

ЛАЗЕРНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ З ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМИ СЕНСОРАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

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@ied.org.ua

Розроблено та проаналізовано структурну схему лазерної вимірювальної системи з волоконно-оптичним сенсором для контролю повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора. В системі використано алгоритм почергового порівняння досліджуваного та опорного світлових потоків, що дає змогу зменшити вплив на результат вимірювання зазору нестабільності параметрів її окремих вузлів та блоків. Проведено аналіз основних похибок вимірювання, які можуть впливати на результат визначення зазору, та встановлено їхні значення. Бібл. 16, рис. 1.

Ключові слова: лазер, оптичне волокно, дифузне відбиття, частотна модуляція, кумулятивна фаза, спектральний аналіз.

В практиці проведення вимірювань значну долю із них складають вимірювання лінійних розмірів та переміщень, пов'язаних з контролем геометричних параметрів обладнання різного призначення. За складного або неможливого встановлення на контрольованому об'єкті оснащення, необхідного для проведення вимірювань, за високої температури об'єкту, його переміщенні або обертанні моніторинг обладнання передбачає безконтактне отримання вимірювальної інформації щодо лінійних розмірів контрольованого об'єкта або його елементів з похибкою 0,1..1,0 мм. Доцільним у даному випадку є використання безконтактних оптоелектронних вимірювальних систем (ОВС), побудованих на базі лазерних далекомірів.

Однією із задач, яку можна вирішити за допомогою ОВС, є контроль повітряних зазорів (проміжків) в електричних машинах, а саме в потужних гідрогенераторах. Повітряний зазор між ротором і статором, який може складати від 5 до 30 мм, є одним із найважливіших параметрів гідрогенератора. Розмір повітряного зазору значною мірою визначає характеристики генератора та його поведінку в процесі експлуатації [1]. Відхилення повітряного зазору від номінального значення може призвести до погіршення характеристик гідрогенератора, а також до аварійних ситуацій та його руйнування. Тому вдосконалення методів високоточної безконтактної діагностики лінійних параметрів гідрогенератора в робочому режимі і зараз є актуальною науково-технічною проблемою.

Авторами проведено аналітичний огляд найбільш близьких за вказаним призначенням відомих безконтактних ОВС.

В [2] розглянуто реалізацію ОВС на основі принципу триангуляції, за допомогою якої можливо здійснювати безконтактне вимірювання геометричних параметрів ротора навантаженого гідрогенератора в динаміці. Лазерний датчик закріплюється біля вентиляційного каналу осердя статору таким чином, щоб лазерне випромінювання було направлено по нормалі до поверхні ротора. Як оптичні сенсори використовуються триангуляційні лазерні датчики серій LS5 [3] або РФ603 [4]. В принципі, вказані датчики згідно їхніх характеристик в діапазоні переміщень до 100 мм забезпечують достатньо високі точність (похибка вимірювання 0,1%) та розрізняльну здатність (0,01%). Однак, під час використання датчиків треба враховувати деякі незручності їхнього встановлення на статорі гідрогенератора через його конструкцію. Крім того, на точність вимірювання зазору будуть впливати неминучі вібрації статора, а на сам датчик – вологість, яка виникає через використання системи охолодження в гідрогенераторах, та підвищена температура в місці встановлення датчика.

В [5, 6] запропоновано метод лазерної діагностики форми обертаючих об'єктів, заснований на лінійній модуляції частоти випромінювання лазера за трикутним законом. Запропонований частотний метод вимірювання відстані реалізовано в складі лазерної системи динамічного моніторингу геометрії навантаженого ротору гідрогенератора, який здійснюється шляхом визначення повітряного зазору між статором та ротором генератора. У даному випадку лазер закріплюють нерухомо на статорі генератора, а випромінювання лазера через технологічний канал направляють по нормалі до

