

УДК 621.9.08

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-23-04

Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

Луцький національний технічний університет

МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

В статті розглядається методика проєктування оптико-електронних приладів, що дозволяють з високою точністю вимірювати поперечні переміщення об'єктів при їх поздовжньому переміщенні від єдиних конструкторських баз. На основі розробленої математичної моделі і застосованих алгоритмів оцінки координат зображень об'єктів сформовані цільові функції проєктування для контролю переміщень, що дозволяють на системотехнічному рівні виконувати проєктні процедури багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації. Запропонована схема оптико-електронних приладів при оптимізованих значеннях параметрів елементів дозволить проводити вимірювання координат об'єктів з середньоквадратичним відхиленням похибки, що не перевищує 1 мкм.

Ключові слова: оптико-електронний прилад, проєктування, похибка, переміщення, контроль, сигнал, вимірювання.

Постановка проблеми. Показники якості виробів у машино- та приладобудуванні, а також при ремонтуванні засобів даних галузей тісно пов'язані з застосуванням методів та засобів розмірного контролю. В даний час більшість підприємств використовує ручні контактні засоби вимірювання геометричних розмірів деталей, що не забезпечують необхідну точність і оперативність вимірювань, підвищують питому вагу ручної праці. Як наслідок виникає необхідність переходу на більш ефективні та точні безконтактні засоби вимірювань.

Використання оптико-електронних приладів (ОЕП) дозволяє виключити з процесу вимірювання суб'єктивний фактор, що важливо при контролі відповідальних деталей, робочі параметри яких значною мірою впливають на безпеку роботи різних машин та приладів.

Перевагою вимірювальних ОЕП є можливість безконтактного контролю лінійних переміщень об'єктів не тільки за одним напрямком, але також за двома і навіть трьома напрямками одночасно, причому цей контроль можна проводити від єдиних конструкторських баз. Щоб повною мірою довести переваги цього приладу необхідно оцінити похибку, яка може бути досягнута при контролі лінійних переміщень. Більш раціональною є інша постановка завдання, яке засновано на можливості досягнення необхідної точності, яка потрібна для вирішення тієї чи іншої практичної задачі. Подібна задача зазвичай формулюється в технічному завданні на проєктування виробу.

Проблема дослідження. Раціональний підхід до проєктування оптико-електронних приладів базується на блочно-ієрархічному поході. З цих позицій функціонального аспекту проєктування включає наступні ієрархічні рівні: функціонально-логічний, системотехнічний, схемотехнічний і компонентний. Зв'язок між рівнями проєктування здійснюється таким чином, що на кожному вищому рівні формулюється технічне завдання (ТЗ) для проєктування складових частин об'єкта проєктування на нижчестоячому рівні. Об'єктом проєктування на функціонально-логічному рівні є комплекс, до складу структурної схеми якого входить, в нашому випадку, вимірювальний ОЕП як складова частина комплексу. На системотехнічному рівні об'єктом проєктування є вимірювальний ОЕП, структурна схема якого відповідає ступеню деталізації функціональної схеми. На схемотехнічному рівні об'єктами проєктування є окремі елементи функціональної схеми (оптична система (ОС), електронний тракт тощо), структурні схеми яких представляються у вигляді принципівих схем. На компонентному рівні об'єктами проєктування є елементи принципівих схем.

Методологія спадного проєктування полягає у вирішенні завдань, пов'язаних з проєктуванням від верхнього ієрархічного рівня до нижчого. На кожному рівні вибирається основний показник якості і на основі методів математичного моделювання визначається цільова функція проєктування як залежність цього основного показника якості від змінних проєктування – параметрів елементів структурної схеми для кожного ієрархічного рівня. На основі виконання проєктних процедур багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації

визначається поєднання значень змінних проектування, оптимальне в сенсі досягнення екстремуму цільової функції проектування.

