

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОЗДНЯКОВ ДМИТРО ВІКТОРОВИЧ

УДК 681.7

**ЗМЕНШЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ВАГИ ВХІДНОЇ ОПТИКИ
ЗОБРАЖУЮЧОГО ФУР'Є – СПЕКТРОМЕТРА КОСМІЧНОГО
БАЗУВАННЯ**

Спеціальність 05.11.07 – оптичні прилади та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів і в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» Державного космічного агентства України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Колобродов Валентин Георгійович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри оптичних та оптико-електронних приладів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Гордієнко Валентин Іванович,
ДП НВК «Фотоприлад», заступник генерального директора з науки – головний конструктор;

кандидат технічних наук,
Синявський Іван Іванович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України, в.о.
завідувача відділу атмосферної оптики та приладобудування.

Захист відбудеться « __ » _____ р. о _____ на засіданні спеціальної вченої ради Д 26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. №1, ауд. № 293.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано « __ » _____ р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор



Н.І. Бурау

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасної держави не можна уявити без використання космічного простору для вирішення як загальнодержавних, так і комерційних задач. Аналіз напрямків розвитку провідних держав засвідчує, що впровадження сучасних космічних технологій дозволяє вирішувати комплекс задач: зв'язку, навігації, картографування, моніторингу Землі та інше. Особливого значення набуває використання космічної техніки для створення космічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Знімками, що отримують з космічних апаратів ДЗЗ, користуються спеціалісти у багатьох галузях, таких як: пошук корисних копалин, оцінювання ґрунтів для сільського господарства, вивчення та оцінювання океанічних ресурсів, виявлення забруднень, аналіз та прогнозування кліматичних змін, картографування рельєфу та інше.

Однією з перспективних систем ДЗЗ є зображуючі Фур'є - спектрометри (ЗФС), що можуть створювати так званий «куб даних», який по двом осям має дві просторові координати підстилаючої поверхні, а по третій осі - спектральну координату, причому реєстрація за цією координатою проводиться у сотнях спектральних каналів. Такі системи не тільки дають набагато більше інформації, ніж мультиспектральні системи, але ще й мають переваги над класичними (дисперсійними або фільтровими) гіперспектральними системами.

Але при створенні систем ДЗЗ, а конкретніше, при створенні оптичних систем ЗФС космічного базування, виникає багато проблем. Однією з таких проблем, при використанні дзеркальної чи дзеркально-лінзової вхідної оптики, є співвідношення діаметра дзеркал та ваги. Розробники оптичних систем прагнуть збільшити діаметр дзеркал, що в свою чергу збільшує не тільки апертуру приладу та просторове розділення, але й вагу оптики та вартість виводу всього приладу в цілому на орбіту. Тому питання полегшення дзеркал вхідної оптики ЗФС космічного базування при зберіганні високої якості форми робочих поверхонь є актуальною задачею при розробці цих систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» і пов'язана з наступними науково-технічними проектами та роботами, виконаними за участю автора:

- дослідно-конструкторська робота «Аванпроект зі створення сканера надвисокої роздільної здатності» згідно з наказом №479 від 17.03.2017;
- дослідно-конструкторська робота «Забезпечення системного отримання даних від космічної системи «Січ». Розроблення та виготовлення льотних зразків оптичного сканера з просторовим розділенням 2,5м (СВРЗ)» у частині розробки полегшених дзеркал згідно з договором №1-24/16 від 06.12.2016р.;
- роботи по виконанню виготовлення та поставки льотного зразка ОМБ МСУ для КА Січ-2-1, в частині терморозрахунку, згідно з договором з ДП «КБ «Південне» №01780 від 29.04.2015;

- розробка комплексу багатоспектрального моніторингу навколишнього середовища для запобігання аваріям, надзвичайним ситуаціям і ліквідації їх наслідків, тема № 2546 п, державний реєстраційний номер 0112U001489;
- тепловізійні системи спостереження безпілотних авіаційних та космічних апаратів, тема № 2903п, номер державної реєстрації 0116U003689.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи: забезпечення високої якості форми робочих поверхонь вхідної оптики ЗФС при зменшенні ваги її дзеркал.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Обґрунтувати необхідність зменшення ваги вхідної оптики на основі порівняльного аналізу оптичних схем сучасних ЗФС космічного базування;
2. Дослідити математичну модель роботи ЗФС;
3. Розробити математичну модель визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС;
4. Розробити методику та провести комплексне дослідження впливу зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС;
5. Встановити комплекс залежностей впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики на деформацію їх робочої поверхні;
6. Провести експериментальну перевірку розробленої математичної моделі для визначення деформації робочих поверхонь дзеркал.

Об'єкт дослідження – вхідна оптика зображуючого Фур'є - спектрометра космічного базування.

Предмет дослідження – масогабаритні характеристики вхідної оптики зображуючого Фур'є - спектрометра космічного базування та шляхи їх зменшення.

Методи дослідження. З метою розв'язання поставлених задач в роботі використовується теорія аберацій оптичних систем та теорія інтерференції, математичне та комп'ютерне моделювання роботи ЗФС; комп'ютерне моделювання деформацій робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики ЗФС під впливом умов зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень); експериментальні дослідження розробленої математичної моделі визначення деформацій робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики ЗФС.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропоновано новий метод проектування ЗФС на основі розділення його роботи на чотири етапи: формування зображення вхідною оптикою, формування інтерференційної картини на приймачі випромінювання, формування сигналу приймачем випромінювання та обробка сигналу;
2. Вперше розроблено математичну модель для визначення деформації робочих поверхонь оптичних компонентів (дзеркал) при впливі на них зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), що відрізняється від відомих можливістю визначення деформації як круглих

поверхонь, так і інших будь-якої форми та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів;

3. Вперше отримано комплекс залежностей деформації робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики від геометричних параметрів їх полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики, які дозволили забезпечити незмінну модуляційно-передавальну функцію системи при зменшенні ваги дзеркал.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропонований новий метод проектування ЗФС на основі розділення його роботи на чотири етапи дозволяє скоротити та спростити створення та оптимізацію ЗФС;
2. Математична модель для визначення деформації робочих поверхонь оптичних компонентів (дзеркал) при впливі на них зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень) та розроблене на його основі програмне забезпечення дозволяють:
 - врахувати багато чинників, що знижують якість створюваного оптичною системою зображення, ще на етапі моделювання, що зменшує кількість необхідних натурних випробувань, а отже знижує вартість та час розробки оптичних систем;
 - імпортувати результати механічного та теплового аналізу оптичних систем у програми оптичного аналізу для аналізу їх оптичних характеристик при впливі на них зовнішніх факторів;
3. Методика проведення комплексного дослідження впливу зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС дозволила встановити комплекс залежностей, які показали можливості для зменшення ваги та деформації робочих поверхонь дзеркал, що дозволило зменшити вагу на 60 – 80%;
4. Запропонований метод зменшення деформацій позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал на основі системи підтримок дозволяє зменшити деформацію дзеркал у 2 – 3 рази у порівнянні з системою без підтримок.

Запропонована математична модель визначення деформації робочих поверхонь оптичних компонентів (дзеркал) при впливі на них зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також програмне забезпечення, що створене на його основі, використані у КП СПБ "Арсенал" (м. Київ) при проектуванні та створенні полегшених дзеркал сканерів високої роздільної здатності (СВРЗ) та надвисокої роздільної здатності (НВРЗ), що підтверджується актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Здобувач приймав безпосередню участь в проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, в аналізі одержаних результатів та формуванні висновків. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертації належать автору.

Основна частина отриманих результатів доповідалась автором особисто на вітчизняних конференціях. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належить: [1, 7,8] класифікація та огляд гіперспектральних пристроїв, огляд, аналіз та порівняння існуючих на цей час схем побудови зображуючих Фур'є-спектрометрів (ЗФС), аналіз принципів їх роботи, [2, 9] запропоноване розділення роботи ЗФС на чотири етапи для спрощення процесу створення базової моделі ЗФС, [2, 9 – 11] запропонована математична модель роботи кожного з чотирьох етапів роботи ЗФС, [3] алгоритм розрахунку деформацій робочої поверхні дзеркал вхідної оптики та дослідження впливу геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал [12] методика розрахунку полегшення для дзеркал вхідної оптики, [4] перевірка роботи програмного забезпечення, що створене на базі запропонованого алгоритму розрахунку деформацій робочої поверхні дзеркал вхідної оптики, [13] проведення оптимізації полегшення для конкретної оптичної системи з позаосьовими сегментами осесиметричних дзеркал, [14] дослідження впливу кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал, [15] дослідження впливу різних типів полегшення на деформацію робочої поверхні дзеркал, [16] дослідження впливу додаткових елементів, що необхідно кріпити на дзеркало при виконанні контрольних операцій при використанні класичних методів контролю, [17] розроблений метод контролю форми великогабаритних дзеркал вхідної оптики, який не потребує допоміжних деталей, [5, 18] проведення дослідження впливу полегшення на деформацію осесиметричних дзеркал при кріпленні за три точки у задній стінці, [19] проведення моделювання запропонованих здобувачем систем підтримок дзеркал вхідної оптики, що необхідні для зменшення деформації їх робочої поверхні.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати доповідалися та обговорювалися на семи міжнародних науково-технічних конференціях: "Приладобудування: стан і перспективи" (м. Київ), "Optics and high technology material science" (м. Київ), "Авіакосмічне приладобудування" (м. Київ), "Новые направления развития приборостроения" (м. Мінськ), Українська конференція з космічних досліджень (м. Одеса), "Спеціальне приладобудування: стан та перспективи" (м. Київ), "Космические технологии: настоящее и будущее" (м. Дніпро).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 робіт, з них 6 статей у фахових наукових виданнях України, з яких 1 стаття у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus та 13 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 6-ти додатків. Загальний обсяг роботи складає 183 сторінок з обсягом основного тексту 115 сторінок, 90 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел з 95 найменувань, 6 додатків на 25 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих

результатів, наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та зв'язок з науковими програмами.

