

УДК 681.586.772

Ф.Б. Гриневич акад. НАН України, **О.М. Саволук**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Похибки коаксіально-циліндричних давачів емнісних рівнемірів

Досліджено похибки коаксіально-циліндричних давачів емнісних рівнемірів, наведено також спрощені співвідношення для їх розрахунків та таблицю для практичної оцінки похибок. Бібл. 11, таблиця.

Ключові слова: емність, рідина, рівень, похибка.

F.B. Grynevych, **A.M. Savoluk**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Errors of coaxial-cylindrical transducers for capacitance levelmeters

The questions of accuracy of coaxial-cylindrical level sensors are considered, simplified expression, table for practical assessment of parameters and value errors are obtained. References 11, table.

Key words: capacitance, liquid, level, error.

Надійшла 28.12.2017

Received 28.12.2017

УДК 621.317

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ВИБІР ОПТИЧНИХ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЗАЗОРІВ У ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ

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

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: masjuriy@ied.org.ua

Проведено аналіз відомих оптичних лазерних систем (ОЛС) для вимірювання лінійних розмірів та переміщень механічних об'єктів з метою їх застосування для визначення повітряних зазорів потужних гідрогенераторів. Встановлено фактори, які брались до уваги при розгляді вказаних ОЛС. Відмічено властивості конструкції гідрогенераторів і вимоги до точності та часу однократного вимірювання повітряного зазору. Розглянуто основні методи вимірювання відстані, на яких базуються ОЛС, і визначено переваги та недоліки кожного з них. Вказано на доцільність використання волоконно-оптичних ліній для передачі та прийому лазерного випромінювання. На основі результатів досліджень вироблено рекомендації по застосуванню ОЛС. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: повітряний зазор, гідрогенератор, лазер, фазовий зсув, частотна модуляція.

Для визначення геометричних параметрів об'єктів, що обертаються або нагріваються до високої температури, а також об'єктів, конструкція яких ускладнює встановлення відповідних сенсорів для їх контролю, застосовуються оптичні методи вимірювання відстані. Авторами проведено огляд та аналіз оптичних лазерних систем (ОЛС) для вимірювання лінійних розмірів та переміщень механічних об'єктів різного призначення з метою діагностики їх стану. Серед останніх особливу увагу було приділено системам для безконтактного контролю повітряних зазорів у електричних машинах, а саме в гідрогенераторах. Повітряний зазор між ротором і статором є одним з найважливіших параметрів гідрогенератора. Розмір повітряного зазору значною мірою визначає характеристики генератора і його поведінку в процесі експлуатації [1]. Відхилення повітряного зазору від номінального значення може призвести до погіршення характеристик гідрогенератора, а також до аварійних ситуацій та руйнування генератора. Тому вдосконалення методів високоточної безконтактної діагностики геометричних параметрів гідрогенератора є і зараз актуальною науково-технічною проблемою.

Мета роботи – провести аналіз відомих ОЛС для вимірювання повітряних зазорів та на його основі виробити рекомендації для розробників і споживачів зазначених систем по їх застосуванню.

Вказані дослідження проводились в Інституті електродинаміки НАН України у відділі електричних і магнітних вимірювань у рамках виконання завдання по науково-дослідній темі «Параметр». Джерелами для таких досліджень були матеріали патентів та опублікованих науково-технічних видань, а також інформативних матеріалів, розміщених в Інтернеті.

При розгляді відомих науково-технічних рішень ОЛС вказаного призначення до уваги брались такі фактори:

- конструкція об'єкта контролю та його характеристики;
- відстань до об'єкта контролю;
- обмеженість простору для розміщення лазерного сенсора;
- режим роботи об'єкта (статичний, динамічний), в якому необхідно контролювати його параметри;
- точність, яка необхідна для вимірювання діагностичних параметрів об'єкта;
- швидкість переміщення або обертання об'єкта;
- форма представлення результатів вимірювання параметрів об'єкта;
- існування зовнішніх несприятливих умов для функціонування системи.

