тш}} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 296 \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 10^3} \approx 58,5 \text{ мкВ.}$$

Сумарне середньоквадратичне значення шумів фотоприймача дорівнює

$$U_{\Sigma\text{ш}} = \sqrt{U_{\text{дш}}^2 + U_{\text{тш}}^2} + \sqrt{49,2^2 + 58,5^2} \approx 76,4 \text{ мкВ.}$$

Використовуючи обчислені значення U_c і $U_{\Sigma\text{ш}}$, знаходимо відношення сигнал-шум за формулою $\rho = U_c / U_{\Sigma\text{ш}} \approx 687$.

З урахуванням знайденого значення ρ проведемо порівняльний аналіз випадкових похибок вимірювання переміщень у разі застосування фазового та частотно-фазового методів вимірювання відстані для оцінки повітряного зазору генератора. При цьому припускаємо, що смуга пропускання вимірювального каналу та час вимірювання в обох випадках однакові, тобто співвідношення сигнал-шум на виході вимірювальних каналів обох пристроїв має одне і те саме значення. Прийmemo, що для фазової системи (ФС) частота модуляції лазерного випромінювання $f_m = 50$ МГц, а діапазон зміни частоти модуляції для частотно-фазових систем (ЧФС) складає 25...100 МГц при обраній базовій відстані $L_x = 4$ м [12]. Визначимо випадкову похибку вимірювання, яка буде характеризувати поріг чутливості пристроїв, що порівнюються. При цьому треба зазначити, що в ЧФС при обраних параметрах перетворення [12] кумулятивний фазовий зсув за час одного вимірювання дорівнює 4π , а період вихідної величини у ФС відповідає фазовому зсуву 2π . Тому для ФС випадкова похибка складає $\Delta L_{\text{ФС}} = \lambda_e / 2\pi\rho$, де λ_e – еквівалентна довжина хвилі моделюючої напруги, а для ЧФС – $\Delta L_{\text{ЧФС}} = L_x / 4\pi\rho$. Якщо підставити в ці вирази значення $\lambda_e = c / 2f_m = 3000$ мм (c – швидкість світла, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с) та $L_x = 4000$ мм, то можна знайти значення випадкових похибок $\Delta L_{\text{ФС}} = 0,7$ мм та $\Delta L_{\text{ЧФС}} = 0,46$ мм. За рахунок усереднення результатів окремих вимірювань можна зменшити випадкову похибку $\Delta L_{\text{вим}}$ до потрібних значень, наприклад, до 0,1 мм у разі визначення повітряного зазору в генераторах. При цьому число усереднень N може бути знайдено із співвідношення $N = (\Delta L_{\text{ФС}} / \Delta L_{\text{вим}})^2 \approx 50$ для ФС та $N = (\Delta L_{\text{ЧФС}} / \Delta L_{\text{вим}})^2 \approx 20$ – для ЧФС.

Для вимірювання відстані до контрольованого об'єкта та оцінки його положення у просторі з застосуванням розглянутої схеми волоконно-оптичного сенсора доцільно, на наш погляд, застосувати частотно-фазовий метод, який у порівнянні з фазовим методом, як показано вище, забезпечує за його практичної реалізації більш високу точність вимірювання через зменшення випадкових похибок. Крім того, для підвищення чутливості у разі вимірювання зазору можна використати можливість роботи ЧФС у радарному режимі, тобто одночасно контролювати відстань до декількох контрольованих точок на поверхні [13]. Оскільки вимірювальна відстань у даному разі пропорційна частоті вихідного сигналу ЧФС, то в його спектрі будуть присутні додаткові складові, значення амплітуд яких можна використати для визначення повітряного зазору. Для цього необхідно забезпечити розсіювання світла, яке виходить із передавального волокна, під деяким кутом $2\varphi_0$ за умови, що $\varphi_0 < \theta_{\text{max}}$. Це досягається, як вже зазначалося, з використанням лінзи Л, яка входить до оптичної схеми сенсора (див. рисунок), конструктивні параметри якої розраховуються таким чином, щоб $\varphi_0 \approx 0,15$ рад. При цьому вважаємо, що відбите від контрольованої поверхні світлове випромінювання підкоряється закону Ламберта.