У **першому розділі** на основі літературних джерел приводиться аналіз гіперспектральних систем ДЗЗ за способом формування двомірного зображення (whiskbroom, pushbroom, windowing, framing) та за способом спектральної селекції (дисперсійні, фільтрові, Фур'є - спектрометри), приводяться переваги та недоліки кожної з таких систем.

В результаті аналізу різних типів гіперспектральних систем встановлено, що найбільш перспективними є Фур'є - спектрометри, які формують зображення одночасно у багатьох (десятки-сотні) спектральних зонах та мають інші переваги у порівнянні з класичними гіперспектральними системами, такі як: велику світлосилу, мультиплексність, зменшення кількості компонентів схеми, та інше. Проаналізовано їх оптичні схеми та встановлено, що їх можна розділити на чотири типи за принципом дії: статичні, динамічні, поляризаційні та комбіновані. За результатами аналізу літературних джерел показано, що ЗФС статичного та комбінованого типу на базі інтерферометра Сан'яка у даний час використовуються найчастіше.

У всіх вказаних чотирьох типах оптичних систем ЗФС першим компонентом є вхідна оптика. Вона є найбільшим та одним з найважливіших компонентів. Розглянуті варіанти її побудови. Встановлено, що головною проблемою при проектуванні вхідної оптики ЗФС є вага оптичних елементів, особливо головних дзеркал, при використанні дзеркальної чи дзеркально-лінзової оптики. Тому необхідно проводити дослідження та використовувати полегшення дзеркал. Розглянуто класичні типи полегшення, що застосовуються при створенні великогабаритних елементів вхідної оптики.

Аналіз літературних джерел показав, що питанням полегшення оптики займається багато організацій. Наведені деякі проведені дослідження у цій сфері. Однак у літературних джерелах приводяться в основному результати досліджень деформації робочих поверхонь дзеркал при полегшенні конкретних систем або вимірів на виготовлених зразках. Комплексному аналізу впливу геометричних параметрів та типів полегшення та кріплення дзеркал на деформацію робочих поверхонь дзеркал приділяється дуже мало уваги. Не приділяється також увага порівнянню можливостей полегшення для різних типів дзеркал – осесиметричних та позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал. Також недостатньо уваги приділяється методикам дослідження та математичним моделям для визначення деформації робочих поверхонь дзеркал.

Встановлено, що при дослідженні полегшених дзеркал вхідної оптики ЗФС необхідно застосовувати такі типи аналізу: частотний, механічний, температурний та комбінований. При виконанні всіх типів аналізу, крім частотного, виникає проблема імпорту результатів аналізу у програми оптичного аналізу. Через це дослідження якості зображення, сформованого деформованими компонентами, є дуже складною задачею.

В результаті аналізу стану проблеми обґрунтована мета дисертаційної роботи та сформульовані задачі, які необхідно вирішити для її досягнення.

Метою **другого розділу** є створення математичної моделі роботи ЗФС статичного типу на базі інтерферометра Сан'яка та моделі для визначення деформації робочої поверхні дзеркал його вхідної оптики під дією зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень).

Так як характеристики оптико-електронної системи ЗФС залежать від багатьох факторів, запропоновано розділити його роботу на чотири етапи (рис. 1).

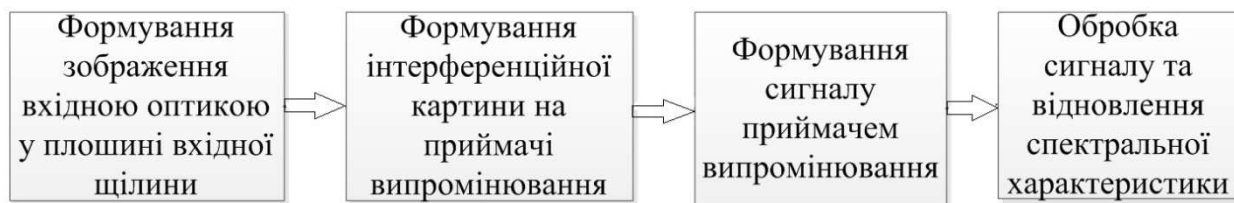


Рис. 1. Чотири етапи роботи ЗФС

Початковим етапом розробки ЗФС є визначення кола задач, для вирішення яких він буде використовуватися. На цьому етапі визначається спектральний діапазон роботи та кількість необхідних спектральних каналів. Потім задається висота орбіти та вибирається приймач випромінювання.

На першому етапі роботи вхідна оптика формує зображення підстилаючої поверхні у площині вхідної діафрагми. На цьому етапі визначаються фокусна відстань вхідного об'єктива (f), поле зору об'єктива, а також проекція пікселя на поверхні Землі (l_x, l_y) та ширина смуги огляду (L):

$$f = \frac{2\Delta l}{D} H \cos \vartheta (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{tg}^2 \vartheta), \quad (1)$$

де D – лінійне розділення на місцевості, м, γ та ϑ – кути тангажу та крену космічного апарату (КА) під час проведення спостереження, Δl – лінійний розмір фоточутливої матриці матричного приймача випромінювання, H – висота польоту космічного апарату;

$$l_x = H \frac{a}{f}, \quad l_y = H \frac{b}{f}, \quad L = H \frac{A}{f}, \quad (2)$$

де $a \times b$ – розміри пікселя, A – довжина приймача випромінювання у напрямку, що перпендикулярний напрямку польоту КА.

Другий етап роботи описує формування інтерференційної картини (її інтенсивності) на приймачі випромінювання. У випадку не монохроматичного випромінювання, з урахуванням поглинання у атмосфері, інтенсивність інтерференційної картини на приймачі випромінювання ($I(x, y)$) буде сумою інтенсивностей всіх монохроматичних складових:

$$I(x, y) = \int_0^\infty 2L(\sigma, x, y) k(\sigma) \left(1 + \cos \left(2\pi \sigma \frac{x}{f'} \right) \right) d\sigma \quad (3)$$

де $L(\sigma, x, y)$ – розподіл спектральної яскравості у площині об'єкта, $k(\sigma)$ – спектральний коефіцієнт ослаблення випромінювання у атмосфері, f' – фокусна відстань вихідної оптики, $\sigma = 1/\lambda$ – хвильове число, відстань між двома

розділеними променями $c = 2 \cdot \sin 45^\circ \cdot d = \sqrt{2} \cdot d$, де d – величина зміщення одного з дзеркал інтерферометра від симетричного положення.

На третьому етапі роботи ЗФС, матричний приймач випромінювання формує вихідний сигнал $S(i, j)$. Його можна розрахувати за формулою:

$$S(i, j) = \int_0^\infty I(x, y) \operatorname{rect}\left(\frac{x}{c} - i, \frac{y}{c} - j\right) dx dy, \quad (4)$$

де i, j – номер рядка та стовпця пікселя відповідно, $\operatorname{rect}\left(\frac{x}{c} - i, \frac{y}{c} - j\right)$ – функція, що описує просторове розміщення пікселів.

Останній етап роботи ЗФС – відновлення спектральної характеристики поверхні Землі ($I(\sigma)$) використовуючи зворотне Фур'є перетворення до зареєстрованої інтерферограми. Для цього можна використати основне рівняння Фур'є-спектроскопії, яке можна записати у вигляді:

$$I(\sigma) = \int_0^\infty \left[I(\Delta_{\max}) - \frac{1}{2} I(0) \right] \cos(2\pi\sigma\Delta) d\Delta \quad (5)$$

де $I(\Delta_{\max}), I(0)$ – інтенсивність інтерференційної картини на приймачі випромінювання при максимальній (Δ_{\max}) та мінімальній (0) різниці ходу променів, що інтерферують.

За результатами аналізу ідеальної схеми та схеми зі зміщеними, нахиленими чи деформованими компонентами встановлено, що фокусуюча оптика вносить набагато більше спотворень у зображення, ніж дзеркальна. При зміні фокусної відстані коліматора, вхідної та вихідної оптики відбувається значне падіння МПФ системи. Нахили та переміщення компонентів оптичної схеми можливо компенсувати за допомогою юстування, параметри оптичних поверхонь, наприклад радіус, можливо контролювати при виготовленні. Однак деформації оптичних поверхонь, що виникають під дією зовнішніх факторів при виготовленні та контролі системи в земних умовах, а також при використанні системи у космосі, все одно будуть впливати на оптичні параметри компонентів та погіршувати якість зображення, що створюється оптичною системою в цілому. Тому необхідно прогнозувати такі деформації та зменшувати їх оптимізуючи конструкцію оптичних та механічних елементів.