Вибраний в якості об'єкта контролю потужний гідрогенератор характеризується такими властивостями.

Залежно від типу гідрогенератора повітряний зазор між статором та ротором може складати від 5 до 30 мм [1]. При цьому похибка вимірювання зазору для його ефективного контролю в статичному та динамічному режимах роботи гідрогенератора не повинна перевищувати 50...100 мкм. Що стосується вимог до швидкодії вимірювальної лазерної системи, то вони визначаються, по-перше, номінальною частотою обертання ротора, а по-друге, числом полюсів гідрогенератора, які підлягають контролю лазерним сенсором. Якщо взяти до уваги параметри тих потужних гідрогенераторів, які виготовляються або експлуатуються в Україні [2], то час одного вимірювання зазору повинен складати не більше 5...10 мс. Тому для забезпечення заданої точності вимірювання зазору необхідно проводити усереднення результатів окремих вимірювань. У цьому випадку лазерна система повинна мати пристрій синхронізації для відповідної ідентифікації полюсів гідрогенератора при виконанні вимірювань у динамічному режимі для одержання даних про відхилення форми ротора та статора, ексцентриситету та перекосів осі обертання ротора.

Необхідно також при виборі ОЛС враховувати складні зовнішні умови, в яких знаходиться гідрогенератор: підвищені температура та вологість, високий рівень електромагнітних завад, вібрації об'єкта.

Згідно зі згаданими вище обставинами було розглянуто відомі принципи побудови та обладнання ОЛС, які відповідають їм повною мірою або частково. Треба одразу підкреслити, що серед переглянутих джерел не виявилось великої кількості прикладів побудови ОЛС вказаного призначення. Перейдемо до їх розгляду.

Як правило, ОЛС для визначення повітряних зазорів гідрогенераторів побудовані з використанням різних оптичних методів вимірювання невеликих відстаней від встановленого обладнання до контрольованого об'єкта. До таких методів можна віднести метод оптичної триангуляції, фазовий, частотний та частотно-фазовий методи.

Метод оптичної триангуляції є найбільш точним для безконтактного вимірювання переміщень об'єктів. Але разом з тим оптичним сенсорам, побудованим на його основі, характерні складність конструкції, трудомісткість монтажу на об'єктах, сприятливість оптики до забруднень навколишнього середовища та завад. Крім того, з віддаленням від об'єкта точність вимірювання зменшується.

Найбільш розповсюдженим є фазовий метод вимірювання відстані, який може бути реалізовано у двох варіантах: на частоті лазерного випромінювання та на частоті модуляції його інтенсивності. У першому випадку вимірювання відстані здійснюється інтерференцій-

ним методом, який в принципі дає змогу отримати точність вимірювання долі та одиниці мікрон. Однак через значні складності організації таких вимірювань в умовах експлуатації гідрогенераторів, інтерференційний метод у даному випадку неприйнятний. У той же час фазовий метод вимірювання відстані на частоті модуляції, який на сьогодні досконально досліджено, може бути розглянуто для використання в ОІС для визначення повітряних зазорів в гідрогенераторах.

Останнім часом завдяки досягненням у лазерних технологіях та розвитку сучасної елементної бази є можливість практичної реалізації оптичного частотного методу вимірювання відстані. Суть методу полягає в частотній модуляції (ЧМ) лазерного випромінювання і зводиться до вимірювання приросту частоти за час розповсюдження ЧМ сигналу до відбивача (контрольованої поверхні), який знаходиться на відстані L_x , та в зворотному напрямку [3]. Якщо частота f_e випромінюваних коливань змінюється за лінійним законом, тобто збільшується або зменшується з постійною швидкістю $v = df/dt$, то зміна частоти за час $\tau_{2L_x} = 2L_x/c$, де c – швидкість світла, складає $\Delta f_e = v\tau_{2L_x} = 2L_x/c$. Вимірявши $\Delta f_e = f_e - f_n$, де f_n – частота прийнятих коливань, за формулою $L_x = c \cdot \Delta f_e / 2v$ можна обчислити значення L_x . Оскільки безперервна зміна частоти за лінійним законом практично неможлива, тому використовується періодична модуляція частоти. В цьому випадку частотна модуляція може здійснюватись за пилоподібним, трикутним та синусоїдальним законами. На рис. 1 показана часова діаграма роботи лазерного далекоміра, побудованого на основі трикутної лінійної частотної модуляції. Верхній графік характеризує зміну частоти випромінюваних (безперервна лінія) та прийнятих (пунктирна лінія) коливань лазера, які мають період модуляції T_m та девіацію частоти ΔF . Нижній графік відтворює зміну різницевої частоти Δf_e (частоти биття).