Проведемо аналітичні дослідження вихідного сигналу запропонованого сенсора. Досліджувана електрична напруга на виході фотоприймача Ф, спричинена відбиванням оптичного сигналу від кожної точки контрольованої поверхні, може бути представлена у вигляді

$$u_i = U_{mi} \sin(\omega_0 + \Delta\omega_i)t, \quad (7)$$

де U_{mi} – амплітуда напруги, в подальшому для спрощення математичних перетворень прийmemo $U_{mi} = 1$ В; ω_0 – основна частота, пропорційна відстані $(l_1 + l_2 + L_0)$; $\Delta\omega_i$ – приріст частоти, обумовлений роботою ЧФС у радарному режимі; t – поточний час; $i = 0, 1, 2, 3$. Значення $\Delta\omega_i$ у (7) може

бути визначено як

$$\Delta\omega_i = \left(\frac{\omega_0}{L_x} \cdot \frac{L_0}{\cos\varphi_i} - \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \right) = \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \left(\frac{1}{\cos\varphi_i} - 1 \right), \quad (8)$$

де $\varphi_i = 0 \dots \varphi_0$.

Представимо $\cos\varphi_i$ у вигляді ряду

$$\cos\varphi_i = 1 - \frac{\varphi_i^2}{2!} + \frac{\varphi_i^4}{4!} - \dots \quad (9)$$

Якщо враховувати діапазон значень φ_i , то з достатньою для практики точністю можна обмежитися двома першими складовими ряду (9). Тоді вираз (8) буде мати вигляд

$$\Delta\omega_i = 0,5 \cdot \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot \varphi_i^2. \quad (10)$$

Після тригонометричного перетворення формули (7) з урахуванням того, що $\Delta\omega_i \ll \omega_0$, вона набуде вигляду

$$u_i = \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t \cdot \sin \Delta\omega_i t. \quad (11)$$

У виразі (11) його друга складова обумовлена додатковими спектральними складовими, за значеннями амплітуд яких можна оцінити величину повітряного зазору. Для визначення складової ($\cos \omega_0 t \cdot \sin \Delta\omega_i t$) у виразі (11) можна використати у ЧФС оптимальний алгоритм перетворення сигналів для оцінки приросту частоти [14]. У цьому випадку із напруги (11) віднімається синфазна складова $u_c = \sin \omega_0 t$, яка формується в процесі вимірювання та обчислювальної обробки досліджуваного сигналу в ЧФС [12]. В результаті цього вираз (11) з урахуванням значення $\Delta\omega_i$ (10) може бути

$$\text{представлений у вигляді} \quad u'_i = \cos \omega_0 t \cdot \sin \left(0,5 \cdot \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot \varphi_i^2 \right) \cdot t. \quad (12)$$

У відповідності до запропонованої оптичної схеми сенсора приріст частоти вихідного сигналу ЧФС за рахунок додаткових спектральних складових можна знайти, якщо вираз (12) представити в

$$\text{інтегральному вигляді} \quad u_{\text{інт}} = \frac{1}{\varphi_0} \cdot \int_0^{\varphi_0} \cos \omega_0 t \cdot \sin \left(0,5 \cdot \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot t \cdot \varphi_i^2 \right) \cdot d\varphi_i. \quad (13)$$

З урахуванням діапазону значень φ_i представимо другий співмножник підінтегрального виразу із (13) згідно з формулою Тейлора [15] у вигляді

$$\sin \left(0,5 \cdot \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot t \right) \varphi_i^2 = \left(\frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot t \right) \varphi_i^2.$$