Розроблено математичну модель для визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС під дією факторів зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), що відрізняється від відомих можливістю визначення деформації як круглих поверхонь, так і інших будь-якої форми та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів. Використання такої математичної моделі допомагає скоротити час та вартість, що необхідні на розробку конструкції вхідної оптики з мінімумом деформацій. Розроблену математичну модель було відлагоджено та перевірено в програмному середовищі MATLAB, після чого вона була реалізована в прикладному програмному забезпеченні «Deform».

Робота програми складається з декількох етапів: спочатку дзеркальна поверхня розбивається на велику кількість точок (сітку) (рис. 2, б) та методом кінцевих елементів у спеціальних програмах проводиться розрахунок зміщення кожного з елементів сітки під дією зовнішніх факторів (рис. 2, з); далі розробленою математичною моделлю деформація дзеркальної поверхні відновлюється апроксимацією, використовуючи поліноми Церніке, по яким розраховується середньоквадратичне відхилення робочої поверхні дзеркала (RMS), що визначається в довжинах хвиль (при $\lambda=695$ нм) (рис. 2, д, е).

Поліноми Церніке, представлені у полярній системі координат:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n [R_n^m(\rho)(C_{nm}\cos(m\varphi) + S_{nm}\sin(m\varphi))], \quad (6)$$

де R_n^m - коефіцієнт поліному, C_{nm} , S_{nm} - косинусний та синусний коефіцієнти розкладу.

Середньоквадратичне відхилення робочої поверхні дзеркала розраховується за формулою:

$$W_{RMS}^2 = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{C_{n0}^2}{n+1} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^N \frac{1}{n+1} (C_{nm}^2 + S_{nm}^2) \quad (7)$$

При розрахунку деформацій не осесиметричних поверхонь (дзеркал, призм) виникають похибки через використання поліномів Церніке, що не дозволяють використовувати алгоритм при відношенні меншої сторони до більшої менше 0,4. При розрахунку деформацій осесиметричних поверхонь (дзеркал та лінз) обмежень немає. Тому для точного визначення деформації коефіцієнти Церніке необхідно розраховувати чисельно по значенню у кожній точці, що і було зроблено у створеному програмному пакеті "Deform".

Також у другому розділі наведена запропонована методика проведення дослідження впливу параметрів полегшення на деформацію робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики. Дана методика проведення дослідження, в комплексі з математичною моделлю для визначення деформацій, може бути застосована для розрахунку деформацій будь-яких оптичних компонентів (дзеркал, лінз, призм і т.д. з механічними деталями корпусу чи без них) під дією будь-яких механічних або температурних факторів зовнішнього середовища.

Методика проведення дослідження складається з 6-ти етапів та представлена на рис.2. На першому етапі створюється 3D - модель (рис. 2, а) досліджуваного об'єкту у CAD - програмі (наприклад SolidWorks, Ansys). Далі у програмах кінцево-елементного аналізу модель розбивається на маленькі частинки (сітку) (рис. 2, б). Наступним етапом є закріплення та прикладання до моделі необхідних сил (рис. 2, в). Для даного дослідження зовнішнім фактором, який розглядається є сила тяжіння. Наступний етап – проведення механічного та/або теплового аналізу, результатом якого є координати зміщення кожної точки сітки (рис. 2, з). Далі ці данні передаються у програмне забезпечення, створене на базі розробленої математичної моделі визначення деформацій, де визначається значення RMS поверхні по всім коефіцієнтам Церніке (рис. 2, д) та без перших

чотирьох (рис. 2, е). По даному параметру (RMS без перших 4-х коефіцієнтів) порівнюються отримані результати. Отримане апроксимоване значення деформації можливо далі імпортувати у програми для оптичного аналізу для визначення зміни якості зображення від зовнішніх факторів, що діють на досліджувані оптичні компоненти.

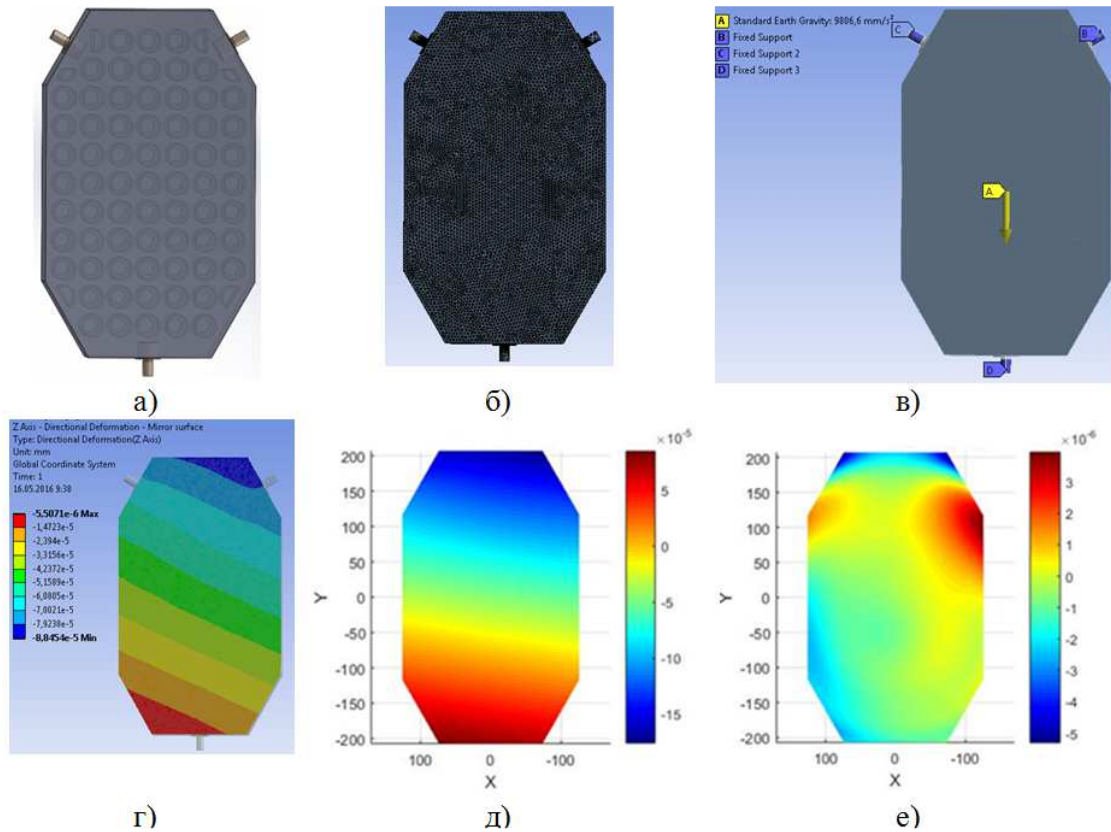


Рис. 2. Етапи дослідження деформації робочої поверхні дзеркала від зовнішніх факторів: а) створення 3-D моделі дзеркала з полегшенням та кріплення з необхідними розмірами; б) розбиття всієї моделі на сітку; в) прикладання зовнішніх факторів (температур, сил, ударів, на рис. – напрямок дії сили тяжіння); г) методами кінцево-елементного аналізу розраховуються зміщення кожного елемента сітки під дією зовнішніх факторів; д) деформація дзеркальної поверхні відновлюється апроксимацією, використовуючи поліноми Церніке, е) прибираються перші чотири коефіцієнти Церніке та розраховується середньоквадратичне відхилення робочої поверхні дзеркала

У **третьому розділі** дисертаційної роботи було проведено комплексне дослідження впливу типів полегшення, кріплення та їх геометричних розмірів на деформацію робочих поверхонь дзеркал різних типів та розмірів. Дослідження було проведене за допомогою розробленої математичної моделі визначення деформацій по запропонованій методиці проведення дослідження. Основним зовнішнім фактором, який розглядався, є сила тяжіння.

Задача полегшення дзеркал – це зменшення маси дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатньої жорсткості та міцності, що необхідна при виготовленні, проведенні контрольних операцій та при виведенні

системи на орбіту. Задача моделювання полегшення – розробити таку структуру дзеркала, що буде задовольняти наступними вимогам:

1. у земних умовах (під дією сили тяжіння) при виготовленні та виконанні контрольних операцій деформація робочої поверхні дзеркала не повинна перевищувати допустимі значення;
2. деформація робочої поверхні дзеркала під впливом градієнта температур не повинна перевищувати допустимі значення;
3. дзеркало повинно витримувати всі навантаження при транспортуванні, старті ракетносія та виведенні супутника на орбіту;
4. вага дзеркала повинна бути мінімальною.