Якщо виконуються умови $\tau_{2L_x} \ll T_m$, то $L_x = \frac{c}{4\Delta F} \cdot \frac{\Delta f_e}{F_m}$, де F_m – частота модуляції. З останнього виразу видно, що відстань L_x , яка визначається, прямо пропорційна частоті биття Δf_e . Вимірявши Δf_e , можна оцінити L_x .

Враховуючи періодичність частотної модуляції, зазначимо, що при вимірюванні Δf_e виникає постійна похибка або похибка дискретності [3], а звідси і похибка вимірювання L_x . Остання не залежить від вимірювальної відстані і

визначається виразом $\Delta L_x = \frac{c}{4\Delta F}$, з якого витікає,

що для зменшення похибки необхідно збільшувати девіацію частоти ΔF . Однак практичні можливості цього способу обмежені. Так, наприклад, якщо похибка вимірювання L_x не повинна перевищувати 0,05 мм, девіація частоти ΔF складатиме $1,5 \cdot 10^{12}$ Гц, чого досягти досить складно. Тому для радикального зменшення похибки дискретності застосовують більш складні частотні системи. Для прикладу можна привести оптичну вимірювальну систему [4], яка створена на базі лазерного радара серії MV300 фірмою Metris (Бельгія). Зовнішній вигляд такої системи показано на рис. 2. З її використанням відстань визначається з високою точністю (10 мкм + 2,5 мкм/м). Вказана точність досягається за допомогою лазерного далекоміра, при створенні якого задіяна запатентована технологія з частотною модуляцією лазерного когерентного радара. При цьому девіація частоти дорівнює 100 ГГц. Така система є досить дорогою (ціна складає приблизно 50 тис. дол. США).