Особливості проектування вимірювальних ОЕП в основному пов'язані з проектуванням на функціонально-логічному і системотехнічному рівнях проектування. Щоб вирішувати задачі проектування на функціонально-логічному рівні потрібно вибрати конкретну область застосування вимірювальних ОЕП контролю лінійних переміщень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Подальший розвиток ряду напрямків в галузі приладобудування, верстатобудування і машинобудування в значній мірі пов'язаний з вирішенням проблеми забезпечення високоточного контролю похибок механічних пристроїв переміщень об'єктів [1, 2, 3]. Ця проблема обумовлена наявністю ряду невирішених технічних задач в області розробки вимірювальних засобів, внаслідок чого на ринку відсутні високоточні засоби контролю, що дозволяють безконтактним методом проводити вимірювання похибок лінійних переміщень об'єктів при значному діапазоні цих переміщень і в складних умовах експлуатації, в тому числі при наявності вібрацій [4, 5].

Недосконалість вимірювальних схем, які використовуються в даний час при контролі взаємного положення об'єктів, зокрема, при реалізації методів активного контролю на металорізальних верстатах з ЧПК пов'язана зі складнощами використання єдиних вимірювальних баз при реалізації контролю з використанням існуючої вимірювальної апаратури.

Основними напрямками вирішення задачі розробки методів і створення нових високоточних безконтактних вимірювальних приладів для контролю похибок лінійних переміщень об'єктів, обумовлених відступом від прямолінійності і кутовими зміщеннями об'єктів є розробка нових принципів дії і схем вимірювальних ОЕП, в яких використовується сучасна елементна база, а також засоби цифрової обробки сигналів, в яких реалізуються ефективні алгоритми [6].

Мета роботи полягає у розробці методики проектування високоточних оптико-електронних приладів для безконтактного автоматичного вимірювання поперечних переміщень об'єктів при їх значному поздовжньому переміщенні.

Викладення основного матеріалу. Однією з областей застосування, яка розглядалася вище, є механічна обробка на верстатах з ЧПК, де вимірювальні ОЕП можуть бути використані в системах активного контролю. Тоді на функціонально-логічному рівні об'єктом проектування є комплекс, що представляє собою систему автоматичного управління обробкою на верстаті з ЧПК. Припустимо, що основним показником якості такого комплексу є відсоток браку деталей, що виготовляються на верстатному обладнанні. Щоб визначити оптимальне поєднання параметрів складових частин системи управління, в тому числі вимоги до похибки вимірювального ОЕП контролю лінійних переміщень, потрібно визначити цільову функцію проектування. Але, як зазначено в [2], в даний час відсутній досить повний формалізований опис взаємозв'язків між результатами вимірювання з необхідними корекціями налаштувань технологічного процесу при активному контролі. У зв'язку з цим відсутня можливість розробки математичної моделі і визначенні на її основі цільової функції для проектування такого комплексу на функціонально-логічному рівні. Тому наведено методику проектування тільки для системотехнічного рівня, на якому об'єктом проектування є власне вимірювальний ОЕП для контролю похибок лінійних переміщень об'єктів. Для вимірювального ОЕП основним показником якості, який повинен бути заданий в технічному завданні, є похибки контролю поперечних і кутових переміщень об'єкта при його поздовжньому переміщенні. Так як визначити допустиме значення цих похибок на основі виконання процедур проектування на функціонально-логічному рівні неможливо, то для механічної обробки пропонується визначити значення цього показника для верстата з заданим класом точності. Відомо, що механообробні верстати в залежності від точності роботи поділяються на класи відповідно до таблиці 1.

Таблиця 1 – Класи точності верстатів

Позначення	Найменування
Н	Верстати нормальної точності
П	Верстати підвищеної точності
В	Верстати високої точності
А	Верстати особливо високої точності
С	Особливо точні верстати

Існують стандарти, які регламентують значення похибки верстатів певних класів для різних показників, наприклад, непрямої лінійності переміщення супорта, биття шпинделя тощо. Норми точності для токарних і токарно-гвинторізних верстатів, що визначають похибку переміщень супорта, та інших робочих органів для верстатів класів А і С не перевищує значень 5 – 6 мкм.