поверхні ротора. В резонаторі лазера здійснюється змішування випромінюваного та прийнятого оптичних сигналів. За допомогою оптичного детектору виділяється низькочастотна складова, частота якої (частота биття) пропорційна відстані до поверхні ротора. По значенню цієї відстані визначається зазор між ротором і статором. Наголошується, що похибка вимірювання зазору в даному випадку не перевищує 1%. Разом з тим, проаналізувавши матеріали [5, 6], необхідно відмітити наступне. Відомо, що в частотних оптичних системах під час вимірювання відстані виникає постійна похибка або похибка дискретності, обумовлена періодичністю частотної модуляції. Усереднення декількох значень вимірюваної відстані задля оцінки зазору для кожного полюса ротора в даному випадку суттєво не зменшує похибку дискретності. Задля зменшення цієї похибки необхідно збільшувати девіацію частоти. Однак практичні можливості цього способу обмежені. Тому для радикального зменшення похибки дискретності застосовують більш складні частотні системи, одну з яких наведено в [7]. Також недоліком розглянутого пристрою, на наш погляд, є та обставина, що він закріплюється на статорі. За такого розміщення пристрою виникають незручності, пов'язані з конструкцією гідрогенератора, а також можливий вплив вібрацій статора на результат вимірювання зазору. Якщо пристрій розташовувати на деякій відстані від гідрогенератора, то збільшується похибка вимірювання. Крім того, у разі постійного контролю профілю ротора необхідно забезпечити безперервність лазерного випромінювання вздовж всієї дистанції.

Підсумовуючи результати аналізу відомих ОВС контролю повітряних зазорів в гідро-генераторах, можна зробити наступні висновки. В розглянутих системах виникають незручності під час розташування лазерних сенсорів на статорі гідрогенератора через особливості його конструкції. Крім того, треба враховувати, що конструктивно лазерний сенсор об'єднано з електронним вимірювальним блоком. У такому випадку на точність вимірювання повітряного зазору будуть впливати підвищена температура у зоні розташування пристрою та високий рівень електромагнітних завад, а на сам сенсор – вологість, яка виникає через використання системи охолодження в гідрогенераторах. За таких причин неможливо реалізувати потенційно високу точність розглянутих сенсорів. Використання високоточних лазерних ОВС [7], що працюють на деякій відстані від об'єкта, потребує чіткої орієнтації лазерного променя на поверхню полюсів ротора та забезпечення безперервності лазерного випромінювання на дистанції в робочому режимі гідрогенератора. Взагалі безперервне використання такої ОВС, яка є надзвичайно дорогою і має інше призначення, в даному разі недоцільно.

Враховуючи вищезгадане, альтернативним рішенням під час проектування ОВС для контролю повітряних зазорів гідрогенератора може бути застосування волоконно-оптичних сенсорів (ВОС), в яких основним елементом є оптичне волокно. Оптичні волокна можуть використовуватися як датчики для вимірювання температури, тиску, переміщень, вібрацій та інших фізичних величин. Для цього волокна, які мають різні властивості, використовують так, що вимірювана величина модулює інтенсивність, фазу, поляризацію, довжину хвилі або міняє час проходження світла у волокні. Як відомо, відмінною рисою ВОС є малий дрейф його характеристик, високі чутливість і точність, тривалий термін служби, висока стійкість до агресивних середовищ і вібрації, нечутливість до електромагнітних завад [8, 9].

ВОС можна поділити на сенсори, в яких оптичне волокно використовується як лінія передачі та прийому лазерного випромінювання, і сенсори, в яких оптичне волокно використовується як чутливий елемент. Серед останніх відомі сенсори переміщень, чутливим елементом яких є волоконна брегівська решітка, створена у середині волоконного світловода. Зовнішній вплив на світловод, обумовлений переміщенням, змінює спектр відбитого сигналу, що знаходить відображення в цифровому сигналі, сформованому системою реєстрації [10].

Для контролю повітряного зазору в гідрогенераторі, тобто в об'єкті, що обертається, доцільно використовувати перший варіант ВОС, до складу якого входять лазерний випромінювач, передавальні та приймальні оптичні волоконні лінії (ОВЛ) і фотоприймач [8]. Додатковими оптичними елементами сенсора можуть бути з'єднувачі, роз'єднувачі, об'єктиви, лінзи та інш. В даному випадку за чутливий елемент сенсора можна вважати саму відбиваючу поверхню ротора [8]. При цьому відсутні жорсткі вимоги до вибору довжини як передавальних, так і приймальних ОВЛ. Ця обставина дає змогу віддалити на задану відстань від контрольованого об'єкта електронне обладнання, призначене для перетворення та обробки оптичних сигналів, задля зменшення впливу на точність вимірювання зазору факторів, які виникають під час експлуатації об'єкта. Тому у [11] авторами запропоновано ОВС фазового типу для вимірювання повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора, побудований за описаною оптичною схемою В цьому сенсорі передавальне

та приймальне оптичні волокна встановлюються відносно нормалі до контрольованої поверхні ротора під однаковим кутом, який 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 від виходу з передавального волокна до поверхні ротора і, після відбиття від ротора, в зворотному напрямку до входу в приймальне волокно.