Тоді після підстановки останнього виразу у (13)

$$\begin{aligned} u_{\text{інт}} &= \frac{1}{\varphi_0} \cdot \int_0^{\varphi_0} \cos \omega_0 t \cdot \left(\frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot t \right) \varphi_i^2 \cdot d\varphi_i = \frac{1}{\varphi_0} \cdot \cos \omega_0 t \cdot 0,33 \cdot \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot t \cdot \varphi_i^3 \Big|_0^{\varphi_0} = \\ &= \cos \omega_0 t \cdot 0,33 \cdot \frac{\omega_0}{L_x} \cdot L_0 \cdot \varphi_0^2 \cdot t = \beta \cdot t \cdot \cos \omega_0 t, \end{aligned} \quad (14)$$

де $\beta = 7,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_0 \cdot L_0 / L_x$ при значенні $\varphi_0 = 0,15$.

Далі згідно з обчислювальною обробкою з використанням оптимального алгоритму для оцінки приросту частоти складова (14) перемножується з квадратурною складовою вихідної величини ЧФС $u_{\text{кв}} = \cos \omega_0 t$. У результаті (14) перетворюється у вираз $u_{\text{н}} = \beta \cdot t \cdot (\cos \omega_0 t)^2$, а з урахуванням того, що $(\cos \omega_0 t)^2 = 0,5 \cdot (1 + \cos 2\omega_0 t)$, маємо

$$u_{\text{н}} = 0,5 \cdot \beta \cdot t \cdot (1 + \cos 2\omega_0 t). \quad (15)$$

У даному випадку, домінуючі складові спектра визначаються його членом

$$u'_{\text{н}}(t) = 0,5 \cdot \beta \cdot t. \quad (16)$$

Якщо періодичну функцію (16) розкласти у тригонометричний ряд Фур'є на часовому відрізку $0 \dots T$, де $T = 2\pi/\omega$, то значення амплітуд складових спектра будуть відповідати коефіцієнтам ряду

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T u'_{\text{н}}(t) \cos n\omega t \cdot dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T u'_{\text{н}}(t) \sin n\omega t \cdot dt, \quad (17)$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

Оскільки функція (16) – непарна, то згідно з [15] її ряд Фур'є не містить косинусів та вільного члена. При цьому коефіцієнти b_n після підстановки значення $u'_{\text{н}}(t)$ із (16) дорівнюють

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T u'_{\text{н}}(t) \sin n\omega t \cdot dt = \beta (-1)^{n+1} \cdot \frac{1}{n}. \quad (18)$$

Тоді амплітуди спектральних складових з урахуванням (18) складають

$$b_1 = \beta; \quad b_2 = \beta/2; \quad b_3 = \beta/3; \quad \dots \quad b_n = \beta/n; \quad \dots \quad (19)$$

Таким чином, оцінивши значення амплітуди спектральної складової $b_1 = \beta$ як найбільш інтенсивної, можна використати наведену вище формулу $\beta = 7,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_0 \cdot L_0 / L_x$ для обчислення повітряного зазору L_0 . У даному випадку визначення зазору здійснюється за результатами одного вимірювання за амплітудою найбільш інтенсивної спектральної складової, що вносить меншу похибку в результат оцінки зазору. Для зменшення загальної випадкової похибки доцільно провести усереднення результатів декількох вимірювань.

Висновки. 1. Запропоновано просту за конструкцією схему сенсора для безконтактних стаціонарних лінійних вимірювань із використанням оптичних волокон як світловодів, у разі реалізації якої відсутні жорсткі вимоги до точності розміщення передавального і приймального волокон та забезпечується лінійність вихідної характеристики сенсора в заданому діапазоні вимірювання. Схема запропонованого сенсора дає змогу також конструктивно виконати головку сенсора у вигляді вимірювального зонда із оптичного волокна, що забезпечить проведення експрес-контролю положення контрольованого об'єкта у просторі.