На основі цього можна припустити, що похибка датчиків, призначених для контролю лінійних переміщень не повинна перевищувати 2 – 3 мкм. Це значення похибки для прецизійних верстатів будемо вважати граничним значенням похибки для наших вимірювальних ОЕП.

Процес проектування на системотехнічному рівні включає наступні етапи:

Етап 1. Розробка математичної моделі об'єкта проектування – оптико-електронних приладів вимірювання переміщень, що включає розробку структурної схеми і функціональних моделей елементів цієї схеми.

Етап 2. Рішення задачі аналізу для визначення сигналу і перешкод на виході моделі приладу.

Етап 3. Формулювання цільової функції проектування для обраного алгоритму оцінки параметра сигналу, що містить інформацію про величину переміщення об'єкта.

Етап 4. Визначення оптимального вектора змінних проектування, що визначає значення параметрів елементів структурної (функціональної) схеми приладу.

Головною особливістю оптико-електронних приладів є те, що випромінювання від когерентного джерела – лазера, що підсвічує транспарант з амплітудним коефіцієнтом пропускання, зображення якого проектується репродукційною афокальною ОС в простір предметів, де розташований об'єкт, що переміщається.

При розробці математичної моделі прийняті наступні припущення:

- ОС формування пучка лазерного випромінювання формує плоский хвильовий фронт;
- афокальні репродукційні системи є просторово-інваріантними;
- призма і плоскі дзеркала, що встановлюються на об'єктах контролю, не мають похибок виготовлення (не вносять спотворень);
- приймач випромінювання і електронний тракт телевізійної системи є лінійними;
- відсутній розкид параметрів і взаємний вплив елементів матричного приймача випромінювання (МПВ);
- електронний тракт цифрової телевізійної камери не вносить лінійних спотворень в сигнал.

З урахуванням прийнятих припущень структурна схема вимірювального ОЕП, як об'єкта проектування на системотехнічному рівні, представлена на рисунку 1.

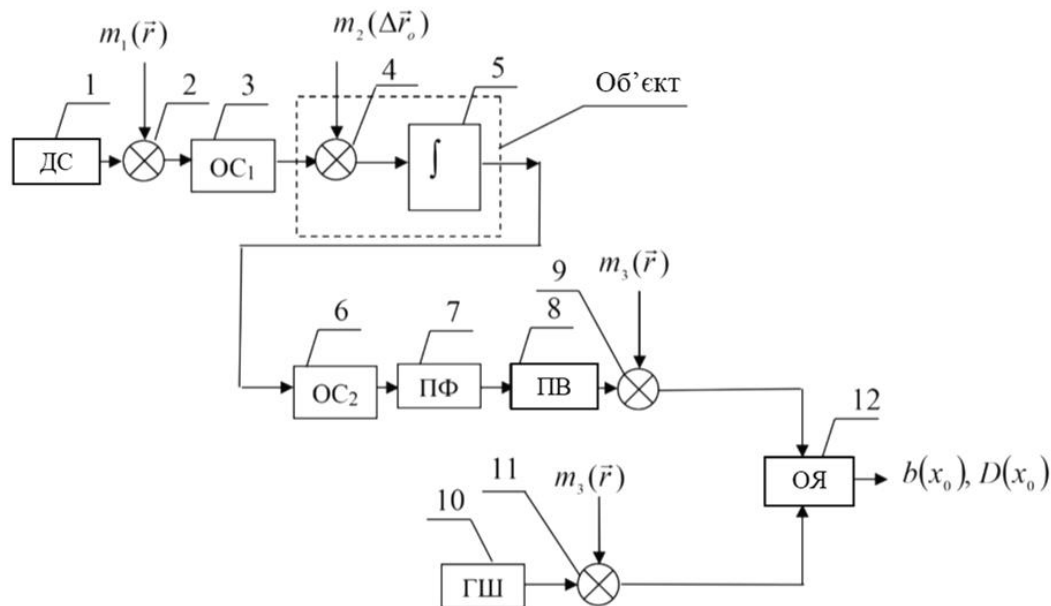


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювального ОЕП активного типу, як об'єкта проектування:

- 1 – джерело оптичного сигналу; 2 – модулятор; 3 – оптична система; 4 – модулятор;
- 5 – інтегратор; 6 – оптична система; 7 – просторовий фільтр; 8 – приймач випромінювання;
- 9, 11 – модулятори; 10 – генератор шуму; 12 – алгоритм оцінки якості

У даній структурній схемі джерело оптичного сигналу 1 моделює випромінювання лазера, який тут приймається як джерело когерентного випромінювання. У прийнятому модельному описі джерело оптичного сигналу 1 формує плоский хвильовий фронт з амплітудою A_0 на довжині хвилі λ , а саме $A(x, y) = A_0$.

Модулятор поз. 2, що являє собою помножувач, що відображає властивості амплітудного транспаранта, який має коефіцієнт пропускання за інтенсивністю $\tau(x, y)$. Відповідно з цим модулююча функція транспаранта описується як

$$m_1(x, y) = \sqrt{\tau(x, y)}. \quad (1)$$

Структурний елемент ОС₁ – поз. 3, моделює властивості репродукційної афокальної ОС передавальної частини приладу. Особливістю репродукційної афокальної ОС є телецентричний хід променів при проекції зображення транспаранта в простір предметів. Елемент ОС₁ характеризується когерентною функцією розсіювання $h_1(x', y')$, коефіцієнтом пропускання за інтенсивністю τ_1 і коефіцієнтом лінійного збільшення $\beta_1 = 1/\Gamma_1$ (Γ_1 – кутове збільшення афокальної системи).

Структурні елементи 4 і 5 моделюють перетворення оптичного сигналу, які вносять об'єкт. Ці перетворення полягають в переміщенні зображення в напрямках осей X і Y , а також переміщення уздовж осі Z (оптичної осі). Так як об'єкт, в силу прийнятого припущення, не вносить лінійних спотворень, то модулююча функція, яка надходить на модулятор 4, описується як:

$$m_2(\vec{r}, \Delta\vec{r}_0) = \delta\left[\xi - (x' - \Delta x_0), \eta - (y' - \Delta y_0), \xi - (z' - \Delta z_0)\right], \quad (2)$$

де $\Delta\vec{r}_0 = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0)^T$ – вектор зміщення об'єкта відносно системи координат $x'y'z'$, зв'язаної із зображенням транспаранта, причому Δx_0 і Δy_0 визначають поперечне переміщення;

z_0 – переміщення в напрямку оптичної осі, яке можна розглядати як розфокусування $\Delta F = \Delta z_0$.

Структурний елемент ОС₂ – поз. 6, моделює властивості репродукційної афокальної ОС приймальної частини приладу. Елемент ОС₂ характеризується когерентною функцією розсіювання $h_2(x', y')$, коефіцієнтом пропускання за інтенсивністю τ_2 і коефіцієнтом лінійного збільшення $\beta_2 = 1/\Gamma_2$ (Γ_2 – кутове збільшення).

Структурні елементи 7, 8 і 5 моделюють матричний приймач випромінювання (МПВ), який входить до складу телевізійної камери приймального каналу. Зокрема, просторовий фільтр 7 має імпульсний відгук:

$$H_{III}(x', y') = \frac{1}{a_x a_y} \text{rest}\left(\frac{x'}{a_x}, \frac{y'}{a_y}\right), \quad (3)$$

де a_x і a_y – розміри чутливого елемента МПВ.

Структурний елемент 8 – квадратичний приймач, що перетворює інтенсивність оптичного сигналу при заданому часі накопичення в електричний сигнал відповідно зі значенням чутливості $S(\lambda)$.