Хоча описаний сенсор має високу розрахункову точність, однак йому властиві недоліки. По-перше, його досить складно встановлювати на об'єкті у зв'язку з необхідністю забезпечення високої точності та стабільності кутів, під якими розміщено волокна. 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 викликати додаткову похибку вимірювання зазору, яка складає 0,1 мм. Задля підвищення точності вимірювання останню треба коректувати.

Виходячи із вищезазначеного, авторами запропоновано сенсор з іншою оптичною схемою [12], монтаж якого на об'єкті більш простий. На відміну від попередньої схеми передавальне та приймальне оптичні волокна розміщено по нормалі до поверхні ротора, причому в торці передавального волокна встановлено мікролінзу для розсіяння світла під певним кутом. Останній визначається з урахуванням апертури вибраного типу приймального волокна. Як відмічено в [12], для такої оптичної схеми потрібно було вибрати та обґрунтувати метод обробки її вихідного сигналу задля визначення відстані до контрольованого об'єкту. В зв'язку з цим в [12] запропоновано застосовувати частотно-фазовий метод вимірювання відстані, який, в порівнянні з фазовим методом, забезпечує за його практичної реалізації більш високу точність вимірювання за рахунок зменшення випадкових похибок. Крім того, задля підвищення чутливості під час вимірювання зазору можна використати можливість роботи частотно-фазової системи (ЧФС) в радарному режимі, тобто одночасно контролювати відстань до декількох контрольованих точок на поверхні. Для цього і встановлюється мікролінза в передавальному волокну. Оскільки вимірювана відстань в даному разі пропорційна частоті вихідного сигналу ЧФС, то в його спектрі будуть присутні додаткові частотні складові. В [12] проведено математичне моделювання перетворювальних процесів під час обробки оптичних сигналів, яке підтвердило можливість за значеннями амплітуд частотних складових визначити повітряного зазору.

Мета даної роботи – розробити та проаналізувати структурну схему ОВС для визначення повітряного зазору між ротором та статором в потужних гідрогенераторах, яка б об'єднувала запропонований волоконно-оптичний сенсор та апаратну реалізацію частотно-фазового методу для обробки його вихідних сигналів, які несуть інформацію щодо величини зазору.