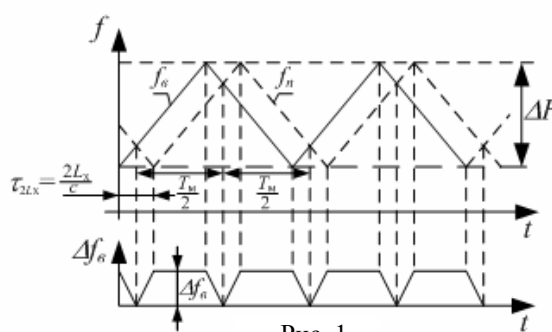


Рис. 1



Рис. 2

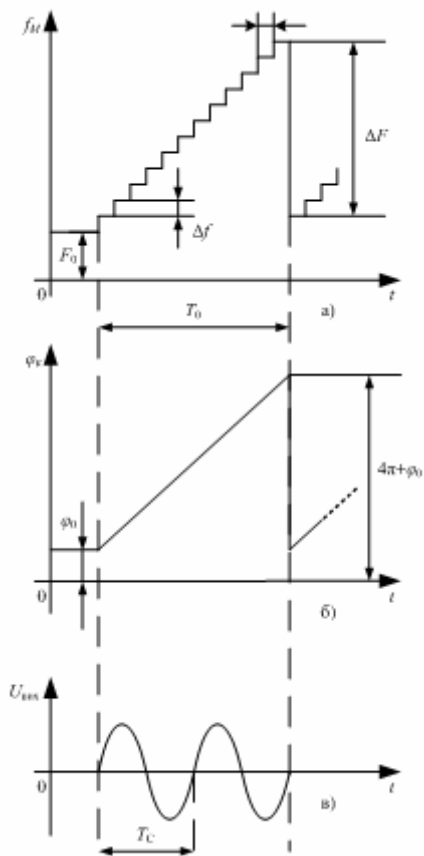


Рис. 3

Альтернативою частотному методу вимірювання відстані є комбінований (частотно-фазовий) метод, коли частота модуляції випромінюваних лазером електромагнітних коливань F_M , що спрямовуються на контрольований об'єкт, не є постійною, як у фазових системах, а періодично змінюється за лінійним законом від початкового F_0 до максимального значення $(F_0 + \Delta F)$, де ΔF – приріст частоти модуляції за вибраний час її зміни T_0 (рис. 3).

Тоді кумулятивний фазовий зсув φ_k (набіг фази) огинаючих електромагнітного сигналу, що спрямовується на об'єкт, та відбитого від нього сигналу за час T_0 визначається формулою $\varphi_k = 2\pi \cdot 2L_x \cdot \Delta F / c$.

Звідси кутова частота вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$ частотно-фазової системи, який може бути сформований за результатами перетворювального процесу, дорівнює

$$\omega_0 = \frac{\varphi_k}{T_0} = \frac{4\pi \cdot L_x \cdot \Delta F}{c \cdot T_0} = kL_x,$$

де k – постійний коефіцієнт, $k = 4\pi \cdot \Delta F / cT_0$. Як бачимо з останнього виразу, ω_0 прямо пропорційна відстані до об'єкта, що визначає її як інформативний параметр.

Авторами протягом останніх 5...10 років запропоновано та досліджено принципи побудови частотно-фазових далекомірів оптичного діапазону. В опублікованих роботах [5, 6] розглянуто особливості практичної реалізації частотно-фазового методу в лазерній далекометрії з використанням

цифрової обробки досліджуваних сигналів, описано алгоритми функціонування далекомірів та його структурні схеми, а також проаналізовано похибки вимірювання відстані та запропоновано методи їх корекції. У попередніх дослідженнях, проведених авторами за цією тематикою, встановлено, що похибка вимірювання відстані залежно від обраних параметрів перетворювальних процесів може складати 0,1...1,0 мм.

Треба зазначити, що частотні та частотно-фазові оптичні вимірювальні системи є більш завадостійкими, ніж фазові системи. Ще однією перевагою частотних та частотно-фазових систем є можливість їх роботи в радарному режимі, що розширює сферу застосування таких систем. Разом з тим у порівнянні з фазовими системами вони більш складні для практичної реалізації.

Тепер перейдемо до огляду відомих практичних реалізацій лазерних систем для вимірювання повітряних зазорів гідроенераторів.

У роботі [7] розглянуто реалізацію ОЛС на основі принципу тріангуляції, за допомогою якої можливо здійснювати безконтактне вимірювання геометричних параметрів ротора навантаженого гідроенератора в динаміці. Лазерний датчик закріплюється біля вентиляційного каналу осердя статора таким чином, щоб лазерне випромінювання було спрямовано по нормалі до поверхні ротора. Наскільки ми зрозуміли з цієї публікації, в якості оптичного сенсора використовуються тріангуляційні лазерні датчики серій LS5 [8] (рис. 4) або РФ603 [9] (рис. 5). В принципі вказані датчики згідно з їх характеристикою в діапазоні переміщень до 100 мм забезпечують досить високі точність (похибка вимірювання 0,1%) і розрізнявальну здатність (0,01%). Однак при використанні датчиків треба враховувати деякі незручності їх установки на статорі гідроенератора 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 гідроенераторах. У згаданій публікації [7] відмічається, що розроблена ОЛС випробувана на діючих гідроагрегатах для оцінки профілю ротора та биття його валу.