Структурні елементи 9 і 11 – модулятори, які характеризуються модулюючою функцією виду [1]:

$$m_3(x_1, y_1, t) = \text{comb}\left(\frac{x_1}{T_x}, \frac{y_1}{T_y}, \frac{t}{T_k}\right) \cdot \text{rest}\left(\frac{x_1}{l_x}, \frac{y_1}{l_y}\right) H_{III}(x', y') = \frac{1}{a_x a_y} \text{rest}\left(\frac{x'}{a_x}, \frac{y'}{a_y}\right), \quad (4)$$

де T_x і T_y – періоди розташування чутливих елементів МПВ, розташованих в площині з координатами x_1, y_1 ;

T_k – період проходження кадрів при зчитуванні сигналу;

l_x і l_y – розміри чутливого шару МПВ.

Таким чином, модулятори описують процеси просторової і тимчасової дискретизації сигналу, які здійснює МПВ телевізійної камери. Якщо вимірювання переміщення здійснюється

за результатами аналізу зображення в кожному реєструючому кадрі, то модулюючу функцію можна представити, як двомірну:

$$m_3(x_1, y_1) = \text{comb}\left(\frac{x_1}{T_x}, \frac{y_1}{T_y}\right) \cdot \text{rest}\left(\frac{x_1}{l_x}, \frac{y_1}{l_y}\right). \quad (5)$$

Структурні елементи 10 і 11 відображають в модельному описі властивості МПВ, як джерела адитивної перешкоди. Вважається, що «шумове» поле на виході МПВ є однорідним і підпорядковується нормальному закону розподілу. Шумове поле МПВ має вигляд «квазібілого шуму» з кореляційною функцією, що має вигляд:

$$Kr(\Delta x, \Delta y, \tau) = \sigma_N^2 \sin c(\pi v_{xM} \Delta x) \sin c(\pi v_{yM} \Delta y) \sin c(\pi v_M \tau), \quad (6)$$

де $v_{xM} = 1/T_x$, $v_{yM} = 1/T_y$, і $v_M = 1/T_K$ – максимальні значення просторової і тимчасової частот випадкового «шумового» поля.

Структурний елемент 12 – вихідний елемент, що виконує обчислення значень показників якості ОЕП, які характеризують похибки контролю лінійних переміщень при реалізації того чи іншого алгоритму оцінки значень вимірюваних величин. У нашому випадку такими показниками якості є умовні зміщення $b(\hat{x}_0 | x_0)$ і дисперсія $D(\hat{x}_0 | x_0)$ оцінки x_0 поперечного переміщення об'єкта (в напрямку осі X) при його поздовжньому переміщенні в напрямку осі Z . Функціональна модель цього структурного елемента визначається алгоритмом обчислень, який реалізується в ЕОМ при визначенні значень переміщень об'єкта. На виході цього структурного елемента повинні обчислюватися показники похибки оцінки x_0 вимірюваних переміщень у вигляді зміщення $b(\hat{x}_0 | x_0)$ і дисперсії $D(\hat{x}_0 | x_0)$ [4].

На основі даних результатів розроблена методика проектування, яка визначає зміст і послідовність операцій і процедур, що виконуються на системотехнічному рівні проектування ОЕП контролю лінійних переміщень, а також особливості процедур, що виконуються на схемотехнічному рівні проектування цих приладів.

Так як функціональні схеми проектного ОЕП для його різних застосувань визначені, то задача проектування полягає у визначенні оптимального вектора проектування, який включає значення параметрів основних елементів функціональної схеми, в тому числі: джерела когерентного випромінювання; транспаранта, який використовується в якості тест-об'єкта; репродукційної афокальної ОС; телевізійної камери. У запропонованій методиці оптимальне поєднання параметрів цих елементів, які розглядаються як змінні проектування, знаходиться в процесі вирішення задачі на екстремум цільової функції проектування, яка встановлює залежність основного показника якості ОЕП – середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання координат переміщень, від змінних проектування. Як показано вище, вид цільової функції проектування в значній мірі залежить від алгоритму, використовуваного при аналізі зображення для оцінки значень переміщень.

Вихідним документом для проектування є технічне завдання (ТЗ). У ТЗ на проектування ОЕП для контролю лінійних переміщень повинні бути задані наступні показники призначення:

- діапазон поздовжніх переміщень ΔZ , в межах якого потрібно здійснювати контроль поперечних переміщень;
- діапазон поперечних переміщень ΔX і ΔY ;
- похибка вимірювання поперечних переміщень δX і δY .