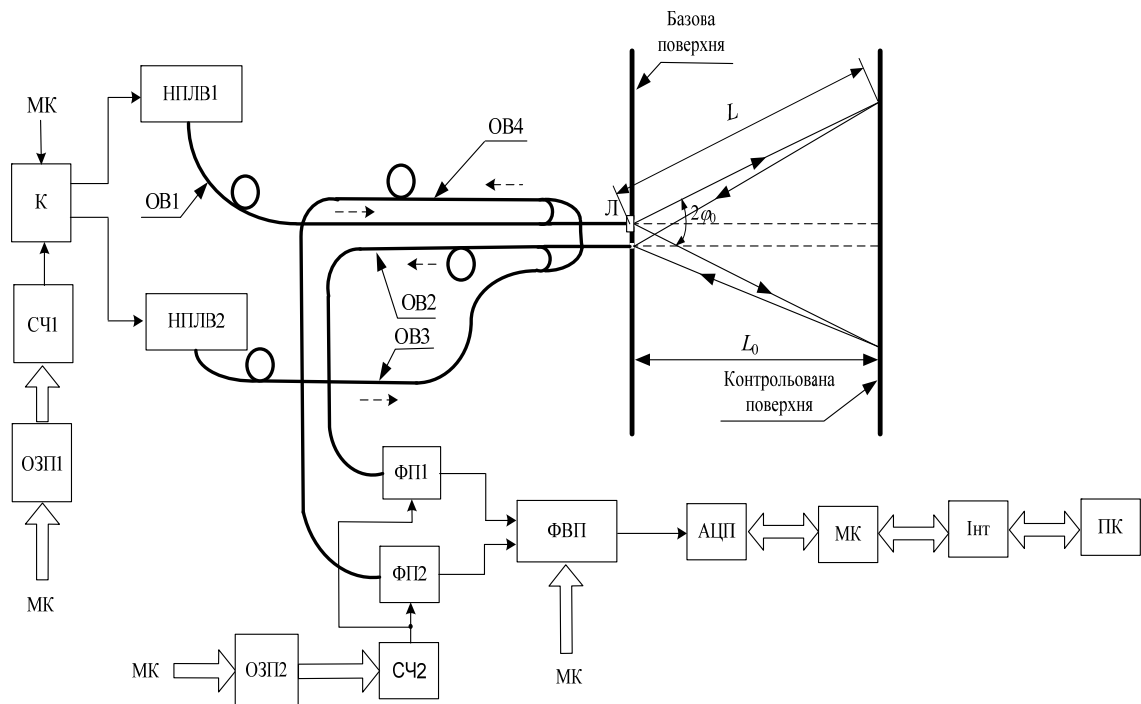
Відповідно до поставленої мети пропонується структурна схема волоконно-оптичної вимірювальної системи (ОВОС) для контролю повітряних зазорів, яку наведено на рисунку. На схемі прийнято наступні позначення: НПЛВ1, НПЛВ2 – напівпровідникові лазерні випромінювачі; К – комутатор; СЧ1, СЧ2 – синтезатори частоти; ОЗП1, ОЗП2 – оперативні запам'ятовуючі пристрої; ОВ1...ОВ4 – оптичні волокна; Л – мікролінза; ФП1, ФП2 – фотоприймачі; ФВП – фазовимірювальний перетворювач; АЦП – аналого-цифровий перетворювач напруги; МК – мікроконтролер; Інт – інтерфейс; ПК – персональний комп'ютер; L_0 – контрольований повітряний зазор.

В структурній схемі частотно-фазової системи, що розглядається, як і в фазовій системі, для оцінки фазового зсуву світлових потоків реалізовано алгоритм почергового порівняння досліджуваного та опорного світлових потоків, що дає змогу зменшити вплив на результат вимірювання короткочасної нестабільності параметрів фазовимірювального перетворювача ФВП. ОВОС працює в два такти.

В першому такті модульований по частоті за допомогою СЧ1 світловий потік, який випромінюється НПЛВ1, через закріплене на статорі волокно ОВ1 з мікролінзою Л в його торці направляється на поверхню ротора. Відбитий від контрольованої поверхні світловий потік через волокно ОВ2, яке теж закріплено на статорі, подається на фотоприймач ФП1. Одночасно світловий потік з другого виходу ОВ1 направляється на вхід волокна ОВ4 і, пройшовши його, попадає на вхід фотоприймача ФП2. При цьому вихідні сигнали ФП1 та ФП2, які працюють в гетеродинному режимі за допомогою ОЗП2 та СЧ2, відповідно дорівнюють

$$u_1' = U_{m1}' \sin(\omega_n t + \varphi_x + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_5); \quad u_2' = U_{m2}' \sin(\omega_n t + \varphi_1 + \varphi_4 + \varphi_6), \quad (1)$$

де U_{m1}' , U_{m2}' – амплітуди напруг u_1' , u_2' відповідно; ω_n – кутова проміжна частота; φ_x – фазовий зсув, обумовлений зазором L_0 ; φ_1 , φ_2 , φ_4 – фазові зсуви, що вносяться волокнами ОВ1, ОВ2, ОВ4 під час проходження по ним світлових потоків; φ_5 , φ_6 – фазові зсуви, що вносяться фотоприймачами ФП1 та ФП2 відповідно. Для спрощення прийнято, що початкові фази u_1' , u_2' дорівнюють нулю.



