

УДК 621.822.681.2:369.64

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-13

Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ

В роботі розглянуто оптимальну конструкцію оптоелектронного сенсора. Він характеризується здатністю вимірювати переміщення в міліметровому діапазоні з субмікрометричною роздільною здатністю. Сенсор складається з трикутної відбивної решітки і двох волоконно-оптичних зондів. Наведено принцип вимірювання сенсора. Конструкцію трикутної решітки сенсора було математично оптимізовано з урахуванням кута кроку решітки для підвищення роздільної здатності сенсора. Метод оптимізації виявив глобальний оптимум, при якому досягається найвища роздільна здатність.

Ключові слова: оптоелектронний сенсор, оптимізація, чутливість, роздільна здатність, волоконно-оптичний зонд, переміщення.

Постановка проблеми. Пристрої на основі високоточних малопотужних оптоелектронних систем були одним із головних предметів досліджень в останні роки. Розробка оптоелектронних сенсорів з високою чутливістю, великим динамічним діапазоном і низькою потужністю розсіювання домінує в дослідницькій галузі для різних комерційних застосувань, включаючи транспорт, біомедицину, космос, авіоніку та моніторинг навколишнього середовища. Використання математичних моделей у поєднанні з експериментальними дослідженнями та технічними розробками може значно покращити ефективність та надійність оптоелектронних сенсорів, забезпечити прогнозування можливих відмов та планування їхнього технічного обслуговування. Це дозволяє попереджувати непередбачені ситуації та знижувати час простою системи.

Завдання, аналіз літературних джерел та одержані результати роботи. Метою дослідження є дослідження математичних моделей і оптимізації оптоелектронних сенсорів.

Оптичні сенсори переміщення високої роздільної здатності на основі інтерферометрів Фабрі–Перо отримали широке застосування в оптоелектронних пристроях завдяки високій точності переміщення та стійкості до електромагнітних перешкод [1]. Дослідження, проведене Chung-Ping Chang [2] модифікує конструкцію традиційного інтерферометра Фабрі–Перо, що дозволило досягти діапазону вимірювання 100 мм із збільшенням оптичної роздільної здатності до чверті довжини хвилі. Іншим прикладом є широкодіапазонний тривісний ґратчастий кодер, розроблений Jie Lin [3]. Цей сенсор може одночасно вимірювати поступальні рухи осей x , y та z . Ґратчастий кодер складається з планарної масштабної решітки відбивного типу з періодом 8 мкм і оптичної головки для зчитування. Для більшої компактності ґратчастого кодера впроваджено подвійний ґратковий світлодіодний блок і два дифракційних оптичних елемента. Експериментальні результати показали роздільну здатність 4 нм для осьового зміщення осі z .

Акіхіде Кімура та ін. [4] описав тривісний поверхневий кодер, що складається з планарної решітки та оптичної сенсорної головки. Він був розроблений і виготовлений для субнанометричного вимірювання зміщення вздовж осей x , y і z . Головка оптичного сенсора мала розміри 50 мм (X) \times 70 мм (Y) \times 40 мм (Z), а роздільна здатність сенсора була кращою за 1 нм у всіх трьох осях.

Також було проведено кілька досліджень на основі інших оптичних технологій для вимірювання лінійних переміщень. Високоєфективний оптичний сенсор був створений A. Missoffe та ін. [5]. Компактна вимірювальна система складається з лазерного діодного модуля разом із фотодіодною матрицею. Ця система характеризується нечутливістю до великих механічних дефектів. Результати експерименту показали, що сенсор може досягати нанометричної роздільної здатності в сантиметровому діапазоні.

На продуктивність волоконно-оптичного сенсора переміщення впливають його геометричні параметри, такі як апертура волокна, радіус серцевини волокна, поперечне розділення передавального та приймального волокон, кут між двома волокнами та радіус відбивача. Було помічено, що для кращої чутливості сенсора має бути мінімальна відстань між передавальним і приймальним волокнами.