2. Проведено світлоенергетичний розрахунок оптичної схеми запропонованого сенсора з урахуванням параметрів його оптичних елементів та визначено співвідношення сигнал–шум на виході фотоприймача. Остання обставина дає змогу оцінити потенційні розрізнявальну здатність та точність лінійних вимірювань з використанням запропонованого сенсора.

3. Обрано та обґрунтовано для запропонованої схеми сенсора частотно-фазовий метод обробки сигналів на виході фотоприймача для вимірювання відстані до контрольованого об'єкта та оцінки його положення у просторі. Проведено аналітичні моделювання перетворювальних процесів у частотно-фазовій системі, які підтвердили можливість оцінки повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора з застосуванням запропонованого волоконно-оптичного сенсора.

Робота виконана у рамках бюджетної програми 6541030 за темою № III-29-17 "Розвиток наукових засад методів та засобів вимірювання експлуатаційних параметрів обладнання електростанцій", шифр теми "ПАРАМЕТР", Державний реєстраційний номер роботи 0116U007285.

1. Лазерные триангуляционные датчики расстояния. Общие сведения. URL: <http://www.promsat.com/content/files/cat/prizma/LS5.pdf> (дата звернення 14.02.2019).
2. Триангуляционный лазерный датчик - РФ603. URL: <http://www.sensorika.com/ru/lazernye-triangulyatsionnye-datchiki/rf603/> (дата звернення 14.02.2019).
3. Бесконтактная измерительная система на базе лазерного радара серии MV300 от 02.2017. URL: <https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2017/03/mv300.pdf> (дата звернення 15.05.2019).
4. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1990. 256 с.
5. Udd Eric, Spillman William. Fiber optic sensors an Introduction for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons, Inc., 2011. 506 p.
6. Брагинець І.О., Кононенко О.Г., Масюренко Ю.О. Аналітичний огляд та вибір оптичних лазерних систем для вимірювання повітряних зазорів у потужних гідрогенераторах. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 49. С. 103-110.
7. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь: оптическая передача и обработка информации. М.: Мир, 1984. 504 с.
8. Парвулюсов Ю.Б., Солдатов В.П., Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
9. Легкий В.Н., Галун Б.В., Санков О.В. Оптоэлектронные элементы и устройства систем специального назначения. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 455 с.
10. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Ч. 2: Приемники оптического излучения. М.: ДМК Пресс, 2017. 586 с.
11. Гауэр Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
12. Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Латенко В.И., Орнатский И.А. Особенности применения фазово-частотного метода в лазерной дальнометрии. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 6. С. 65-70.
13. Брагинець І.О., Кононенко О.Г., Масюренко Ю.О. Застосування частотно-фазового методу для контролю геометричних параметрів об'єктів. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 88-93.
14. Van Trees Harry L. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part 1: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 690 p.
15. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Гос. изд. физико-математической литературы, 1958. 784 с.

УДК 621.317

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.А. Брагинец, канд.техн.наук, Ю.А. Масюренко, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: masjuriv@ied.org.ua

Предложена простая по конструкции схема сенсора для бесконтактных стационарных линейных измерений с оптическими волокнами в качестве световодов. Схема датчика позволяет конструктивно изготовить головку датчика из оптического волокна в виде измерительного зонда. Это даст возможность выполнять экспресс-контроль положения контролируемого объекта в пространстве. Проведен светоэнергетический расчет оптической схемы предложенного сенсора с учетом параметров его оптических элементов и оценено отношение сигнал-шум на выходе фотоприемника. Выбран и обоснован для предложенной схемы сенсора частотно-фазовый метод обработки сигналов на выходе фотоприемника при измерении расстояния до контролируемого объекта и оценки его положения в пространстве. Проведено аналитическое моделирование преобразовательных процессов в частотно-фазовой системе, что подтвердило возможность измерения воздушного зазора между ротором и статором гидрогенератора с использованием предложенного волоконно-оптического сенсора. Библ. 15, рис. 1.