Важливим етапом на початку проектування дзеркал вхідної оптики є вибір матеріалу. Обраний матеріал повинен мати високу міцність, мати низьку густину та мати малий коефіцієнт лінійного розширення (КЛР). Проведені дослідження з трьома матеріалами: склокераміка Zerodure, карбід кремнію та берилій. Показано, що форма залежностей деформації робочої поверхні дзеркал від різних параметрів не змінюється, тільки зміщується по осі Y в залежності від своїх механічних параметрів. Аналіз літератури показав, що у багатьох випадках використовується склокераміка фірми Zerodure, так як технологія її обробки досить проста та добре розроблена. Тому для подальших досліджень було обрано саме таку склокераміку.

Варіант кріплення має дуже велике значення при моделюванні дзеркал вхідної оптики. На сьогоднішній день в основному застосовуються наступні типи кріплення дзеркал вхідної оптики:

1. кріплення за три точки у задній стінці (ЗС) (рис.3).
2. кріплення за циліндричну поверхню (за лиски для осесиметричних дзеркал, рис.5) або за фаски (для позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал, рис.6);

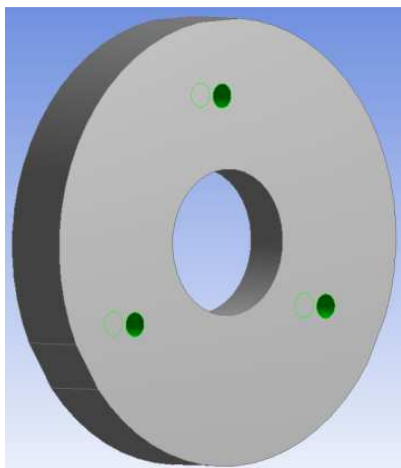


Рис. 3. Кріплення за три точки у задній стінці

Кріплення за три отвори у задній стінці (ЗС) представляє собою три отвори, що зроблені у задній стінці (рис. 3). Далі у ці отвори може вклеюватися втулка, яка далі буде закріплена на оправі. В якості геометричних параметрів кріплення, які моделювалися, були обрані наступні: діаметр кола, на якому розміщені отвори для кріплення, діаметр отворів для кріплення (діаметр кріплення), товщина стінок отворів для кріплення та їх глибина. Деформація робочої поверхні при цьому типі кріплення залежить від форми отворів полегшення, що використовуються. Для даного дослідження обрані 2 типи отворів: кільцеві та шестикутні (рис. 9, а, б). Деякі отримані графіки залежностей представлені на рис. 4. Діаметр дзеркала, що обрано

для дослідження, дорівнює 550 мм. Зміна товщини стінок майже не впливає на деформацію дзеркала для обох видів полегшення.

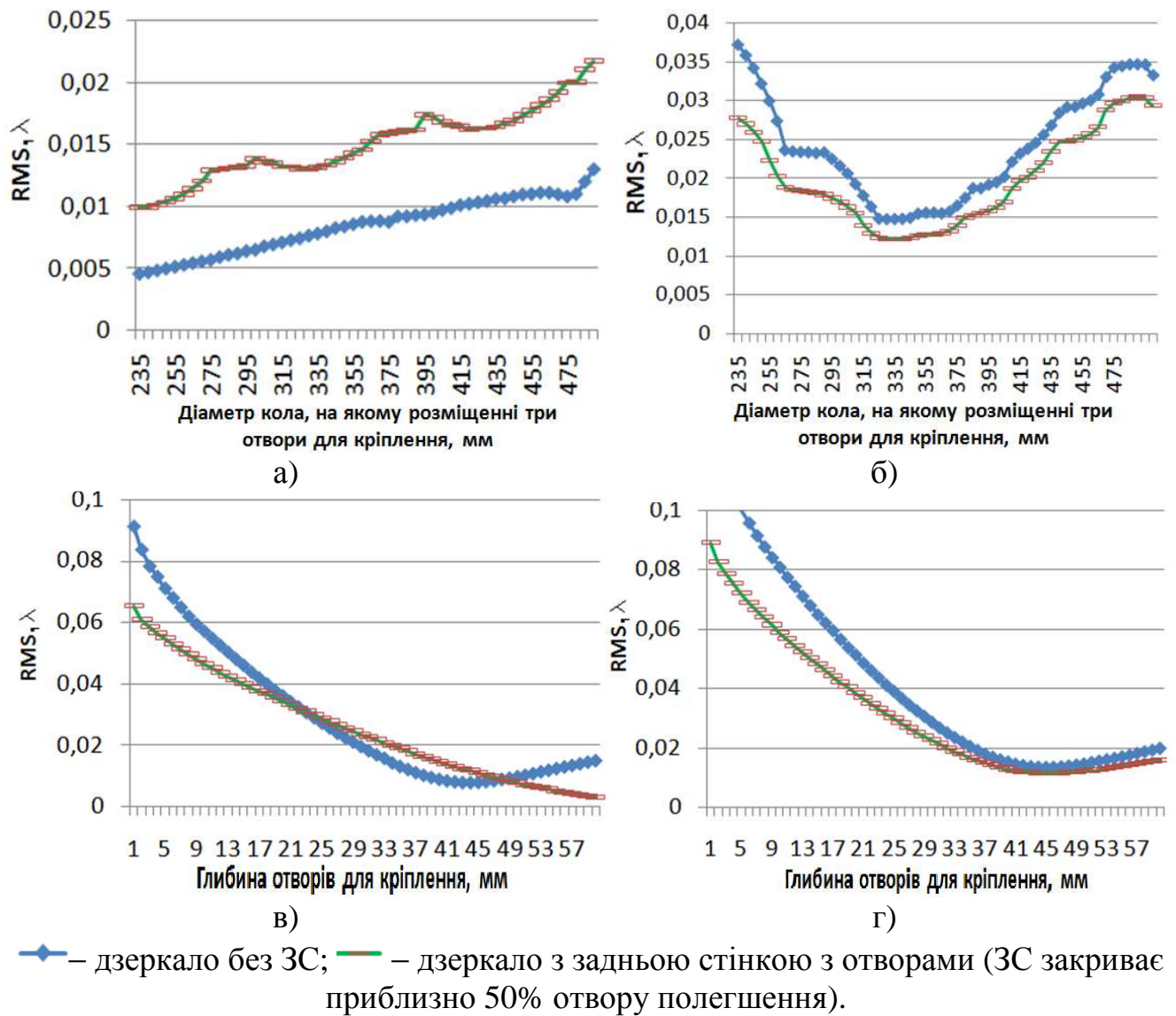


Рис.4. Залежність деформації робочої поверхні дзеркал від параметрів кріплення за три точки у ЗС: від діаметра кола, на якому розміщенні три отвори у кріпленні для шестикутних (а) та кільцевих (б) отворів полегшення, та від глибини отворів для кріплення для шестикутних (в) та кільцевих (г) отворів полегшення

Класичним варіантом кріплення за циліндричну поверхню (або фаски) є біподи, які показані на рис. 5. Біпод-пластину застосовують для кріплення відносно малих осесиметричних дзеркал. Гнучкі біподи застосовують для зменшення деформації за рахунок температурного градієнта (варіант б), та для зменшення деформацій за рахунок навантажень у напрямку оптичної осі (варіант в). Також можливо застосовувати кріплення на втулки та шарніри, що показане на рис.6.

Дослідження показало, що для отримання найменшої деформації робочої поверхні дзеркала, площина, яка будується по трьом точкам, по одній точці дії на кожне кріплення, має проходити через центр ваги дзеркала. Для біподів точкою дії кріплення є перетин ніжок біподів. Мінімум деформації при оптимальному положенні кріплення спостерігається при використанні будь-яких отворів

полегшення. Дослідження впливу геометричних розмірів елементів біпода показало, що на деформацію робочої поверхні дзеркала впливає тільки два параметра: відстань від ЗС до точки дії кріплення, а також кут між ніжками, так як змінюючи кут змінюється точка дії (рис. 7).

Для подальшого дослідження в якості кріплення були обрані біподи.

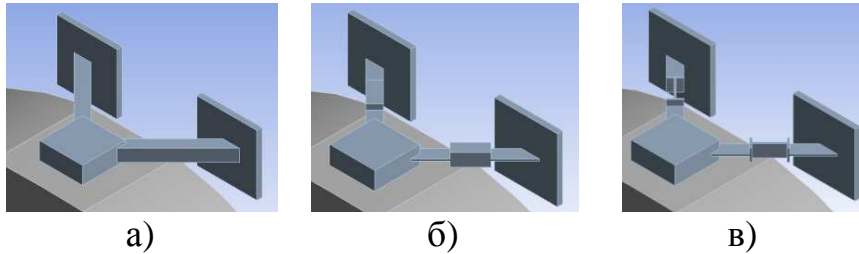


Рис. 5. Біподи: а) біпод-пластина, б) гнучкий біпод по одній площині, в) гнучкий біпод по двом площинам

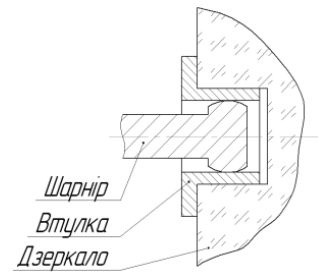


Рис. 6. Кріплення дзеркал на шарнірах та втулках

Ще одним важливим моментом при розгляді кріплення є положення дзеркала відносно напрямку дії сили тяжіння. На рис. 8. показані три з шести основних положень, яке може займати дзеркало. Проміжні положення не розглядаються.