Для бездротових сенсорних мереж, де кілька викликів включають потенційно суперечливі цілі, задоволення однієї цілі призводить до погіршення продуктивності іншої (якщо ми зосередимося на збільшенні терміну служби мережі, затримка також може збільшитися, що небажано). Таким чином, багатоцільові методи оптимізації застосовуються для вирішення цієї проблеми з використанням натхнених природою метаевристичних алгоритмів [6]. Цей метод залишається більш складним у порівнянні з методом оптимізації, застосованим до сенсора в цьому дослідженні. Для оптимізації роботи сенсора було адаптовано середовище програмування Python, і аналітична модель змогла знайти оптимальні геометричні параметри кантилевера для фотоакустичного зондування з ємнісною трансдукцією. Ми бачимо, що геометричні параметри можуть змінювати продуктивність сенсора, що подібно до методу оптимізації, застосованого в цьому дослідженні.

Сенсор складається з двох волоконно-оптичних зондів, пов'язаних із поверхнею з високим ступенем відбивання. Кожен зонд має одне центральне емісійне волокно та чотири приймальні волокна, розміщені навколо емісійного волокна. Ефективність сенсора, коли він пов'язаний з плоскою поверхнею, вже була проаналізована [7]. У класичній конфігурації емісійне волокно, розміщене в центрі, випромінює світло на плоску відбиваючу поверхню. Світло, відбите поверхнею, вводиться в приймальні волокна та спрямовується на PIN-фотодіод. Вихідна напруга сенсора є функцією переміщення дзеркала (рис. 1).

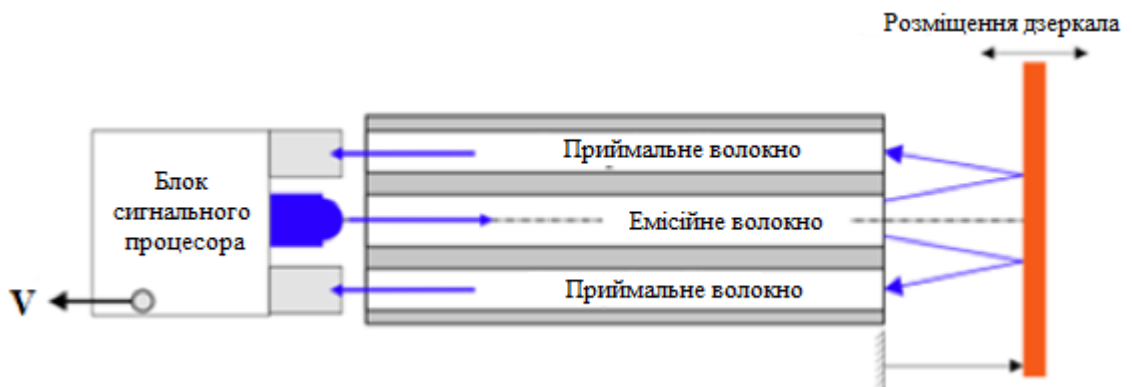


Рисунок 1 – Оптоелектронний сенсор

Коли плоске дзеркало переміщується перпендикулярно до осі зонда, крива відгуку сенсора виглядає так, як показано на рисунку 2.