Крім цих обов'язкових показників, у ТЗ можуть бути задані вимоги, які регламентують, наприклад, швидкість переміщень, напрямок переміщень відносно основного робочого переміщення та інші показники.

Зміст і послідовність проектних операцій і процедур включають в себе:

1. Аналіз технічного завдання і визначення діапазону значень змінних проектування.

На основі вимог ТЗ здійснюється попередній вибір алгоритму обробки зображень, який використовується для вимірювання значень переміщень. Алгоритм оцінки максимальної правдоподібності (ОМП) при інших рівних умовах дозволяє досягти більш високої точності, ніж алгоритм «центру мас». Обмеженням на використання алгоритму ОМП є знання виду функції, що описує розподіл в зображенні транспаранта.

Щоб вирішити задачу визначення оптимального вектора змінних проектування, потрібно спочатку визначити діапазон значень складових вектора проектування. Такими параметрами є:

- вид і параметри функції пропускання транспаранта;
- параметри афокальної репродукційної ОС;
- відношення сигналу до шуму в реєстрованому зображенні.

а) Вид і параметри функції пропускання транспаранта.

Для досягнення великих значень чутливості приладу використовувати транспарант у вигляді штрихової міри. Для забезпечення діапазону поздовжніх переміщень ΔZ , в межах якого потрібно здійснювати контроль поперечних переміщень період штрихів T_x слід визначити відповідно до формули:

$$T_x \geq \sqrt{\lambda \Delta Z_M} / \beta, \quad (7)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання лазера;

ΔZ_M – максимальне значення поздовжнього переміщення об'єкта;

β – лінійне збільшення афокальної репродукційної ОС.

Розміри транспаранта $b_x \times b_y$ слід вибирати з урахуванням діапазону переміщень ΔX і ΔY об'єкта і лінійних розмірів $l_x \times l_y$ світлочутливого шару МПВ телевізійної камери, а саме:

$$b_x \leq (l_x - \Delta X) / \beta; \quad b_y \leq (l_y - \Delta Y) / \beta. \quad (8)$$

б) Параметри афокальної репродукційної ОС.

Основними параметрами афокальної репродукційної ОС є лінійне збільшення β , фокусні відстані f'_1 і f'_2 , габаритний розмір L_{oc} , а також діаметр α_{AD} апертурної діафрагми. Значення перерахованих параметрів визначаються за такими формулами:

$$f'_2 = f'_1 \beta, \quad (9)$$

$$f'_1 + f'_2 \beta, \quad (10)$$

$$\alpha_{AD} \geq 2\lambda f' / T_x. \quad (11)$$

в) Відношення сигналу до шуму в реєстрованому зображенні.

Відношення μ сигналу до шуму в зображенні транспаранта, що реєструється телевізійною камерою, залежить від максимального значення освітленості E_0 в зображенні транспаранта, який формується афокальною репродукційною ОС при підсвічуванні лазером, і пороговою освітленістю E'_{II} в площині МПВ телевізійної камери, а саме, $\mu = E_0 / E'_{II}$.

Якщо вибраний лазер і відома потужність – потік Φ_0 лазерного випромінювання, то значення освітленості в площині зображення визначається за формулою:

$$E_0 = \tau \Phi_0 / (\beta^2 A_{II}), \quad (12)$$

де τ – коефіцієнт пропускання всієї оптичної системи ОЕП;

A_{II} – площа пучка лазерного випромінювання, після ОС, яка формує пучок підсвічування транспаранта.

Зазвичай порогова чутливість телевізійних камер оцінюється значенням порогової освітленості E'_{II} в площині об'єкта з коефіцієнтом відображення $\rho \approx 0,7$, при реєстрації камерою з об'єктивом, що має відносний отвір $D/f' = 1/1,4$. При таких значеннях порогова освітленість в площині МПВ телевізійної камери дорівнює $E'_{II} = 0,1 E_{II}$.