Фазовий зсув між напругами u_1' та u_2' , визначений ФВП, згідно з (1) відповідає формулі

$$\varphi_{\text{вим}}' = \varphi_x + \varphi_2 + \varphi_5 + \varphi_7 - \varphi_4 - \varphi_6 - \varphi_8, \quad (2)$$

де φ_7 , φ_8 – фазові зсуви, що вносяться вимірювальним та опорним каналами ФВП відповідно.

Значення $\varphi_{\text{вим}}'$ після перетворення за допомогою АЦП в цифрову форму запам'ятовується в пам'яті МК.

В другому такті до виходу СЧ1 за допомогою комутатора К замість НПЛВ1 підключається випромінювач НПЛВ2. В цьому випадку модульований за частотою світловий потік через волокно ОВ3 і другий вхід волокна ОВ2 подається на вхід фотоприймача ФП1. Одночасно модульований світловий потік з виходу НПЛВ2 через волокно ОВ3 та другий вхід ОВ4 направляється на вхід фотоприймача ФП2. При цьому вихідні сигнали ФП1 та ФП2 відповідно дорівнюють

$$u_1'' = U_{m1}'' \sin(\omega_n t + \varphi_3 + \varphi_2 + \varphi_5); \quad u_2'' = U_{m2}'' \sin(\omega_n t + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_6), \quad (3)$$

де φ_3 – фазовий зсув, який вносить волокно ОВ3.

Фазовий зсув між напругами u_1'' та u_2'' , який визначається ФВП у другому такті, дорівнює

$$\varphi_{\text{вим}}'' = \varphi_2 + \varphi_5 + \varphi_7 - \varphi_4 - \varphi_6 - \varphi_8. \quad (4)$$

Значення $\varphi_{\text{вим}}''$, оцифроване за допомогою АЦП, пересилається в МК. Згідно заданої програми МК обчислює різницю визначених фазових зсувів в цифрових еквівалентах в 1-му та в 2-му тактах $\varphi_{\text{вим}} = \varphi_{\text{вим}}' - \varphi_{\text{вим}}'' = \varphi_x$.

Таким чином, завдяки описаному алгоритму вимірювання та подальшому обчисленню отримане значення $\varphi_{\text{вим}}$ дорівнює фазовому зсуву φ_x і не залежить від фазових зсувів, що вносяться в процесі вимірювання оптичними волокнами, фотоприймачами та каналами фазовимірювального пристрою. Знайдені числові значення φ_x для кожної частоти модуляції світлового випромінювання, яка змінюється за лінійним законом на виході СЧ1, через інтерфейс Інт передаються в комп'ютер та запам'ятовуються. Далі за отриманими даними за допомогою комп'ютера згідно з [13] формується вихідний сигнал ЧФС, математична модель якого має вигляд [12]

$$u_i = U_{mi} \sin(\omega_0 + \Delta\omega_i) t, \quad (5)$$

де U_{mi} – амплітуда напруги; ω_0 – основна частота, пропорційна відстані $L_x = (l_1 + l_2 + L_0)$, в якій l_1 – довжина волокна ОВ1, l_2 – довжина волокна ОВ2; $\Delta\omega_i$ – приріст частоти, обумовлений роботою ЧФС в радарному режимі; t – поточний час; $i = 0, 1, 2, 3, \dots$

В [12] проведено аналітичні дослідження вихідного сигналу (5) з урахуванням параметрів волоконно-оптичного сенсора з метою оцінки додаткових спектральних складових сигналу, обумовлених радарним режимом роботи ЧФС. При цьому для спрощення математичних перетворень під час аналізу було прийнято $U_{mi} = 1$ В, а частоту ω_0 представлено у відносних одиницях, тобто $\omega_0 = \varphi_k / T_0$, де φ_k – кумулятивний фазовий зсув в ЧФС, T_0 – період вихідного сигналу системи в радіанах. В результаті аналізу виявлено, що ці спектральні складові визначаються сигналом, який представляє собою періодичну функцію

$$u(t) = 0,5 \cdot \beta \cdot t, \quad (6)$$

де

$$\beta = 7,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_0 \cdot L_0 / L_x. \quad (7)$$

В [12] знайдено амплітуди складових спектру сигналу (6) від 1-ої до n -ої, які дорівнюють

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

Таким чином, оцінивши значення амплітуди спектральної складової $b_1 = \beta$ як найбільш інтенсивної, можна використати (7) для обчислення повітряного зазору L_0 . В даному випадку визначення зазору здійснюється за результатами одного вимірювання за амплітудою найбільш інтенсивної спектральної складової, що вносить меншу похибку в результат оцінки зазору. Задля зменшення загальної випадкової похибки доцільно провести усереднення результатів декількох вимірювань.