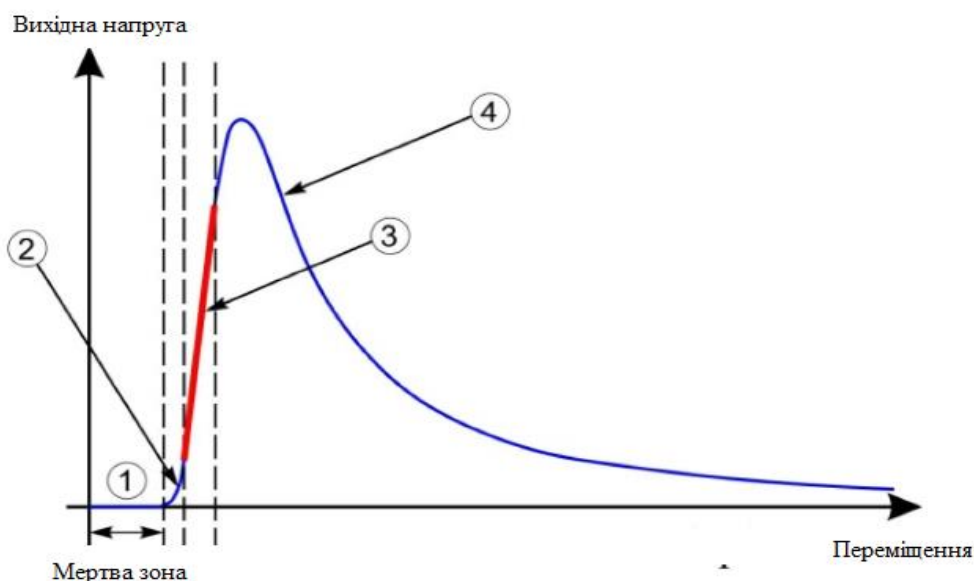


Рисунок 2 – Крива відгуку сенсора

Як видно на рисунку 2, крива реакції сенсора складається з чотирьох зон [8]. Перша зона - це мертва зона, де приймальні волокна не можуть збирати відбите світло через простір між випромінювальним і приймальним волокнами. Зони 2 і 4 демонструють сильну нелінійність із поганою роздільною здатністю. Зона 3, з іншого боку, є найцікавішою робочою зоною завдяки

своїй високій чутливості та лінійності. Продуктивність сенсора характеризується його чутливістю і роздільною здатністю в робочій зоні. Чутливість (S) розраховується як функція зміни вихідної напруги (ΔV) і зміщення в лінійній зоні (Δd):

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta d} \quad (1)$$

Роздільна здатність (R) виводиться з чутливості (S) і середньоквадратичного шуму сенсора (N_{RMS}):

$$R = \frac{N_{RMS}}{S} \quad (2)$$

Тим не менш, зона 3 має малий лінійний діапазон вимірювань (<200), який не підходить для довгих ходів у промислових застосуваннях.

Для збільшення діапазону вимірювання лінійної зони напрямок переміщення плоского дзеркала може відрізнятись від нормальної векторної орієнтації його поверхні. Це призводить до множення значення номінального діапазону на коефіцієнт $(\sin \epsilon)^{-1}$, де ϵ кут нахилу відносно осі решітки [9], як показано на рис. 3. В результаті волоконно-оптичний зонд зміщується вбік до плоского дзеркала.

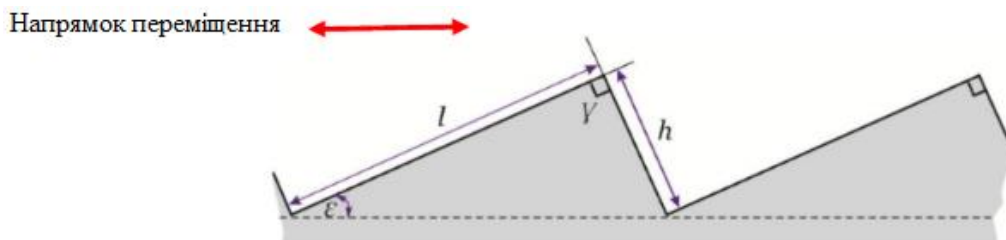


Рисунок 3 – Конфігурація похилого дзеркала

Таким чином, роздільна здатність сенсора з цією конфігурацією похилого дзеркала збільшується як функція кута ϵ згідно з рівнянням:

$$R_\epsilon = \frac{R}{\sin \epsilon} \quad (3)$$

де:

- R - роздільна здатність сенсора в класичному випадку;
- R_ϵ : відповідна роздільна здатність у конфігурації похилого дзеркала.

Як видно з рівняння 3, найвища роздільна здатність (тобто несприятлива роздільна здатність) досягається при малих значеннях кута ϵ , тоді як при більших значеннях ϵ роздільна здатність покращується. Для збільшення діапазону вимірювань до декількох міліметрів було продубльовано конфігурацію похилого дзеркала, в результаті чого вийшла решітка з плоских дзеркал.

У випадку решітки з плоских дзеркал необхідні два волоконно-оптичні зонди, щоб уникнути втрати вимірювання через перехід між двома послідовними кроками, і це забезпечує безперервне вимірювання зміщення на великій відстані шляхом почергового перемикавання між зондами. Іншими словами, слід уникати нелінійної зони на кривій відгуку сенсора. Для забезпечення корисного та правильного вимірювання в цій лінійній зоні використовуються два волоконно-оптичні зонди. Коли перший з них потрапляє в нелінійну зону, вимірювання перемикається на наступний зонд. Відзначається, що рух дзеркала щодо зонда може бути як вліво, так і вправо.

Геометричну модель було розроблено для вимірювання геометричних параметрів решітки та для моделювання роботи сенсора переміщення на великій відстані. Ця модель приймає як вхідні дані геометричні розміри кожного волокна та кожного кроку решітки. Ця модель дає на виході відповідну продуктивність сенсора. Ці характеристики включають роздільну здатність сенсора та відстань перекриття, необхідну для легкого перемикавання між двома волоконно-оптичними зондами.