На підставі викладеного формулу для розрахунку відношення сигналу до шуму в зображенні транспаранта можна представити у вигляді

$$\mu = \tau \Phi_0 / (0,1 \beta^2 A_{II} E_{II}). \quad (13)$$

2. Виконання процедур багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації.

Розраховані за формулами значення параметрів використовуються як початкові наближення при вирішенні задачі визначення оптимального вектора змінних проектування ОЕП. Зауважимо, що ця задача пошуку екстремуму цільової функції проектування може бути вирішена в процесі виконання процедури багатоваріантного аналізу, тобто прямим перебором значень параметрів зі значень їх апіорного інтервалу.

3. Вибір комплектуючих елементів ОЕП.

На основі обчислених параметрів елементів функціональної схеми ОЕП можна здійснити вибір готових елементів таких, як лазер і телевізійна камера. При виборі лазера особливу увагу слід звертати на довжину когерентності його випромінювання: вона повинна перевищувати

діапазон поздовжніх переміщень контрольованих об'єктів.

4. Проектування оптичної системи на схемотехнічному рівні.

Розрахунок елементів оптичної схеми, пов'язаний з проектуванням на схемотехнічному рівні, можна виконувати з використанням пакетів автоматизованого проектування оптичних систем.

Висновки. Оптико-електронні прилади дозволяють з високою точністю вимірювати поперечні переміщення об'єктів при їх поздовжньому переміщенні від єдиних конструкторських баз. Розроблено методику проектування ОЕП для контролю переміщень на системотехнічному рівні. На основі розробленої математичної моделі ОЕП і застосовних алгоритмів оцінки координат зображень об'єктів сформовані цільові функції проектування ОЕП для контролю переміщень, що дозволяють на системотехнічному рівні виконувати проектні процедури багатоваріантного аналізу і параметричної оптимізації. На основі розробленої математичної моделі афокальної репродукційної ОС показано, що шляхом оптимізації її параметрів можна забезпечити сталість розподілу інтенсивності в зображенні транспаранта при значному переміщенні площини реєстрації уздовж оптичної осі.

Інформаційні джерела

1. Афанасьєва О. В., Курський Ю. С., Одаренко Є. М. Оптичні вимірювання: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2021. Ч.1. 180 с.

2. Тимчик Г. С., Скицюк В. І., Клочко Т. Р. Оптичні вимірювання у механічній обробці деталей: монографія. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 332 с.

3. Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В. Аналіз методів метрологічного забезпечення високоточного контролю похибок механічних пристроїв переміщень об'єктів. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. 2022. Вип. 21. С. 20–25.

4. Максимяк П. П., Фесів І. В. Оптична діагностика випадкових об'єктів: посібник. Чернівці: ЧНУ, 2021. 188 с.

5. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. Кн. 2. 336 с.

6. Шахновський О. М., Денисюк В. Ю. Метрологічне забезпечення контролю похибок переміщення об'єктів оптико-електронними приладами. «Інформаційні технології в освіті, техніці і промисловості»: зб. тез доп. Всеукр. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 8 жовт. 2020 р, Івано-Франківськ, 2020. С. 123 – 124.

Denysiuk V., Ptashenchuk V.

Lutsk National Technical University

METHOD FOR DESIGNING HIGH-PRECISION OPTICAL-ELECTRONIC APPLIANCES FOR CONTACTLESS AUTOMATIC VIMING OF LINEAR MOVEMENTS

The article examines the design methodology of optical-electronic devices that allow high-precision measurements of the transverse displacement of objects during their later movement from common design bases. Based on a fragmented mathematical model and state-of-the-art algorithms for estimating coordinates, the image of objects formed by the target design functions for controlling movement, which allows the design to be finalized on a system-technical level and procedures for multivariate analysis and parametric optimization. A diagram of optical-electronic devices has been designed, with optimized values of the parameters of the elements, to allow the alignment of object coordinates with mean-square deviations that do not exceed 1 micron.

Key words: optical-electronic device, design, abduction, displacement, control, signal, extinction.