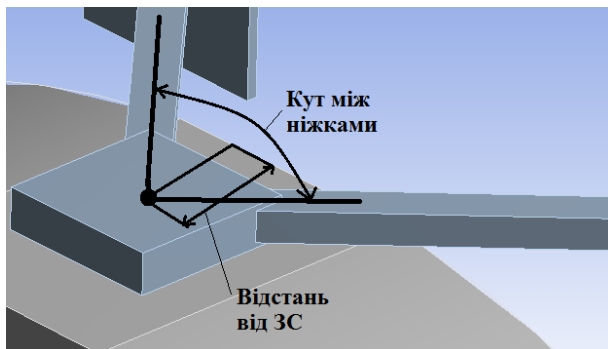


Рис. 7. Параметри біпода, що впливають на деформацію робочої поверхні дзеркала

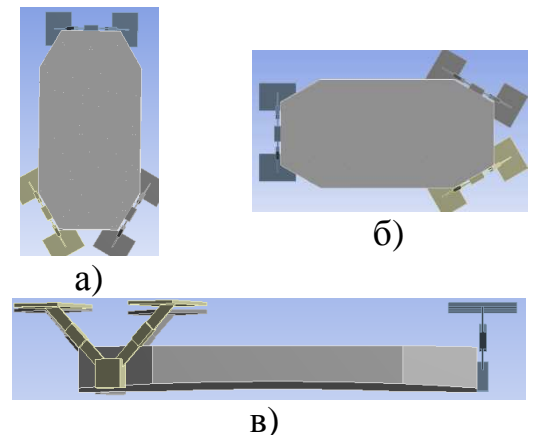


Рис. 8. Три положення дзеркала у кріпленні. Сила тяжіння діє у площині рисунка вниз

Дослідження показало наступне:

- для осесиметричних дзеркал при вертикальному положенні (рис. 8 а та б) (його оптична вісь перпендикулярна напрямку дії сили тяжіння) значення деформації не залежить від повороту дзеркала відносно оптичної осі та є мінімальним; при розташуванні дзеркала горизонтально (рис. 8 в) значення деформація збільшується більше ніж у 15 разів відносно значення деформації при вертикальному положенні;
- для позаосьового сегменту осесиметричного дзеркала для варіанта розміщення а та в спостерігаються такі ж залежності, однак при використанні варіанту б

значення деформації буде збільшуватися у 3 – 4 рази у порівнянні зі значенням при використанні варіанту *a*.

Горизонтальне кріплення будь-яких дзеркал без додаткових елементів дуже сильно збільшує деформацію. Однак при виготовленні дзеркал з діаметром більше 2 м та при використанні спеціальних пристроїв (системи пневматичних підтримок) таке положення є найкращим. Таке кріплення вимагає великої кількості додаткового обладнання як при виготовленні, так і при виконанні контрольних операцій.

Для ЗФС найкращим варіантом дзеркал є дзеркала середнього розміру (з діаметром до 1 м). Такі дзеркала можливо кріпити вертикально (рис. 8, *a*), що дає мінімальну деформацію без додаткових елементів та дозволяє у подальшому використовувати спрощену горизонтальну систему контролю. Тому всі подальші дослідження будуть проводитися при вертикальному положенні дзеркал (рис.8.*a*).

Для дослідження можливостей полегшення осесиметричних дзеркал, було обрано два класичні типи полегшення: кільцеві (рис. 9, *a*) та шестикутні (рис. 9, *б*) вирізи. Для таких отворів дослідження проводилися з відкритою задньою частиною (без ЗС) та з ЗС з отворами. У процесі дослідження змінювалися всі геометричні параметри дзеркала (товщина ребра, глибина отворів полегшення, сторона шестикутника або кількість сегментів та кілець, ...), включаючи конструктивні (діаметр дзеркала та внутрішнього отвору, його товщина та радіус дзеркальної поверхні). Максимальне зменшення ваги, яке можливо отримати (при найменшій товщині ребра 5 мм для дзеркала з однаковими геометричними параметрами) наступні: шестикутні вирізи – 71%, кільцеві вирізи – 68%.

Також розглядалися два варіанти полегшення з трикутними отворами: звичайними (рис. 9, *в*) та симетричними (рис. 9, *г*). Однак використання таких отворів не дозволяє досягти максимального зменшення ваги (полегшення складає 56% та 59% відповідно).

В результаті дослідження залежності деформації робочих поверхонь дзеркал від геометричних розмірів полегшення та кріплення було отримано комплекс залежностей, які показали можливості для зменшення ваги дзеркал та деформації їх робочих поверхонь.

Важливими параметрами дзеркала є його розміри. Вони впливають на конструкцію полегшення, яку необхідно обрати, щоб деформація робочої поверхні були мінімальною. Результати даного дослідження приводяться для кріплення на біподи при вертикальному положенні дзеркал.

В результаті досліджень встановлено, що при використанні вузьких позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал з відношенням меншої сторони до більшої 0,5 та менше можливо застосовувати полегшення без ЗС. Це дає змогу зменшити вагу дзеркала при отриманні мінімальної деформації робочої поверхні. При збільшенні відношення сторін рекомендується використовувати ЗС з отворами для зменшення деформації, однак в такому випадку незначно збільшується вага дзеркала та складність виробництва.

При використанні осесиметричних дзеркал з малими діаметрами (до приблизно 400 мм) також можна обійтися полегшенням без ЗС. Однак при подальшому збільшенні діаметра дзеркала деформація збільшується і необхідно використовувати полегшення з ЗС з отворами. При діаметрах дзеркала більше 650 мм деформація зростає досить сильно, і для її зменшення необхідно використовувати суцільну (без отворів) ЗС. При її використанні вага дзеркала збільшується, складність виробництва збільшується суттєво, однак деформація зменшується приблизно на 40% відносно ЗС з отворами.

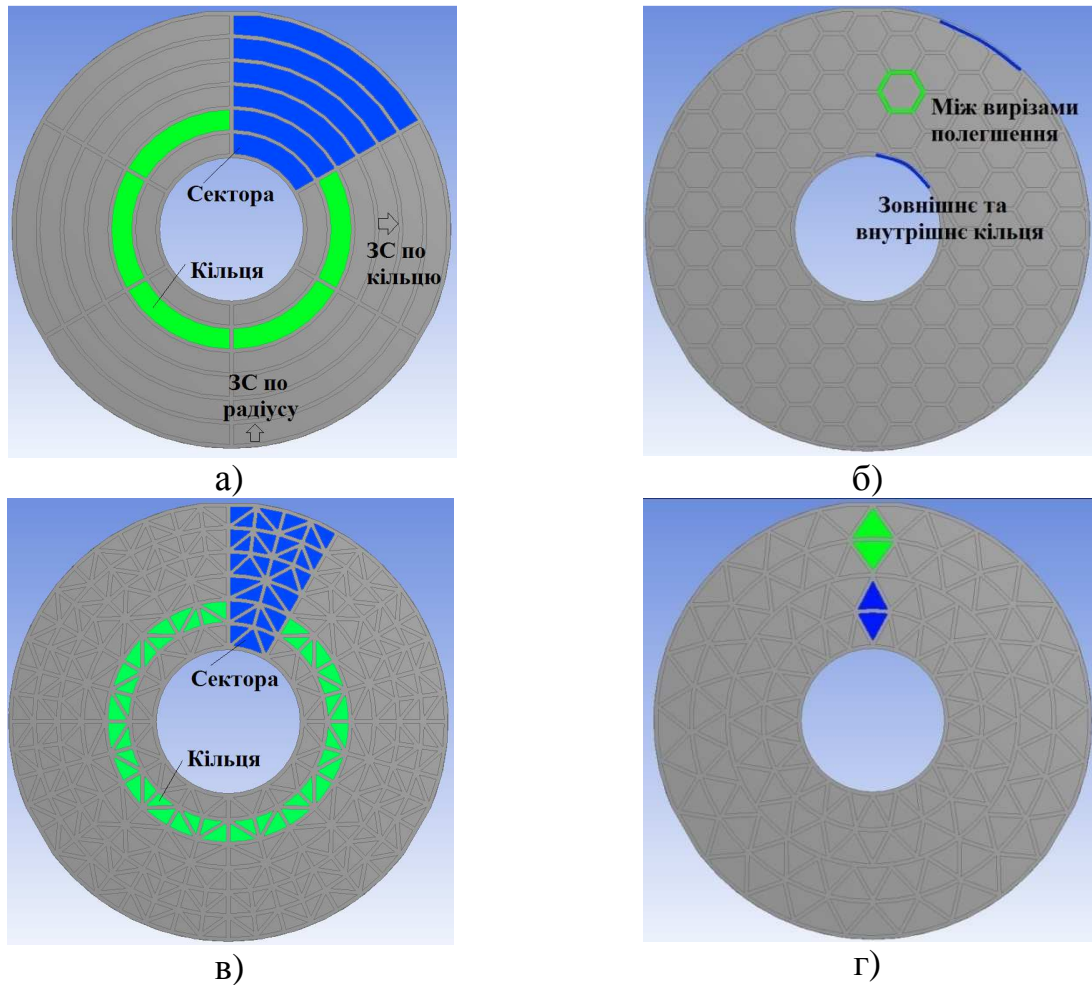


Рис. 9. Типи полегшення: а) кільцеві вирізи, б) шестикутні вирізи, в) трикутні вирізи, г) симетричні трикутні вирізи

Рекомендації дані для вхідної оптики сканера ДЗЗ, для якого розраховане значення деформації не повинне перевищувати $0,005\lambda$.