У цій моделі враховано дві умови:

1. Відстань між зондом і сходиною решітки має бути в лінійній зоні (зона 3 на рис. 2).

© Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г.

2. Відстань перекриття, необхідна для перемикання між двома послідовними сигналами волоконно-оптичних зондів, щоб уникнути розриву лінійного вимірювання під час крокового переходу, залежить від швидкості вимірюваного зміщення. Зазвичай вважається, що він становить від 10 до 30 мкм.

Параметри в геометричній моделі плоскої решітки показані на рисунку 4.

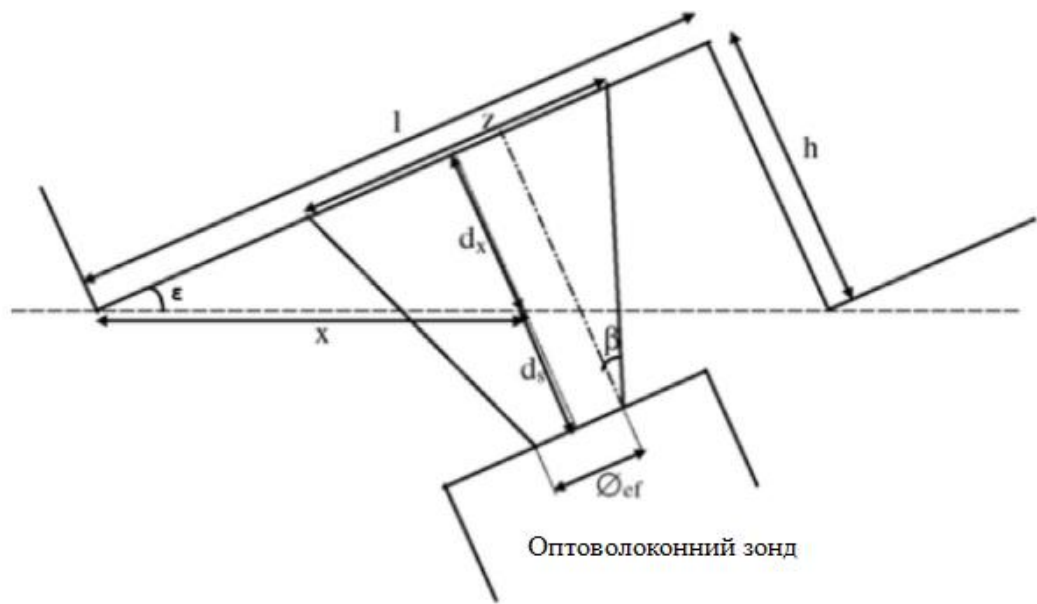


Рисунок 4 – Параметри в геометричній моделі плоскої решітки

Геометрична модель розраховує відстань (d) між зондом і ґраткою на додаток до відстані перекриття, необхідної для перебування в лінійній зоні та перемикання між двома зондами. Відстань (d), яка знаходиться між головкою зонда та ґраткою, буде локалізована в лінійній зоні сенсора, а перекриття має відповідне значення між 10 мкм і 30 мкм.

На рисунку 5 показано ілюстративний приклад експериментальної перевірки принципу сенсора цього прототипу. Як показано нижче, використовуються два волоконно-оптичні зонди, щоб залишатися в лінійній зоні сенсора.