Рис. 4



Рис. 5

В [10, 11] запропоновано метод лазерної діагностики форми обертаючих об'єктів, який засновано на лінійній модуляції частоти випромінювання лазера за трикутним законом. Запропонований частотний метод вимірювання відстані реалізовано в складі лазерної системи для динамічного моніторингу геометрії навантаженого ротора гідрогенератора, який здійснюється шляхом визначення повітряного зазору між статором та ротором генератора. У цьому випадку лазер закріплюють нерухомо на статорі генератора, а випромінювання лазера через технологічний канал спрямовують по нормалі до поверхні ротора. В резонаторі лазера здійснюється змішування випромінюваного та прийнятого оптичних сигналів. За допомогою оптичного детектора виділяється низькочастотна складова, частота якої (частота биття) пропорційна відстані до поверхні ротора. За значенням цієї відстані визначається зазор між ротором і статором. Для підвищення точності вимірювання зазору для кожного його полюса проводиться накопичення та усереднення вимірюваної відстані за декілька періодів обертання ротора. Наголошується, що похибка вимірювання зазору в даному разі не перевищує 1%. У розглянутих матеріалах відмічається, що запропонований метод лазерного контролю профілю ротора показав свою працездатність в реальних умовах експлуатації гідрогенераторів.

Разом з тим, аналізуючи матеріали [10, 11], необхідно зазначити наступне.

Як вже відмічалось, у частотних оптичних системах при вимірюванні відстані виникає постійна похибка або похибка дискретності, обумовлена періодичністю частотної модуляції. Усереднення декількох значень вимірюваної відстані для оцінки зазору для кожного полюса ротора в даному випадку суттєво не зменшує похибку дискретності. Для зменшення цієї похибки необхідно збільшувати девіацію частоти ΔF (див. рис. 1). Однак, як було показано вище на конкретному прикладі, практичні можливості цього способу обмежені. Тому для радикального зменшення похибки дискретності застосовують більш складні частотні системи, одна з яких вже була наведена в [4]. На жаль, в [10, 11] не розкривається, яким чином при зазначеній точності вимірювання зазору здійснюється частотна модуляція лазерного випромінювання. Також недоліком розглянутого пристрою, на погляд авторів, є та обставина, що він закріплюється на статорі. При цьому виникають незручності при розміщенні пристрою, пов'язані з конструкцією гідрогенератора, а також можливий вплив вібрацій статора на результат вимірювання зазору. Якщо пристрій розмішувати на деякій відстані від гідрогенератора, то збільшується похибка вимірювання. Крім того, при сталому контролі профілю ротора необхідно в такому випадку забезпечити безперервність лазерного випромінювання за дистанцією.

У статті [12] запропоновано одну із перспективних оптичних лазерних систем для вимірювання зазорів на базі фазового далекоміра, в якій для передачі та прийому лазерного випромінювання використовуються волоконно-оптичні лінії (ВОЛ). Розглянемо більш детально оптичну схему системи, яку зображено на рис. 6.

До схеми входять лазерний випромінювач ЛВ, передавальне В1 і приймальне В2 оптичні волокна та фотоприймач ФП. На рисунку статор та ротор гідрогенератора умовно показано у вигляді прямих ліній, відстань між якими відповідає повітряному зазору. Останній обчислюється з використанням результатів вимірювання відстані, яку проходить лазерне випромінювання від оптичного волокна В1 до поверхні ротора і, відбившись від ротора, в зво-