Для обох типів дзеркал також можна вибирати товщину дзеркала для мінімізації ваги та деформації, однак при значному зменшенні товщини збільшується ризик отримання бракованого дзеркала.

У **четвертому** розділі розглядається вплив деформації робочої поверхні дзеркал на коефіцієнти Церніке, які відповідають за аберації, що вносяться у оптичну систему. Показано, що найбільше значення має вибір оптимального положення кріплення відносно центра ваги дзеркала. При зміщенні кріплення у

оптичну систему вноситься астигматизм 3-го порядку, в меншій мірі кома 3-го порядку.

Також показана залежність МПФ (модуляційно-передавальна функція) від деформації робочої поверхні дзеркал конкретної системи. Обрана оптична система представляє собою тридзеркальний об'єктив, який показаний на рис. 10.

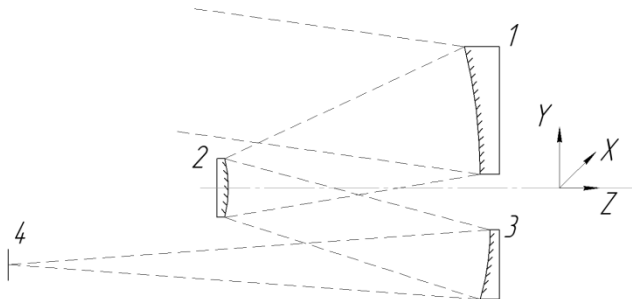
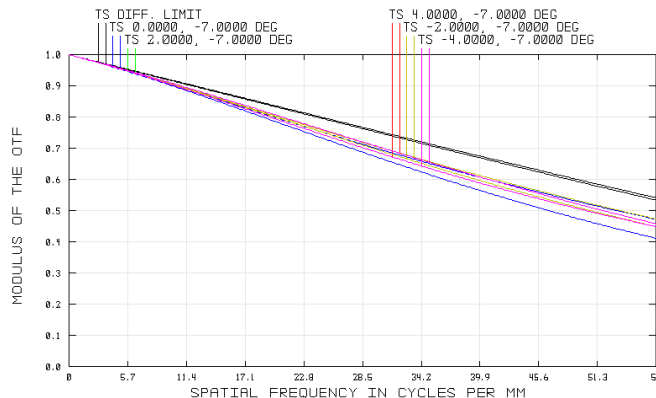


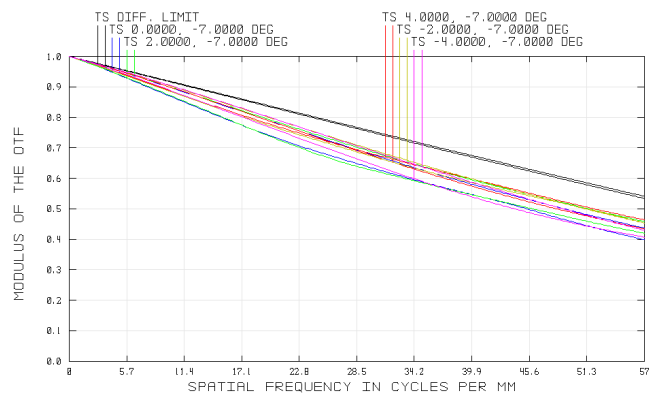
Рис. 10. Тридзеркальний об'єктив вхідної оптики: 1, 3 – позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал, 2 – осесиметричне дзеркало, 4 – фокальна площина

На рис. 11, а наведена МПФ ідеальної системи без полегшення, на яку не діє жодна сила. На рис. 11, б – МПФ системи на яку діє сила тяжіння. Дзеркала в цьому випадку мають полегшення у 70 %. Як видно з графіків, при використанні розроблених математичної моделі для визначення деформації робочих оптичних компонентів та методики проведення дослідження, можливо розрахувати таке полегшення, яке не тільки значно зменшить вагу оптичної системи, а ще не буде впливати на

МПФ системи.



а)



б)

Рис. 11. МПФ системи: б) ідеальної, в) з полегшеними дзеркалами при дії сили тяжіння

На рис.12 наведено моделі полегшення першого та третього дзеркал тридзеркального об'єктива (рис.10), а також деформацію їх робочих поверхонь, яка розрахована створеними математичними моделями.

Для зменшення деформації робочої поверхні великих (з більшою стороною більше 0,5м) позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал був запропонований метод зменшення деформацій, якій базується на системі підтримок, які встановлюються знизу дзеркала при його вертикальному розміщенні. При дослідженні можливостей зменшення значення деформації моделювалися три варіанта прикладання сили до нижньої грані (рис.13): на всю нижню грань (а), на два ребра (б), або на квадратну пластину, що менша за грань (в). На рис.14

представлено результати прикладання сили для одного з дзеркал, що досліджувалося. По осі X знак "-" відповідає силі, що розтягує дзеркало, знак "+" - силі, що стискає дзеркало. З графіка, представленого на рис.14 видно, що найкращим варіантом прикладання сил є варіант з квадратною підтримкою. Такий варіант дозволяє зменшити значення деформації у 2-3 рази. Як показали дослідження, для максимального зменшення значення деформації на підтримку необхідно прикладати силу, що дорівнює 0,5-0,6 від ваги дзеркала.

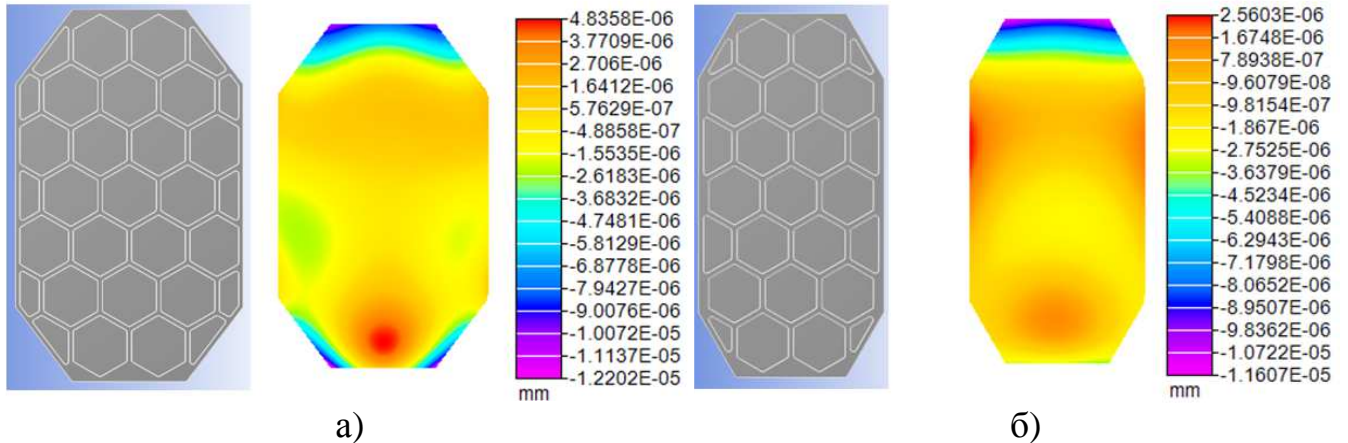


Рис.12. Модель полегшення дзеркала та деформація його робочої поверхні: а) для першого дзеркала ($RMS=0,00349\lambda$ (2,42 нм)), б) для другого дзеркала ($RMS=0,00328\lambda$ (2,27 нм))

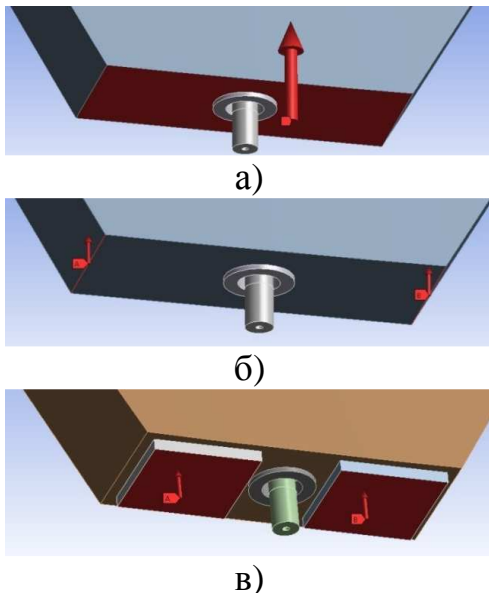


Рис. 13. Три варіанти прикладання сили до нижньої грані: а) на всю нижню грань, б) на два ребра, в) на квадратну пластину

Експериментальна перевірка роботи математичної моделі для визначення деформацій робочих поверхонь дзеркал здійснювалася за допомогою схеми, модель головного компонента якої представлений на рис.15. Даний компонент складається з підтримки (поз. 1), на якій встановлена опукло - увігнута лінза діаметром 50 мм. Сила тяжіння (A) діє у площині рисунка вниз. На лінзу зверху поставлений вантаж масою 1 кг (B). Після цього за допомогою інтерферометра визначається деформація опуклої поверхні. Зображення деформації опуклої поверхні лінзи, що отримано після обробки експериментальних даних та після розрахунку розробленим методом представлено на рис.16.