Ключевые слова: лазер, оптоволокно, рассеянный свет, диффузное отражение, линейная частотная модуляция, спектральный анализ.

FIBER OPTICAL SENSOR FOR LINEAR MEASUREMENTS

I.O. Bragynets, Yu.O. Masjurenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: masjuriv@ied.org.ua

A simple-designed sensor circuit for contactless stationary linear measurements with optical fibers as light guide is proposed. The scheme of the sensor allows doing constructively the sensor head from optical fiber in the form of a measuring probe. Its will provide an opportunity to carry out express control of the position of the controlled object in space. Taking into account the parameters of the optical elements of the proposed sensor, a lightenergy calculation of the optical circuit was performed. The signal-to-noise ratio at the photodetector output was estimated. A frequency-phase method for processing of an output photodetector signals when measuring the distance to the object being monitored and estimating its position in space was selected and substantiated for the proposed sensor circuit. Analytical modeling of conversion processes in the frequency-phase system was carried out. It's confirmed the possibility of measuring the air gap in the hydrogenerator between the rotor and the stator using the proposed fiber-optic sensor. References 15, figure 1.

Keywords: laser, optical fiber, scattered light, diffuse reflection, linear frequency modulation, spectral analysis.

1. Laser triangulation distance sensors. General information.

URL: <http://www.promsat.com//content/files/cat/prizma/L55.pdf> (Accessed at 14.02.2019). (Rus)

2. Laser Triangulation Sensor - RF603.

URL: <http://www.sensorika.com/ru/lazernye-triangulyatsionnye-datchiki/rf603/> (Accessed at 14.02.2019). (Rus)

3. Contactless measuring system based on laser radar series MV300 from 02.2017.

URL: <https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2017/03/mv300.pdf> (Accessed at 15.05.2019). (Rus)

4. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara Kh., Kuma K., Khatate K. Fiber Optic Sensors. Leningrad: Energoatomizdat., Leningradskoe otделение, 1990. 256 p. (Rus)

5. Udd Eric, Spillman William. Fiber optic sensors an Introduction for Engineers and Scientists, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 506 p.

6. Bragynets I.O., Kononenko O.G., Masjurenko Yu.O. Analytical review and selection of optical laser systems for measuring air gaps in powerful hydrogenerators. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 49. Pp. 103-110. (Ukr)

7. Cozannet A., Fleuret J., Maitre H., Rousseau M. Optics and communications: Optical transmission and processing of information. Moskva: Mir, 1984. 504 p. (Rus)

8. Parvulusov Yu.B., Soldatov V.P., Yakushenkov Yu.G. Designing of optical-electronic devices: A manual for students of technical colleges. Moskva: Mashinostroenie, 1990. 432 p. (Rus)

9. Legkyi V.N., Galun B.V., Sankov O.V. Optoelectronic elements and devices for special-purpose systems. Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU, 2011. 455 p. (Rus)

10. Baranochnikov M.L. Receivers and radiation detectors. Part 2: Receivers of optical radiation. Moskva: DMK Press, 2017. 586 p.

11. Gauer G. Optical communication systems. Moskva: Radio i sviaz, 1989. 504 p. (Rus)

12. Zaitsev E.A., Kononenko A.G., Masjurenko Yu.A., Nizhenskyi A.D., Latenko V.I., Ornatskyi I.A. Special features of a phase-frequency method application in a laser ranging. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2008. No 6. Pp. 65-70. (Rus)

13. Bragynets I.O., Kononenko O.G., Masjurenko Yu.O. Application of the frequency-phase method for controlling the geometric parameters of objects. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 88-93. (Ukr)

14. Van Trees Harry L. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part 1: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 690 p.

15. Vygodskiy M.Ya. Handbook of higher mathematics. Moskva: Gosudarstvennoe izdanie fiziko-matematicheskoi literatury, 1958. 784 p. (Rus)

Надійшла 20.05.2019

Остаточний варіант 07.06.2019