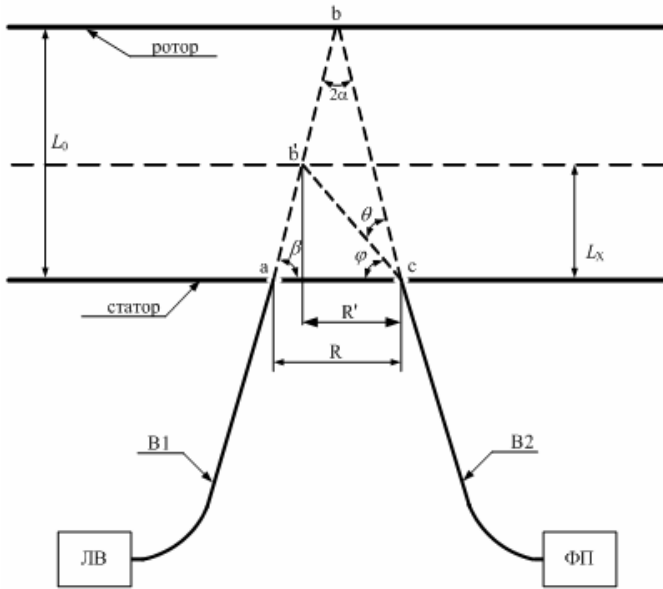


Рис. 6

ротному напрямку до входу в оптичне волокно В2. У роботі проведено оцінку можливого діапазону зміни значень зазору, що вимірюється за допомогою оптичної схеми, яка розглядається, а також відношення сигнал-шум на виході фотоприймача за умови, що потужність випромінювання на виході передавального оптичного волокна В1 складає 20 мВт. Відзначимо, що в якості В1 і В2 використовується багатомодове оптичне волокно з діаметром осердя, рівним 50 мкм, і діаметром оболонки, що становить 0,9 мм. Відповідно до рис. 6 оптичні волокна В1 і В2 встановлюються відносно нормалі до контрольованої поверхні ротора під кутом $\alpha = \arctg 0,5R/L_0$, де R – відстань між центрами осердь В1 і В2, а L_0 – номінальне значення

зазору між ротором і статором генератора (прийнято, що $L_0 = 10$ мм). Також через θ позначено кут введення відбитого світлового випромінювання в приймальне волокно В2. При $L_x = L_0$, де L_x – поточне значення зазору, $\theta = 0$. Якщо $L_x < L_0$, то θ набуває значення $\theta = \pi/2 - \alpha - \varphi$, де φ – кут між напрямом відбитого світлового променя і лінією, що сполучає центри осердь В1 і В2. Враховуючи параметри обраного оптичного волокна, обчислено максимально допустиме значення θ , яке не повинно перевищувати $\theta_{\max} = 0,212$ рад. Для оптичної схеми, що розглядається, в діапазоні $L_x = 4 \dots 10$ мм значення θ не перевищує 0,17 рад, тобто менше θ_{\max} . Якщо зазор, що вимірюється, менше 4 мм, необхідно встановити ще один волоконно-оптичний сенсор з іншими геометричними параметрами.

Для оцінки точності системи з використанням запропонованої оптичної схеми знайдено значення відношення сигнал-завада ρ на виході фотоприймача ФП. Для цього, враховуючи параметри оптичної схеми, визначено потужність оптичного випромінювання, яке потрапляє в приймальне волокно В2, та діюче значення шумів на виході фотоприймача. Звідси оцінено ρ , яке дорівнює приблизно 550.

Аналізуючи оптичну схему, яка розглядається, можна зробити висновок, що в діапазоні вимірювальних зазорів виникає похибка вимірювання, обумовлена нелінійністю характеристики перетворення відстані у відповідний інформативний параметр. Оскільки в роботі такі розрахунки не проведені, спробуємо оцінити тут згадану похибку від нелінійності.

Відповідно до рис. 6 при поточному значенні зазору L_x , який потрібно визначити, довжину відрізка $a-b'$ позначимо через l_1 , а відрізка $b'-c$ – через l_2 . Тоді $L_x = l_1 \sin \beta$. З іншого боку, нам відомо значення $S = l_1 + l_2$. Щоб оцінити L_x , треба знайти значення $l_1 = S - l_2$. Для гострокутного трикутника $ab'c$ маємо

$$l_2^2 = l_1^2 + R^2 - 2Rl_1 \cos \beta. \quad (1)$$

Враховуючи, що $l_2 = S - l_1$, можна записати

$$(S - l_1)^2 = l_1^2 + R^2 - 2Rl_1 \cos \beta. \quad (2)$$

З виразу (2) після проведення його математичних перетворень можна знайти значення для l_1 :

$$l_1 = \frac{S}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{R^2}{S^2}\right)}{\left(1 - \frac{R}{S} \cos \beta\right)}. \quad (3)$$