Проаналізуємо складові похибки вимірювання повітряних зазорів, які можуть виникати під час використання ВОВС, побудованої згідно розробленої структурної схеми.

Сумарна похибка вимірювання зазору буде визначатися рівнем шумів на виході фотоприймача вимірювального каналу (ФП1), точністю та завадостійкістю фазового детектору, який входить до складу ФВП, нестабільністю та неідентичністю фазових характеристик оптичних волокон, фотоприймачів, вимірювального та опорного каналів ФВП. Як показано вище, остання складова похибки може бути суттєво зменшена за рахунок реалізації в системі алгоритму почергового порівняння досліджуваного та опорного світлових потоків. Слід зазначити, що ефективність застосування цього алгоритму залежить від частоти комутації оптичних сигналів за допомогою комутатора К. Остання вибирається за умови допустимих фазових флуктуацій, обумовлених короткочасною нестабільністю параметрів аналогових блоків системи, перерахованих вище. Як встановлено авторами із практичних досліджень, середньоквадратичне значення фазових флуктуацій, які мають, як правило, низькочастотний спектр, в одиницях довжини складає $\Delta L_{\text{фл}} \leq 0,02$ мм при частоті комутації 3...5 Гц.

Розглянемо похибку визначення зазору, обумовлену впливом шумів, присутніх у вихідному сигналі фотоприймача вимірювального каналу. В [12] оцінено співвідношення сигнал-шум ρ на виході фотоприймача волоконно-оптичного сенсора, яке дорівнює приблизно 700. З урахуванням значення ρ знайдемо випадкову похибку вимірювання переміщень у разі застосування частотно-фазового методу вимірювання відстані для оцінки повітряного зазору гідрогенератора. Прийемо, що діапазон зміни частоти модуляції частотно-фазової системи складає 25...100 МГц за вибраної базової відстані $L_x = 4$ м [13]. При цьому маємо на увазі, що в ЧФС за вибраних параметрів перетворення [13] кумулятивний фазовий зсув за час одного вимірювання дорівнює 4π . Тому для ЧФС випадкова похибка від дії шумів складатиме $\Delta L_{\text{ш}} = L_x / 4\pi\rho$. Якщо підставити в останній вираз значення $L_x = 4000$ мм і $\rho = 700$, то середньоквадратичне значення випадкової похибки $\Delta L_{\text{ш}} = 0,45$ мм. За рахунок усереднення результатів окремих вимірювань можна зменшити $\Delta L_{\text{ш}}$ до потрібних значень, наприклад, до $\Delta L_{\text{вип.}} = 0,04$ мм. При цьому число усереднень N може бути знайдено із співвідношення $N = (\Delta L_{\text{ш}} / \Delta L_{\text{вип.}})^2 \approx 125$.

В принципі, вимірювання повітряних зазорів в гідрогенераторах з похибкою не більше 0,05 мм потребує використання високоточних та завадостійких фазовимірювальних перетворювачів. Наприклад, для ЧФС із згаданими вище параметрами перетворення похибці вимірювання зазору 0,05 мм відповідає допустима похибка фазового детектору $\delta_{\text{ф}} = (9 \cdot 10^{-3})^\circ$. В нашому випадку, завдяки запропонованій структурній схемі ВОВС та застосуванню алгоритму почергового порівняння досліджуваного та опорного світлових потоків визначається різниця близьких за значенням малих фазових зсувів. Так, значенню зазору 10 мм відповідає фазовий зсув $1,8^\circ$. Тому знижуються вимоги до мультиплікативної складової похибки вимірювання фазових зсувів та до похибки від нелінійності характеристики фазового детектора, які взаємно компенсуються при реалізації зазначеного вище