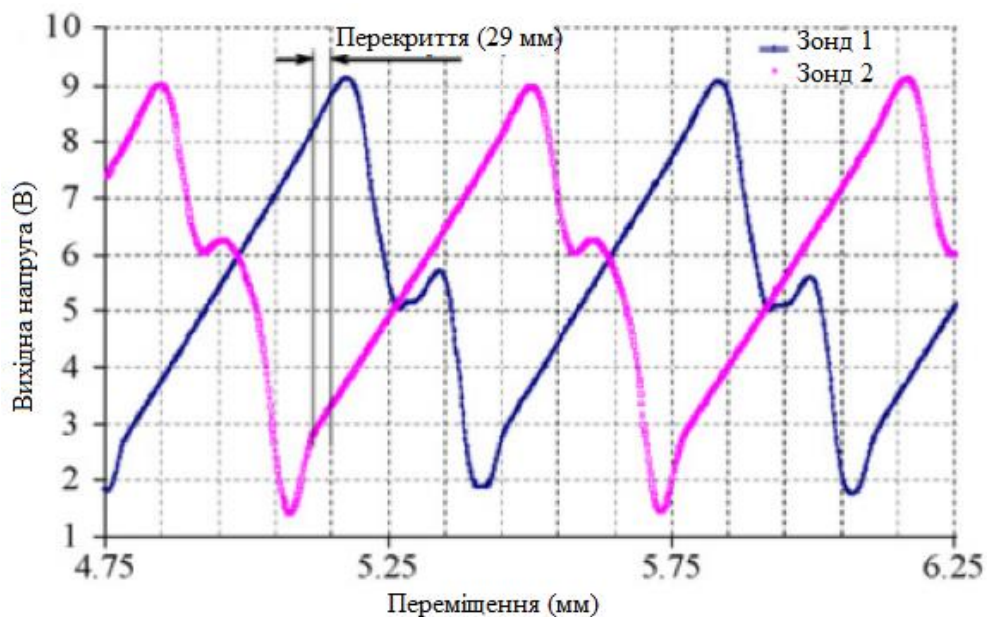


Рисунок 5 – Експериментальна перевірка принципу роботи сенсора

Для покращення роботи сенсора запропоновано метод оптимізації. Його метою є покращення найвищої роздільної здатності сенсора (невідповідної роздільної здатності) шляхом зменшення відповідного значення. Цього можна досягти за допомогою геометричних параметрів, зокрема кута ϵ .

Основна мета цієї розробки полягає у визначенні оптимальних розмірів планарної решітки сенсора, що може покращити його роздільну здатність; фізична модель сенсора ще не реалізована, а результати базуються на програмі, яка використовувалася раніше, де принцип сенсора був перевірений. На рисунку 6 показана класична калібрувальна крива оптикоелектронного сенсора для переміщення 300 мкм, яка розглядається в цьому дослідженні [9]. Помічено, що збільшення діапазону вимірювання призводить до зменшення чутливості сенсора, як показано на рисунку 7, який показує миттєву чутливість як функцію переміщення сенсору. Очевидно, що чутливість досягає свого максимального значення в точці перегину кривої, яка знаходиться при зміщенні 186 мкм і має максимальну чутливість 44,28 мВ/мкм. Однак поблизу точки перегину чутливість зменшується зі збільшенням діапазону вимірювань.

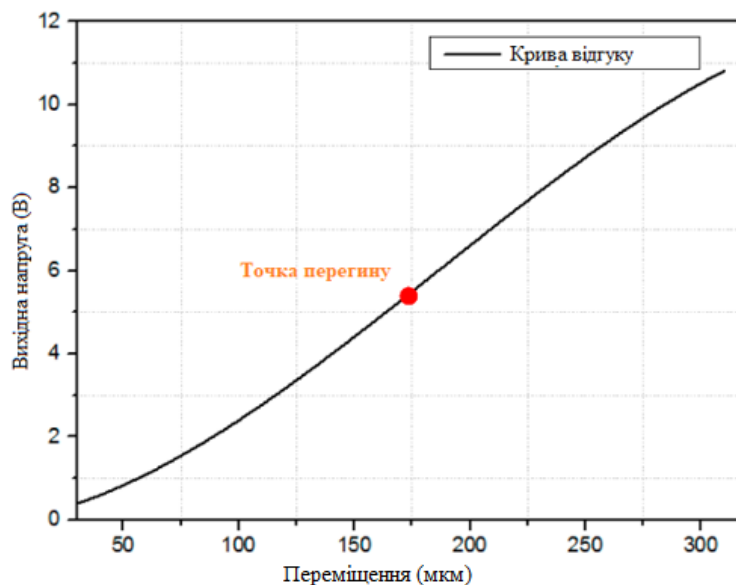


Рисунок 6 – Класична калібрувальна крива оптикоелектронного сенсора для переміщення 300 мкм