Як видно з даних, наведених у табл. 1, дані, що отримані при комп'ютерному моделюванні з подальшим визначенням значення деформації розробленою математичною моделлю співпадають з даними, що отримані експериментально.

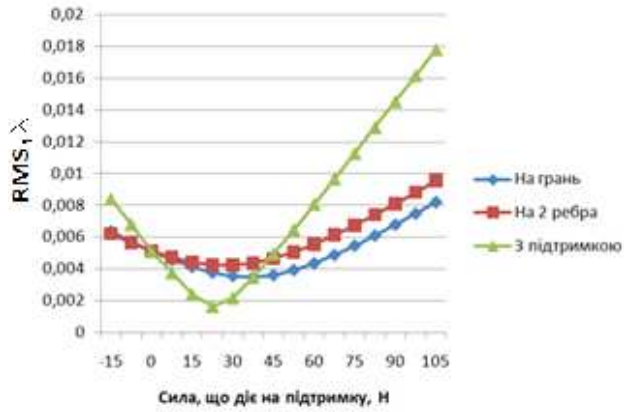


Рис. 14. Залежність деформації дзеркальної поверхні від сили, що діє

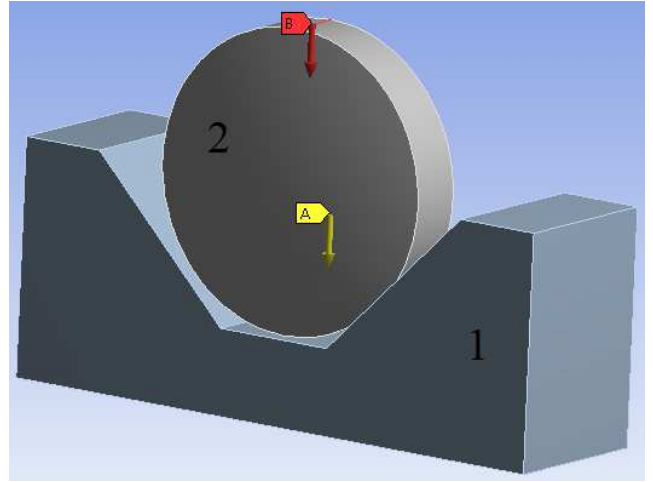
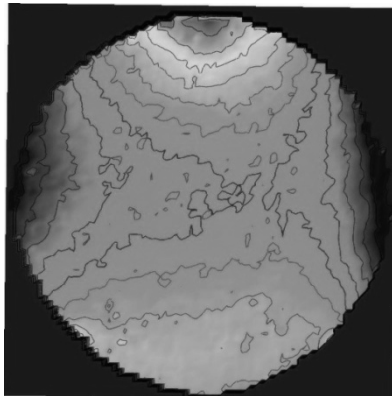
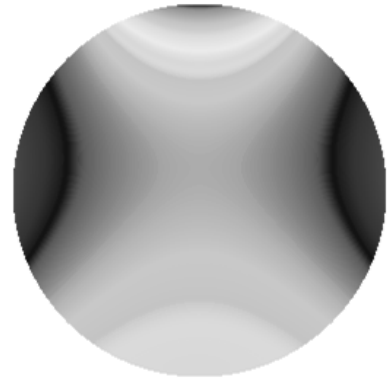


Рис. 15. Модель головного компонента схеми



а)



б)

Рис. 16. Зображення опуклої поверхні лінзи під дією ваги вантажу: а) отримане по експериментальним даним, б) отримане після розрахунку розробленою математичною моделлю

Таблиця 1

Результати експерименту та моделювання

	Експеримент	Моделювання
Всі коефіцієнти Церніке, λ	0,16344	0,1371
Без 4-х перших коефіцієнтів Церніке, λ	0,025439	0,02313

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена наукова задача забезпечення високої якості форми робочих поверхонь вхідної оптики ЗФС при зменшенні ваги її дзеркал.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані такі наукові результати:

1. Порівняльний аналіз оптичних схем сучасних ЗФС космічного базування показав, що найбільшим компонентом системи, який присутній у всіх видах ЗФС, є вхідна оптики. При збільшенні роздільної здатності системи необхідно

значно збільшувати її апертуру, що призводить до значного зростання ваги системи в цілому.

2. Дослідження математичної моделі ЗФС показало, що вхідна оптика, при зміщенні, нахилах або деформаціях компонентів вносить набагато більше спотворень у створюване системою зображення.
3. Розроблено математичну модель визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС під дією зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), на базі математичної моделі створена програма у пакеті MatLab. Такий алгоритм відрізняється від відомих ширшою областю застосування (можливістю розрахунку деформації як круглих поверхонь, так і інших будь-якої форми) та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів, він допомагає скоротити час та вартість, що необхідні на розробку конструкції вхідної оптики з мінімумом деформацій.
4. Розроблено методику проведення комплексного дослідження впливу зовнішніх факторів (температур, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС. Дана методика проведення дослідження, в комплексі з математичною моделлю розрахунку деформацій, може бути застосований для розрахунку деформацій будь-яких оптичних компонентів (дзеркал, лінз, призми і т.д. з механічними деталями корпусу чи без них) під дією будь-яких механічних або температурних факторів зовнішнього середовища. Використання даного методу дозволяє значно зменшити кількість натурних випробувань та дозволяє передбачити поведінку оптичної системи під дією температурних та механічних навантажень.
5. Проведене комплексне дослідження впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики на деформацію їх робочої поверхні показало можливості для зменшення ваги дзеркал та деформації їх робочих поверхонь. Використовуючи розроблені математичні моделі та методики можливо розрахувати такі геометричні параметри кріплення та полегшення, які дозволяють зменшити вагу дзеркала на 60 – 80%. При цьому МПФ системи не змінюється.
6. Результати експериментальних досліджень підтверджують правильність роботи розробленої математичної моделі визначення деформації оптичних поверхонь під дією факторів зовнішнього середовища.
7. Отримані результати впроваджені у КП СПБ «Арсенал» при проектуванні та створенні полегшених дзеркал сканерів високої роздільної здатності (СВРЗ) та надвисокої роздільної здатності (СНВРЗ), що підтверджується актом впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20, № 5 (90). – С. 35-40.
Здобувачем проведено аналіз існуючих схем зображуючих Фур'є-спектрометрів, розглянуті їх переваги та недоліки.
2. Поздняков Д.В. Математичне моделювання статичного зображуючого фур'є-спектрометра для дистанційного зондування землі / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2016. – №6. – С. 79-84. DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.78026.
Здобувачем запропоновано розділення роботи ЗФС на 4 етапи та представлено математичні моделі для кожного з етапів.
3. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №2. – С. 89-96. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.94144.
Здобувачем запропоновано алгоритм розрахунку деформацій робочої поверхні дзеркал вхідної оптики та проведено дослідження впливу геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.
4. Pozdniakov D. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko, V. Tiagur // Eastern-Europe journal of enterprise technologies. – 2017. – №4, Information and controlling systems. – P.46-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108458 (входить до наукометричної бази Scopus).
Здобувачем проведено перевірку працездатності створеного програмного продукту шляхом розрахунку полегшення дзеркал вхідної оптики.
5. Колобродов В. Г., Поздняков Д.В., Тягур В.М. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №6. – С.93-100.
Здобувачем представлено результати дослідження впливу полегшення на деформацію осесиметричних дзеркал при кріпленні за три точки у задній стінці.
6. Поздняков Д.В. Закономірності впливу розмірів великогабаритних дзеркал для дистанційного зондування Землі на вибір типу їх полегшення / Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2018. – №.1 – С.65-72.
7. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 23-24 квітня 2014. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 64-65.

Здобувачем проведено класифікацію гіперспектральних пристроїв та показано, що зображуючі Фур'є-спектрометри є найбільш перспективними. Проведено порівняння їх оптичних схем.

8. Pozdniakov D.V. Optical systems of fourier transform imaging spectrometer for remote sensing / D.V. Pozdniakov, V.G. Kolobrodov // Scientific works of 15th International young scientists conference «Optics and high technology material science», October 23-26, 2014. – Kyiv: Taras Shevchenko national university of Kyiv. – 2014. - P.173.

Здобувачем проведений аналіз принципів роботи статичного, динамічного, комбінованого та поляризаційного зображуючого Фур'є-спектрометра.

9. Поздняков Д.В. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування», 10-11 грудня 2014 р. – Київ: КП СПБ «Арсенал». - 2014. – С.53-55.