алгоритму вимірювання. Однак на остаточний результат визначення зазору може впливати випадкова похибка вимірювання, обумовлена дією шумів та короткочасною нестабільністю інтенсивності прийнятого оптичного сигналу. Задля зменшення впливу вказаних завад доцільно використовувати ортогональне перетворення вимірювального сигналу з метою визначення його квадратурних складових [14]. За значеннями синусоїдальної та косинусоїдальної складових вимірювального сигналу обчислюється його фазовий зсув. Практичну реалізацію такого фазового детектора наведено в [15], а в роботі [16] показано, що за малих значень вимірювального фазового зсуву та використанні ортогонального перетворення вимірювального сигналу, похибка, обумовлена відхиленням значення фазового зсуву між опорними сигналами від 90° , для даного випадку є незначною.

Висновки. Розроблено та обґрунтовано структурну схему ОВС, в якій об'єднано відносно простий під час монтажу волоконно-оптичний сенсор та апаратну реалізацію частотно-фазового методу обробки вихідного сигналу сенсора задля визначення повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора. Використання в системі алгоритму почергового порівняння досліджуваного та опорного світлових потоків дає змогу зменшити вплив на результат вимірювання зазору короткочасної нестабільності параметрів оптичних волокон, фотоприймачів та каналів фазовимірювального перетворювача. Крім того, застосування в системі вказаного алгоритму вимірювання дає змогу використовувати світлові волокна досить великої довжини (десятки метрів). Це зумовлює одну із основних переваг ОВС, побудованої згідно розробленої структурної схеми, – на результат вимірювання зазору практично не впливають потужні електричні та магнітні поля гідрогенератора. Проведений аналіз основних похибок вимірювання підтвердив можливість контролювати повітряні зазори в гідрогенераторах із заданою точністю.

Роботу виконано в рамках бюджетної програми за темою № III-29-17 "Розвиток наукових засад методів та засобів вимірювання експлуатаційних параметрів обладнання електростанцій" (шифр – "ПАРАМЕТР"), КПКВК 6541030.

1. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою емнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.

2. Круглова Т.Н., Ярошенко И.В., Мельников М.А., Работалов Н.Н. Метод лазерной диагностики динамической формы ротора гидрогенератора. *Инженерный вестник Дона. Сетевое издание.* 2015. № 1. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Kruglova.pdf_30d454bee1.pdf (дата доступу 14.02.2021)

3. Лазерные триангуляционные датчики расстояния. Общие сведения. URL: <http://www.promsat.com/content/files/cat/prizma/LS5.pdf> (дата доступу 14.04.2021)

4. Триангуляционный лазерный датчик – РФ603. URL: <http://www.sensorika.com/ru/lazernye-triangulyatsionnye-datchiki/rf603/> (дата доступу 14.04.2021)

5. Куликов Д.В., Меледин В.Г., Двоишников С.В., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кротов С.В., Павлов В.А., Чубов А.С., Прибатурин Н.А. Метод лазерной диагностики динамической формы вращающихся объектов. *Современные проблемы науки и образования.* 2013. № 2. С. 12-19.

6. Kulikov D.V., Anikin Yu. A., Dvoishnikov S.V., Meledin V.G. Lazer technology for determining the geometry of a hydroelectric generator rotor under load. *Power Technology and Engineering.* 2011. Vol. 44. No 5. Pp. 411-416

7. Бесконтактная измерительная система на базе лазерного радара серии MV 300. URL: <https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2017/03/mv300.pdf> (дата доступу 22.03.2021)

8. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 256 с.

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

10. Волоконно-оптические измерительные системы. URL: <http://nevatec.ru/products/ndt/opticalfiber.html> (дата доступу 15.03.2021)

11. 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.49.103>

12. Брагинець І.О., Масюренко Ю.О. Волоконно-оптичний сенсор для лінійних вимірювань *Технічна електродинаміка.* 2019. № 6. С. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.081>

13. 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.

14. Глинченко А.С., Кузнецкий С.С., Фиштейн А.М., Чмых М.К. Цифровые методы измерения сдвига фаз. Новосибирск: Наука, 1979. 288 с.

15. Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Орнатский И.А., Сидорчук В.Е. Оптимальный преобразователь фаза-код для высокоточных фазовых светодальномеров. *Техническая электродинамика*. 1996. № 1. С. 61-64.