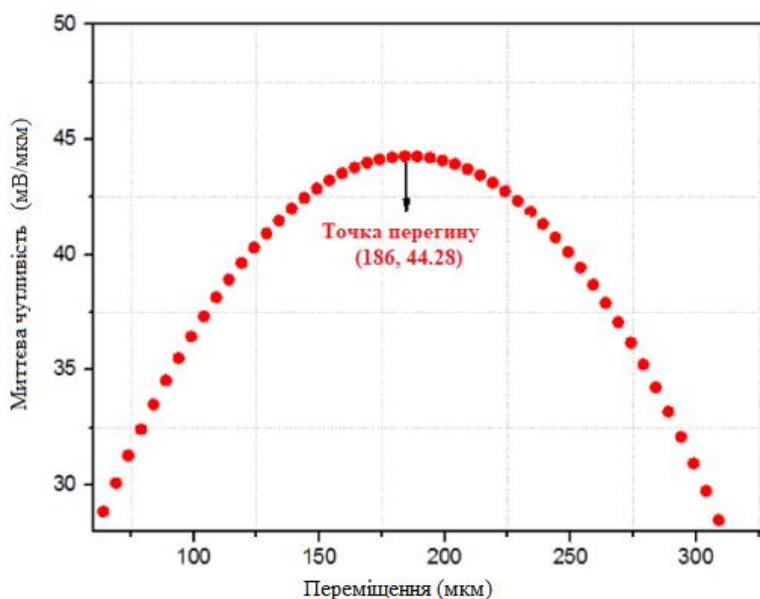


Рисунок 7 – Миттєва чутливість як функція зміщення

Підхід, застосований для досягнення оптимальної продуктивності сенсора, полягав у розподілі кількох зон навколо точки перегину кривої реакції сенсора, де кожна зона має додаткову довжину на 20 мкм порівняно з попередньою: (довжина 80 мкм для зони 1, 100 мкм для зони 2, 120 мкм для зони 3... тощо). Аналіз визначив зону, для якої роздільна здатність сенсора є оптимальною. Для загального аналізу було взято шість зон навколо точки перегину, чого було достатньо для визначення оптимальної роздільної здатності сенсора.

У кожній зоні розраховувалися чутливість, діапазон вимірювань і роздільна здатність як в осьовій, так і в поперечній конфігураціях. Що стосується осьової конфігурації сенсора, аналіз розглядав найбільш невідповідну чутливість діапазону вимірювання в кожній зоні (чутливість на краю діапазону вимірювання), з якої було виведено максимальну осьову роздільну здатність. Ці значення чутливості та роздільної здатності були враховані в цьому дослідженні з метою оптимізації роздільної здатності сенсора в найгіршому випадку.

Що стосується бічної конфігурації, аналіз виявив максимальний кут нахилу (ϵ_{\max}) у діапазоні вимірювань кожної досліджуваної зони для оптимізації роздільної здатності сенсора, оскільки найкраща роздільна здатність досягається при високому значенні кута ϵ . Для цього, а також для того, щоб отримати максимально можливий кут, необхідно було зафіксувати малий критерій перекриття, тому що при малому перекритті кут ϵ великий. Для цього дослідження в кожній зоні було взято перекриття 10 мкм, оскільки це було мінімально достатнє перекриття, що забезпечує високе значення кута ϵ .

Беручи до уваги аналіз, проведений для зони 1, яка має довжину 80 мкм навколо точки перегину (ця зона починається з 146 мкм і закінчується на 226 мкм), осьовий діапазон вимірювання становить 67,5 мкм (починаючи з 158,52 мкм і закінчуючи на 226 мкм), в якому були визначені мінімальна осьова чутливість і максимальна роздільна здатність ($S_{\text{аксіальний min}} = 42,59$ мВ/мкм, $R_{\text{аксіальний max}} = 7,04$ нм) і знайдено максимальний кут нахилу ($\epsilon_{\max} = 5,54^\circ$).

Висновки. Геометричний дизайн оптоелектронного сенсора покращено щодо його чутливості, роздільної здатності та діапазону вимірювань. У цій статті генерується глобальний оптимум між чутливістю та роздільною здатністю сенсора, що, як наслідок, покращує його загальну продуктивність. Цей глобальний оптимум з боку підвищив чутливість і роздільну здатність, навіть якщо аксіальна продуктивність була в несприятливому випадку; це було здійснено за допомогою кута ϵ , який було обрано максимальним значенням. Наступний підхід довів свою справедливість, оскільки чутливість сенсора зросла до 4,28 мВ/мкм, незважаючи на розширення діапазону вимірювань. Однак можна було б досягти вищих значень чутливості, якби аксіальні характеристики були кращими. З іншого боку, відповідний критерій перекриття слід розглядати як функцію швидкості вимірювальної системи та частоти дискретизації. Геометричні параметри сенсора в його оптимальній зоні будуть розглянуті для майбутнього виготовлення решітки, щоб експериментально підтвердити цей глобальний оптимум. За допомогою сенсора, згаданого в цьому дослідженні, з точки зору роздільної здатності та діапазону вимірювань, можна побачити, що навіть у найгіршому випадку межа роздільної здатності є нанометричною