Тоді значення L_x може бути обчислено за формулою

$$L_x = l_1 \sin \beta = \frac{S}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{R^2}{S^2}\right)}{\left(1 - \frac{R}{S} \cos \beta\right)} \cdot \sin \beta. \quad (4)$$

При $L_x = L_0$ (рис. 6) формула (4) має вигляд

$$L_0 = \frac{S}{2} \cdot \sin \beta, \quad (5)$$

де S – це сума довжин відрізків ab і bc . Якщо порівняти формули (4) та (5), то можна зробити висновок, що похибка від нелінійності при оцінці L_x визначається у формулі (4) співмножни-

ком $\frac{\left(1 - \frac{R^2}{S^2}\right)}{\left(1 - \frac{R}{S} \cos \beta\right)}$. Так, наприклад, якщо мінімальна вимірювальна відстань (зазор) $L_x = 5$ мм, а

$R = 2$ мм, то, враховуючи геометричні параметри оптичної схеми, похибка від нелінійності у відносних одиницях складатиме 0,02, а в одиницях довжини – відповідно 0,1 мм. Для її зменшення треба вибирати менше значення R , але при цьому погіршується поріг чутливості схеми. Тому більш доцільним є застосування методу корекції похибки від нелінійності, додатково розробленому для цієї системи.

Як вже відмічалось, у системі використовується фазовий метод вимірювання відстані. Для цього вибрано відповідну структурну схему, за допомогою якої реалізується алгоритм періодичного порівняння досліджуваного та опорного світлових потоків. Це дає змогу визначити основний фазовий зсув, пропорційний вимірювальній відстані, та уникнути впливу на нього фазових зсувів, які вносяться оптичними волокнами, фотоприймачами та каналами фазовимірювального пристрою. Вибір відповідної частоти комутації світлових потоків суттєво зменшує вплив на результат вимірювання фазових флуктуацій аналогових ланок системи. В якості фазовимірювального пристрою використовується оптимальний з точки зору завадостійкості перетворювач фаза-код з самокорекцією, в якому фазовий детектор побудовано на застосуванні цифрового перетворення Гільберта. У роботі проаналізовано та розраховано складові похибки вимірювання зазору та оцінено результуючу похибку, яка складає 0,04 мм (без врахування похибки від нелінійності).

Висновки. 1. При розробці нової ОЛС для вимірювання повітряних зазорів гідрогенераторів або при виборі відомих науково-технічних рішень для її реалізації необхідно враховувати зазначені фактори, пов'язані з вимогами до точності та часу вимірювання, режимами роботи системи, умовами експлуатації, складністю монтажних робіт при розміщенні обладнання.

2. При проведенні робіт, які пов'язані з установкою та монтажем гідрогенератора, тобто в статичному режимі, та при проведенні профілактичних робіт можна будувати ОЛС з використанням стандартних триангуляційних оптичних сенсорів.

3. При роботі гідрогенератора як в статичному, так і в динамічному режимі при його навантаженні для забезпечення постійного контролю повітряного зазору доцільно застосовувати оптичну схему з оптоволоконними лініями зв'язку для підведення лазерного випромінювання та приймання відбитого від ротора випромінювання. Для подальшої обробки оптичних сигналів з метою визначення повітряних зазорів можна використати фазовий, частотний або частотно-фазовий методи вимірювання відстані. Відповідне обладнання повинно бути віднесено на деяку відстань від гідрогенератора.

1. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.
2. Гидрогенераторы: [каталог]. [Харьков: Государственное предприятие завод "Электротяжмаш"]. 24 с.
3. Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогодезические и электрооптические из-

- мерения: уч. для вузов. Москва: Недра, 1985. 303 с.
4. Бесконтактная измерительная система на базе лазерного радара серии MV 300 от 02.2017 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://nevatec.ru/wp-content/uploads/2016/10/mv300.pdf>
 5. 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.
 6. Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Латенко В.И., Орнатский И.А. Специфические погрешности фазово-частотных лазерных измерителей расстояния. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 3. С. 50–54.
 7. Круглова Т.Н., Ярошенко И.В., Мельников М.А., Работалов Н.Н. Метод лазерной диагностики динамической формы ротора гидрогенератора. *Инженерный вестник Дона: электрон. науч. журн.* 2015. №1. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Kruglova.pdf_30d454bee1.pdf
 8. <http://www.promsat.com/content/files/cat/prizma/LS5.pdf>
 9. <http://www.sensorika.com/ru/lazernye-triangulyatsionnye-datchiki/rf603/>
 10. Пат. РФ № 2469264, МПК G01B 11/14; H02K 15/00. Лазерное устройство для измерения воздушного зазора электрической машины / Д.В. Куликов, С.В. Двойнишников, Ю.А. Аникин, В.Г. Меледин, И.В. Намумов, С.В. Кротов, В.Г. Главный, В.В. Рахманов, Г.В. Бакакин, В.А. Павлов, К.В. Шпольвинд, И.К. Кабардин, А.С. Чубов (РФ). Опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.
 11. Куликов Д.В., Меледин В.Г., Двойнишников 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 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://docplayer.ru/43957954-Method-of-laser-diagnostics-of-dynamic-form-of-rotating-objects.html>
 12. Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Лазерный волоконно-оптический измеритель зазоров в гидрогенераторах. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 2. С. 51–58.

УДК 621.317

И.А. Брагинец, канд. техн. наук, **А.Г. Кононенко**, канд. техн. наук, **Ю.А. Масюренко**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

Аналитический обзор и выбор оптических лазерных систем для измерения воздушных зазоров в мощных гидрогенераторах

Проведен анализ известных оптических лазерных систем (ОЛС) для измерения линейных размеров и перемещений объектов, в том числе вращающихся объектов или нагретых до высокой температуры, а также объектов, конструкция которых усложняет установку соответствующих сенсоров для их контроля. Целью исследований является оценка возможности использования указанных ОЛС для определения воздушных зазоров мощных гидрогенераторов. При этом обозначены факторы, которые принимались во внимание при рассмотрении таких систем. Отмечены особенности конструкции гидрогенераторов и требования к точности и времени однократного измерения воздушного зазора. Рассмотрены основные методы измерения расстояния, на которых базируются ОЛС, и определены преимущества и недостатки каждого из них при практической реализации систем. С учетом конструкции гидрогенератора и условий его эксплуатации указано на целесообразность использования волоконно-оптических линий для передачи и приема лазерного излучения. На основании результатов исследований разработаны рекомендации по применению ОЛС. Библиограф. 12, рис. 6.

Ключевые слова: воздушный зазор, гидрогенератор, лазер, фазовый сдвиг, частотная модуляция.

I. Bragynets, O. Kononenko, Yu. Masjurenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Analytical review and choice of optical laser systems for measuring air gaps in powerful hydrogenerators

The work analyzes the known optical laser systems (OLS) for measuring linear dimensions and displacements of objects, including rotating objects or heated to high temperatures. The purpose of the studies is to assess the possibility of using these OLS for determining the air gaps of powerful hydrogenerators. The factors that were taken into account when considering such systems are indicated. The features of hydrogenerators design and the requirements for the accuracy and time of a single measurement of the air gap are noted. The main methods of the distance measuring on which the OLS is based are considered, and the advantages and disadvantages of each of them are determined in the practical implementation of the systems. Taking into account the design of the hydrogenerator and the conditions of its operation, it is indicated on the expediency of using fiber-optic lines for the transmission and reception of laser radiation. The recommendations on the application of the OLS, based on the results of the research, were developed. References 12, figure 6.

Key words: air gap, hydrogenerator, laser, phase shift, frequency modulation.