16. Брагинец И.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Волоконно-оптические измерители расстояний до диффузно-отражающих поверхностей. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2007. № 1(16). Ч. 2. С. 130-133.

LASER MEASURING SYSTEMS WITH FIBER-OPTICAL SENSORS FOR CONTROL OF LINEAR PARAMETERS OF MECHANICAL OBJECTS

I.O. Bragynets, Yu.O. Masjurenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: masjuriv@ied.org.ua

A block diagram of a laser measuring system with a fiber-optical sensor for monitoring the air gap between the rotor and stator of a hydrogenerator has been developed and analyzed. The system uses an algorithm for alternating comparison of the investigated and reference light fluxes. This makes it possible to reduce the influence on the measurement result of the gap of the instability of the parameters of individual units and blocks of such a system. The analysis of the main measurement errors, which can affect the result of determining the gap, is carried out. References 16, figure 1.

Keywords: laser, optical fiber, diffuse reflection, frequency modulation, cumulative phase, spectral analysis.

1. Levytskyi A.S., Fedorenko G.M., Gryboi O.P. Monitoring of powerful hydro- and turbogenerators by means of capacitive meters of parameters of mechanical defects. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. 242 p. (Ukr)

2. Kruglova T.N., Yaroshenko I.V., Melnikov M.A., Rabotalov N.N. Method of laser diagnostic of dynamic forms of hydraulic generator rotor. *Inzhenernyi vestnik Dona: Setevoe izdanie*. 2015. No 1. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Kruglova.pdf_30d454bee1.pdf (accessed at 14.02.2021). (Rus)

3. Laser triangulation distance sensors. General information. URL: <http://www.promsat.com//content/files/cat/prizma/LS5.pdf> (accessed at 14.04.2021). (Rus)

4. Laser Triangulation Sensor – RF603. URL: <http://www.sensorika.com/ru/lazernye-triangulyatsionnye-datchiki/rf603/> (accessed at 14.04.2021). (Rus)

5. Kulikov D.V., Meledin V.G., Dvoynishnikov S.V., Anikin Yu.A., Bakakin G.V., Glavnyy V.G., Krotov S.V., Pavlov V.A., Chubov A.S., Pribaturin N.A. Method of laser diagnostics of dynamic form of rotating objects. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniia*. 2013. No 2. Pp. 12-19. (Rus)

6. Kulikov D.V., Anikin Yu.A., Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G. Lazer technology for determining the geometry of a hydroelectric generator rotor under load. *Power Technology and Engineering*. 2011. Vol. 44. No 5. Pp. 411-416.

7. Non-contact measuring system based on laser radar MV 300 series. URL: <https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2017/03/mv300.pdf> (accessed at 22.03.2021). (Rus)

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

9. Udd Eric, Spillman William. Fiber optic sensors an Introduction for Engineers and Scientists, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 506 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118014103>

10. Fiber Optic Measuring Systems. URL: <http://nevatec.ru/products/ndt/opticalfiber.html> (accessed at 15.03.2021) (Rus)

11. 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) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.49.103>

12. Bragynets I.O., Masjurenko Yu.O. Fiber optical sensor for linear measurements. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 81–87. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.081>

13. Zaitsev Ye.A., Kononenko A.G., Masjurenko Yu.A. Features of the application of the phase-frequency method in laser ranging. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2008. No 6. Pp. 65-70. (Rus)

14. Hlinchenko A.S., Kuznetskii S.S., Fishtein A.M., Chmyh M.K. Digital methods of measuring the phase shift. Novosibirsk: Nauka., 1979. 288 p. (Rus)

15. Kononenko A.G., Masjurenko Yu.A., Nizhenskii A.D., Ornatskii I.A., Sidorchuk V.Ye. Optimal phase-to-code converter for high precision phase rangefinders. *Tekhnicheskaya Elektrodynamika*. 1996. No 1. Pp. 61-64. (Rus)

16. Bragynets I.O., Kononenko O.G., Masjurenko Yu.O., Nizhenskii A.D. Fiber-optical distance meters to diffusely reflecting surfaces. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2007. Part 2. No 1(16). Pp. 130-133. (Rus)

Надійшла 27.05.2021