Здобувачем представлено математичну модель розрахунку основних параметрів статичного та динамічного ЗФС

10. Поздняков Д.В. Математичне моделювання зображувального фур'є – спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 22-23 квітня 2015р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – С.71-72.

Здобувачем детально розглянуто формування зображення вхідною оптикою ЗФС та створення інтерференційної картини за допомогою інтерферометра Сан'яка у ЗФС статичного типу.

11. Поздняков Д.В. Математическое моделирование изображающего фурье – спектрометра ДЗЗ / Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 8-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», 22-24 апреля 2015. – Минск: БНТУ. – 2015.

Здобувачем розглянуто роботу ЗФС статичного типу та встановлено його основні характеристики.

12. Поздняков Д.В. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 35-36.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку полегшення дзеркал.

13. Поздняков Д.В. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів дистанційного зондування землі на деформацію їх оптичної поверхні / Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 16-ої Української конференції з космічних досліджень, 22-27 серпня 2016 р. – Одеса. – 2016 р. – С. 218.

- Здобувачем проведено оптимізацію полегшення для конкретної оптичної системи з позаосьовими сегментами осесиметричних дзеркал.*
14. Поздняков Д.В. Метод кріплення та юстування великогабаритних позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / А.М. Ворох, І.Л. Зозуля, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи», 6-7 грудня 2016 р. – Київ. – 2016. – С.186-188.
Здобувачем проведено дослідження впливу кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики.
 15. Поздняков Д.В. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Сборник тезисов докладов 6-ой Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», 23-26 мая 2017г. – Днепр. – 2017г. – С.80.
Здобувачем проаналізовано вплив різних конструкцій полегшення при кріплення ні три шарніра на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики.
 16. Поздняков Д.В. Контроль формы вогнутых асферичных дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 36-37.
Здобувачем проведено моделювання впливу допоміжних деталей на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики при виконанні операцій контролю.
 17. Поздняков Д.В. Метод контролю форми асферичных дзеркал / Б.Ю. Пінчук, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 16-17 травня 2017р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2017. – С.32-33.
Здобувачем розроблено метод контролю форми великогабаритних дзеркал вхідної оптики, що базується на скануючому інтерферометрі.
 18. Поздняков Д.В. Полегшення осесиметричних великогабаритних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 208.
Здобувачем досліджено деформацію осесиметричних дзеркал при різних конструкціях полегшення.
 19. Поздняков Д.В. Система разгрузки крупногабаритных зеркал для систем дистанционного зондирования Земли / А.М. Ворох, Д.В. Поздняков, И.Л. Зозуля, И.Г. Игнатова // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 88.
Здобувачем проведено моделювання системи підтримок дзеркал вхідної оптики та встановлено залежності між силою, що діє на підтримки, та вагою дзеркал.

АНОТАЦІЯ

Поздняков Д.В. Зменшення деформації та ваги вхідної оптики зображуючого Фур'є - спектрометра космічного базування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.07 – оптичні прилади та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню наукової задачі забезпечення високої якості форми робочих поверхонь вхідної оптики ЗФС при зменшенні ваги її дзеркал.

Запропоновано новий метод проектування ЗФС на основі розділення його роботи на чотири етапи: формування зображення вхідною оптикою у площині вхідної щілини, формування інтерференційної картини на приймачі випромінювання, формування сигналу приймачем випромінювання, обробка сигналу та відновлення спектральної характеристики. Для кожного з етапів розроблена математична модель. Розроблено математичну модель для визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС під дією факторів зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), що відрізняється від відомих можливістю визначення деформації як круглих поверхонь, так і інших будь-якої форми та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів. Використання такої математичної моделі допомагає скоротити час та вартість, що необхідні на розробку конструкції вхідної оптики з мінімумом деформацій. Розроблену математичну модель було відлагоджено та перевірено в програмному середовищі MATLAB, після чого він був реалізований в прикладному програмному забезпеченні «Deform».

Вперше отримано комплекс залежностей деформації робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики від геометричних параметрів їх полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики, які дозволили забезпечити незмінну модуляційно-передавальну функцію системи при зменшенні ваги дзеркал.

Використовуючи створені математичні моделі та методики, можна розрахувати дзеркала з полегшенням до 80%, використання яких не вносить аберацій у оптичну систему, а отже не зменшує МПФ системи.

Експериментально підтверджено, що розроблена математична модель для визначення деформацій дозволяє точно розрахувати значення деформації робочої поверхні оптичних компонентів.

Ключові слова: зображуючий Фур'є - спектрометр, полегшення дзеркал, коефіцієнти Церніке.

АННОТАЦИЯ

Поздняков Д.В. Уменьшение деформации и веса входной оптики изображающего Фурье - спектрометра космического базирования. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – оптические приборы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению научной задачи обеспечения высокого качества формы рабочих поверхностей входной оптики ИФС при уменьшении веса ее зеркал.

Предложен новый метод проектирования ИФС на основе разделения его работы на четыре этапа: формирование изображения входной оптикой в плоскости входной щели, формирование интерференционной картины на приемнике излучения, формирование сигнала приемником излучения, обработка сигнала и восстановления спектральной характеристики. Для каждого из этапов разработана математическая модель. Разработана математическая модель для определения деформации рабочей поверхности зеркал входной оптики ИФС под действием факторов внешней среды (температуры, силы тяжести, других сил и нагрузок), отличающийся от известных возможностью определения деформации как круглых поверхностей, так и других любой формы и быстрой обработкой результатов при оптимизации большого количества параметров. Использование такой математической модели помогает сократить время и стоимость, необходимые на разработку конструкции входной оптики с минимумом деформаций. Разработанная математическая модель была отлажена и проверена в программной среде MATLAB, после чего она была реализована в прикладном программном обеспечении «Deform».

Впервые получены комплекс зависимостей деформации рабочих поверхностей зеркал входной оптики от геометрических параметров их облегчения и крепления, их типов, размеров и типов зеркал входной оптики, которые позволили обеспечить неизменную модуляционно-передаточную функцию системы при уменьшении веса зеркал.

Используя созданные математические модели и методики, можно рассчитать зеркала с облегчением до 80%, использование которых не вносит aberrаций в оптическую систему, а следовательно, не уменьшает МПФ системы.

Экспериментально подтверждено, что разработанная математическая модель для определения деформаций позволяет точно рассчитать значение деформации рабочей поверхности оптических компонентов.

Ключевые слова: изображающий Фурье - спектрометр, облегчение зеркал, коэффициенты Цернике.

SUMMARY

Pozdniakov D.V. Reducing the deformation and weight of the input optics of the space-based Fourier transform imaging spectrometer. – Manuscript copyright.

A thesis for a degree of the Doctor of Philosophy in the Faculty of Instrumentation Engineering by specialty 05.11.07 – optical devices and systems. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of ensuring the high quality of the form of working surfaces of the entrance optics of the FTIS with the reduction of the weight of its mirrors.

A comparative analysis of the optical schemes of modern space-based FTIS has shown that the largest component of the system, which is present in all types of FTIS, is the input optics. When increasing the resolution of the system it is necessary to significantly increase its aperture, which leads to a significant increase in the weight of the system as a whole.

A new method for designing FTIS is proposed based on the division of its work into four stages: the formation of the image of the input optics in the plane of the input slit, the formation of an interference pattern on the radiation-measuring instrument, the formation of a signal by the radiation-measuring instrument, signal processing and the restoration of the spectral characteristics. For each stage, a mathematical model is developed. The research of such mathematical model of the FTIS showed that the input optics, in the case of bias, tilt or deformation of components, introduces much more distortion in the image created by the system. Therefore, the issue of weight reduction of the mirrors of the input optics of FTIS is an actual question.

A mathematical model was developed for determining the deformation of the working surface of the mirrors of the entrance optics of the FTIS under the influence of external factors (temperature, gravity, other forces and loads), which differs from the known ability to determine the deformation of both round surfaces and other forms of any shape and faster processing results when optimizing a large number of parameters. The use of such mathematical model helps to reduce the time and cost necessary for the design of the input optics with a minimum of deformations. The developed mathematical model was debugged and tested in the MATLAB software environment, after it was implemented in the application software "Deform".

The methodology of carrying out the research of the influence of the external factors (temperature, gravity, other forces and loads) on the deformation of the working surfaces of optical elements has been developed. The developed methodology allows to carry out practically complete cycle of modeling of optical elements. It can be used to determine the deformations of any optical surfaces and elements under the influence of any external factors. This methodology allows to reduce the cost of the full-scale modeling of all the processes that affect the optics and lead to its deformation and to determine the deformation itself.

Using the proposed mathematical model of deformation determination and the methodology for carrying out the research, for the first time a complex study of the influence of geometrical parameters of weight reduction and mounting, their types, sizes

and types of mirrors of the input optics on the deformation of their working surface was carried out. Using created mathematical models and methodology, it is possible to calculate mirrors with a weight reduction of up to 80%, the use of which does not introduce aberrations into the optical system, and therefore does not reduce the MTF of the system.

Experimentally confirmed that the developed mathematical model for determining deformations allows precisely calculate the value of deformation of the working surface of optical components.

Key words: Fourier transform imaging spectrometer, weight reduction, coefficients of Zernike.