Інформаційні джерела

- [1] Kim, Y.-S.; Dagalakis, N.G.; Choi, Y.-M. Optical fiber Fabry-Pérot micro-displacement sensor for MEMS in-plane motion stage. *Microelectron. Eng.* 2020, 187–188, 6–13.
- [2] Chang, C.P.; Tung, P.C.; Shyu, L.H.; Wang, Y.C.; Manske, E. Fabry-Pérot displacement interferometer for the measuring range up to 100 mm. *Measurement* 2023, 46, 4094–4099.
- [3] Lin, J.; Guan, J.; Wen, F.; Tan, J. High-resolution and wide range displacement measurement based on planar grating. *Opt. Commun.* 2021, 404, 132–138.
- [4] Kimura, A.; Gao, W.; Kim, W.; Hosono, K.; Shimizu, Y.; Shi, L.; Zeng, L. A sub-nanometric three-axis surface encoder with short-period planar gratings for stage motion measurement. *Precis. Eng.* 2022, 36, 576–585.
- [5] Missoffe, A.; Chassagne, L.; Topçu, S.; Ruaux, P.; Cagneaux, B.; Alayli, Y. New simple optical sensor: From nanometer resolution to Centimeter displacement range. *Sens. Actuators A* 2018, 176, 46–52.
- [6] Trzypil, W.; Maurin, N.; Rousseau, R.; Ayache, D.; Vicet, A.; Bahriz, M. Analytic Optimization of Cantilevers for Photoacoustic Gas Sensor with Capacitive Transduction. *Sensors* 2021, 21, 1489.
- [7] Prelle, C.; Lamarque, F.; Revel, P. Reflective optical sensor for long-range and high-resolution displacements. *Sens. Actuators* 2006, 127, 139–146.

- [8] Xu, Z.; Wang, Z.; Chen, L.; Fan, J.; Tu, L.; Zhou, Z. Two-Dimensional Displacement Sensor Based on a Dual-Cavity Fabry-Perot Interferometer. *J. Light. Technol.* 2022, 40, 1195–1201.
- [9] Li, T.; Shi, C.; Ren, H. A novel fiber Bragg grating displacement sensor with a sub-micrometer resolution. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2017, 29, 1199–1202.
- [10] Zhu, C.; Zheng, H.; Ma, L.; Yao, Z.; Liu, B.; Huang, J.; Rao, Y. Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review. *IEEE Sens. J.* 2023, 23, 6406–6426.
- [11] Gunjan. A Review on Multi-objective Optimization in Wireless Sensor Networks Using Nature Inspired Meta-heuristic Algorithms. *Neural Process. Lett.* 2023, 55, 2587–2611.
- [12] Li, Z.; Qu, Y.; Wen, S.; Chen, L.; Li, Z.; Qu, Y.; Wen, S.; Chen, L. Development of a High-Performance Piezoelectric Single-Crystal Accelerometer by Using Gradient Optimization Method. *IEEE Sens. J.* 2023, 23, 27102–27110.
- [13]. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання. У 2 кн. / В. О. Чадюк. – Київ : НТУУ «КПІ», 2019. – Кн. 1. 380 с. Кн 2. 436 с.
- [14]. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. – УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2018. 189 с.
- [15]. Воробйова О.М., Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник. Одеса ОНАЗ, 2017. 298 с.

Okhrimchuk O.B., Doctor of Technical Sciences, Professor Verbytskyi V.G.

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

MODELING AND OPTIMIZATION OF OPTOELECTRONIC SENSORS

The work considers the optimal design of the optoelectronic sensor. It is characterized by the ability to measure displacements in the millimeter range with submicrometer resolution. The sensor consists of a triangular reflective grating and two fiber-optic probes. The principle of sensor measurement is given. The design of the triangular grating of the sensor was mathematically optimized taking into account the pitch angle of the grating to increase the resolution of the sensor. The optimization method found the global optimum at which the highest resolution is achieved.

Key words: *optoelectronic sensor, optimization, sensitivity, resolution, fiber optic probe, displacements.*